مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره نوزدهم، شماره ۱، سال ۱۳۹۸

روش تقریبی برای تحلیل لرزه‌ای شبکه‌های دولایه

حسن حاجی‌کاظمی[۱]، مهرزاد شریفیان[۲]، مهرداد شریفیان[۳]

۱- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استادیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی قوچان
۳- استادیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی قوچان

m.sharifian@qiet.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/٤/۱۱] تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

چکیده

پاسخ دینامیکی شبکه‌های دولایه را می‌توان با به کارگیری نرم افزارهای مبتنی بر روش اجزای محدود به دست آورد. از سوی دیگر، به روش‌های تقریبی که به آسانی و سرعت تخمین مناسبی از رفتار دینامیکی سازه‌ها و از جمله شبکه‌های دولایه فراهم آورند، نیز نیاز است. در این مقاله، یک روش تقریبی برای تحلیل لرزه‌ای شبکه های دولایه با طرح مربع روی مربع فضایی و با پلان مربع یا مستطیل و دارای تکیه‌گاه‌های ساده در پیرامون سازه، پیشنهاد می‌شود. این روش توانایی تخمین کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم و نیز نیروهای لرزه ای حاصل از شتاب قائم زمین لرزه در شبکه‌های دولایه را دارد. برای بررسی توانایی روش پیشنهادی، ۲۱ مدل از شبکه‌های دولایه با روش دقیق و نیز شیوه تقریبی پیشنهادی تحلیل دینامیکی می‌شود و پاسخ‌های بدست آمده باهم سنجش می‌شوند. یافته‌ها نشان دهنده دقت خوب پاسخ‌های روش تقریبی رابطه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های دولایه، تحلیل لرزه‌ای، روش تقریبی، فرکانس ارتعاش قائم.

۱- مقدمه

شبکه‌های دو لایه به طور معمول برای پوشش فضاهای بزرگ مانند سقف‌های استادیوم‌های ورزشی، مرکزهای فرهنگی، تالارهای کنفرانس، نمایشگاه‌ها، ایستگاه‌های راه آهن، آشیانه‌های هواپیماها، مرکزهای تفریحی و مواردی از این دست به کار می‌روند. در حال حاضر برای دهانه‌های تا ۱۰۰ متر، از این نوع سازه در صنعت استفاده شده است.

استفاده از سازه‌های فضاکار و از جمله شبکه‌های دولایه در دهه‌های اخیر افزایش یافته است و پژوهش‌های گوناگونی در مورد رفتار آن‌ها انجام شده است. افزون بر شبکه‌های دولایه متداول که جزئیات آن‌ها نخستین بار توسط مکوسکی [1]، بررسی شده است، شبکه‌های دولایه قابل گسترش نیز ارائه شد که چهار نمونه از مدل‌های پایه آن‌ها از نظر عملکرد زیر اثر بارهای ثقلی، توسط وُو و همکاران [2]، با شبکه‌های دولایه ثابت متداول سنجش شده است. بخشی از پژوهش‌های انجام شده روی سازه‌های فضاکار، مربوط به بررسی رفتار لرزه‌ای و تحلیل شبکه‌های دولایه اختصاص داشته است که در ادامه به پاره‌ای از آن‌ها اشاره می‌شود.

مارش [3]، در مورد شبکه‌های دولایه عنوان می‌کند، ترکیب حرکت‌های افقی و قائم زمین باعث ایجاد نیروهای

www.SID.ir

Archive of SID

محوری رفت و برگشتی فراتر از بار کمانشی شماری از عضوهای شبکه دولایه می‌شود، و نتیجه می‌گیرد که برای جلوگیری از این مسئله، عضوها را باید محافظه کارانه‌تر طراحی نمود. کاوه و سرواتی [4] از شبکه‌های عصبی برای ارزیابی تغییرشکل بیشینه، وزن و طراحی شبکه‌های دولایه مربعی استفاده نمودند و روش ویژه‌ای برای افزایش پایداری و سرعت حل پیشنهاد کردند. قلی‌زاده [5] برای بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های دولایه با درنظرگرفتن رفتار ناخطی، الگوریتمی مؤثری با روشی متوالی بر پایه الگوریتم گرگ خاکستری استخراج نمود. واعظی و عابدی [6] اثر نقص هندسی در طول عضوهای شبکه‌های دولایه گنبدی روی پایداری را با انجام تحلیل‌های ناخطی استاتیکی و دینامیکی بررسی نمودند؛ مشخص شد که سازوکار فروپاشی گنبدهای دولایه با نقص هندسی در طول عضوهای آن بستگی به نسبت ارتفاع به دهانه، موقعیت عضوهای بحرانی، مقدار سختی پس‌کمانشی عضوها و نیز مقدار نیروهای توزیع شده پس از کمانش عضوهای بحرانی دارد.

شبکه‌های دولایه حساس به نخریب پیش‌رونده به دلیل کمانش ناگهانی عضوهای فشاری است. رشیدیان و شیدایی [7] روشی برای بهبود رفتار شبکه‌های دولایه در برابر تخریب پیش‌رونده با افزایش مقاومت عضوهای لایه فشاری و کاهش مقاومت عضوهای لایه کششی پیشنهاد نمودند. در زمینه تخریب پیش‌رونده، فو و پارک [8] رفتار شکست شبکه‌های دولایه را با روش اجزای محدود و استفاده از روش‌های ضمنی و صریح در تحلیل و با در نظر گرفتن چندین سناریو شکست بررسی نمودند، و روش‌هایی برای بهبود عملکرد این سازه‌های فضاکار ارایه دادند.

در ساختمان‌های طبقاتی متداول، مودهای افقی و قائم به طور واضحی از یکدیگر جدا هستند و پاسخ افقی ساختمان حاکم بر نخستین مود ارتعاش است که به عنوان مود اصلی شناخته می‌شود و مؤلفه قائم زمین لرزه معمولاً اثر قابل توجهی بر سازه ندارد. در حالی که در سازه‌های فضاکار به علت طبیعت پیچیده سازه، مؤلفه قائم زمین لرزه بیشترین تأثیر را بر رفتار سازه دارد [9].

روش‌های مختلفی برای تحلیل لرزه‌ای شبکه‌های دولایه ارائه شده است که دو نمونه آن روش ضریب کنش زلزله و روش ضریب نیروی لرزه‌ای است. روش‌های مزبور برای محاسبه نیروهای ناشی از شتاب قائم زمین لرزه و برای شبکه‌های دولایه با تکیه‌گاهها در پیرامون سازه، کاربرد دارند [10,11]. در مورد تحلیل دینامیکی تقریبی شبکه‌های دولایه نیز روش‌هایی ارائه شده است. دو نمونه از روش‌های تقریبی را الشیخ [12]، با استفاده از شبیه سازی به تیر معادل برای شبکه‌های دولایه با عملکرد یک طرفه و شبیه‌سازی به صفحه معادل برای شبکه‌های دولایه با عملکرد دوطرفه، ارائه داده است که در آن‌ها پس از شبیه‌سازی شبکه دولایه به محیط پیوسته معادل از معادله دیفرانسیلی تعادل دینامیکی استفاده می‌کند و فرکانس‌های ارتعاش قائم شبکه‌های دولایه را تخمین می‌زند.

لازم به توضیح است که پاسخ دینامیکی شبکه‌های دولایه را به وسیله نرم افزارهایی که از روش اجزای محدود بهره می‌جویند، می‌توان به دست آورد، امّا به روش‌های تحلیل تقریبی که به آسانی و سرعت تخمین مناسبی از رفتار دینامیکی سازه‌ها فراهم آورند، نیاز است. دلایل این نیاز را می‌توان به شرح زیر دانست:

۱ – فراهم کردن تخمین مناسبی از رفتار دینامیکی در مرحله طراحی نخستین که اندازه و ابعاد به آسانی اصلاح شود.

