

بررسی تاثیر رفتار برشی-پیچشی در محاسبه درز انقطاع بین دو ساختمان همجوار به روش ارتعاشات پیشا

نوید سیاه پلو^۱، علیرضا فیوض^۲

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه شهید چمران، مجتمع آموزش عالی بهبهان

۲- استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

n_siahpolo@yahoo.com

خلاصه

در این تحقیق هدف، محاسبه درز انقطاع بین دو ساختمان با در نظر گرفتن رفتار برشی-پیچشی که بدلیل عدم تطابق مرکز جرم بر مرکز سختی شکل می گیرد، می باشد. روش مورد استفاده در این تحقیق، روش ارتعاشات پیشا و تاثیر عوامل مختلفی همچون میزان خروج از مرکزیت دو ساختمان مجاور هم، میرایی، زمان تناوب بر درز انقطاع بررسی شده و نتایج حاصل از تحلیل با ضوابط آیین نامه های استاندارد ۲۸۰۰ ایران، UBC97 و IBC2006 مقایسه می گردد. در کلیه فرآیندهای تحلیل از فرض خطی بودن رفتار اعضا استفاده شده است. مهمترین دست آورد این تحقیق این پدیده است که در ساختمانهایی که مد پیچشی شبیه هم دارند، افزایش درصد خروج از مرکزیت باعث کاهش نیاز درز انقطاع بین دو ساختمان می گردد.

کلمات کلیدی: نیروی تنه ای، درز انقطاع، ارتعاشات پیشا، زوج پاسخ جانبی-پیچشی

مقدمه

عدم تعبیه فاصله مناسب بین دو ساختمان هم جوار (درز انقطاع) اعم از رفتار برشی یا برشی-پیچشی در اثر اعمال زلزله های مهیب منجر به برخورد دو ساختمان مجاور هم و در نهایت تشکیل نیروی دینامیکی به نام نیروی تنه ای می گردد. در تعیین درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان عمدتاً از مدل های برشی در تحقیقات تئوریک استفاده می شود. روشهای موجود در تعیین درز انقطاع عبارتند از روش ارتعاشات پیشا، روش تاریخچه زمانی، روش تفاضل طیفی و روش طیف پاسخ. ساده ترین روش برای مقابله با نیروی تنه ای، تعبیه درز انقطاع مناسب بین دو ساختمان به کمک ضوابط آیین نامه است. درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان هم جوار، به عوامل مختلفی چون جرم ساختمان، سختی طبقات، میرایی، ارتفاع طبقات، بزرگی و مدت زمان تداوم زلزله و نوع رفتار ساختمان اعم از برشی یا برشی-پیچشی بستگی دارد. به منظور تعبیه درز انقطاع مناسب و کافی بین دو ساختمان آیین نامه های معتبر ضوابط مختلفی را ارائه داده اند که در این قسمت مرور اجمالی و سریع بر آنها خواهیم داشت. در آیین نامه UBC97 فاصله مورد نیاز جهت جداسازی دو ساختمان مجاور هم به کمک جمع جبری تغییر مکان نسبی غیر الاستیک آن دو ساختمان تعیین می گردد. در حالیکه مطابق ضوابط آیین نامه IBC2006 جذر مجموع مربعات تغییر مکان نسبی بین دو ساختمان هم جوار به عنوان معیاری در تعیین درز انقطاع بیان می کند. این درز محاسبه شده، زمانی که دو ساختمان هم جوار خصوصیات ارتعاشی شبیه به هم داشته باشند، فراتر از حد نیاز است. در آیین نامه طرح لرزه ای چین SGCBS حداقل فاصله بین ساختمانها را بر اساس ارتفاع ساختمان و شدت تحریکات زمین در نظر می گیرد. در آیین نامه طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) به منظور تعیین درز انقطاع مورد نیاز، ساختمانها را بر اساس تعداد طبقات و ضریب اهمیت ساختمان به دو دسته تقسیم شده اند. در دسته اول ساختمانها تا هفت طبقه با اهمیت کم و متوسط و دسته دوم ساختمانهای با اهمیت زیاد و خیلی زیاد در هر تعداد طبقه و با اهمیت کم و متوسط هشت طبقه و یا بیشتر. در دسته اول حداقل درز انقطاع را برابر پنج هزارم مجموع ارتفاع هر طبقه از دو ساختمان کنار هم نسبت به تراز زمین در نظر می گیرد. برای دسته دوم علاوه بر شرط قبل درز انقطاع مورد نیاز را جمع جبری تغییر مکان نسبی واقعی طرح طبقه دو ساختمان مجاور هم می داند.

در این مقاله سعی شده است که درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان مجاور هم با فرض وجود زوج پاسخ جانبی-پیچشی و به کمک روش ارتعاشات پیشا تعیین گردد. در فرآیند تحلیل سازه از فرض رفتار خطی استفاده شده است. علاوه بر اثر عواملی چون زمان تناوب، میرایی، میزان خروج از مرکزیت، میزان درز انقطاع محاسبه شده به روش ارتعاشات پیشا با ضوابط آیین نامه های UBC97، IBC2006 و استاندارد ۲۸۰۰ ایران مقایسه شده و نتایج حاصله در قالب نمودارهایی ارائه شده است.

از بین دانشمندانی که روی این پدیده به تحقیق و بررسی پرداختند Anagnostopouls [۱]، پرچمدار این مسیر است. ایشان در سال ۱۹۸۸ با مدلسازی سیستم های ساختمانی چند درجه آزاد برشی در کنار هم به صورت زنجیر وار استفاده کرد. به منظور بررسی اثرات تخریبی ناشی از نیروی نه

^۱ مربی دانشکده مهندسی، مجتمع آموزش عالی بهبهان، دانشگاه شهید چمران، اهواز

ای و عوامل موثر بر آن از یک سیستم فنر-میراگر جهت مدلسازی نیروی تنه ای بهره گرفت. عمده نتایج حاصل از تحقیق ایشان، بررسی اثر جرم، پیوند سازه و ارتباط این دو پارامتر در بین دو سازه مجاور هم، موقعیت قرار گیری ساختمان (از این نظر که ساختمان در ابتدای زنجیره ساختمانها قرار گرفته یا در میان آنها) و عدم برابری سختی و ارتفاع دو ساختمان کنار هم می باشد. Westermo، [۲]، به منظور کاهش خسارتهای ناشی از نیروی تنه ای، دو ساختمان برشی مجاور هم را از طریق یک تیر اتصال (link beam) به همدیگر متصل کرد تا بدین طریق پاسخ تغییر مکانی دو ساختمان یکی شود. ایشان به این نتیجه رسید که هرچه ویژگی های دینامیکی دو ساختمان مجاور هم نزدیک به هم باشد، وجود تیر اتصال سبب کاهش درز انقطاع مورد نیاز می گردد. البته نسبت سختی تیر اتصال به ستونی که تیر بدان متصل شده است نیز در تعیین این فاصله جداساز موثر است.

