

روش ساده تحلیل سیستم های ثانویه

علیرضا فیوض ، استادیار و عضو هیأت علمی دانشگاه خلیج فارس

محسن غفوری آشتیانی ، استاد و رئیس پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

alirezafiouz@persiangulfu.ac.ir

ashtiany@iiees.ac.ir

تاکنون روش های نظری مختلفی برای تحلیل سیستم های ثانویه ارائه شده است که به علت پیچیده بودن روابط حاکم بر آنها، مورد استفاده قرار نگرفته است و برای تعیین نیروهای وارد بر سیستم های ثانویه در هنگام زلزله، بیشتر به روابط ساده موجود در آیین نامه ها اکتفا شده است. ولی این روابط بسیاری از پارامترهای مؤثر را درنظر نمی گیرند. در این مقاله روش ساده ای به صورت روابط تحلیل طیفی، برای تحلیل سیستم های ثانویه و محاسبه نیروهای وارد بر آنها در هنگام زلزله ارائه شده است. در روابط بدست آمده اثر پارامترهای مؤثر نظیر خصوصیات دینامیکی سیستم های اولیه و ثانویه، هم فرکانسی، اندرکنش و نسبت جرم منظور شده است. با مقایسه نتایج روش های پیشنهادی با روش های دقیق و آیین نامه ای نتیجه گرفته شده است که روش پیشنهادی علاوه بر حفظ سادگی دقت خوبی دارد. همچنین روابط موجود در آیین نامه ها (بخصوص آیین نامه ۲۸۰۰) باید مورد تجدیدنظر قرار گرفته تا بتوان با استفاده از آنها برآورد دقیقتری از رفتار سیستم های ثانویه بدست آورد.

: سیستم های ثانویه ، اندرکنش سازه-تجهیزات ، آیین نامه ، تحلیل طیفی

سیستم های ثانویه، سیستم هاو اجزای مکانیکی، الکترونیکی و معماری غیر برابر هستند که به سازه اصلی متصل می شوند و ممکن است در هنگام زلزله تحت اثر نیروهای بزرگی قرار گیرند. به همین دلیل باید به نحو مناسبی به سازه اصلی متصل گردند تا بتوانند این نیروها را به خوبی تحمل نموده و عملکرد مطلوبی در هنگام زلزله از خود نشان دهند. روش های تحلیل و محاسبه نیروهای وارد بر سیستم های ثانویه را می توان به طور کلی به دو دسته با اندرکنش و بدون اندرکنش تقسیم بندی نمود.

در روش هایی که اندرکنش درنظر گرفته نمی شود، ابتدا سیستم اولیه تحت اثر زلزله تحلیل شده و پاسخ درجه (درجات) آزادی که سیستم ثانویه به آن متصل است بدست می آید. آنگاه از این پاسخ به عنوان ورودی سیستم ثانویه استفاده شده و پاسخ آن محاسبه می گردد. برای تحلیل سیستم های اولیه و ثانویه می توان از روش های تاریخچه زمانی ، تحلیل طیفی و یا ارتعاشات پیشا استفاده نمود. از آنجا که زلزله اصولاً یک فرآیند پیشا می باشد، بسیاری از محققین برای محاسبه پاسخ سیستم ثانویه در مقابل زلزله از روش ارتعاشات پیشا استفاده کرده اند [۱، ۲]. در این روش ورودی سیستم اولیه تابع احتمالاتی زلزله نظیر توابع چگالی طیفی یا میانگین مربعات قرار داده شده و با استفاده از تئوری ارتعاشات پیشا پاسخ سیستم ثانویه بدست می آید. چون تقریباً در همه آیین نامه های زلزله، ورودی