۲ – خروجی برنامه‌های رایانه ای وارسی شود.

در این مقاله، یک روش تقریبی تحلیل لرزه‌ای که مناسب برای شبکه‌های دولایه با طرح مربع روی مربع فضایی و با پلان مربع یا مستطیل و دارای تکیه‌گاه‌های ساده در پیرامون سازه می‌باشد، پیشنهاد می‌شود. این روش براساس شبیه‌سازی شبکه‌های دولایه به تیر و صفحه معادل است که با استفاده از روش رایلی، کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم شبکه‌های دولایه را به دست می‌آورد و با بهره‌جویی از رابطه‌های دینامیک سازه‌ها و تخمین تابع شکل نخستین مود ارتعاش قائم در شبکه های دولایه، نیروهای لرزه‌ای حاصل از شتاب قائم زمین لرزه را تخمین می‌زند.

www.SID.ir

Archive of SID

۲- تخمین کوچکترین فرکانس سازه

شبکه‌های دولایه که بیشتر از عضوهای خرپایی و گره‌ها تشکیل شده‌اند را می‌توان سیستم‌های با جرم‌های متمرکز درنظرگرفت. از آنجا که بارهای مرده و زنده معمولاً به گره‌ها وارد می‌شوند، در نتیجه در صورتی که تنها تغییرمکان قائم گره‌های دارای بار به عنوان درجه‌های آزادی در نظرگرفته شود و شبکه‌های دولایه به عنوان سیستم‌های یک درجه آزادی کلی با جرم های متمرکز فرض شود، می‌توان رابطه‌های زیر را برای حرکت ارتعاش آزاد در نظر گرفت:

$$\{w\} = Z(t)\{\phi\} \quad (۱)$$

$$\{w\} = Z_0\{\phi\}\sin\ \omega_n t \quad (۲)$$

$$\{\dot{w}\} = \omega_n Z_0\{\phi\}\cos\ \omega_n t \quad (۳)$$

که در رابطه های فوق، $\{w\}$ بردار تغییرمکان، $\{\dot{w}\}$ بردار سرعت، $\{\phi\}$ بردار شکل است که منحنی تغییر شکل را تعریف می‌کند، Z_0 دامنه مختصه کلی $Z(t)$ و ω_n فرکانس طبیعی ارتعاش است.

اکنون، به منظور برآورد کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم شبکه‌های دولایه، از روش رایلی استفاده می‌شود. این روش بر پایه اصل بقای انرژی تعیین شده یعنی، انرژی کل در یک سیستم نامیرای تحت ارتعاش، ثابت است. برای استفاده از روش رایلی نیاز به انرژی پتانسیل بیشینه و انرژی جنبشی بیشینه است که بدین منظور باید بردار $\{\phi\}$ برای شبکه‌های دولایه تعیین شود.

دقت فرکانس طبیعی محاسبه شده با روش رایلی، بستگی کامل به تابع شکل پنداشته شده برای بیان تقریبی شکل مود ارتعاش دارد. در حالت کلی، هر تابعی که شرایط مرزی را برآورده سازد، می توان به عنوان تابع شکل انتخاب نمود. یک انتخاب معمول برای تابع شکل، تابعی است که به کمک منحنی تغییرشکل یک دسته نیروهای استاتیکی به دست می‌آید و این نیروهای استاتیکی را می‌توان بارهای استاتیکی وارد به سازه درنظرگرفت (بارهای مرده و درصدی از بارهای زنده). استفاده از چنین تابع شکلی دو حسن دارد، یکی شرایط مرزی تغییرشکلی، خود به خود برآورده می‌شود و دیگر این که امکان محاسبه انرژی کرنشی براساس بارهای وارده به وجود می‌آید [13]. در مورد شبکه های دولایه چنانچه بردار $\{w_s\}$ بردار تغییرمکان گره‌های دارای بار شبکه دولایه زیر اثر ۱۰۰ درصد بارهای مرده و ۵۰ درصد بارهای زنده (بارهای مورد نظر در محاسبه نیروهای زمین لرزه) در نظرگرفته شود، می‌توان کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم شبکه‌های دولایه را به‌صورت زیر به دست آورد:

$$\{w\} = \{w_s\}\sin\ \omega_n t \quad (٤)$$

$$\{w_s\} = Z_0\{\phi\} \Rightarrow \{\phi\} = \frac{\{w_s\}}{Z_0} \quad (٥)$$

$$V_{\max} = \frac{1}{2}\{P\}^T\{w_s\} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} p_i w_{si} \quad ; \quad p_i = m_i g \quad (٦)$$

$$V_{\max} = \frac{1}{2} g \sum_{i=1}^{n} m_i w_{si} \quad (٧)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2}\omega_n{}^2\{m\}^T\{w_s{}^2\} = \frac{1}{2}\omega_n{}^2\sum_{i=1}^{n} m_i w_{si}{}^2 \quad (٨)$$

اکنون، با برابر قرار دادن انرژی پتانسیل بیشینه ($V_{\max}$) و انرژی جنبشی بیشینه ($T_{\max}$) می‌توان نوشت:

$$V_{\max} = T_{\max} \Rightarrow \omega_n{}^2 = g\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i w_{si}}{\sum_{i=1}^{n} m_i w_{si}{}^2} \quad (٩)$$

$$\omega_n = \sqrt{g\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i w_{si}}{\sum_{i=1}^{n} m_i w_{si}{}^2}} \quad (١٠)$$

در رابطه‌های بالا، w_{si} خیز گره iام از شبکه دولایه زیر اثر ۱۰۰ درصد بارهای مرده به اضافه ۵۰ درصد بارهای زنده، m_i جرم گره iام از شبکه دولایه حاصل از ۱۰۰ درصد بارهای مرده به اضافه ۵۰ درصد بارهای زنده، g شتاب جاذبه زمین، ω_n کوچکترین فرکانس زاویه ای طبیعی ارتعاش قائم شبکه دولایه است. لازم به توضیح است که در آیین‌نامه کشور چین نیز رابطه‌ای مشابه رابطه (۱۰) برحسب فرکانس دوره‌ای f برای شبکه‌های دولایه ارائه شده است [11]. به منظور استفاده از رابطه (۱۰)، نیاز به محاسبه خیز گره‌های دارای بار از شبکه دولایه و در نتیجه تخمین سطح مقطع عضوهای شبکه دولایه می باشد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۱ تخمین سطح مقطع عضوهای شبکه دولایه

برای تخمین سطح مقطع عضوهای شبکه دولایه از شبیه‌سازی شبکه دولایه به تیر و صفحه معادل استفاده می‌شود. در این شبیه‌سازی از عملکرد سازه‌ای عضوهای جان چشم‌پوشی می‌شود. همچنین، پنداشته می‌شود که بارهای وارد به شبکه دولایه، از جمله وزن شبکه، به صورت گسترده یکنواخت است که با q نمایش داده می‌شوند. اکنون، نوار میانی در امتداد محور x و به عرض یک عضو افقی مانند شکل(۱) از شبکه دولایه در نظرگرفته شده و به ترتیب زیر به تیر معادل شبیه‌سازی می‌شود:

$$I_x(x) = 2 * A_x(x) * (\frac{h}{2})^2 = \frac{1}{2} A_x(x) h^2 \qquad (۱۱)$$

$$q_x = q \frac{L_y^4}{L_x^4 + L_y^4} \qquad (۱۲)$$

$$q'_x = q_x L_e \qquad (۱۳)$$

که، $I_x(x)$ ممان اینرسی تیر معادل با صرف‌نظر از عضوهای جان شبکه دولایه، $A_x(x)$ سطح مقطع هر عضو افقی از شبکه دولایه و در امتداد محور x، L_x طول شبکه در امتداد محور x، L_y طول شبکه در امتداد محور y، L_e طول هر عضو افقی از شبکه دولایه، q بار گسترده یکنواخت وارد به شبکه دولایه، q_x بار گسترده یکنواخت توزیع شده در امتداد x، q'_x بار گسترده یکنواخت خطی وارد به عرض یک پانل و در امتداد x است.

