

یادداشت تحقیقاتی

بهینه سازی الگوی بار مودال برای تحلیل پوش آور در سازه های فضاکار چلیکی دولایه متکی بر دیوارهای مشبک عمودی دولایه

محمد خیراللهی^۱، کریم عابدی^{۲*}، محمدرضا چناقلو^۲

۱- دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

*k_abedi@sut.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۹/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۶/۲۶

چکیده

تلاش های گسترده ای برای توسعه روش های تحلیل غیرخطی به طوری که ساده و سریع باشد، صورت گرفته است. یکی از این روش ها تحلیل های پوش آور است که در سال های اخیر به طور گسترده ای برای ارزیابی لرزه ای سازه ها به کار گرفته شده اند. همچنین روش های پوش آور پیشرفته متعددی برای لحاظ نمودن آثار مودهای بالاتر و در نظرگیری آثار تغییر مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم یا کمانش اعضا پیشنهاد شده است. بیشتر این روش ها برای تخمین تقاضای لرزه ای سازه های متداول بکار گرفته شده و پژوهش های محدودی برای تحلیل های پوش آور و تخمین پاسخ های لرزه ای سازه های فضاکار صورت گرفته است. بدین منظور در این مطالعه کاربرد بهینه سازی در تحلیل پوش آور برای پیش بینی پاسخ های لرزه ای سازه های فضاکار چلیکی دولایه متکی بر دیوارهای عمودی دولایه بررسی شده است. در این روش از ترکیب ضریب دار نیروهای مودی غالب استفاده شده و سپس ضرایب نیروهای مودی براساس الگوریتم بهینه سازی تا تعیین الگوی بار بهینه، بهینه سازی می شود. به منظور ارزیابی دقت روش مذکور، مدل های مختلف با نسبت های مختلف خیز به دهانه سقف چلیکی دولایه و یک نسبت ثابت ارتفاع دیوار فضاکار دولایه به طول دهانه انتخاب شده و پس از طراحی هر یک از سازه ها، تحلیل پوش آور تحت الگوی بار بهینه شده انجام می گیرد. پاسخ های حاصل از تحلیل پوش آور تحت الگوی بار بهینه شده با نتایج تحلیل دینامیکی نموی (افزایشی) و دو روش تحلیل پوش آور تحت مود اول سازه و تحلیل پوش آور مودال مقایسه شده است. نتایج تحلیل نشان می دهد که روش پوش آور پیشنهادی دقت قابل قبولی در پیش بینی برش پایه و سختی اولیه سازه با نتایج تحلیل دینامیکی داشته و با افزایش نسبت ارتفاع سقف چلیکی دولایه به طول دهانه سازه فضاکار دقت روش مذکور افزایش می یابد. همچنین مقایسه نتایج نشان می دهد که روش پوش آور ارائه شده نتایج نزدیکی در پیش بینی پاسخ های جابه جایی در جهات طولی و عرضی با نتایج تحلیل دینامیکی نموی دارد. علاوه بر آن مقایسه پروفیل دررفت حاصل از تحلیل های پوش آور و دینامیکی نموی نشان دهنده آن است که تمامی روش های پوش آور نتایج نزدیکی با تحلیل دینامیکی در گره های روی دیوار در جهت طولی داشته و در گره های سقف فضاکار روش پوش آور پیشنهادی دارای دقت قابل قبولی هست. در جهت عرضی نیز روش پوش آور پیشنهادی در مقایسه با سایر روش ها دقت قابل قبولی در پیش بینی دررفت دارد.

واژه های کلیدی: تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، تقاضای لرزه ای، تحلیل پوش آور، چلیکی دولایه، دیوار فضاکار دولایه.