به صورت طیف طرح زمین معرفی می گردد ، بعضی از محققین به جای توابع احتمالاتی ذکر شده ، با استفاده از رابطه بین میانگین مربعات و طیف پاسخ یک فرآیند، طیف طرح سیستم ثانویه را مستقیماً بر حسب طیف طرح زمین به دست آورده اند [۳،۴،۵] اشاره نمود. بر اساس مرجع [۵] طیف پاسخ سیستم ثانویه واقع بر ساختمان های برشی بر حسب طیف پاسخ زمین به صورت رابطه (۱) به دست می آید :

$$R_m^2(\omega_p, \xi_p) = \sum_{j=1}^{N-1} \varphi_{mj}^2 \gamma_j^2 [(A_j + B_j) R_a^2(\omega_p, \xi_p) + (C_j + D_j) R_a^2(\omega_j, \xi_j)] + 2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \varphi_{mj} \varphi_{mk} \gamma_j \gamma_k [(A_{jk} + B_{jk}) R_a^2(\omega_p, \xi_p) + (C_{jk} + D_{jk}) R_a^2(\omega_j, \xi_j) + (E_{jk} + F_{jk}) R_a^2(\omega_k, \xi_k)]$$

$R_m(\omega_p, \xi_p)$ حداکثر پاسخ سیستم ثانویه یک درجه آزاد با فرکانس ω_p و نسبت میرایی ξ_p می باشد که به درجه آزادی m سیستم ثانویه متصل شده است. R_a طیف پاسخ زمین، φ_{mj} درایه m درایه j ، γ_j ضریب مشارکت مود j هستند. $A_j, B_j, \dots, C_j, D_j$ ضرایبی هستند که بر حسب خصوصیات دینامیکی سیستم های اولیه و ثانویه به دست می آیند که روش محاسبه آنها در مرجع [۵] ارائه شده است. نشان داده شده است که تحلیل هایی که در آنها اندرکنش در نظر گرفته نمی شود، برای سیستم های ثانویه سیک و غیر هم فرکانس روش کارا و نسبتاً دقیقی است ولی برای سیستم هایی که چنین خصوصیاتی ندارند ، پاسخ ها دست بالا و محافظه کارانه خواهد شد) سیستم های ثانویه هم فرکانس، سیستم هایی هستند که فرکانس ارتعاشی سیستم ثانویه با فرکانس یکی از مودهای ارتعاشی سیستم اولیه برابر شود).

برای در نظر گرفتن اندرکنش لازم است سیستم ثانویه به عنوان جزئی از سیستم اولیه در نظر گرفته شده و هر دو سیستم با هم و به صورت یک سیستم مرکب مدل سازی، و یا یکی از روش های مرسوم تحلیل شوند. چون پارامترهای دینامیکی سیستم های اولیه و ثانویه (نظیر جرم، سختی و میرایی) با یکدیگر تفاوت زیادی دارند ، ماتریس های دینامیکی سیستم مرکب دارای درایه هایی است که با یکدیگر اختلاف زیادی داشته و دارای شرایط بودوضیعتی می شوند . به همین دلیل حل معادلات مشخصه سیستم مرکب و محاسبه مقدار و بردار ویژه با روش های مرسوم، دارای ناپایداری عددی بوده و خطاهای زیادی دارد، و به تبع آن پاسخ سیستم مرکب نیز خطاهای زیادی خواهد داشت. بعضی از محققین روی محاسبه مقدار و بردارهای ویژه سیستم مرکب [۶] و بعضی از محققین روی تحلیل سیستم های ثانویه با درنظر گرفتن اندرکنش کار کرده اند [۷]. طیف پاسخ سیستم ثانویه بر حسب طیف پاسخ زمین با درنظر گرفتن اندرکنش برای قاب های برشی بامیرایی متناسب به صورت رابطه (۲) بدست می آید [۵].

$$R_m^2(\omega_p, \xi_p) = \sum_{j=1}^{N+1} \varphi_{N+1,j}^2 \gamma_j^2 (1 + 4\xi_j^2) R_a^2(\omega_j, \xi_j) + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{k=j+1}^{N+1} \varphi_{N+1,j} \varphi_{N+1,k} \gamma_j \gamma_k [(A'_{jk} + B'_{jk}) R_a^2(\omega_j, \xi_j) + (C'_{jk} + D'_{jk}) R_a^2(\omega_k, \xi_k)]$$

در این رابطه فرض شده که سیستم ثانویه درجه آزادی $N+1$ ام سیستم اولیه است. A'_{jk}, \dots, D'_{jk} ضرایبی هستند که در مرجع [۵] ارائه شده اند.