اکنون می‌توان تیر معادل را براساس بار وارد به آن طراحی نمود. بدین منظور ابتدا فرض می شود که سطح مقطع وسط تیر برابر با $2A_{0x}$ است، یعنی سطح مقطع هر عضو افقی شبکه دولایه در امتداد محور x و در وسط دهانه برابر A_{0x} است که با ثابت نگه داشتن تنش‌های حاصل از خمش در طول تیر معادل می‌توان سطح مقطع دیگر عضوهای شبکه دولایه در امتداد محورx و در امتداد نوار مورد نظر از شبکه دولایه را برحسب A_{0x} به دست آورد:

$$M(x) = \frac{q'_x L_x}{2} x - \frac{q'_x}{2} x^2 \qquad (۱۴)$$

$$\sigma = \frac{M(x) * (\frac{h}{2})}{I_x(x)} = \frac{\frac{q'_x L}{2} x - \frac{q'_x}{2} x^2}{A_x(x) h} \qquad (۱۵)$$

که تنش بیشینه ناشی از خمش در میانه دهانه خواهد بود:

$$\sigma_{c,max} = \frac{q'_x L_x^2}{8 A_{0x} h} \qquad (۱۶)$$

شکل ۱. نمایشی از روش شبیه‌سازی به منظور تخمین سطح مقطع عضوهای افقی شبکه دولایه

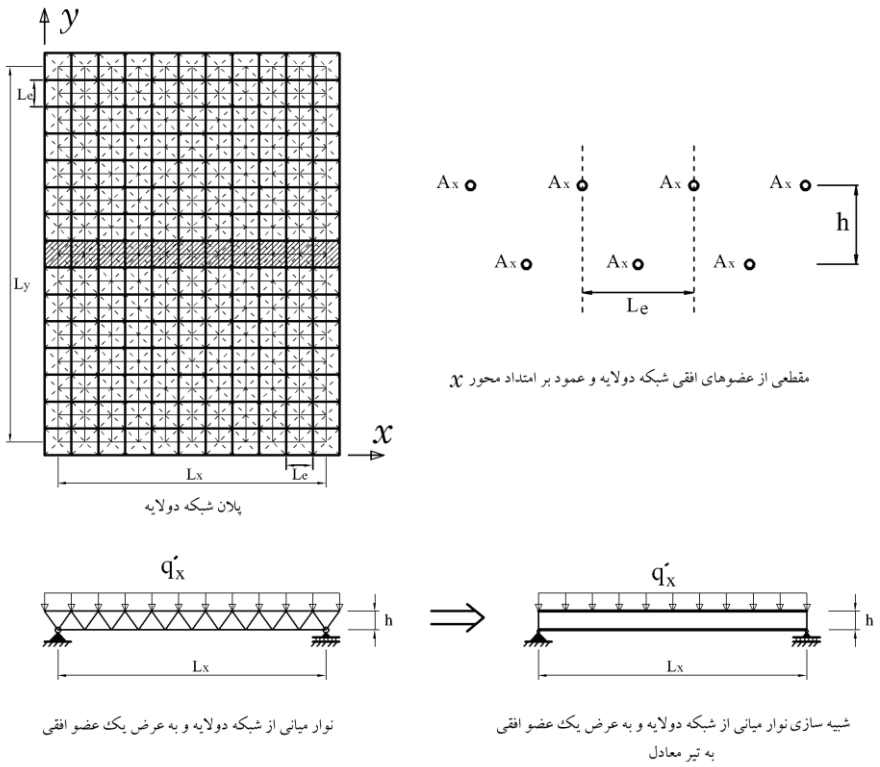

Fig. 1. Modeling in order to estimate the cross sectional area of the horizontal members of the double layer

www.SID.ir

Archive of SID

اکنون، با برابر قرار دادن تنش قائم ناشی از خمش در هر نقطه‌ای از تیر معادل با تنش قائم ناشی از خمش در میانه دهانه تیر معادل خواهیم داشت:

$$A_x(x) = 4A_{0x}\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right) \qquad (۱۷)$$

از رابطه (۱۷) مقدار سطح مقطع عضوهای نوار میانی از شبکه دولایه و در امتداد محور x، برحسب سطح مقطع وسط دهانه و در امتداد محور x به‌دست می‌آید. چنانچه پنداشته شود که توزیع سطح مقطع عضوهای امتداد x در امتداد عمود بر آن نیز از تابعی مشابه امتداد x پیروی می کند، می‌توان سطح مقطع تمام عضوهای با امتداد x را در کل شبکه دولایه به صورت زیر تخمین زد :

$$A_x(x,y) = 16\,A_{0x}\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y}{L_y} - \frac{y^2}{L_y^2}\right) \qquad (۱۸)$$

رابطه (۱۸) سطح مقطع عضوهای امتداد x را در کل شبکه دولایه و بر حسب سطح مقطع وسط دهانه و در امتداد x تخمین می‌زند. با استفاده از این رابطه می‌توان سطح مقطع عضوهای امتداد y را نیز بر حسب سطح مقطع وسط دهانه و در امتداد y ، به‌صورت زیر تخمین زد:

$$A_y(x,y) = 16\,A_{0y}\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y}{L_y} - \frac{y^2}{L_y^2}\right) \qquad (۱۹)$$

در استفاده از رابطه های (۱۸ و ۱۹) نیاز به تعیین مقدار A_{0x} و A_{0y} است. در ادامه، روشی به منظور تخمین مقدارهای مزبور بر پایه روش تنش مجاز و پیشنهاد آیین نامه AISC پیشنهاد می‌شود.

۲-۱-۱ تخمین مقدار A_{0x} و A_{0y}

در صورتی که از روش تنش مجاز و آیین نامه AISC برای طراحی شبکه دولایه استفاده شود، می‌توان تنش بیشنه ایجاد شده در عضو با سطح مقطع A_{0x} را برابر تنش فشاری مجاز قرار داد ($F_a = \sigma_{c,\max}$) و A_{0x} را به‌صورت زیر یافت:

$$A_{0x} = \frac{q'_x L_x^2}{8F_a h} \qquad (۲۰)$$

که F_a تنش مجاز فشاری در عضو با طول L_e و سطح مقطع A_{0x} است و به‌ترتیب زیر محاسبه می‌شود [14]:

$$F_a = \frac{3}{5}\left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right)F_y \quad ; \quad \lambda \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \qquad (۲۱\text{-a})$$

$$F_a = \frac{3}{5}(0.877F_e) \quad ; \quad \lambda > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \qquad (۲۱\text{-b})$$

$$\lambda = \frac{kL_e}{r}; \quad F_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

در رابطه‌های بالا λ لاغری عضو، k ضریب طول مؤثر عضو که برای عضوهای با دو انتهای مفصلی $k = 1$ می‌شود و r شعاع ژیراسیون مقطع است.