Anagnostopouls، [۳]، مجدداً در سال ۱۹۹۱ تاثیر نیروی تنه ای را بر افزایش پاسخ نسبی دو ساختمان مجاور هم به چالش کشید. البته ایشان در مدل محاسباتی خود علاوه بر رفتار خطی، رفتار غیر خطی (دو خطی) را برای مدل خود در نظر گرفت. ایشان علاوه بر پارامترهایی که در تحقیق اولیه خود مورد بررسی قرار داد، اثر عواملی چون مقاومت گسیختگی اعضا، تاثیر میرایی، اندازه دهانه بین دو سازه را بررسی نمود. Maison, kasai، [۴]، درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان را به کمک روش تفاضل طیفی تعیین کردند. فرض رفتار خطی در تحلیل ایشان در نظر گرفته شده و روش مذکور را با روش تاریخچه زمانی مقایسه کردند. Jeng-Hsiang lin، [۵]، در تعیین حداقل درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان از روش ارتعاشات پیشا بهره گرفتند. در مدلسازی تحریکات زلزله نیز این فرض در نظر گرفته شد که تحریکات زلزله از نوع فرآیند پیشای گوسی با میانگین صفر می باشد. مدل محاسباتی از نوع ساختمان n درجه ازاد با جرم متمرکز و رفتار برشی در نظر گرفته شد. محل پتانسیل شکل گیری نیروی تنه ای را در تراز طبقه ساختمان کوتاهتر و تراز نظیر آن در ساختمان بلند تر در نظر گرفته شد. مهمترین نتیجه حاصل از تحقیق ایشان این است که چنانچه مشخصات دینامیکی دو ساختمان مجاور هم یکی باشد، براساس روش ارتعاشات پیشا نیازی به تعبیه درز انقطاع نمی باشد. همچنین روش مذکور برای ساختمانهایی که فرکانس مودی آنها به اندازه کافی نسبت به هم اختلاف داشته باشد در مقایسه با سایر موارد معتبر است. Hong Hao & Zhang، [۶]، تاثیر تغییر در تحریکات زمین از هر نقطه به نقطه دیگر و تاثیر ویژگی های ارتعاشی دو ساختمان هم جوار بر تغییر مکان نسبی مورد بررسی قرار دادند. مهمترین نتیجه حاصل از تحقیقات ایشان این نکته است که در ساختمانهای بلند نادیده گرفتن اثر تغییرات حرکتی زمین (تغییرات مولفه شتاب از یک نقطه به نقطه دیگر) سبب می شود درز انقطاع محاسباتی ۵۰٪ کمتر از حد مورد نیاز تخمین زده شود. Hao & Shen، [۷]، اولین دانشمندانی بودند که با بررسی رفتار برشی-پیچشی دو ساختمان هم جوار به تعیین درز انقطاع پرداختند. در مدلسازی ایشان هر دو نوع رفتار خطی و غیر خطی رادر نظر گرفته و اثر خروج از مرکزیت، فرکانس جانبی، فرکانس پیچشی را مورد مطالعه قرار دادند. به منظور مدلسازی رفتار هیستریزس غیر خطی ساختمان از روش معادل سازی خطی رفتار غیر خطی که توسط Kasai ارائه شده است استفاده کردند. ایشان در تحقیق خود دریافتند که چنانچه فرکانس ارتعاشی دو سازه نسبت به هم خیلی فرق داشته باشد پاسخ سازه عمدتاً خارج از فاز عمل کرده و همین مسئله سبب افزایش تغییر مکان نسبی می شود. هم چنین چنانچه دو ساختمان مجاور نسبت به هم انعطاف پذیر باشند عمده تغییر مکان نسبی به خاطر تغییر مکان نسبی جانبی آنهاست. پاسخ پیچشی زمانی اهمیت پیدا می کند که یکی از دو ساختمان سخت باشند. Diego Lopez Garcia، [۸]، به منظور محاسبه درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان هم جوار از روش مجذور مربعات پاسخ SRSS، روش ترکیب تفاضلی یا DDC و روش شبیه سازی با میز لرزه ای استفاده کرد. مدل مورد استفاده توسط ایشان دارای ویژگی های زیر است:

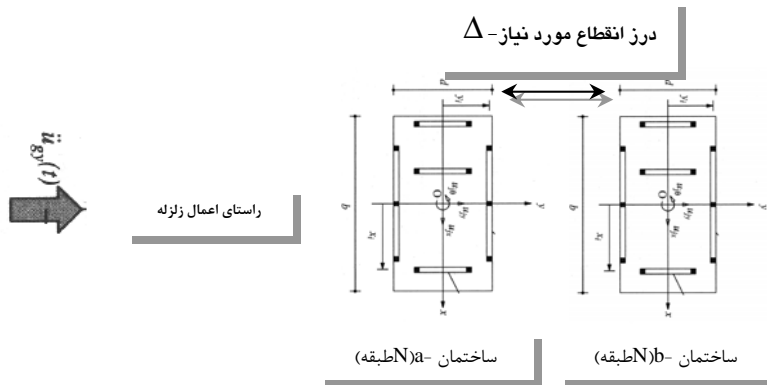
۱. یک سیستم یکدرجه آزاد SDOF در نظر گرفت.
۲. تابع شتاب زمین را تابع چگالی طیفی تاجیمی-کانای اصلاح شده منظور کرد.
۳. از تحریکات باند پهن و باند باریک به عنوان تحریکات القایی بهره جست
۴. به منظور محاسبه پاسخ سازه از روش ارتعاشات پیشا استفاده کرد.

عمده نتایج حاصل از تحقیق ایشان در حوزه خطی این نکته است که هنگامیکه چربود دو ساختمان مجاور هم به هم نزدیک باشد نتایج حاصل از روش DDC در مقایسه با سایر روشهای ترکیب آماری دقت بیشتری را ارائه می کند. همچنین در روش ترکیب آماری ABS در مقایسه با سایر روشها اغلب نتایج محافظه کارانه تری ارائه می کند. با بررسی مدل غیر خطی و نتایج حاصل از آن و مقایسه آنها با مدل خطی این نتیج حاصل می شود که هیچکدام از روشهای فوق الذکر در تعیین درز انقطاع نتایج صحیحی را ارائه نمی کند. نتایج حاصل از روش SRSS و DDC متناسب ویژگی تحریکات وارده و مشخصات دینامیکی سیستم ها، در پاره ای موارد درز محاسباتی کمترودر پاره ای موارد درز بیشتری را ارزیابی می کنند. در نتیجه خطر وقوع نیروی تنه ای عملاً ناشناخته است. در مقایسه با نتایج حاصل از روش های موجود، روش ABS در مدل غیر خطی خیلی فراتر از حد نیاز است.

استخراج روابط مورد نیاز به کمک روش ارتعاشات پیشا

• معرفی مدل تحلیلی

جرم طبقات به صورت متمرکز در در محل مرکز جرم طبقه و تعداد درجات آزادی هر طبقه با فرض صلبیت دیافراگم ۳ درجه می باشد. به منظور اعمال خروج از مرکزیت هر ساختمان قابهای راستای X را متقارن در نظر گرفته و قابهای راستای Y را به گونه ای جانمایی میکنیم که درصد خروج از مرکزیت مورد نظر تامین گردد. جهت اعمال نیروی زلزله در راستای Y در نظر گرفته شده است. سیستم سازه ای از نوع قاب خمشی بتن مسلح با شکل پذیری متوسط در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- پلان و نمای سه بعدی مدل محاسباتی- هر دو سیستم در راستای x متقارن و در راستای y نامتقارن

• تابع تغییر مکان نسبی کنج دو ساختمان هم جوار :

تابع تغییر مکان نسبی بین کنج ۱ ساختمان a نسبت به کنج ۱ ساختمان b عبارتست از :

$$\Delta(t) = u_b(t) + \left(\frac{D_b}{2}\right)\theta_b(t) - u_a(t) - \left(\frac{D_a}{2}\right)\theta_a(t) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، $u_a(t)$ و $u_b(t)$ به ترتیب تغییر مکان افقی مرکز جرم ساختمانهای **a** و **b** بوده و به همین ترتیب $\theta_a(t)$ و $\theta_b(t)$ مقدار تغییر مکان پیشروی مرکز جرم ساختمانهای **a** و **b** می باشند. تابع تغییر مکان در لحظه $t + \tau$ مطابق رابطه (۲) با جایگذاری $t + \tau$ بجای t بدست می آید.

$$\Delta(t + \tau) = u_b(t + \tau) + \left(\frac{D_b}{2}\right)\theta_b(t + \tau) - u_a(t + \tau) - \left(\frac{D_a}{2}\right)\theta_a(t + \tau) \quad (2)$$

به کمک نتایج حاصل از آنالیز مودال و با جایگذاری در رابطه (۱) داریم :

$$\Delta(t) = \sum_{j=1}^{2N_b} \varphi_b(N_a, j) \cdot y_{bj}(t) + \sum_{j=1}^{2N_b} \left(\frac{D_b}{2}\right) \cdot \varphi_b(N_a + N_b, j) \cdot y_{bj}(t) - \sum_{k=1}^{2N_a} \varphi_a(N_a, k) \cdot y_{ak}(t) - \sum_{k=1}^{2N_a} \left(\frac{D_a}{2}\right) \cdot \varphi_a(2N_a, k) \cdot y_{ak}(t) \quad (3)$$

به همین ترتیب تابع تغییر مکان نسبی در لحظه $t + \tau$ در مختصات نرمال نیز بدست می آید. در رابطه (۳)، $\varphi_b(N_a + N_b, j)$ و $\varphi_b(N_a, j)$ به ترتیب مولفه نظیر درجه آزادی تغییر مکان جانبی و تغییر مکان پیشروی مود λ م ساختمان **b** در تراز ارتفاعی طبقه آخر ساختمان **a** می باشد. به همین ترتیب $\varphi_a(2N_a, k)$ و $\varphi_a(N_a, k)$ مولفه نظیر درجه آزادی تغییر مکان جانبی و تغییر مکان پیشروی مود k م ساختمان **a** در تراز ارتفاعی آخرین طبقه ساختمان **a** می باشد. همچنین $y_{bj}(t)$ و $y_{aj}(t)$ به ترتیب مختصات نرمال λ م ساختمانهای **a** و **b** می باشد. N_a و N_b نیز به ترتیب معرف تعداد طبقات ساختمانهای **a** و **b** می باشد. برای تعیین تابع سرعت نسبی کافی است از تابع تغییر مکان نسبی نسبت به زمان مشتق بگیریم.