۱- مقدمه

به تازگی استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن توجه زیادی از پژوهشگران را به خود جلب نموده و به عنوان مناسب ترین ابزار برای پیش بینی تقاضای لرزه ای سازه ها شناخته شده است. از طرف دیگر این روش در آیین نامه های مختلف بین المللی از قبیل [1] ATC-40، [2] FEMA-356، [3] FEMA-440 و [4] ASCE41-06 با عنوان تحلیل های پوش آور مرسوم توصیه شده است. در این روش، سازه تحت الگوی بار جانبی فزاینده قرار می گیرد تا آنجا که تغییر مکان در نقطه کنترل به مقدار مشخصی (تغییر مکان هدف) برسد و یا سازه دچار فروریزش شود. روش پوش آور مرسوم دارای دو نقطه ضعف اصلی است: ۱- عدم در نظر گیری آثار موده های بالاتر؛ ۲- عدم در نظرگیری تغییرات مشخصات دینامیکی سازه ها در محدوده غیرخطی. به منظور غلبه بر نقاط ضعف فوق، روش های پوش آور ارتقا یافته به وسیله پژوهشگران مختلف توسعه داده شده است. این روش ها می تواند آثار موده های بالاتر را با فرض ثابت بودن مشخصات دینامیکی مودی در نظر بگیرد. اولین روش ارائه شده به منظور در نظرگیری آثار موده های بالاتر توسط پارت و همکاران [5] پیشنهاد شد. در این روش تحلیل های پوش آور براساس شکل مودی انجام شده و نتایج براساس روش طیف ظرفیت ارائه می شود. مشابه همین روش، روش پوش آور مودال توسط چوپرا و گوئل [6] براساس تئوری دینامیکی ارائه شد. در این روش تحلیل های پوش آور برای هر مود غالب به صورت جداگانه انجام شده و نتایج حاصل از هر مود براساس روش های مناسب شناخته شده ترکیب می شوند. اصلاح شده این روش توسط همان پژوهشگران ارائه شد. این روش براساس ترکیب نتایج حاصل از تحلیل پوش آور تحت مود اول سازه و نتایج حاصل از تحلیل مودال الاستیک به منظور در نظرگیری آثار موده های بالاتر است. روش تحلیل پوش آور مودال متوالی توسط پورشا و همکاران [7] در سال ۲۰۰۹ ارائه شد که شامل تحلیل پوش آور تک و چند مرحله ای بوده و قادر به در نظر گیری آثار موده های بالاتر است. در سال ۲۰۱۲ خوشنودیان و همکاران [8] نسخه اصلاح شده روش پوش آور مودی متوالی را

ارائه دادند. در این روش تعداد موده های مشارکت کننده به جای دو یا سه مود در تحلیل پوش آور مودی متوالی برابر تعداد موده هایی است که مجموع جرم موثر مودی آنها حداقل ۹۰ درصد جرم کلی سازه باشد. در این روش از تحلیل طیف پاسخ برای تخمین میزان مشارکت موده های مختلف در تحلیل های چند مرحله ای استفاده شده است. فایفر و کرسلین [9] در سال ۲۰۱۱ روش N2 را برای در نظرگیری آثار موده های بالاتر را توسعه دادند. در این روش فرض بر آن است که سازه در موده های بالاتر در محدوده الاستیک است. پاسخ های سازه براساس پوش نتایج حاصل از تحلیل پوش آور تحت مود اول و تحلیل مودال الاستیک است. امینی و پورشا [10] در سال ۲۰۱۵ روش پوش آور چند مودی تک مرحله ای را به منظور در نظرگیری آثار موده های بالاتر پیشنهاد دادند. در این روش الگوی بار جانبی از جمع جبری نیروهای مودی در هر طبقه به منظور اعمال آثار موده های بالاتر تعیین می شود. مزیت اصلی این روش در نظر گرفتن علامت در بردار بارها است. پاسخ های سازه از پوش نتایج تحلیل های پوش آور تحت مود اول و تحت الگوی بار پیشنهادی تعیین می شود. علاوه بر آن، روش پوش آور مبتنی بر جابه جایی غیر تطبیقی توسط همان پژوهشگران [11] در سال ۲۰۱۶ را پیشنهاد شد. این روش از دو تحلیل پوش آور تحت مود اول سازه و تحت الگوی بار حاصل از جمع جبری جابه جایی های مودال در طبقه تشکیل یافته است. در این روش علامت در توزیع بار جانبی در نظر گرفته شده است. شایانفر و همکاران [12] در سال ۲۰۱۳ بهینه سازی الگوی بار مودال را برای انجام تحلیل پوش آور در سازه های ساختمانی مورد بررسی قرار دادند. پس روش مذکور در یک قاب خمشی دوبعدی ۲۰ طبقه پیاده سازی شده و نتایج به دست آمده با نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی مقایسه شد که نتایج نشان دهنده کارایی الگوی بار پیشنهادی بوده است. همان گونه که پیشتر گفته شد تحلیل های پوش آور، بیشتر برای ارزیابی رفتار سازه ها در محدوده غیرالاستیک و تعیین محل های ضعیف و سازوکار خرابی در سازه ها اعمال شده است. توسعه روش های پوش آور توسط پژوهشگران مختلف با تمرکز روی سازه های متداول صورت گرفته و پژوهش های کمی در تخمین لرزه ای سازه های فضاکار مشبک