در شبکه‌های دولایه به طور معمول از عضوهای با مقطع لوله استفاده می‌شود و چنانچه پنداشته شود شعاع مقطع‌های مورد استفاده ۱۰ برابر ضخامت لوله و $k = 1$ باشد، می‌توان رابطه بین لاغری عضو و سطح مقطع عضو را به ترتیب زیر به دست آورد:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \qquad (۲۲)$$

$$t \le 0.1R \Rightarrow \begin{cases} A = 2\pi Rt \\ I = \pi R^3 t \end{cases} \qquad (۲۳)$$

$$r = \sqrt{\frac{\pi R^3 t}{2\pi Rt}} \Rightarrow r = \frac{R}{\sqrt{2}} \qquad (۲۴)$$

$$\lambda = \frac{L_e}{r} \Rightarrow \lambda = \frac{\sqrt{2}L_e}{R} \qquad (۲۵)$$

$$t = 0.1R \Rightarrow A = 0.2\pi R^2 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{A}{0.2\pi}} \qquad (۲۶)$$

اکنون، با جایگذاری رابطه (۲۶) در رابطه (۲۴) ضریب لاغری عضو بر حسب طول و سطح مقطع عضو بدست می‌آید:

$$\lambda = \sqrt{\frac{0.4\pi}{A}}L_e \qquad (۲۷)$$

در رابطه‌های بالا، t ضخامت، R شعاع، I ممان اینرسی و A مساحت مقطع عضو است، که مقدار A را می‌توان از برابر قراردادن تنش کششی بیشینه ایجاد شده در شبکه در راستای x و تنش کششی مجاز به صورت زیر به‌دست آورد:

$$0.6F_y = \frac{\frac{q'_x L_x^2}{8}\frac{h}{2}}{A\frac{h^2}{2}} = \frac{q'_x L_x^2}{8Ah} \quad ; \quad A = \frac{q'_x L_x^2}{4.8F_y h} \qquad (۲۸)$$

www.SID.ir

Archive of SID

اکنون، با جایگذاری رابطه (۲۸) در رابطه (۲۷) می‌توان لاغری عضو مورد نظر را با رابطه زیر یافت و سپس، با استفاده از آن مقدار A_{0x} را محاسبه نمود.

$$\lambda = \frac{L_e}{L_x}\sqrt{\frac{1.92\,\pi F_y h}{q'_x}} \qquad (۲۹)$$

$$q'_x = qL_e\frac{L_y^4}{L_x^4 + L_y^4} \qquad (۳۰)$$

اکنون، با استفاده از رابطه‌های بدست آمده، می‌توان سطح مقطع تمام عضوهای افقی شبکه دولایه را تخمین زد. برای استفاده از این رابطه‌ها تنها نیاز به تعیین بارهای وارد به شبکه دولایه است. مقدار بارهای مرده حاصل از وزن پوشش و تأسیسات و نیز بارهای زنده معلوم هستند. بنابراین، تنها بارهای حاصل از وزن خود شبکه دولایه و بارهای لرزه‌ای حاصل از شتاب قائم زمین لرزه مجهول است که باید تخمین زده شوند. در اینجا، چنانچه مجموع بارهای حاصل از وزن شبکه دولایه و بارهای لرزه‌ای وارد به آن برابر بارهای مرده حاصل از وزن پوشش و تأسیسات پنداشته شود، مقدار بار گسترده یکنواخت وارد به شبکه دولایه برای استفاده در تخمین سطح مقطع عضوهای شبکه برابر خواهد بود با رابطه زیر:

$$q = 2\,DL + LL \qquad (۳۱)$$

که، q بارگسترده یکنواخت وارد به شبکه دولایه است که در تخمین سطح مقطع عضوهای شبکه دولایه به کار می‌رود، DL بار مرده وارد به شبکه دولایه است که حاصل از وزن پوشش و تأسیسات است و LL بار زنده وارد به شبکه دولایه را نشان می‌دهد.

در این مرحله، می‌توان گام‌های مورد نیاز برای تعیین $A_x(x,y)$ را به‌صورت زیر کوتاه نمود:

۱- $q = 2\,DL + LL$

۲- $q'_x = qL_e\dfrac{L_y^4}{L_x^4 + L_y^4}$

۳- $\lambda = \dfrac{L_e}{L_x}\sqrt{\dfrac{1.92\,\pi F_y h}{q'_x}}$

۴- F_a (رابطه ۲۱)

۵- $A_{0x} = \dfrac{q'_x L_x^2}{8F_a h}$

۶- $A_x(x,y) = 16\,A_{0x}\left(\dfrac{x}{L_x} - \dfrac{x^2}{L_x^2}\right)\left(\dfrac{y}{L_y} - \dfrac{y^2}{L_y^2}\right)$

لازم به توضیح است که $A_y(x,y)$ نیز به همین روش و با قرار دادن زیرنویس y به‌جای x و برعکس به دست می‌آید.

۲-۲- تخمین وزن شبکه دولایه

برای تخمین خیز شبکه دولایه، نیاز به تعیین وزن شبکه دولایه است. برای این منظور می‌توان از رابطه‌های تخمین سطح مقطع عضوهای شبکه دولایه بهره برد. به عنوان نمونه، در شبکه‌های مربع روی مربع فضایی و با طول عضوهای یکسان و با پلان مربعی، اگر محاسبه مقدار وزن شبکه در گره‌های دارای بار، مورد نظر باشد (تنها گره‌ها در لایه بالایی شبکه دولایه به دلیل اعمال بارهای خارجی به آن‌ها برای تحلیل دینامیکی در نظر گرفته می‌شوند)، به ازای هر گره در لایه بالا، ۸ عضو وجود دارد که با یکسان پنداشتن سطح مقطع عضوهای مربوط به هر گره، بار حاصل از وزن شبکه دولایه در گره i ام از لایه بالا به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$WG_i = 128\,\gamma L_e A_{0x}\left(\frac{x_i}{L_x} - \frac{x_i^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y_i}{L_y} - \frac{y_i^2}{L_y^2}\right) \qquad (۳۲)$$

که، WG_i مقدار وزنی از شبکه که در گره i ام از لایه بالایی شبکه دولایه تخمین زده، x_i, y_i مختصات گره i ام از لایه بالا می باشد (محورهای مختصات با توجه به شکل (۱) انتخاب شوند.) و γ وزن مخصوص مصالح مورد استفاده برای ساخت عضوهای شبکه دولایه است. در نتیجه، اگر کل وزن شبکه دولایه با WG نشان داده شود، خواهیم داشت:

$$WG = \sum_{i=1}^{n} WG_i \qquad (۳۳)$$

۲-۳- تخمین خیز شبکه دولایه

در این قسمت، خیز شبکه دولایه برای بدست آوردن کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم به صورت تقریبی محاسبه می‌شود. روش کار بدین ترتیب است که نخست خیز تیر معادل که در بخش(۲-۱) شبیه سازی شد، محاسبه می‌شود و از تابع شکل بدست آمده، برای محاسبه خیز در کل شبکه دولایه استفاده می‌شود. سرانجام، تابع شکلی برپایه آن برای

www.SID.ir

Archive of SID

تغییر شکل شبکه دولایه به دست می‌آید. بارهای وارد به شبکه دولایه در مرحله نخست به صورت گسترده یکنواخت و در مرحله بعدی با اعمال تغییرات وزن شبکه در امتداد دهانه‌ها درنظرگرفته می‌شود.