• تابع خود همبستگی

تابع خود همبستگی تابع تغییر مکان نسبی ساختمانهای هم جوار عبارتست از :

$$R_{\Delta\Delta} = E[\Delta(t) \cdot \Delta(t + \tau)] \quad (4)$$

حال با جایگذاری روابط (۱) و (۲) در رابطه (۴) و بازنویسی رابطه به کمک روش مودال، تابع خودهمبستگی را به شکل زیر باز نویسی می شود :

$$R_{\Delta\Delta} = E\left\{\sum_{j=1}^{2N_b} \varphi_b(N_a, j) \cdot y_{bj}(t) + \sum_{j=1}^{2N_b} \left(\frac{D_b}{2}\right) \cdot \varphi_b(N_a + N_b, j) \cdot y_{bj}(t) - \sum_{k=1}^{2N_a} \varphi_a(N_a, k) \cdot y_{ak}(t) - \sum_{k=1}^{2N_a} \left(\frac{D_a}{2}\right) \cdot \varphi_a(2N_a, k) \cdot y_{ak}(t)\right\} \quad (5)$$

$$\times \left\{\sum_{j=1}^{2N_b} \varphi_b(N_a, j) \cdot y_{bj}(t + \tau) + \sum_{j=1}^{2N_b} \left(\frac{D_b}{2}\right) \cdot \varphi_b(N_a + N_b, j) \cdot y_{bj}(t + \tau) - \sum_{k=1}^{2N_a} \varphi_a(N_a, k) \cdot y_{ak}(t + \tau) - \sum_{k=1}^{2N_a} \left(\frac{D_a}{2}\right) \cdot \varphi_a(2N_a, k) \cdot y_{ak}(t + \tau)\right\}$$

پس از ضرب تک تک عبارتهای داخل پرانتز، رابطه (۵) به شکل زیر باز نویسی میشود:

$$R_{\Delta\Delta} = R_{u_b, Na u_b, Na} + R_{u_b, Na \theta_b, Na + Nb} - R_{u_b, Na u_a, Na} - R_{\theta_b, Na \theta_a, 2Na} + R_{\theta_b, Na + Nb u_b, Na} + R_{\theta_b, Na + Nb \theta_b, Na + Nb} - R_{\theta_b, Na + Nb u_a, Na} - R_{\theta_b, Na + Nb \theta_a, 2Na} - R_{u_a, Na u_b, Na} - R_{u_a, Na \theta_b, Na + Nb} + R_{u_a, Na u_a, Na} + R_{u_a, Na \theta_a, 2Na} - R_{\theta_a, 2Na u_b, Na} - R_{\theta_a, 2Na \theta_b, Na + Nb} + R_{\theta_a, 2Na u_a, Na} + R_{\theta_a, 2Na \theta_a, 2Na} \quad (6)$$

که بطور نمونه اولین پارامتر عبارت (۶) برابر است با:

$$R_{u_b, Na u_b, Na} = E\left[\sum_{j=1}^{2N_b} \sum_{k=1}^{2N_b} \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a + N_b, k) Y_{bj}(t) Y_{bk}(t + \tau)\right] \quad (7)$$

این رابطه با استفاده از تعریف ارائه شده در روابط روش مختصات نرمال، عبارت (۷) به شکل زیر در می آید:

$$R_{u_b, N_a, u_b, N_a} = \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a, k) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E[p_{bk}(t-\theta_2) p_{bj}(t-\theta_1)] h_{bj}(\theta_1) h_{bk}(\theta_2) d\theta_1 d\theta_2 \quad (8)$$

که در رابطه فوق برای ساختمان **b** داریم :

$$E[p_{bj}(t-\theta_1) p_{bk}(t+\tau-\theta_2)] = E[\sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) f_{br}(t-\theta_1) f_{bs}(t+\tau-\theta_2)] \quad (9)$$

از طرفی با کمک تعریف تابع خود همبستگی بردار نیروی خارجی ساختمان **b** به شکل رابطه زیر :

$$R_{f_{br}, f_{bs}} = E[f_{br}(t) f_{bs}(t+\tau)] \quad (10)$$

در رابطه فوق $f_{br}(t)$ و $f_{bs}(t)$ به ترتیب مولفه Γ ام و S ام بردار نیروی خارجی ساختمان **b** می باشند. لذا در نهایت رابطه (۹) به شکل زیر در می آید:

$$R_{u_b, N_a, u_b, N_a} = \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a, k) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) R_{f_{br}, f_{bs}}) h_{bj}(\theta_1) h_{bk}(\theta_2) d\theta_1 d\theta_2 \quad (11)$$

در رابطه فوق توابع $h_{bj}(\theta_1)$ و $h_{bk}(\theta_2)$ به ترتیب توابع پاسخ ضربه واحد در مود Γ ام برای ساختمانهای **a** و **b** می باشند. به طور مشابه و با استفاده از روش فوق سایر پارامترهای رابطه (۱۱) قابل محاسبه اند که دلیل حجم زیاد روابط از ذکر آنها خودداری می کنیم. برای تعیین تابع خودهمبستگی سرعت نسبی از عملیات مشابه روش فوق استفاده می شود.

• تابع چگالی طیفی توان

تابع چگالی طیفی توان تغییر مکان نسبی، تبدیل فوریه تابع خودهمبستگی تغییر مکان نسبی ساختمانهای همجوار می باشد و براساس تعریف عبارتست از :

$$S_{\Delta\Delta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\Delta\Delta}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (12)$$

بنابراین با جایگذاری رابطه (۶) در رابطه (۱۲)، رابطه (۱۲) به شکل زیر بدست می آید :

$$S_{\Delta\Delta} = S_{u_b, N_a, u_b, N_a}(\omega) + S_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b}(\omega) - S_{u_b, N_a, u_a, N_a}(\omega) - S_{u_b, N_a, \theta_a, 2N_a}(\omega) + S_{\theta_b, N_a+N_b, u_b, N_a}(\omega) + S_{\theta_b, N_a+N_b, \theta_b, N_a+N_b}(\omega) - S_{\theta_b, N_a+N_b, u_a, N_a}(\omega) - S_{\theta_b, N_a+N_b, \theta_a, 2N_a}(\omega) - S_{u_a, N_a, \theta_b, N_a+N_b}(\omega) + S_{u_a, N_a, u_a, N_a}(\omega) + S_{u_a, N_a, \theta_a, 2N_a}(\omega) - S_{\theta_a, 2N_a, u_b, N_a}(\omega) - S_{\theta_a, 2N_a, \theta_b, N_a+N_b}(\omega) + S_{\theta_a, 2N_a, u_a, N_a}(\omega) + S_{\theta_a, 2N_a, \theta_a, 2N_a}(\omega) \quad (13)$$

به عنوان مثال در رابطه فوق :

$$S_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b} e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (14)$$

که با جایگذاری مقدار نظیر $R_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b}$ در رابطه (۱۴) داریم :

$$S_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} (\frac{D_b}{2}) \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a + N_b, k) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) R_{f_{br}, f_{bs}}(\tau - \theta_2 + \theta_1) \} h_{bj}(\theta_1) h_{bk}(\theta_2) d\theta_1 d\theta_2 e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (15)$$