تحلیل پوش آور مودال

این روش براساس انجام چندین تحلیل پوش آور تحت الگوی بار متناسب با شکل مودی است. پاسخ های کلی سازه براساس روش های ترکیب مودی (SRSS یا CQC) ترکیب می شوند [6]. مراحل این روش به شرح زیر است:

- ۱- تعیین فرکانس های طبیعی و مدهای ارتعاشی سازه؛
- ۲- انجام تحلیل پوش آور تحت الگوی φ_n ، $S_n=m$ و تعیین منحنی ظرفیت به صورت برش پایه- تغییر مکان بام؛
- ۳- تبدیل منحنی ظرفیت سازه به منحنی دو خطی ایده آل سازی شده؛
- ۴- تبدیل منحنی ایده آل سازی شده به منحنی نیرو- تغییر مکان سازه یک درجه آزادی معادل؛

$$\frac{F_{sny}}{L_n} = \frac{V_{bny}}{M_n^*}, D_{ny} = \frac{u_{rny}}{\Gamma_n \varphi_{rn}} \quad (1)$$

که در آن:

$$\Gamma_n = \frac{\varphi_n^T m i}{\varphi_n^T m \varphi_n} \quad (2)$$

$$L_n = \varphi_n^T m i \quad (3)$$

$$M_n^* = L_n \cdot \Gamma_n \quad (4)$$

که M_n^* جرم مودی موثر، Γ_n ضریب مشارکت مودی، φ_{rn} شکل مودی در طبقه بام، V_{bny} و u_{rny} به ترتیب برش پایه و تغییر مکان بام متناظر با حالت تسلیم تحت مود n ام در سازه چند درجه آزادی است.

- ۵- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای مدل تک درجه آزادی معادل مود n ام سازه صورت گرفته و با استفاده از رابطه ۵ بیشینه تغییر مکان بام متناظر با مود n ام در سازه چند درجه آزادی محاسبه می شود.

$$u_{rno} = \Gamma_n \varphi_{rn} D_n \quad (5)$$

- ۶- تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه چند درجه آزادی براساس بیشینه تغییر مکان بام متناظر با مود n ام از مرحله ۵، انجام شده و پاسخ های سازه مانند جابه جایی و دررفت تعیین می شود.