۲-۳-۱- تخمین خیز برای بارهای گسترده یکنواخت

برای تخمین خیز با اعمال بارهای گسترده یکنواخت، نخست نوار میانی از شبکه دولایه مشابه شکل (۱) به تیر معادل شبیه سازی می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است. در این قسمت بارهای گسترده یکنواخت وارد به شبکه دولایه با p نشان داده می‌شود.

$$A_x(x) = 4A_{0x}\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right)$$

$$I_x(x) = 2A_x(x)\left(\frac{h}{2}\right)^2 = \frac{1}{2}A_x(x)h^2$$

$$p_x = p\frac{L_y^4}{L_x^4 + L_y^4} \qquad (۳۴)$$

$$p'_x = p_x L_e \qquad (۳۵)$$

که p بارگسترده یکنواخت وارد به شبکه دولایه، p_x بار گسترده یکنواخت توزیع شده در امتداد x و p'_x بار گسترده یکنواخت خطی وارد به عرض یک پانل و در امتداد x است. در نتیجه، خیز تیر معادل به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$w(x) = \frac{p'_x L_x^4}{8EA_{0x}h^2}\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right) \qquad (۳۶)$$

رابطه (۳۶) خیز شبکه دولایه را در نوار میانی که در شکل (۱) نشان داده شده است، ارائه می‌دهد. برای تخمین خیز در کل شبکه دولایه می‌توان تابع شکلی بر اساس رابطه (۳۳) برای امتداد عمود بر آن نیز پنداشت و خیز در کل شبکه را به صورت زیر به‌دست آورد:

$$w(x,y) = \frac{p'_x L_x^4}{8EA_{0x}h^2}\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right).\left[4\left(\frac{y}{L_y} - \frac{y^2}{L_y^2}\right)\right]$$

$$w(x,y) = \frac{p'_x L_x^4}{2EA_{0x}h^2}\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y}{L_y} - \frac{y^2}{L_y^2}\right) \qquad (۳۷)$$

رابطه (۳۷) مقدار خیز در کل شبکه دولایه را تخمین می‌زند که با استفاده از آن می‌توان تابع شکلی برای خیز شبکه دولایه زیر اثر بارهای گسترده یکنواخت را از تقسیم تابع خیز بر مقدار خیز بیشینه در مرکز شبکه دولایه به صورت زیر به دست آورد:

شکل ۲. شبیه سازی شبکه دولایه به منظور تخمین خیز

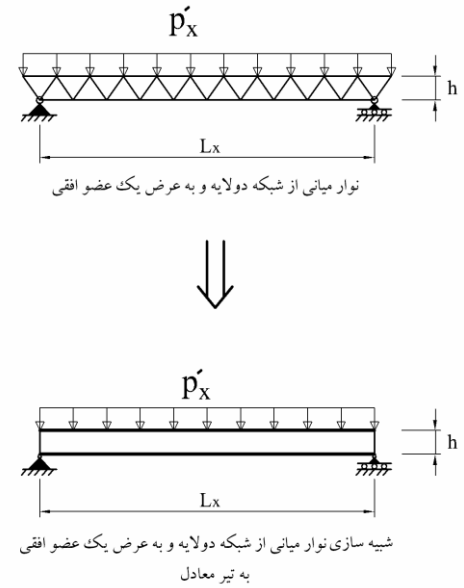

Fig. 2. Modeling of the double layer to estimate the deflection

$$\phi(x,y) = \frac{w(x,y)}{w\left(\frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}\right)}$$

$$\phi(x,y) = 16\left(\frac{x}{L_x} - \frac{x^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y}{L_y} - \frac{y^2}{L_y^2}\right) \qquad (۳۸)$$

که $\phi(x,y)$ تابع شکل برای خیز شبکه دولایه زیر اثر بارهای گسترده یکنواخت است. اکنون، می‌توان خیز شبکه دولایه را در گره‌های مورد نظر برای محاسبه (گره‌های دارای جرم که معمولاً در لایه بالایی قرار دارند.) کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم با رابطه زیر یافت:

$$w_{si}(x_i, y_i) = \frac{p'_x L_x^4}{2EA_{0x}h^2}\left(\frac{x_i}{L_x} - \frac{x_i^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y_i}{L_y} - \frac{y_i^2}{L_y^2}\right) \qquad (۳۹)$$

$$p'_x = pL_e\frac{L_y^4}{L_x^4 + L_y^4} \qquad (۴۰)$$

$$p = DL + 0.5LL + \frac{WG}{L_x * L_y} \qquad (۴۱)$$

که در رابطه های بالا، $w_{si}(x_i, y_i)$ مقدار خیز شبکه در گره i ام و به مختصات (x_i, y_i)، DL بار مرده گسترده یکنواخت بر یکه سطح و ناشی از وزن پوشش و تأسیسات، LL بار

www.SID.ir

Archive of SID

زنده گسترده یکنواخت بر یکه سطح، WG کل وزن شبکه دولایه که با استفاده از رابطه (۳۳) تخمین زده می‌شود.

لازم به توضیح است که هدف از پیشنهاد روشی برای تخمین خیز شبکه دولایه، استفاده از آن برای محاسبه کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم و همچنین به‌دست آوردن تابع شکل تقریبی تغییر شکل شبکه دولایه برای استفاده در محاسبه بارهای لرزه‌ای در بخش‌های آینده است. در ادامه، خیز شبکه دولایه زیر اثر وزن خود با استفاده از رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود.

۲-۳-۲ تخمین خیز با اعمال تغییرات وزن شبکه

چنانچه خیز شبکه دولایه را با اعمال تغییرات وزن شبکه دولایه در امتداد دهانه‌ها با استفاده از رابطه (۳۲) و به روشی مشابه با قسمت پیشین محاسبه شود، می‌توان به رابطه زیر برای گره i ام رسید:

$$w_{si}(x_i,y_i)=\frac{\bar{p}'_x L_x^4}{2EA_{0x}h^2}\left(\frac{x_i}{L_x}-\frac{x_i^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y_i}{L_y}-\frac{y_i^2}{L_y^2}\right)+\frac{9216}{10092}\frac{\bar{W}}{EA_{0x}h^2}\left(\frac{7}{6}\frac{x_i}{L_x}-\frac{x_i^2}{L_x^2}-\frac{1}{3}\frac{x_i^3}{L_x^3}+\frac{1}{6}\frac{x_i^4}{L_x^4}\right)\left(\frac{7}{6}\frac{y_i}{L_y}-\frac{y_i^2}{L_y^2}-\frac{1}{3}\frac{y_i^3}{L_y^3}+\frac{1}{6}\frac{y_i^4}{L_y^4}\right) \quad (۴۲)$$

$$\bar{p}'_x=\bar{p}L_e\frac{L_y^4}{L_x^4+L_y^4}$$

$$\bar{p}=DL+0.5LL$$

$$\bar{W}=8\gamma A_{0x}\frac{L_y^4}{L_x^4+L_y^4}$$

۳- تخمین نیروهای حاصل از شتاب قائم زمین لرزه

در تحلیل لرزه‌ای دینامیکی سازه‌ها به روش برهم‌نهی مودها، مجهول‌های اصلی را می توان فرکانس‌های طبیعی ارتعاش و شکل مودهای ارتعاش سازه دانست. با یافتن کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم شبکه‌های دولایه به صورت تقریبی، اکنون می‌توان با استفاده از تابع شکل به‌دست آمده برای تغییر شکل شبکه دولایه زیر اثر بارهای گسترده یکنواخت، نیروهای لرزه‌ای حاصل از شتاب قائم زمین لرزه با درنظرگرفتن نخستین مود ارتعاش قائم به روش تحلیل طیفی و با پنداشت این‌که شتاب قائم زمین لرزه $\frac{2}{3}$ شتاب افقی آن در نظرگرفته شود [10,11] به‌شرح زیر تخمین زده شود:

$$F_{EVi}=\frac{2}{3}m_i\phi_i\lambda S_a \quad (۴۳)$$

$$F_{EVi}=\frac{2}{3}\frac{L^2}{M}S_a$$

$$M=\sum_{i=1}^{n}m_i\phi_i^2\ ;\qquad \lambda=\frac{L}{M}\ ;\qquad L=\sum_{i=1}^{n}m_i\phi_i$$

که در رابطه‌های بالا، S_a مقدار شتاب وارد به سازه برپایه طیف مورد نظر و به ازای زمان تناوب $T=\frac{2\pi}{\omega_n}$ است، که در آن ω_n کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم شبکه دولایه است. همچنین، ϕ_iها مقدارهای شکل مود است که با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می‌شوند:

$$\phi_i=16\left(\frac{x_i}{L_x}-\frac{x_i^2}{L_x^2}\right)\left(\frac{y_i}{L_y}-\frac{y_i^2}{L_y^2}\right) \quad (۴۴)$$

که، x_i, y_i مختصات گره i ام از لایه بالا است. (محورهای مختصات با توجه به شکل (۱) انتخاب شوند.) در این روش گره‌های مورد نظر، گره‌هایی هستند که بارهای خارجی مانند وزن پوشش و بارهای برف به آن‌ها وارد می‌شوند که معمولاً در لایه بالا از شبکه دولایه قرار می‌گیرند. جرم در نظر گرفته شده برای گره‌های مزبور (m_i) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$m_i=\frac{(DL+0.5LL)L_e^2+WG_i}{g} \quad (۴۵)$$

که، DL بار مرده گسترده یکنواخت بر یکه سطح و ناشی از وزن پوشش و تأسیسات، LL بار زنده گسترده یکنواخت بر یکه سطح، WG_i مقدار وزنی از شبکه که در گره iام از لایه بالایی شبکه دولایه تخمین زده می‌شود و g شتاب جاذبه زمین است.