به دلیل ثابت ماندن شکل مود ارتعاشی نسبت به زمان، رابطه (۱۵) را به شکل زیر بازنویسی کنیم :

$$S_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b} = \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} (\frac{D_b}{2}) \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a + N_b, k) \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{ \frac{1}{2\pi} R_{f_{br}, f_{bs}}(\tau - \theta_2 + \theta_1) e^{-i\omega(\tau - \theta_2 + \theta_1)} d(\tau - \theta_2 + \theta_1) \} h_{bj}(\theta_1) h_{bk}(\theta_2) e^{i\omega\theta_1} e^{-i\omega\theta_2} d\theta_1 d\theta_2 \quad (16)$$

با تعریف تابع چگالی طیفی توان نیروی خارجی سیستم در رابطه (۱۶)، آن رابطه به شکل زیر در می آید :

$$S_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b}(\omega) = \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} (\frac{D_b}{2}) \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a + N_b, k) \{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) S_{f_{br}, f_{bs}}(\omega) h_{bj}(\theta_1) e^{i\omega\theta_1} h_{bk}(\theta_2) e^{-i\omega\theta_2} d\theta_1 d\theta_2 \} \quad (17)$$

حال از آنجا که تابع چگالی توان تابع پارامتر ω می باشد، لذا می توان آن را از زیر انتگرال بیرون کشید. سپس با مرتب کردن عبارات داخل انتگرال ها داریم :

$$S_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b}(\omega) = \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} (\frac{D_b}{2}) \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a + N_b, k) \{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) S_{f_{br}, f_{bs}}(\omega) \} \int_{-\infty}^{\infty} h_{bj}(\theta_1) e^{i\omega\theta_1} d\theta_1 \int_{-\infty}^{\infty} h_{bk}(\theta_2) e^{-i\omega\theta_2} d\theta_2 \quad (18)$$

حال با استفاده از تعریف تابع پاسخ فرکانسی مختلط رابطه (۱۸) را به شکل زیر می نویسیم :

$$S_{u_b, N_a, \theta_b, N_a+N_b}(\omega) = \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} (\frac{D_b}{2}) \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a + N_b, k) \times \{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) S_{f_{br}, f_{bs}}(\omega) \} H_{bj}^*(\omega) H_{bk}(\omega) \quad (19)$$

به همین ترتیب سایر اجزاء رابطه چگالی طیفی و چگالی طیفی متقاطع تغییر مکان نسبی ساختمانها **a** و **b** به کمک روند فوق الذکر قابل محاسبه اند. در رابطه (۱۹)، $H_{bk}(\omega)$ ، تابع پاسخ فرکانسی مختلط (تابع انتقال) ساختمان **b** در مود k ام می باشد و به کمک رابطه (۲۰) قابل محاسبه است. همچنین تابع $\dot{H}_{bk}^*(\omega)$ مزدوج تابع $H_{bk}(\omega)$ می باشد:

$$H_{bk} = \int_{-\infty}^{\infty} h_{bk} e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{K_{bk} + i\omega C_{bk} - \omega^2 M_{bk}} \quad (20)$$

$$S_{f_{ar}f_{as}}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[f_{ar}(t)f_{as}(t+\tau)]e^{-i\omega\tau} d\tau \quad S_{f_{br}f_{bs}}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[f_{br}(t)f_{bs}(t+\tau)]e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (21) \text{ الی } (22)$$

به همین ترتیب تابع چگالی طیفی متقاطع مؤلفه Γ ام بردار نیروی خارجی ساختمان **a** و مؤلفه S ام بردار نیروی خارجی ساختمان **b** است و $S_{f_{br}f_{as}}(\omega)$ تابع چگالی طیفی متقاطع مؤلفه Γ ام بردار نیروی خارجی ساختمان **b** و مؤلفه S ام بردار نیروی خارجی ساختمان **a** است و از روابط (۲۳) و (۲۴) به دست می آیند:

$$S_{f_{ar}f_{bs}}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[f_{ar}(t)f_{bs}(t+\tau)]e^{-i\omega\tau} d\tau \quad S_{f_{br}f_{as}}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[f_{br}(t)f_{as}(t+\tau)]e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (23) \text{ الی } (24)$$

تابع چگالی طیفی سرعت نسبی دو کنج ساختمان همجوار از تبدیل فوریه مستقیم تابع خودهمبستگی سرعت نسبی کنج دو ساختمان هم جوار محاسبه می شود و از طریق رابطه زیر بدست می آید:

$$S_{\Delta\Delta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\Delta\Delta} e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (25)$$

• میانگین مربعات

میانگین مربعات تابع تغییر مکان نسبی دو ساختمان هم جوار عبارتست از:

$$\sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta\Delta}(\omega) d\omega \quad (26)$$

که با جایگذاری رابطه (۱۳) در عبارت فوق، تابع میانگین مربعات تغییر مکان نسبی عبارتست از:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{\infty} & \{ S_{u_b, N_a u_b, N_a}(\omega) + S_{u_b, N_a \theta_b, N_a + N_b}(\omega) - S_{u_b, N_a u_a, N_a}(\omega) - S_{u_b, N_a \theta_a, 2N_a}(\omega) + S_{\theta_b, N_a + N_b u_b, N_a}(\omega) + S_{\theta_b, N_a + N_b \theta_b, N_a + N_b}(\omega) - S_{\theta_b, N_a + N_b u_a, N_a}(\omega) \\ & - S_{\theta_b, N_a + N_b \theta_a, 2N_a}(\omega) - S_{u_a, N_a u_b, N_a}(\omega) - S_{u_a, N_a \theta_b, N_a + N_b}(\omega) + S_{u_a, N_a u_a, N_a}(\omega) + S_{u_a, N_a \theta_a, 2N_a}(\omega) - S_{\theta_a, 2N_a u_b, N_a}(\omega) - S_{\theta_a, 2N_a \theta_b, N_a + N_b}(\omega) + S_{\theta_a, 2N_a u_a, N_a}(\omega) \\ & + S_{\theta_a, 2N_a \theta_a, 2N_a}(\omega) \} d\omega \end{aligned} \quad (27)$$

بیان شکل صریح روابط

بردار نیروی خارجی وارد بر سازه تحت اثر تحریکات القایی ناشی از زمین لرزه عبارتست از:

$$\{f(t)\} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_N(t) \\ \vdots \\ f_{2N}(t) \end{Bmatrix}_{1 \times 2N} = \ddot{u}_g(t) \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_N \\ 0 \\ 0_{2N} \end{Bmatrix}_{1 \times 2N} \quad (29)$$

در رابطه (۲۹)، $[m]_{2N \times 2N}$ و $\ddot{u}_g(t)$ به ترتیب ماتریس جرم سازه، شتاب نگاشت زلزله وارده بر سازه می باشد:

$$S_{f_{ar}f_{as}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[m_{ar} \ddot{u}_g(t) m_{as} \ddot{u}_g(t+\tau)] e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (30)$$

یا

$$S_{f_{ar}f_{as}} = m_{ar} m_{as} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[\ddot{u}_g(t) \ddot{u}_g(t+\tau)] e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (31)$$

با تعریف تابع چگالی طیفی توان زمین به شکل زیر:

$$S_g(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[\ddot{u}_g(t) \ddot{u}_g(t+\tau)] e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (32)$$

لذا رابطه (۳۱) به شکل زیر در می آید:

$$S_{f_{ar}f_{as}} = m_{ar} m_{as} S_g(\omega) \quad (33)$$

به همین ترتیب داریم:

$$S_{f_{br}f_{bs}} = m_{br}m_{bs}S_g(\omega), S_{f_{ar}f_{bs}} = m_{ar}m_{bs}S_g(\omega), S_{f_{br}f_{as}} = m_{br}m_{as}S_g(\omega) \quad (34) \text{ الی (36)}$$

در روابط فوق الذکر، m_{bs} و m_{ar} به ترتیب جرم طبقه \mathbf{a} و جرم طبقه \mathbf{b} ساختمان می باشد. $S_g(\omega)$ نیز تابع چگالی طیفی توان زمین می باشد. در این مقاله تابع چگالی طیفی زمین به صورت طیف سفید با چگالی طیفی ثابت S_0 در نظر گرفته شده است. اکنون با جایگذاری نتایج حاصل از روابط (33) الی (36) در معادله (27) و با فرض اینکه زلزله وارده از نوع فرآیند اغتشاش سفید با چگالی طیفی توان S_0 می باشد، به طور نمونه برای اولین پارامتر خواهیم داشت:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_{u_b, N_a u_b, N_a}(\omega) d\omega = \sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a, k) \times \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) \right\} \int_{-\infty}^{\infty} S_{f_{br}f_{bs}}(\omega) H_{bj}^*(\omega) H_{bk}(\omega) d\omega =$$

$$\sum_{j=1}^{2Nb} \sum_{k=1}^{2Nb} \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a, k) \times \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) m_{br} m_{bs} \right\} \times \int_{-\infty}^{\infty} S_0(\omega) H_{bj}^*(\omega) H_{bk}(\omega) d\omega \quad (37)$$