برای تحلیل یک سیستم ثانویه، ابتدا باید ازوم درنظر گرفتن اندرکنش بررسی و تعیین گردد. ایگوسا و درکیورگیان [۸] معیار در نظر گرفتن اندرکنش را به صورت نامساوی رابطه (۳) ارائه نمودند:

$$r_{\min,i} < r_i < r_{\max,i} \quad (3)$$

این نامساوی برقرار باشد آنگاه لازم است اندرکنش درنظر گرفته شود. در این رابطه :

$$r_{\min,i} = \frac{1-\alpha_i}{1+\alpha_i} \quad \text{و} \quad r_{\max,i} = \frac{1}{r_{\min,i}} = \frac{1+\alpha_i}{1-\alpha_i} \quad (4)$$

$$r_i = \frac{\omega_i}{\omega_p}$$

$$\alpha_i \text{ فرکانس مود } i \text{ سیستم اولیه و } \alpha_p \text{ فرکانس سیستم ثانویه بوده و } \alpha_i = \frac{(\xi_i + \xi_p)^2}{4e} \left(1 + \frac{\lambda_i}{4\xi_i \xi_p} \right) \quad \text{و} \quad \lambda_i = \varphi_{mi}^2 \frac{m_p}{M_i} \quad (5)$$

در این رابطه α_i نسبت میرایی مود i سیستم اولیه، α_p نسبت میرایی سیستم ثانویه، e میزان خطای قابل قبول در محاسبه پاسخ سیستم ثانویه، m_p جرم سیستم ثانویه و M_i جرم مودی i سیستم اولیه می باشند. در اصل $r_{min,i}$ و $r_{max,i}$ محدوده ای را مشخص می کنند در آن باید اثر اندرکش درنظر گرفته شود.

تحلیل سیستم های ثانویه با پیچیدگی هایی مواجه می باشد به طوریکه انجام آن به برنامه های کامپیوتی نیاز دارد. این مسئله برای کسانیکه در زمینه های طراحی به فعالیت مشغول هستند کمی ایجاد دشواری می کند. به همین دلیل بهتر است که روابط تحلیلی دقیق در صورت امکان به طوری ساده گردند که به راحتی قابل استفاده باشند و در ضمن نتایج نسبتاً دقیقی هم بدهنند. تحقیقاتی که در زمینه ساده سازی روش های تحلیل انجام گرفته، بسیار اندک هستند که شاید علت آن پیچیده بودن روابط حاکم و متعدد بودن پارامترها مؤثر می باشد. از بین تحقیقات مهم انجام شده جهت ساده سازی تحلیل سیستم های ثانویه می توان به مراجع [۱۰] و [۱۱] اشاره نمود. جدیدترین روش توسط ویلاورد [۱۱] ارائه شده که شبیه به روش استاتیکی معادل می باشد. بر اساس این روش، نیروی وارد بر سیستم های ثانویه یک درجه آزاد عبارت است از :

$$F_p = \frac{ZIC}{R_p} I_p C_p W_p \quad (6)$$

که در آن : Z شتاب حداقل زمین در منطقه مورد نظر، I ضریب اهمیت سازه، R_p ضریب اهمیت سیستم ثانویه (که ویلاورد آن را برابر $1/0$ در نظر گرفته است)، C_p ضریب کاهش پاسخ سیستم ثانویه (که ویلاورد آن را برابر نصف ضریب کاهش پاسخ سازه در نظر گرفته است، یعنی $R_p = R_w/2$ ، که در آن R_w ضریب کاهش پاسخ سازه می باشد)، W مقدار طیف همپایه شده سازه، W_p وزن سیستم ثانویه، و I_p ضریب بزرگنمایی پاسخ سیستم ثانویه است که برابر است با :

$$C_p = \frac{1}{2\sqrt{\frac{W_p}{W} - \frac{0.0025}{\varphi_0^2}}} \leq 400\varphi_0 \quad \text{و} \quad \varphi_0 = \frac{Wh}{\sum_{i=1}^N W_i h_i} \quad (7)$$