لازم به توضیح است که براساس آیین‌نامه بارگذاری ایران نیروی لرزه‌ای وارد به هر گره، با استفاده از این روش تقریبی به صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$F_{EVi}=\frac{2}{3}m_i\phi_i\lambda Bg\frac{AI}{R} \quad (۴۶)$$

که، B ضریب بازتاب بر پایه طیف طرح ایران، A نسبت شتاب مبنای طرح، I ضریب اهمیت سازه، R ضریب رفتار

www.SID.ir

Archive of SID

سازه می باشند و توصیه می‌شود که همواره از قسمت مسطح طیف طرح استفاده شود.

٤- بررسی نتایج روش تقریبی تحلیل لرزه ای برای ۲۱ مدل از شبکه های دولایه

به منظور بررسی روش تقریبی تحلیل لرزه‌ای، ۲۱ مدل از شبکه‌های دولایه با طرح مربع روی مربع فضایی، با طول عضوهای افقی و مورب یکسان، با پلان مربعی، دهانه‌های ۳۰ متر تا ٦۰ متر با گام ۵ متر و تعداد ۱۰، ۱۲ و ١٤ عضو افقی در امتداد دهانه در نظرگرفته می‌شود. بارهای مرده حاصل از وزن پوشش و تأسیسات ۵۰ کیلوگرم بر متر مربع، باربرف ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع است و بارهای لرزه‌ای بر پایه طیف طرح ایران در منطقه با خطر نسبی زیاد و تیپ خاک III محاسبه می‌شود و نیز با پنداشت ضریب رفتار ٦ و ضریب اهمیت ۱/۲ است. به منظور تحلیل و طراحی مدل‌ها، پنداشته می‌شود که عضوهای شبکه‌ها به صورت مفصلی به گره‌ها متصل می‌شوند، عضوها مستقیم هستند و بارهای وارد شده به گره‌های سازه‌ها وارد می‌آیند؛ در نتیجه، عضوهای شبکه دو نیرویی‌اند و تنها نیروهای داخلی محوری در آن‌ها ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، به علت استفاده از طیف طرح و تحلیل طیفی رفتار سازه خطی در نظرگرفته می‌شود و طراحی عضوهای شبکه‌ها بر اساس آیین‌نامه AISC-ASD، (و روش تنش‌مجاز) صورت می‌گیرد. برای تحلیل و طراحی مدل‌ها، از نرم‌افزار SAP2000 استفاده می‌شود و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده با روش پیشنهادی تحلیل لرزه ای تقریبی در نمودارهایی بررسی و سنجش می‌شود.

٤-۱- بررسی فرکانس ارتعاش

همان‌گونه که بیان شد، کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم را می‌توان با و بدون اعمال تغییرات وزن شبکه دولایه در امتداد دهانه‌های آن تخمین زد که در شکل های (۳، ٤ و ۵) تغییرات کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم با و بدون اعمال تغییرات وزن شبکه در امتداد دهانه ها و نیز کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم بدست آمده با نرمافزار SAP2000 نسبت به طول دهانه ارائه می‌شود. در نمودارهای مزبور:

- SAP : مربوط به فرکانس‌های ارتعاش بدست آمده با نرم افزار SAP2000 ؛
- APPROXIMATE 1 : مربوط به فرکانس های ارتعاش با روش تقریبی و با اعمال تغییرات وزن در محاسبه آن ها؛
- APPROXIMATE 2 : مربوط به فرکانس های ارتعاش با روش تقریبی و بدون اعمال تغییرات وزن در محاسبه آن‌ها؛
- N : تعداد عضوهای افقی در امتداد دهانه؛
- L : طول دهانه به متر و
- ω_n: کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم است.

نتایج به‌دست آمده از سنجش فرکانس‌های ارتعاش محاسبه شده با روش تقریبی و فرکانس‌های به دست آمده با روش دقیق، نشان می‌دهد که بیشینه خطا با درنظرگرفتن تغییرات وزن شبکه در امتداد دهانه ها ۱۵/۳۷٪ و بدون در نظر گرفتن تغییرات وزن شبکه در امتداد دهانه ها ۱۲/۵۱٪ است.

شکل ۳. نمودار کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم به طول دهانه و برای N=10

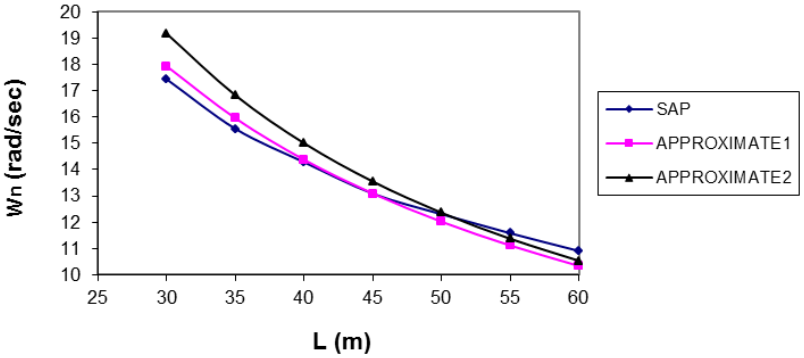

Fig. 3. Diagram of the smallest circular frequency of the vertical vibration with respect to the bay length, N=10

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ٤. نمودار کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم به طول دهانه و برای N=12

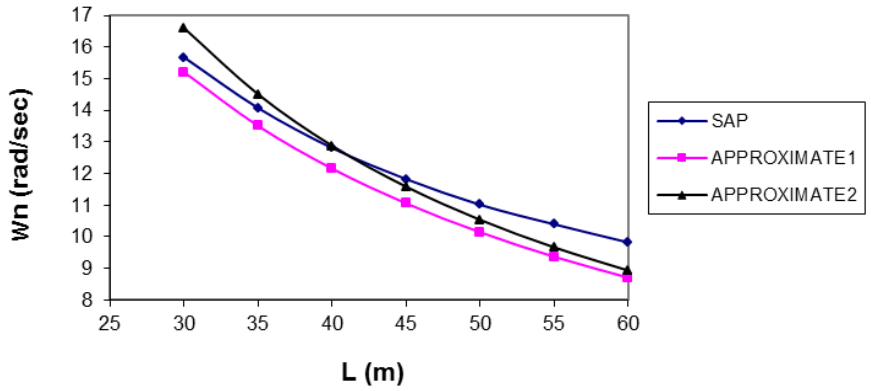

Fig. 4. Diagram of the smallest circular frequency of the vertical vibration with respect to the bay length, N=12

شکل ٥. نمودار کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم به طول دهانه و برای N=14