رابطه فوق را با جداکردن عبارات مربوط به $j = k$ و $j \neq k$ به صورت ساده تر زیر در خواهد آمد:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_{u_b, N_a u_b, N_a}(\omega) d\omega = \sum_{j=1}^{2Nb} \varphi_b^2(N_a, k) \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, j) m_{br} m_{bs} \right\} \times \int_{-\infty}^{\infty} S_0(\omega) |H_{bj}(\omega)|^2 d\omega +$$

$$\sum_{j=1}^{2Nb-1} \sum_{k=j+1}^{2Nb} \varphi_b(N_a, j) \varphi_b(N_a, k) \times \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \varphi_b(r, j) \varphi_b(s, k) m_{br} m_{bs} \right\} \times \int_{-\infty}^{\infty} S_0(\omega) [H_{bj}(\omega) \times H_{bk}^*(\omega) + H_{bj}^*(\omega) \times H_{bk}(\omega)] d\omega \quad (38)$$

همانگونه که در رابطه (38) می توان دید، مهمترین مشکل محاسبه عبارت انتگرالی آن رابطه است. بدین منظور از تکنیک ساده سازی به شرح زیر استفاده می شود. بنا بر این هدف محاسبه عبارت انتگرالی زیر است:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(\omega) [H_{bj}(\omega) \times H_{bk}^*(\omega) + H_{bj}^*(\omega) \times H_{bk}(\omega)] d\omega \quad (39)$$

عبارت درون کروشه رابطه (39) را به شکل زیر باز نویسی می کنیم:

$$A = |H_{bj}(\omega)|^2 |H_{bk}(\omega)|^2 \left[\frac{1}{H_{bj}(\omega) \times H_{bk}(\omega)} + \frac{1}{H_{bj}^*(\omega) \times H_{bk}^*(\omega)} \right] \quad (40)$$

در رابطه فوق $|H_{bk}(\omega)|^2$ و $|H_{bj}(\omega)|^2$ به ترتیب اندازه (بزرگی) توابع پاسخ فرکانسی مختلط مد های ارتعاشی \mathbf{k} ام و \mathbf{j} ام ساختمان \mathbf{b} می باشد. به همین ترتیب $H_{bj}(\omega)$ و $H_{bk}(\omega)$ پاسخ فرکانسی مختلط مد های ارتعاشی \mathbf{k} ام و \mathbf{j} ام ساختمان \mathbf{b} بوده و توابع $H_{bj}^*(\omega)$ و $H_{bk}^*(\omega)$ مزدوج آنها می باشد. از طرفی طبق تعریف داریم:

$$C_j = 2\xi_j \omega_j M_j \quad \text{و} \quad M_j = \omega_j^2 \cdot K_j$$

لازم به یاد آوری است که C_j و M_j و K_j به ترتیب میرایی مودی، جرم مودی و سختی مودی در مود \mathbf{j} ام سازه مورد نظر می باشد. با جایگذاری روابط فوق در پاسخ فرکانسی مختلط مد های ارتعاشی \mathbf{k} ام و \mathbf{j} ام ساختمان \mathbf{b} داریم:

$$H_{bj} = \frac{1}{M_{bj}((\omega^2 - \omega_{bj}^2) + 2i\xi_{bj}\omega\omega_{bj})}, H_{bk} = \frac{1}{M_{bk}((\omega^2 - \omega_{bk}^2) + 2i\xi_{bk}\omega\omega_{bk})} \quad (41) \text{ و } (42)$$

سیس با استفاده از روابط فوق و با جایگذاری در عبارت (40) حاصل عبارت درون کروشه به شکل زیر در می آید:

$$\left[\frac{1}{H_{bj}(\omega) \times H_{bk}(\omega)} + \frac{1}{H_{bj}^*(\omega) \times H_{bk}^*(\omega)} \right] = 2M_{bj}M_{bk} \times [(\omega^2 - \omega_{bj}^2) \times (\omega^2 - \omega_{bk}^2) + 4\omega^2 \xi_{bk} \omega_{bk} \xi_{bj} \omega_{bj}] \quad (43)$$

حال چنانچه عبارت درون کروشه رابطه (43) را با $N(\omega)$ نمایش دهیم:

$$N(\omega) = [(\omega^2 - \omega_{bj}^2) \times (\omega^2 - \omega_{bk}^2) + 4\omega^2 \xi_{bk} \omega_{bk} \xi_{bj} \omega_{bj}] \quad (44)$$

در رابطه فوق، ω_{bj} و ξ_{bj} به ترتیب فرکانس زاویه ای و ضریب میرایی مود \mathbf{j} ام ساختمان \mathbf{b} می باشد. در نهایت رابطه (40) به فرم ساده شده زیر تبدیل می شود:

$$A = 2M_{bj}M_{bk}N(\omega) |H_{bj}(\omega)|^2 |H_{bk}(\omega)|^2 \quad (45)$$

از طرفی اندازه تابع پاسخ فرکانسی مختلط مود \mathbf{k} ام ساختمان \mathbf{b} برابر است با:

$$|H_{bj}(\omega)|^2 = \frac{1}{M_{bj}^2 \{(\omega^2 - \omega_{bj}^2)^2 + 4\omega^2 \xi_{bj}^2 \omega_{bj}^2\}}, |H_{bk}(\omega)|^2 = \frac{1}{M_{bk}^2 \{(\omega^2 - \omega_{bk}^2)^2 + 4\omega^2 \xi_{bk}^2 \omega_{bk}^2\}} \quad (46) \text{ و } (47)$$

در نهایت فرم انتگرال رابطه (39) به شکل زیر در می آید:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S_g(\omega) [H_{bj}(\omega) \overset{*}{H}_{bk}(\omega) + \overset{*}{H}_{bj}(\omega) H_{bk}(\omega)] d\omega = 2M_{bj} M_{bk} \int_{-\infty}^{\infty} N(\omega) S_g(\omega) |H_{bj}(\omega)|^2 |H_{bk}(\omega)|^2 d\omega \quad (48)$$

با قراردادن عبارات (46)، (47) و (44) در عبارت $N(\omega) |H_{bj}(\omega)|^2 |H_{bk}(\omega)|^2$ و اعمال تکنیک تجزیه پذیری کسرها داریم:

$$\frac{\omega^4 - \omega^2(\omega_{bj}^2 - \omega_{bk}^2 - 4\xi_{bk}\xi_{bj}\omega_{bj}\omega_{bk}) + \omega_{bj}^2\omega_{bk}^2}{[(\omega^2 - \omega_{bj}^2)^2 + 4\omega^2\xi_{bj}^2\omega_{bj}^2][(\omega^2 - \omega_{bk}^2)^2 + 4\omega^2\xi_{bk}^2\omega_{bk}^2]} = \frac{A_{jk} + B_{jk}\omega^2}{[(\omega^2 - \omega_{bj}^2)^2 + 4\omega^2\xi_{bj}^2\omega_{bj}^2]} + \frac{C_{jk} + D_{jk}\omega^2}{[(\omega^2 - \omega_{bk}^2)^2 + 4\omega^2\xi_{bk}^2\omega_{bk}^2]} \quad (49)$$

مجهولات عبارت فوق به قرار زیر می باشند:

$$A_{jk} = \frac{(u-s) \times \{tw_3 - (stw_4 + t^2w_1)\} - (v-t) \times \{tw_2 - (stw_1 + w_4)\}}{(tu-sv) \times (u-s) + (t-v)^2}, \quad B_{jk} = \frac{tw_2 - (stw_1 + w_4) + (v-t) \times A_{jk}}{t \times (u-s)}, \quad C_{jk} = \frac{1}{t}(w_4 - A_{jk} \times v) \quad (50)$$

$$D_{jk} = w_1 - B_{jk} \quad (51)$$

لذا حاصل عبارت انتگرالی I به شکل زیر تبدیل می شود:

$$I = A_{jk} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) |H_{bj}(\omega)|^2 d\omega + B_{jk} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \omega^2 |H_{bj}(\omega)|^2 d\omega + C_{jk} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) |H_{bk}(\omega)|^2 d\omega + D_{jk} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \omega^2 |H_{bk}(\omega)|^2 d\omega \quad (52)$$