در این روابط ، W وزن کل سازه ، h ارتفاع نقطه اتصال سیستم ثانویه به سازه و W_i و h_i به ترتیب وزن و ارتفاع طبقه i می باشد. رابطه (7) برای حالت هم فرکانسی است. اگر فرکانس سیستم ثانویه قابل محاسبه باشد و مشخص باشد که در حدود فرکانس های سازه نیست، می توان مقدار C_p را کمتر از رابطه (7) و با استفاده از شکل (۱) انتخاب نمود. در این شکل T زمان تناوب اصلی سازه و T_p زمان تناوب سیستم ثانویه می باشند و

$$b = \frac{1}{2} \varphi_0 \sqrt{\frac{W_p}{W}} \quad (8)$$

بر اساس آیین نامه IBC نیروی وارد بر سیستم های ثانویه از رابطه زیر بدست می آید [۱۲]:

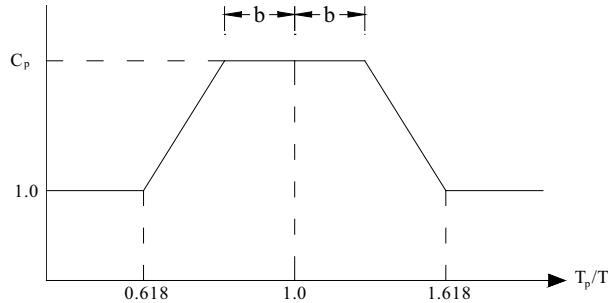
$$F_p = \frac{0.4a_p S_{Ds} I_p}{R_p} \left(1 + 2 \frac{h_i}{h_r} \right) W_p \quad (9)$$

که لازم نیست از رابطه (10) بیشتر شده و نباید از رابطه (11) کمتر شود.

$$F_{p,max} = 1.6 S_{Ds} I_p W_p \quad (10)$$

$$F_{p,min} = 0.3 S_{Ds} I_p W_p \quad (11)$$

در این روابط: h_r ارتفاع بام سازه نسبت به زمین ، a_p ضریب بزرگنمایی سیستم ثانویه که بین 1 تا $2/50$ متغیر است (می توان این ضریب را با استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه و سیستم ثانویه به دست آورد ولی نباید از 1 کمتر شود)، S_{Ds} پاسخ شتاب طیفی طرح در زمان تناوب کوتاه می باشند. برای مقادیر a_p ، R_p و I_p آیین نامه



شکل(۱): ضریب بزرگنمایی سیستم ثانویه بر اساس ویلارد /11/

IBC جداولی دارد. برای سیستم های ثانویه ای که زمان تناوب آنها کمتر از ۰/۰۶ ثانیه است نیروی زلزله از رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$F_p = 0.3 S_{Ds} W_p \quad (12)$$

بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ [۱۳] نیروی واردبرسیستم های ثانویه از رابطه (۱۳) به دست می آید.

$$F_p = AB_p IW_p \quad (13)$$

که در آن A شتاب مبنای طرح، I ضریب اهمیت ساختمان (ونه سیستم ثانویه) و B_p ضریبی است که بین ۰/۷ و ۲ متغیر بوده و بر اساس نوع سیستم ثانویه مشخص می شود.

فرض کنید سیستم ثانویه ای باید تحلیل شود که بر اساس رابطه (۳) لازم نیست اندرکنش برای آن در نظر گرفته شود. در این صورت می توان از رابطه (۱) برای تحلیل آن استفاده نمود. در این رابطه دو جمله جمع ساده و جمع دوگانه وجود دارد. جملات جمع دوگانه تأثیر کمی در پاسخ سیستم ثانویه واقع بر سازه های منظم دارند. در جهت ساده سازی می توان از جملات جمع دوگانه صرفنظر و برای محاسبه پاسخ سیستم ثانویه ملحق شده به سازه های منظم از رابطه (۱۴) استفاده نمود.

$$R_m^2(\omega_s, \xi_s) = \sum_{j=1}^N R_j^2 \quad (14)$$

$$R_j^2 = \varphi_{mj}^2 \gamma_j^2 [(A_j + B_j) R_a^2(\omega_s, \xi_s) + (C_j + D_j) R_a^2(\omega_j, \xi_j)] \quad (15)$$