- ۷- گام های ۱ تا ۶ برای تعداد کافی از مودها تا رسیدن به دقت مطلوب تکرار می شود؛

صورت گرفته است. برای سازه های با دهانه های بزرگ، ناکازاوا و همکاران [13] تحلیل پوش آور مودال و تحلیل پوش آور تطبیقی را ارائه نمودند. کاتو و همکاران [14] کاربرد تحلیل پوش آور مودال در گنبدهای مشبک را بررسی کردند. در مطالعه دیگر، زیانگ و همکاران تحلیل پوش آور مودال را برای تخمین عملکرد لرزه ای گنبدهای مشبک توسعه دادند. در این روش سیستم یک درجه آزادی معادل برای مدهای ارتعاشی غالب گنبد براساس پارامتر سختی سازه ای مبتنی بر انرژی تعیین شد. اوساکی و زانگ [15] در سال ۲۰۱۰ روش جدیدی برای ارزیابی پاسخ لرزه ای گنبدهای فضاکار پیشنهاد دادند. این روش شامل انجام یک سری تحلیل های پوش آور تحت الگوی بار حاصل از ترکیب خطی مدهای غالب است. همانگونه که اشاره شد در سازه های قابی از تحلیل های پوش آور به عنوان روشی ساده و جایگزین تحلیل های دینامیکی غیرخطی برای تخمین ظرفیت سازه ها و شناسایی نقاط آسیب پذیر استفاده می شود، در نتیجه با الهام گرفتن از این ایده و براساس مطالعات محدودی که در این خصوص در سازه های فضاکار صورت گرفته است، ارائه روش مناسب برای تحلیل های پوش آور در سازه های فضاکار ضروری است که بررسی این موضوع می تواند منجر به توسعه طراحی مبتنی بر سطح عملکرد در سازه های فضاکار شود. پس در این مقاله روشی برای تحلیل پوش آور سقف چلیکی دولایه متکی بر دیوارهای عمودی دولایه پیشنهاد شده است. این روش مبتنی بر ترکیب ضریب دار نیروهای مودی غالب بر سازه فضاکار که ضرایب نیروها براساس الگوریتم بهینه سازی به منظور دستیابی به الگوی بار بهینه تعیین می شود، است. بدین منظور نسبت های مختلف خیز به طول دهانه سقف چلیک دولایه و یک نسبت ثابت ارتفاع دیوار به طول دهانه سازه فضاکار انتخاب شده است. پاسخ های حاصل از تحلیل پوش آور تحت الگوی بار بهینه شده با نتایج تحلیل دینامیکی نموی (افزایشی) و دو روش تحلیل پوش آور تحت مود اول سازه و تحلیل پوش آور مودال مقایسه شده است.

جدول ۱. جزئیات شتاب نگاشت های انتخاب شده [17].

ID no.	PEER-NGA Record Information			Recorded Motions	
	Record ID	Horizontal Components		Vertical Component	PGA _{component} (g)
		Component 1	Component 2	Component 3	
1	953	NORTHR/MUL009	NORTHR/MUL279	NORTHR/MUL_UP	0.52
2	960	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270	NORTHR/LOS_UP	0.48
3	1602	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090	DUZCE/BOL_UP	0.82
4	169	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352	IMPVALL/H-DLT_UP	0.35
5	174	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230	IMPVALL/H-E11_UP	0.38
6	1116	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090	KOBE/SHI_UP	0.24
7	1158	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270	KOCAELI/DZC_UP	0.36
8	900	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360	LANDERS/YER_UP	0.24
9	848	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR	LANDERS/CLW_UP	0.28
10	752	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090	LOMAP/CAP_UP	0.53
11	767	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090	LOMAP/G_UP	0.56
12	721	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090	SUPERST/B-ICC_UP	0.36
13	725	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360	SUPERST/B-POE_UP	0.45
14	829	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360	CAPEMEND/RIO_UP	0.55
15	1244	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N	CHICHI/CHY101-UP	0.44
16	68	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180	SFERN/PEL_UP	0.21