برای محاسبه عبارات انتگرالی رابطه (52) از تعریف زیر استفاده می کنیم:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_0 + i\omega B_1}{A_0 + i\omega A_1 - \omega^2 A_2} d\omega = \frac{\pi(A_0 B_1^2 + A_2 B_0^2)}{A_0 A_1 A_2} \quad (53)$$

با استفاده از تعریف فوق عبارت انتگرالی I برابر است با:

$$I = \frac{S_o \pi}{2} \left\{ \frac{1}{\omega_{bj} \xi_{bj}} (A_{jk} \frac{1}{\omega_{bj}^2} + B_{jk}) + \frac{1}{\omega_{bk} \xi_{bk}} (C_{jk} \frac{1}{\omega_{bk}^2} + D_{jk}) \right\} \quad (54)$$

در نهایت حاصل عبارت (37) به شکل زیر درمی آید:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_{u_{b_a}, u_{b_a}, u_{b_a}} d\omega = \sum_{j=1}^{2Nb} \phi_b^2(N_a, j) \times \frac{1}{M_{bj}^2} \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \phi_b(r, j) \phi_b(s, j) m_{br} m_{bs} \right\} \times \frac{S_o \pi}{2 \omega_{bj} \xi_{bj}} + \frac{2}{M_{bj} M_{bk}} \sum_{j=1}^{2Nb-1} \sum_{k=j+1}^{2Nb} \phi_b(N_a, j) \phi_b(N_a, k) \times \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \phi_b(r, j) \phi_b(s, k) m_{br} m_{bs} \right\} \times \frac{S_o \pi}{2} \left\{ \frac{1}{\omega_{bj} \xi_{bj}} (A_{jk} \frac{1}{\omega_{bj}^2} + B_{jk}) + \frac{1}{\omega_{bk} \xi_{bk}} (C_{jk} \frac{1}{\omega_{bk}^2} + D_{jk}) \right\} \quad (55)$$

به منظور تعیین شکل صریح اجزای تشکیل دهنده تابع میانگین مربعات سرعت نسبی از تکنیک مشابه آنچه برای تابع تغییر مکان بیان گردید استفاده می شود. تنها تفاوت اصلی نسبت به حالت قبل، ضرایب دستگاه معادلات مربوط به تعیین پارامترهای A'_{jk} ، B'_{jk} ، C'_{jk} ، D'_{jk} می باشد. روند تعیین این مجهولات دقیقاً مشابه آنچه در قبل ذکر شد، می باشد. ضرایب دستگاه معادلات در این حالت عبارتند از:

$$w_1 = 1, w_2 = -(\omega_{bj}^2 + \omega_{bk}^2 - 4\xi_{bk}\xi_{bj}\omega_{bj}\omega_{bk}), w_3 = \omega_{bj}^2\omega_{bk}^2, w_4 = 0$$

به دلیل حجم بودن روابط حاصل برای تعیین تابع میانگین مربعات سرعت نسبی تنها به ذکر یک نمونه از مجموعه روابط بسنده می کنیم. به طور مثال:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_{u'_{b_a}, u'_{b_a}, u'_{b_a}} d\omega = \sum_{j=1}^{2Nb} \phi_b^2(N_a, k) \times \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \phi_b(r, j) \phi_b(s, j) m_{br} m_{bs} \right\} \times \frac{S_o \pi}{2 \omega_{bj} \xi_{bj}} + 2 \sum_{j=1}^{2Nb-1} \sum_{k=j+1}^{2Nb} \phi_b(N_a, j) \phi_b(N_a, k) \times \left\{ \sum_{r=1}^{Nb} \sum_{s=1}^{Nb} \phi_b(r, j) \phi_b(s, k) m_{br} m_{bs} \right\} \times \frac{S_o \pi}{2} \left\{ \frac{1}{\omega_{bj} \xi_{bj}} (A'_{jk} \frac{1}{\omega_{bj}^2} + B'_{jk}) + \frac{1}{\omega_{bk} \xi_{bk}} (C'_{jk} \frac{1}{\omega_{bk}^2} + D'_{jk}) \right\} \quad (56)$$

در نهایت یادآور می شویم که برای یک فرآیند دلخواه Z رابطه بین چگالی طیفی توان تغییر مکان و سرعت نسبی عبارتست از:

$$S_{..}(\omega) = \omega^2 S_{zz}(\omega) \quad (57)$$

درز انقطاع مورد نیاز و میزان انحراف معیار آن

با فرض یک فرآیند گوسی با میانگین آماری صفر، $X(t)$ ، دونپارت، [9]، نشان داد میانگین و انحراف معیار مقادیر بیشینه پاسخ یک سیستم به ترتیب به کمک مجموعه روابط زیر بدست می آید:

$$\bar{\delta} \cong \left(\sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \right) \sigma_z, \quad \sigma_{\delta} \cong \left(\frac{\pi}{\sqrt{12 \ln(vT)}} \right) \sigma_z, \quad v = \frac{\sigma_z}{2\pi\sigma_z} \theta \quad (60)$$

بررسی اثر پارامترهای مختلف بر میزان درز انقطاع مورد نیاز

• معرفی مدل‌های مورد استفاده در محاسبات

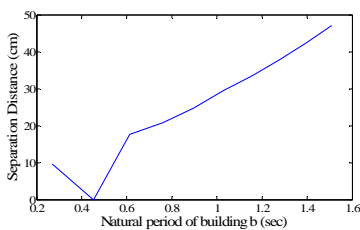
به منظور تطبیق بهتر نتایج حاصل از آنالیز به روش ارتعاشات پیش‌ساختی جانبی مدل‌های تحلیلی با استفاده از روش سعی و خطی به گونه ای برآورد شده است تا با پیروید تجربی حاصل از آیین نامه ۲۸۰۰ انطباق کامل داشته باشد برای محاسبه پاسخ جانبی هر یک از سازه ها به روش ارتعاشات پیشا و

مقایسه نتایج با ضوابط تحلیل طیفی یک برنامه کامپیوتری نگارش شده. به منظور در نظر گرفتن اثر خروج از مرکزیت سه دسته مدل سازه ای در نظر گرفته شد که دارای خروج از مرکزیت های به ترتیب ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ می باشند.

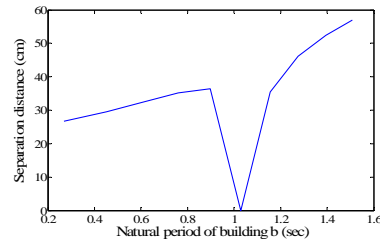
بررسی اثر زمان تناوب، درصد خروج از مرکزیت و درصد میرایی بر درز انقطاع

• تاثیر زمان تناوب

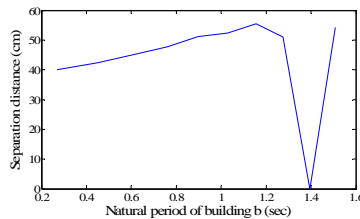
به منظور بررسی تاثیر زمان تناوب تعداد طبقات ساختمان **a** به صورت ثابت از ۲ الی ۲۰ طبقه و تعداد طبقات ساختمان **b** نیز به ترتیب از ۲ الی ۲۰ طبقه در نظر گرفته شده است.