چنانچه در این رابطه دیده می شود برای رسیدن به پاسخ دقیق لازم است کلیه مودهای سازه در نظر گرفته شوند ولی مودهای بالا تأثیر زیادی روی پاسخ سیستم ثانویه ندارند. مطالعات پارامتریک نشان می دهد که تعداد مودهای لازم برای تحلیل سیستم ثانویه برابر است با تعداد مودهای سیستم اولیه که فرکانس آنها کمتر از فرکانس سیستم ثانویه می باشد [۵].

هر چند رابطه (۱۴) رابطه ای به ظاهر ساده برای محاسبه پاسخ سیستم ثانویه است ولی محاسبه آن نیاز به حل معادلات همزمان دارد [۵]. برای ساده سازی، این معادلات به طور صریح حل شده، ضرایب $A_{j_0}, B_{j_0}, \dots, A_j, B_j$ به دست آمده، و با صرفنظر نمودن از جملات کم اهمیت در نهایت روابط زیر بدست آمده است:

$$A_j + B_j \cong 0 \quad \text{و} \quad C_j + D_j \cong \frac{1}{(1 - r_j^2)^2} \quad ; \quad r_j = \frac{\omega_j}{\omega_p} \quad (16)$$

با جایگزینی این روابط در رابطه (۱۵) خواهیم داشت:

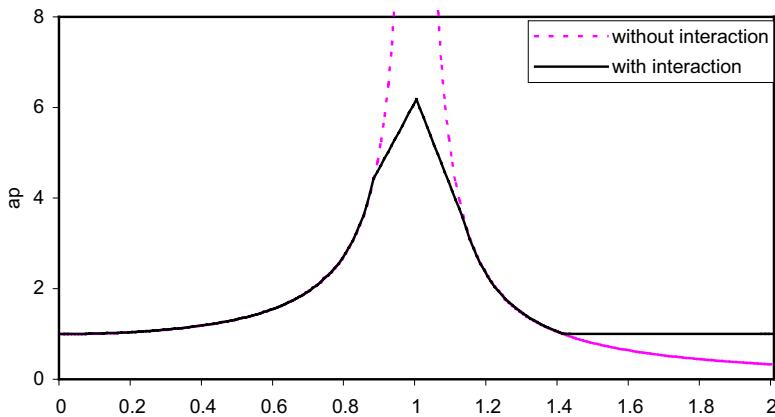
$$R_j = K_{pj} a_{pj} R_a(\omega_j) \quad ; \quad K_{pj} = \gamma_j \varphi_{mj} \quad ; \quad a_{pj} = \frac{1}{|1 - r_j^2|} \quad (17)$$

رابطه (۱۷) شتاب مطلق سیستم ثانویه در مود j است که به همراه رابطه (۱۴) روش تحلیل طیفی (جذر مجموع مربعات) را برای محاسبه پاسخ سیستم ثانویه تشکیل می‌دهند.
با استفاده از رابطه (۱۷) نیروی وارد بر سیستم ثانویه در مود j خواهد شد:

$$F_{pj} = K_{pj} a_{pj} \frac{R_a(\omega_j)}{g} W_p = C_{pj} W_p \quad (18)$$

که در آن C_{pj} ضریب زلزله سیستم ثانویه در مود j بوده و $R_a(\omega_j)/g$ طیف پاسخ شتاب زمین است که نسبت به شتاب جاذبه (g) همپایه شده است.

a_p : در آینه نامه‌ها برای ضریب بزرگنمایی (a_p) مقادیر ثابتی ارائه شده است که بر حسب نوع اتصال سیستم ثانویه به سیستم اولیه (صلب یا انعطاف‌پذیر)، مقادیری بین $1/0$ تا $2/5$ در نظر گرفته اند.
رابطه ارائه شده برای a_p در این مقاله که نمودار آن به صورت خط چین در شکل (۲) نشان داده شده، از روابط نظری به دست آمده است.