Table 1. Details of selected ground motions

۴- بهینه سازی ترکیب مودی

براساس اصول دینامیک سازه ها، نیروهای مودی در هر طبقه با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه محاسبه می شود که مطابق رابطه (۶) است:

$$f_{ij} = \Gamma_j \phi_{ij} m_i S_{aj} \quad (6)$$

که در آن f_{ij} نیروهای مود j ام در طبقه i ام، Γ ضریب مشارکت مودی، ϕ بردار شکل مودی، m جرم لرزه ای طبقه، S_a شتاب طیفی است. ترکیب مودی برای مودهای ارتعاشی غالب براساس رابطه (۷) محاسبه می شود:

$$F_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j f_{ij} \quad (7)$$

که در آن F_i نیروی جانبی اعمال شده در طبقه i ام، j شماره مود و α ضریب اصلاحی است که می تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد. اگرچه پژوهش های کانات و همکاران [18] در سال ۲۰۰۴

۸- پاسخ های کلی سازه براساس روش ترکیبی مناسب از قبیل CQC یا SRSS محاسبه می شود.

۲- تحلیل دینامیکی افزایشی (نموی)

تحلیل دینامیکی افزایشی (نموی) [16] روشی مناسب برای بررسی دقیق تر رفتار لرزه ای سازه ها است. در این روش سازه تحت یک سری شتاب نگاشت های مقیاس شده قرار گرفته و شدت آنها به طور نموی افزایش می یابد تا جایی که مفاصل پلاستیک در سازه تشکیل و گسترش یافته تا در نهایت منجر به خرابی کلی سازه شود. در روش تحلیل دینامیکی افزایشی از دو پارامتر اصلی اندازه شدت (IM) و پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) برای ارائه منحنی های ظرفیت استفاده می شود. پارامترهای مختلفی به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی استفاده می شوند. در این مقاله بیشینه جابجایی گرهی به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی و همچنین شتاب طیفی در مود اول سازه $S_a(T_1, \xi = 0.02)$ به عنوان اندازه شدت انتخاب شده است. در این مطالعه برای انجام تحلیل دینامیکی نموی از الگوریتم Hunt & Fill [16] استفاده شده است. لازم به ذکر است با توجه به سه بعدی بودن سازه ها، همه تحلیل های دینامیکی نموی در سازه های فضاکار مطالعه شده تحت ۱۶ رکورد زلزله به صورت سه مولفه ای همزمان انجام شده است. ضریب مقیاس هر سه مولفه یکسان و براساس ترکیب SRSS شتاب های طیفی در هر سه جهت در دوره تناوب اول سازه مورد مطالعه انجام شده است. با این روش، هماهنگی بین مولفه ها از نظر شدت نسبی آنها به طور کامل تا لحظه فروپاشی سازه حفظ خواهد شد.

۳- رکوردهای مورد مطالعه

به منظور انجام تحلیل دینامیکی نموی، ۱۶ رکورد زلزله اصلاح شده در نشریه FEMA-P695 [17] انتخاب شده است. تمامی رکوردهای انتخاب شده دارای بزرگای بین ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر با فاصله حداقل ۱۰ کیلومتر از محل گسل و مربوط به خاک نوع C براساس استاندارد ASCE-41-06 [4] هستند. جزئیات رکوردها شامل بیشینه شتاب زمین (PGA) در هر سه جهت در جدول (۱) داده شده است.

۷- اگر $f(x_n) \leq f(r)$ باشد، نقطه انقباض شده محاسبه می‌شود. اگر $f(c) \leq f(x_{n+1})$ با نقطه x_{n+1} جایگزین شده و سیمپلکس جدید تعیین شده و از مرحله ۱ محاسبات تکرار می‌شود؛