شکل (۲) ساختمان **a**، ۴ طبقه (و ساختمان **b** با طبقات مختلف)



شکل (۳) ساختمان **a**، ۱۲ طبقه و ساختمان **b** با طبقات مختلف



شکل (۴) ساختمان **a**، ۱۸ طبقه و ساختمان **b** با طبقات مختلف

نکته قابل درک از نمودارهای ترسیم شده این است که با افزایش زمان تناوب دو ساختمان مجاور هم با فرض رفتار برشی - پیچشی میزان درز انقطاع مورد نیاز افزایش می یابد. همچنین چنانچه زمان تناوب دو ساختمان مجاور هم یکی شود (ویژگی های دینامیکی آن دو ساختمان شبیه هم باشد)، بر اساس روش ارتعاشات پیشا، نیازی به تعبیه درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان نمی باشد

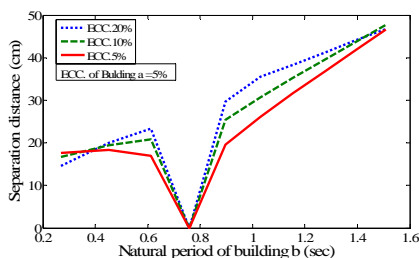
• تاثیر خروج از مرکزیت

به منظور بررسی تاثیر خروج از مرکزیت بر میزان درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان همجوار دارای رفتار برشی - پیچشی، ۲ حالت زیر در نظر گرفته می شود:

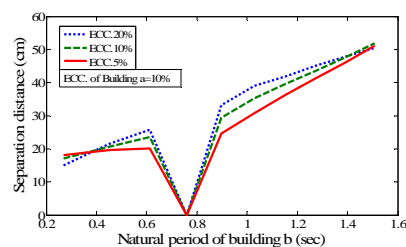
ب-۱- خروج از مرکزیت ساختمان **a** به صورت ثابت و خروج از مرکزیت ساختمان **b** متناوباً افزایش می یابد.

ب-۲- همزمان با افزایش درصد خروج از مرکزیت ساختمان **a** (۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)، درصد خروج از مرکزیت ساختمان **b** نیز به ترتیب ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ در نظر گرفته می شود.

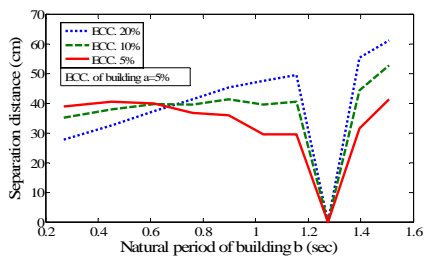
اشکال حالت ب-۱:



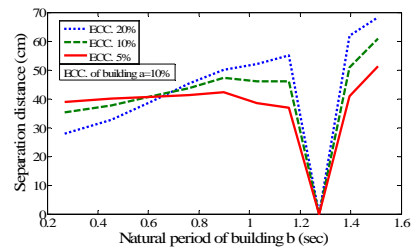
شکل (۵) ساختمان **a**، ۸ طبقه



شکل (۶) ساختمان **a**، ۸ طبقه



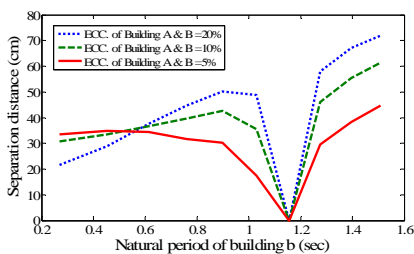
شکل (۷) ساختمان a، ۱۶ طبقه



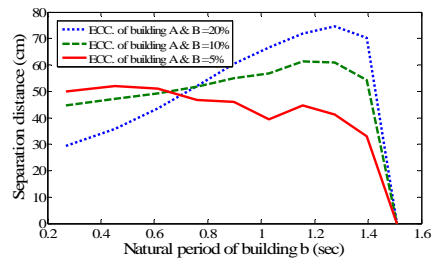
شکل (۸) ساختمان a، ۱۶ طبقه

با مشاهده نمودارهای فوق، با افزایش درصد خروج از مرکزیت ساختمان مرجع، در نسبتهای پرپود بزرگ (نسبت زمان تناوب ساختمان مجاور به زمان تناوب ساختمان مرجع)، اختلاف بین پرپود ساختمان مرجع با ساختمان مجاور آن زیاد باشد، درز انقطاع مورد نیاز کاهش می یابد. اما در نسبتهای پرپود کوچک، زمانیکه زمان تناوب ساختمان مرجع به ساختمان مجاور آن نزدیک می شود، با افزایش میزان خروج از مرکزیت ساختمان مرجع افزایش درز انقطاع را شاهد هستیم.

اشکال ب-۲:



شکل (۹) - ساختمان a، ۲۰ طبقه

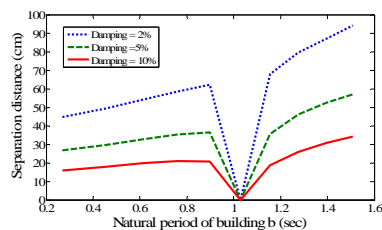


شکل (۱۰) - ساختمان a، ۱۴ طبقه

با مشاهده اشکال (۸) الی (۱۰) در می یابیم که در نسبتهای زمان تناوب بزرگ (اختلاف زیاد بین زمان تناوب ساختمان مرجع و ساختمان مجاور) افزایش درصد خروج از مرکزیت سبب کاهش میزان درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان می گردد زیرا در چنین حالتی مود ارتعاشی پیچشی دو ساختمان مجاور هم تقریباً مشابه هم می گردد و همین مسئله سبب کاهش درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان می گردد. در اصل این حالت شبیه حالتی است که دو ساختمان با فرض رفتار برشی، دارای مودهای ارتعاشی یکسانی باشند. در چنین حالتی به روش ارتعاشات پیشا نیازی به تعبیه درز انقطاع نمی باشد.

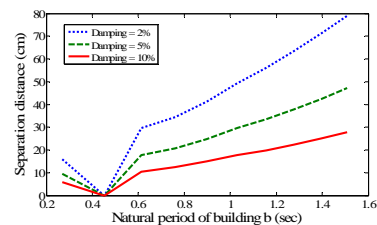
• تاثیر میرایی

به منظور بررسی تاثیر میرایی بر درز انقطاع دو ساختمان هم جوار، مقادیر ضریب میرایی به ترتیب ۲٪، ۵٪ و ۱۰٪ در نظر گرفته می شود. در این بررسی، تعداد طبقات ساختمان a ثابت فرض شده و تعداد طبقات ساختمان b به ترتیب ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ طبقه در نظر گرفته می شود. به طور مثال زمانیکه ساختمان a به ترتیب ۴ و ۱۲ طبقه دارد در اشکال ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل (۱۱) - تاثیر میرایی - ساختمان a، ۴ طبقه،

درصد خروج از مرکزیت ساختمان a، ۱۰٪



شکل (۱۲) - تاثیر میرایی - ساختمان a، ۱۲ طبقه،

درصد خروج از مرکزیت ساختمان a، ۱۰٪

با مشاهده اشکال فوق، با افزایش درصد میرایی میزان درز انقطاع مورد نیاز کاهش می یابد. از این پدیده به عنوان راهکاری جهت بحث مقاوم سازی ساختمانهایی که در کنار هم قرار گرفته و فاقد درز انقطاع کافی هستند استفاده می شوند.

مقایسه با ضوابط آیین نامه های لرزه ای

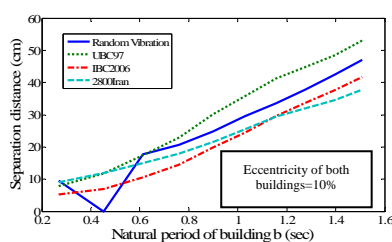
در تمامی آیین نامه های طرح لرزه ای ، مجموعه ضوابطی جهت تعیین درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان مجاور هم ارائه شده است که در این مقاله به منظور مقایسه نتایج حاصل از تحلیل به روش ارتعاشات پیشا با نتایج آیین نامه ای ، از آیین نامه های استاندارد ۲۸۰۰ ایران ، UBC97 و IBC2006 استفاده خواهد شد. به طور نمونه استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای ساختمانهای ۷ طبقه و کمتر، درز انقطاع را به صورت زیر در نظر می گیرد:

$$\Delta_{\min} = 0.005(H_a + H_b) \quad (63)$$

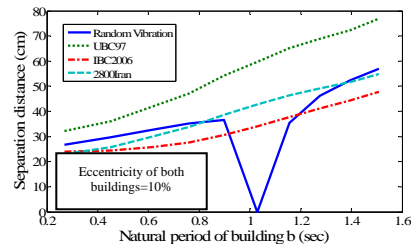
در این رابطه H_a و H_b به ترتیب ارتفاع ساختمان های a و b می باشد. برای ساختمانهای ۸ طبقه و بیشتر ، حداقل درز انقطاع به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\Delta_{\min} = 0.5(R_a \Delta_{w_a} + R_b \Delta_{w_b}) \quad (64)$$