شکل(۲): ضریب بزرگنمایی a_p

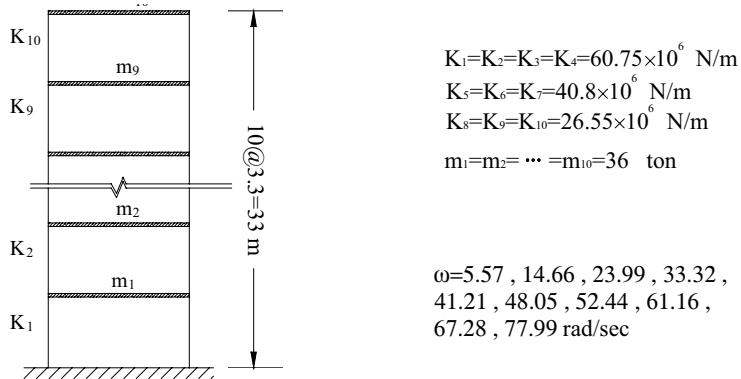
سه مقدار حدی برای a_p عبارتند از:
۱- اگر اتصال سیستم ثانویه به سازه صلب باشد، فرکانس سیستم ثانویه به سمت بی نهایت میل می‌کند، r برابر صفر شده و در نتیجه ضریب a_p برابر یک می‌شود. به عبارت دیگر شتاب سیستم ثانویه و شتاب طبقه با هم برابر می‌شوند.
۲- اگر اتصال سیستم ثانویه به سازه خیلی نرم باشد، فرکانس سیستم ثانویه به سمت صفر میل می‌کند. به عبارت دیگر شتاب سیستم ثانویه برابر صفر می‌شود و هیچ نیرویی به آن وارد نمی‌شود. البته آینه نامه‌ها همواره حداقلی برابر $1/0$ برای a_p در نظر می‌گیرند.
۳- اگر فرکانس سیستم ثانویه به سمت فرکانس سازه میل کند، r به سمت یک و a_p به سمت بی نهایت میل می‌کند. بی نهایت شدن a_p به دلیل اینستکه تحلیل بدون اندرکنش بوده است. در واقع برای r های نزدیک به یک ضریب بزرگنمایی باید اصلاح گردد.

رابطه (۱۷) برای حالتی است که اندرکنش در نظر گرفته نمی‌شود و در حالت‌هایی که r به $1/0$ نزدیک می‌شود دارای خطای زیادی است. محدوده‌ای که لازم است در آن اثر اندرکنش در نظر گرفته شود در رابطه (۳) داده شده است. در اصل رابطه (۱۸) برای $r < r_{min}$ و $r > r_{max}$ نتایج مناسب، ولی برای $r_{min} < r < r_{max}$ باید اصلاح گردد. برای بدست آوردن a_p با درنظر گرفتن اندرکنش از رابطه (۱۷) به این ترتیب استفاده شده که r با درنظر گرفتن اندرکنش بدست آمده و بر ضریب $R_a(\omega_j)$ تقسیم شده است. این کار برای پارامترهای مختلف صورت گرفته وتابع a_p بر حسب این پارامترها بدست آمده است که با درون یابی از آن، تابع زیر در حالت هم فرکانسی کامل ($r=1$) برای a_p بدست آمده است:

$$a_{p,\max} = 1.5a_{pl} \left(1 - \sqrt{\frac{M_R}{M_p}}\right) \quad (19)$$

که در آن $a_{p,\max}$ مقدار a_p در r_{min} و M_R نسبت جرم سیستم ثانویه به جرم طبقه می باشد. در حالت غیر هم فرکانسی نیز a_p از رابطه (17) محاسبه می شود. در حالت های نزدیک به هم فرکانسی a_p از درون یابی خطی بین این دو مقدار به دست می آید. لازم به ذکر است که برای سیستم های ثانویه خیلی نرم a_p به سمت صفر میل میکند ولی آیین نامه ها همواره مقدار حداقلی برابر $1/0$ برای آن در نظر می گیرند. با توجه به نکات گفته شده منحنی a_p با در نظر گرفتن اندرکنش به صورت خط پیوسته در شکل (۲) در می آید که از آن می توان برای محاسبه نیروی وارد بر سیستم ثانویه استفاده نمود.