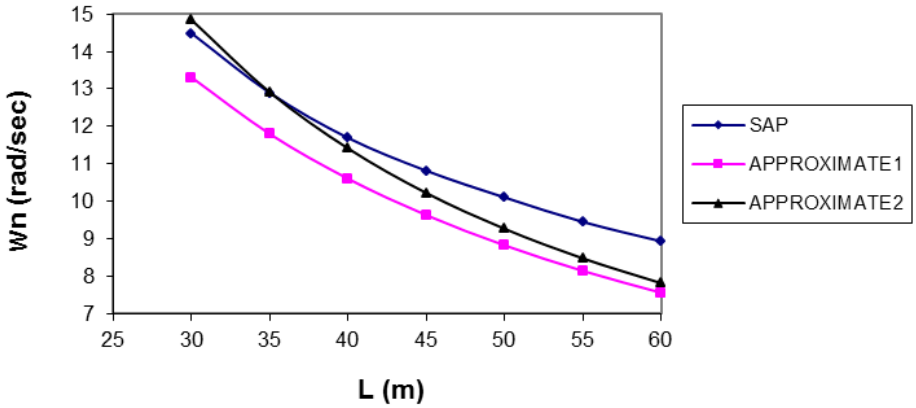

Fig. 5. Diagram of the smallest circular frequency of the vertical vibration with respect to the bay length, N=14

شکل ٦. نمودار تغییرات کل نیروهای لرزه ای قائم به طول دهانه و برای N=10

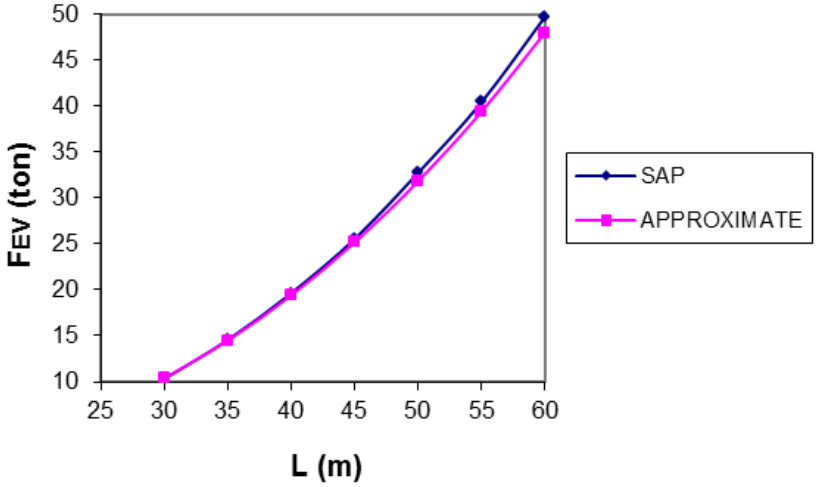

Fig. 6. Diagram of the changes in the total vertical seismic forces with respect to the bay length, N=10

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۷. نمودار تغییرات کل نیروهای لرزه ای قائم به طول دهانه و برای N=12

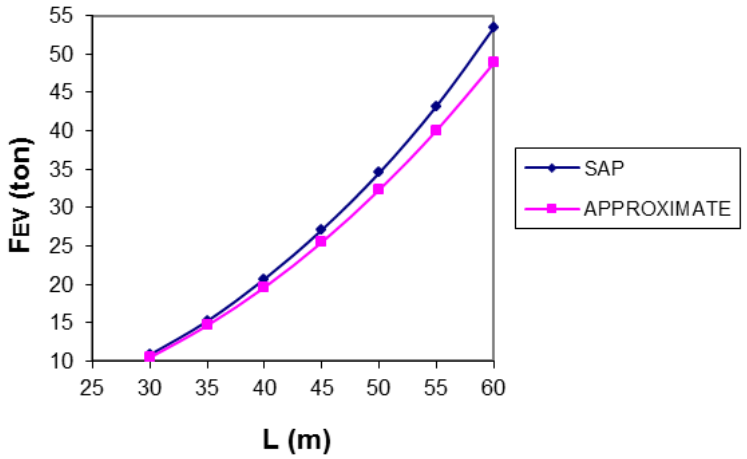

Fig. 7. Diagram of the changes in the total vertical seismic forces with respect to the bay length, N=12

شکل ۸. نمودار تغییرات کل نیروهای لرزه ای قائم به طول دهانه و برای N=14

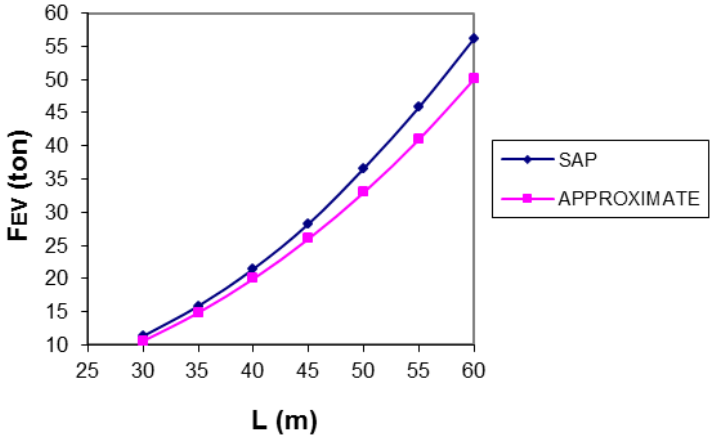

Fig. 8. Diagram of the changes in the total vertical seismic forces with respect to the bay length, N=14

شکل ۹. نمودار خیز نوار میانی شبکه دولایه با دهانه ۳۰ متر و طول عضوهای ۳ متر زیر بار برف.

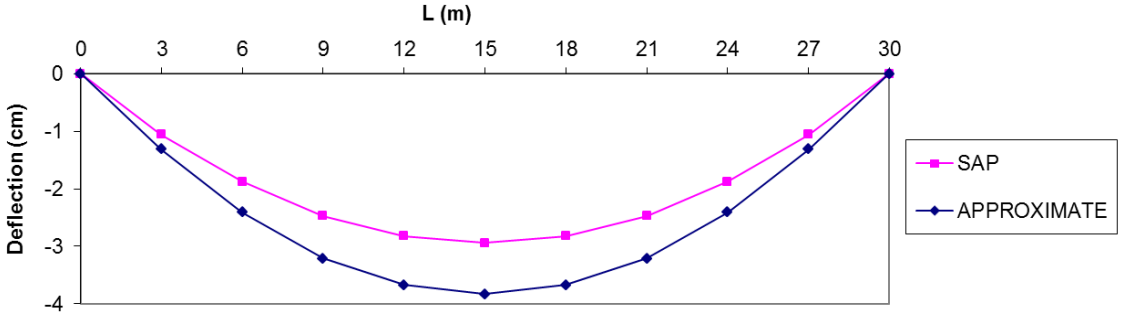

Fig. 9. Diagram of the deflection for the center strip of the double layer gird with the bay of 30 m and the member length of 3 m under the snow load.

۴-۲- بررسی نیروهای لرزه ای

برای بررسی نیروهای لرزه‌ای به‌دست آمده با روش تقریبی از ۳ نمودار استفاده می‌شود که تغییرات کل نیروهای لرزه‌ای حاصل از شتاب قائم زمین لرزه و محاسبه شده با روش تقریبی و با استفاده از نرم افزار SAP2000 را نسبت به طول دهانه نشان می‌دهد. نمودارهای مزبور در شکل‌های (٦، ٧ و ٨) ارائه می‌شوند که در آن‌ها، F_{EV} کل نیروی حاصل از شتاب

www.SID.ir

Archive of SID

قائم زمین لرزه است. بیشینه خطای روش تقریبی با توجه به نتایج حاصل ۱۰/۹۳٪ است.