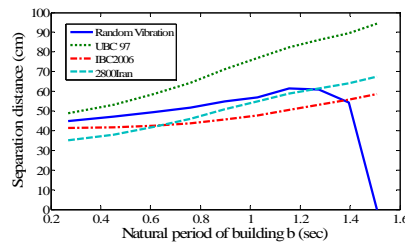
در رابطه بالا Δ_{w_a} و Δ_{w_b} به ترتیب تغییر مکان نسبی طرح ساختمان های a و b هستند. به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از درز انقطاع محاسبه به روش ارتعاشات پیشا با آیین نامه های فوق الذکر همانند بخش قبل تعداد طبقات ساختمان a را ثابت و طبقات ساختمان b از ۲ الی ۲۰ طبقه افزایش می یابند. درصد خروج از مرکزیت برای هر دو ساختمان ۱۰٪ فرض شده است. برای نمونه نتایج حاصل از بررسی برای حالتی که ساختمان مرجع دارای طبقات ۴ ، ۱۲ و ۲۰ طبقه می باشد در اشکال (۱۳) الی (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل (۱۳) نتایج مقایسه - ساختمان a ، ۴ طبقه



شکل (۱۴) نتایج مقایسه - ساختمان a ، ۱۲ طبقه



شکل (۱۵) نتایج مقایسه - ساختمان a ، ۲۰ طبقه

با مرجعه به اشکال فوق در می یابیم، درز انقطاع محاسبه شده توسط آیین نامه UBC97 در مقایسه با آیین نامه های IBC2006 و استاندارد ۲۸۰۰ ایران ، در اکثر نسبتهای زمان تناوب، بزرگتر برآورد میشود. درز انقطاع محاسبه شده به روش ارتعاشات پیشا به نسبت به آیین نامه IBC و استاندارد ۲۸۰۰ مقادیر بیشتری را برای درز انقطاع محاسبه می کند. البته در مقایسه با استاندارد ۲۸۰۰ نتایج اختلاف چندانی ندارند. ضمن اینکه تمامی مقادیر محاسبه شده توسط آیین نامه UBC از روش ارتعاشات پیشا نیز بزرگتر است.

نتایج و پیشنهادات

• نتایج

- بررسی نتایج حاصل از نمودارها و حالت های مختلفی که در بخش های ۳ و ۴ ارائه گردید عبارتند از:
 - ضمن ثابت بودن زمان تناوب یک ساختمان و افزایش زمان تناوب ساختمان دیگر درز انقطاع مورد نیاز افزایش می یابد. بدیهی است که چنانچه زمان تناوب دو ساختمان یکی باشد، بدین معنی که کلیه مشخصات دینامیکی دو ساختمان مجاور هم یکی باشد، مطابق روش ارتعاشات پیشا نیازی به در نظر گرفتن درز انقطاع بین دو ساختمان نمی باشد.
 - با افزایش درصد میرایی، درز انقطاع بین دو ساختمان کاهش می یابد. اثر میرایی در تعیین درز انقطاع نشان می دهد، از آنجا که در کلان شهرها اکثر ساختمانهای بلند پیش از تدوین آیین نامه های ساختمانی جدید ساخته شده اند و بالتبع آن درز انقطاع کافی بین دو ساختمان هم جوار رعایت نشده است، لذا می توان با تعبیه یکسری میراگرهای اضافی جدید به مجموعه سیستم سازه ای، ضمن کاهش پاسخ تغییر مکان سازه، تا حد قابل توجهی میزان درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان را کاهش داد.
 - ببررسی نمودارهای (۴) الی (۱۰) دو نتیجه زیر حاصل می گردد:

۳-۱- در نسبت‌های زمان تناوب بزرگ (اختلاف زیاد بین زمان تناوب ساختمان مرجع و ساختمان مجاور آن) افزایش درصد خروج از مرکزیت سبب کاهش میزان درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان می‌گردد زیرا در چنین حالتی مود ارتعاشی پیچشی دو ساختمان مجاور هم تقریباً مشابه هم می‌گردد و همین مسئله سبب کاهش درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان می‌گردد. در اصل این حالت شبیه حالتی است که دو ساختمان با فرض رفتار برشی، دارای مودهای ارتعاشی یکسانی باشند. در چنین حالتی به روش ارتعاشات پیشا نیازی به تعبیه درز انقطاع نمی‌باشد.

۳-۲- در نسبت‌های زمان تناوب کوچک (اختلاف اندک بین زمان تناوب ساختمان مرجع و ساختمان مجاور آن) افزایش درصد خروج از مرکزیت همزمان دو ساختمان سبب افزایش درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان می‌گردد.

۴- با مراجعه به اشکال (۱۳) الی (۱۵) در می‌یابیم، درز انقطاع محاسبه شده توسط آیین نامه UBC97 در مقایسه با آیین نامه های IBC2006 و استاندارد ۲۸۰۰ ایران، در اکثر نسبت‌های زمان تناوب، بزرگتر برآورد می‌شود.

۵- درز انقطاع محاسبه شده به روش ارتعاشات پیشاهمواره نسبت به آیین نامه IBC و استاندارد ۲۸۰۰ مقادیر بیشتری را برای درز انقطاع محاسبه می‌کند. البته در مقایسه با استاندارد ۲۸۰۰ نتایج اختلاف چندانی ندارند. ضمن اینکه تمامی مقادیر محاسبه شده توسط آیین نامه UBC از روش ارتعاشات پیشا نیز بزرگتر است.

۶- با افزایش زمان تناوب ساختمان مرجع، درز انقطاع محاسبه شده توسط آیین نامه IBC در مقایسه با استاندارد ۲۸۰۰ در نسبت های زمان تناوب بزرگ مقادیر بیشتری را برآورد می‌نماید.

• پیشنهادات

برای تحقیق های آینده پیشنهاد می‌شود :

- ۱- بررسی تاثیر نوع تحریکات زلزله اعم از باند باریک و باند پهن بر درز انقطاع مورد نیاز
- ۲- محاسبه درز انقطاع مورد نیاز برای تحریکات اعمالی زلزله در یک زاویه دلخواه α بر ساختمانهای مجاور
- ۳- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های تحلیل با یک مدل شبیه سازی شده به کمک میز لرزان
- ۴- بررسی رفتار غیر خطی ساختمان در محاسبه درز انقطاع بین دو ساختمان هم جوار
- ۵- بررسی اثر صلبیت پیچشی در محاسبه درز انقطاع مورد نیاز بین دو ساختمان همجوار

مراجع

1. Anagnostopoulos S.A. (1988). "Pounding of buildings in series during earthquakes." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 16, pp. 443-456.
2. Westermo, B.D. (1989). "The dynamics of interstructural connection to prevent pounding." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 18, pp. 687-699.
3. Anagnostopoulos S.A., Spiliopoulos K.V (1991). "An investigation of earth quake induced pounding between adjacent building." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 21, pp. 289-302.
4. Jeng V , Kasai K and Maison B. F. (1992). "A spectral difference method to estimate building separations to avoid pounding." *Earthquake Spectra.*, Vol. 8, pp. 201-223.
5. Lin J.H , (1997). "Separation distance to avoid seismic pounding of adjacent building ." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 26, pp. 395-403.
6. Hao H, SE-Rong Zhang , (1999). "Spatial ground motion effect on relative displacement of adjacent building structures ." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 28, pp. 333-349.
7. Hao H , Shen J (2001). "Estimation of relative displacement of two adjacent asymmetric structures." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 30, pp. 81-96.
8. Garcia D.L , (2005). "Critical building separation distance in reducing pounding risk under earthquake excitation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 27, pp. 393-396.
9. Davenport A.G. (1964). "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading." *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Vol. 28, pp. 187-196.
10. Tajimi H (1960). A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake. *Proc. 2d world conf ; Earthquake Eng Tokyo and Kyoto.*, Vol. 2, pp. 781-798.
11. 1997 Uniform Building Code ; UBC 1997
12. 15- 2006 International Building Code ; IBC 2006
۱۳. آیین نامه طرح ساختمان ها در برابر زلزله ، استاندارد ۲۸۰۰ ، ویرایش سوم ، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، ۱۳۸۴