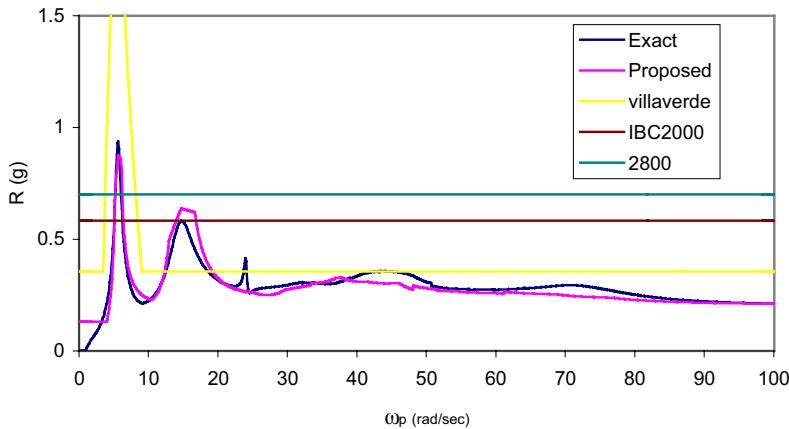
به منظور نشان دادن کارایی روش ارائه شده و مقایسه آن با روش های ساده دیگر ، قاب برشی شکل (۳) با پارامترهای مختلف تحلیل شده و طیف پاسخ سیستم ثانویه برای نسبت های جرم مختلف



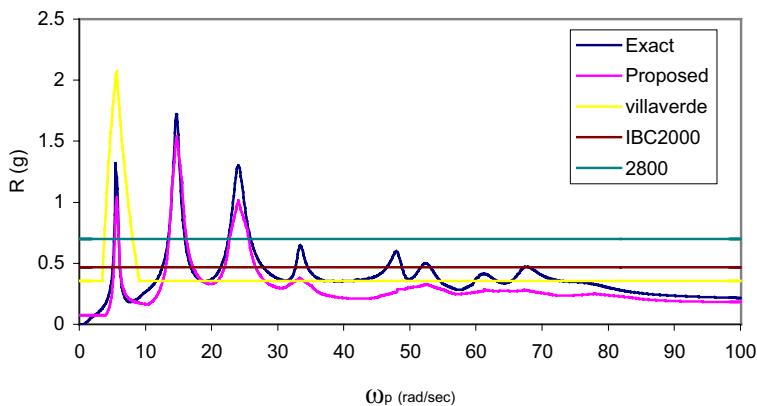
شکل(۳): قاب برشی مثال پارامتریک

محاسبه شده است. از طیف نیومارک با پارامترهای $PGV=1.2 \text{ m/sec}$ و $PGA=0.35$ و $R=0.05$ به عنوان ورودی زلزله استفاده شده است. روش هایی که این قاب با آن تحلیل شده اند عبارتند از : ۱- روش دقیق (رابطه ۲) ۲- روش پیشنهادی (رابطه ۱۸) ۳- روش آیین نامه ۲۸۰۰ (رابطه ۱۳) ۴- روش ویلارد (رابطه ۶) ۵- روش آیین نامه IBC2000 (رابطه ۹). لازم به ذکر است که چون رفتار سیستم به صورت خطی درنظر گرفته شده، نتایج روش های دقیق و روش پیشنهادی بر ضریب R تقسیم شده اند تا قابل مقایسه با روابط آیین نامه ها شوند.

برای قاب ذکر شده طیف پاسخ شتاب مطلق سیستم ثانویه برای نسبت های جرم و طبقات مختلف، به دست آمده که دو نمونه آن در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل(۴): طیف پاسخ طبقه ۵ ، نسبت جرم ۰/۱



شکل(۵): طیف پاسخ طبقه ۳ ، نسبت جرم ۰/۰۱

از بررسی این شکل ها نتایج زیر را می توان استنتاج نمود.

روش پیشنهادی از دقت قابل قبولی برخوردار است و از آن می توان برای محاسبه پاسخ سیستم ثانویه استفاده نمود.