۴-۳- بررسی تغییرمکان قائم (خیز)

به‌منظور بررسی دقت روش تقریبی پیشنهادی در محاسبه خیز، شبکه دولایه با پلان مربع و دهانه ۳۰ متر و طول عضوهای ۳ متر و ارتفاع شبکه $L_e/\sqrt{2}$ در نظرگرفته می‌شود. برای این شبکه دولایه زیر بارهای مورد اشاره در آغاز این بخش، با استفاده از روش تقریبی پیشنهادی مقدار سطح مقطع $A_{0x} = 20.5\ \mathrm{cm}^2$ در امتداد x و در میانه دهانه بدست می‌آید. اکنون، می‌توان برای نوار میانی از این شبکه منحنی خیز را با استفاده از رابطه (۳۶) و یا با استفاده از رابطه (۳۷) در $y = L_y/2$ زیر بارگذاری دلخواه محاسبه نمود. به عنوان نمونه چنانچه خیز زیر بار برف با میزان ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع مورد نظر باشد، منحنی خیز پیش‌بینی شده در شکل (۹) آمده است. برای سنجش میزان دقت روش، با استفاده از نرم افزار SAP2000 و تحلیل و طراحی دقیق شبکه دولایه نیز منحنی خیز برای نوار میانی بدست آمده و در شکل (۹) ترسیم شده است. میزان خطای روش پیشنهادی در محاسبه خیز بیشینه این شبکه دولایه حدود ۲۳ درصد است که با توجه به سرعت و حجم کم محاسبات روش تقریبی در سنجش با تحلیل و طراحی دقیق شبکه دولایه (که در نرم افزار از روش تحلیل طیفی استفاده شده است) مناسب خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

روش تقریبی برای شبکه‌های دولایه با طرح مربع روی مربع فضایی با پلان مربع یا مستطیل و تکیه‌گاه‌های ساده در پیرامون سازه پیشنهاد شد. روش مزبور توانایی تخمین کوچکترین فرکانس ارتعاش قائم و نیروهای لرزه‌ای حاصل از شتاب قائم زمین لرزه را دارد. این روش برای شبکه‌های دولایه با پلان مربع و طول عضوهای افقی و مورب یکسان به کار برده شد و با نتایج حاصل از نرم افزار SAP2000 سنجش شد. نتایج به دست آمده از ارزیابی فرکانس‌های ارتعاش نشان می‌دهد که بیشینه خطا با درنظرگرفتن تغییرات وزن شبکه در امتداد دهانه ها ۱۵/۳۷ درصد و بدون در نظرگرفتن تغییرات وزن شبکه در امتداد دهانه ها ۱۲/۵۱ درصد است. همچنین، بررسی نیروهای لرزه‌ای نشان می‌دهد که بیشینه خطای روش مزبور ۱۰/۹۳ درصد است. این مقدارهای خطا برای یک روش تحلیل تقریبی و به جهت طراحی نخستین مناسب است.

٦- مراجع References

[1] Makowski, Z. S. 1981 Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids. *Applied Science Publishers Ltd*.

[2] Vu K. K., Liew J. Y. R. & Krishnapillai A. 2006 Deployable Tension-Strut Structures: from Concept to Implementation. Journal of Constructional Steel Research, 62, 195-209.

[3] Marsh C. 2000 Some Observations on Designing Double-Layer Grids. *International Journal of Space Structures*, 15(3), 225-232.

[4] Kaveh A. & Servati H. 2001 Design of Double Layer Grids Using Backpropagation Neural Networks. *Computers and Structures*, 79, 1561-1568.

[5] Gholizadeh S. 2015 Optimal Design of Double Layer Grids Considering Nonlinear Behavior by sequential grey wolf algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 5(4), 511-523.

[6] Vaezi-Vazna R. & Abedi K. 2016 Effect of Member Length Imperfection on Stability Behavior of Double Layer Grid Pellevated Dome. *Proceedings of the IASS Annual Symposium, Spatial Structures in the 21st Century*, Tokyo, Japan.

[7] Rashidyan S. & Sheidaii M-R. 2017 Improving Double-Layer Space Trusses Collapse Behavior by Strengthening Compression Layer and Weakening Tension Layer Members. *Advances in Structural Engineering*, 20(11), 1757-1767.

[8] Fu F. & Parke G.A.R. 2018 Assessment of the Progressive Collapse Resistance of Double-Layer Grid Space Structures Using Implicit and Explicit Methods. *International Journal of Steel Structures*, 18(3), 831–842.

[9] Moghaddam H. A. 2000 Seismic Behaviour of Space structures. *International Journal of Space Structures*, 15(2), 119-135.

[10] Zhang Y. & Lan T. 2000 Research on the Dynamic Characteristics and Seismic Response of Space Frames. *International Journal of Space Structures*, 15(3), 239-242.

[11] JGJ 7-91. 2001 Specifications for the Design and Construction of Space Trusses. *International Journal of Space Structures*, 16(3), 177-208.

[12] El-Sheikh A. 2000 Approximate Dynamic Analysis of Space Trusses. *Engineering Structures*, (22), 26-38.

[13] Chopra A. K. 2007 Dynamic of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. *Prentice-Hall India*.

[14] AISC. 2010 Specification for Structural Steel Buildings. *ANSI/AISC 360, American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL.

www.SID.ir

Archive of SID

Approximate Method for Seismic Analysis of Double-Layer Grids

Hassan Haji Kazemi[1], Mehrzad Sharifian[2], Mehrdad Sharifian[3]

1- Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Quchan University of Technology
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Quchan University of Technology

***m.sharifian@qiet.ac.ir**

Abstract

The dynamic response of the double-layer girds (a kind of space trusses) can be determined by means of the software based on the finite element method. However, it is always needed the approximate techniques by which one can easily and quickly obtain the suitable estimation of the dynamic behavior of the structures. This need may be caused by: 1- providing an appropriate estimation in the first stage of designing the members, and 2- verification of the results of the computer programs.

In this study, an approximate method is suggested for seismic analyses of the double-layer grids with the spatial square on square layout, the square or rectangular plan and simple supports around the structure. The method is on the basis of the simulation of double-layer grid to the equivalent beam and plate. Here, the smallest circular frequency of the vertical vibration is computed by using Rayleigh's method. In addition, the seismic forces caused by the vertical acceleration of the earthquake are evaluated by employing the equations of the dynamics of the structures and estimating the shape function of the first mode of the vertical vibration. There are the deflections of the structural nodes in the achieved equation for estimating the circular frequency; therefore, an initial estimation for the sizes of the members of the double-layer gird is required. In fact, since the weight of the structure should be considered in evaluating the applied loads, an approximate design must be performed. For this purpose, a step by step technique is suggested based on the AISC Specification to initially design the structure. In addition, the assessment of the deflection of the double-layer girds is done based on the uniformly distributed loads and non-uniformly distributed loads.

Finally, to assess the suggested approximate method, 21 models of the double-layer grids with the spatial square on square layout are considered. These models have the horizontal and diagonal (web) members with the equal lengths. The supports of the double-layer girds are simple. The bays have 30 to 60 m with the step of 5 m and the number of 10, 12 and 14 horizontal members along the span. In order to analyze and design the models, the members are considered to be connected to each other as bending free connections. The spectrum analysis is done to take into account the seismic effects. Also, SAP2000 is used to analyze and design the models in question, and the results achieved by this software are considered as exact outcomes. On the other hand, the models are analyze by the suggested approximate method and the obtained results including frequencies, seismic vertical forces of the members of the models are compared with the exact outcomes in diagrams. The findings show that the proposed method can be evaluated the dynamic properties of the double-layer girds with a suitable precision which prove the robustness of the derived scheme. In fact, the maximum error in estimating the frequency is about 15%, and 12% if it is considered the variation of the weight of the double-layer girds and if it is not considered, respectively. Furthermore, the comparison of the achieved forces of the members between the exact and approximate results is revealed that the maximum error is about 11%, which is a good estimation for an approximate method.

Keywords

Double-layer grids, seismic analysis, approximate method, vertical frequency of vibration

www.SID.ir