روش آیین نامه IBC بجز در حالت های هم فرکانسی نتایج محافظه کارانه ای می دهدند. در بعضی حالت های هم فرکانسی پاسخ های سیستم ثانویه تا چند برابر کمتر از مقدار حقیقی آن می شود.

روش ویلارد در حالت هم فرکانسی با مود اول پاسخ های بالاتر و در سایر موارد پاسخ های کمتر از مقدار واقعی می دهد.

آیین نامه ۲۸۰۰ برای کلیه ساختمان ها و با هر تعداد طبقه و با هر نوع زمین فقط یک پاسخ می دهد. حتی در یک ساختمان اگر سیستم ثانویه در طبقه اول یا طبقه آخر واقع شده باشد یک مقدار پاسخ بیشتر به دست نمی آید.

در این مقاله روش ساده قابل استفاده در آیین نامه های ساختمانی برای برآورد نیروی وارد بر سیستم های ثانویه در اثر زلزله ارائه شده است. در این روابط پارامترهای مؤثر نظری خصوصیات دینامیکی سیستم های اولیه و ثانویه، هم فرکانسی، اندرکنش و نسبت جرم درنظر گرفته شده است. در یک مثال پارامتریک روش پیشنهادی با روابط موجود در آخرین آیین نامه های بارگذاری زلزله و روابط ارائه شده توسط ویلارد مقایسه شده اند. نتایج بدست آمده نشاندهنده این است که روش پیشنهادی تقریب قابل قبولی در مقایسه با روش دقیق دارد و از آن می توان برای تحلیل

سیستم های ثانویه استفاده نمود. براین اساس پیشنهاد می گردد در روابط آیین نامه ای تجدید نظر عمل آمده و اثر پارامترهای مختلف در تحلیل سیستم های ثانویه منظور گردد

1.Singh, M. P., " Generation of seismic floor spectra ", J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 101, No. M5,1975, 593-607.

2.DerKiureghian, A., Sackman J. L., and Nour-Omid, B., "Dynamic response of light equipment in structures", Report No. UCB/EERC-81/05, University of California, Berkeley, 1981.

3.Vanmarcke, E. H., "A simple procedure for predicting amplified response spectra and equipment response", Proc. 6th World Conf. On Earthquake Engineering, Vol. III, 3323-3327, India, 1977.

4.Singh, M. P., "Seismic design input for secondary systems", ASCE, J. of the structural division, Vol. 106, No. ST2, 1980, pp. 505-517.

۵-فیوض، علیرضا، "تحلیل سیستم های ثانویه تحت اثر همزمان مؤلفه های شتاب زلزله و ساده سازی روش های تحلیل"، رساله دکتری عمران-سازه به راهنمایی محسن غفوری آشتباخی، دانشگاه تربیت مدرس، پاییز ۱۳۸۱.

6.Sackman, J.L., Derkiureghian, A., and Nour-Omid, B., " Dynamic analysis of light equipment in Structures: Modal properties of the combined system", J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 109, No. 1, 1983, 73-89.

7.Igusa, T., and Derkiureghian, A., "Generation of floor response spectra including oscillator-structure interaction", Eq. Eng. Str. Dyn., Vol. 13, 1985, 661-676.

8.Igusa, T., and Derkiuregian, A., "Dynamic characterization of two-degree-of-freedom equipment-structure systems", J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 111, No.1, 1-19, 1985.

9.Singh, M.P., Suarez, L.E., Matheu, E.E., and Maldonado, G.O., "Simplified procedures for seismic design of nonstructural components and assessment of current code provisions", Tech. Rept., NCEER 93-0013, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, 1993.

10.Soong,T.T., Shen, G., Wu, Z., Zhang, R.H., and Grigoriu, M., "Assessment of the 1991 NEHRP provisions for nonstructural components and recommended revisions", Tech. Rept., NCEER 93-0003,National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo,1993.

11.Villaverde, R., "Method to improve seismic provisions for nonstructural components in buildings", J. Str. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 4, 432-439, 1997.

12. International Conference of Building Officials, "International building Code", 2000.

۱۳-آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش ۲، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، آذر ۱۳۷۸.