$$X_C = m + (r - m) / 2$$

۸- همه نقاط به جز x_1 با $v(i) = x_1 + (x(i) - x_1) / 2$ جایگزین شده و از مرحله ۱ محاسبات تکرار می‌شود که این مرحله کوچک شدن است. لازم به ذکر است معیارهایی برای شکستن چرخه تکراری لازم است. در روش نلدر-مید از انحراف استاندارد برای مقادیر تابع، به ازای سیمپلکس فعلی استفاده شده است. اگر مقادیر تابع کوچکتر از یک مقدار معین باشد، چرخه متوقف شده و پایین‌ترین نقطه در سیمپلکس به عنوان یک نقطه بهینه پیشنهادی انتخاب می‌شود. همان‌گونه که ذکر شد در ترکیب ضریب‌دار نیروهای مودی، ضریب α برای بدست آوردن بهینه‌ترین الگوی بار ترکیب شده بهینه سازی می‌شود. مراحل روش بهینه سازی ترکیب مودی به شرح زیر است:

- ۱- ایجاد مدل سازه‌ای مناسب با در نظر گیری غیرخطی مصالح؛
- ۲- تحلیل مقادیر ویژه و تعیین بردار شکل مودی غالب برای سازه فضاکار مطالعه شده در سه جهت (دو جهت افقی و یک جهت قائم)؛
- ۳- تعیین شتاب طیفی متناظر با هر مود غالب برای رکوردهای زلزله مطالعه شده؛
- ۴- انتخاب مقدار اولیه برای ضریب α برای مودهای ارتعاشی غالب؛
- ۵- محاسبه نیروهای مودی مطابق رابطه ۱ در هر تراز سازه فضاکار برای تعداد کافی مودهای ارتعاشی و ترکیب نیروهای مودی در سه جهت براساس رابطه ۲؛

$$f_{ij,x} = \Gamma_{j,x} \phi_{ij,x} m_i S_{aj,x} \quad (9)$$

$$f_{ij,y} = \Gamma_{j,y} \phi_{ij,y} m_i S_{aj,y}$$

$$f_{ij,z} = \Gamma_{j,z} \phi_{ij,z} m_i S_{aj,z}$$

$$F_i = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \alpha_{j,x} f_{ij,x} \\ \sum_{j=1}^n \alpha_{j,y} f_{ij,y} \\ \sum_{j=1}^n \alpha_{j,z} f_{ij,z} \end{array} \right\} \quad (10)$$

- ۶- انجام تحلیل پوش‌آور تحت الگوی بار بدست آمده از مرحله ۵ و استخراج پارامترهای بررسی شده؛

پارامترهایی که در این مرحله تعیین خواهد شد شامل موارد زیر است:

نشان‌دهنده حساسیت پاسخ سازه‌ها به پارامتر α بوده است به ویژه اگر مشارکت جرمی مود کم و شتاب طیفی برای مودهای بالاتر قابل توجه باشد. با توجه به آنکه روشی مشخص برای تعیین این ضریب وجود ندارد. پس در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه سازی، مقدار بهینه برای ضریب α تعیین می‌شود. بهینه‌ترین مقدار α زمانی است که پاسخ‌های حاصل از تحلیل پوش‌آور تحت الگوی بار مودی ترکیب شده با ضریب نهایی دارای برابری قابل قبولی با نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی داشته باشد.

۵- الگوریتم بهینه سازی

در این مقاله، از الگوریتم سیمپلکس نلدر-مید (Nelder-Mead Simplex) به عنوان بهینه کردن الگوی بار مودی ترکیب شده استفاده شده است. روش مذکور، یک روش عددی در کمینه یا بیشینه نمودن یک تابع هدف در فضای بهینه سازی چند بعدی است. در روش نلدر-مید چهار پارامتر ضریب بازتاب، گسترش، انقباض و کوچک شدن بایستی تعیین می‌شود. مراحل الگوریتم نلدر-مید به شرح زیر است:

- ۱- تعیین لیست نقاط در سیمپلکس جاری؛

$$X(i), i=1, 2, \dots, n+1$$

- ۲- مرتب‌سازی مقادیر تابع هدف در نقاط؛

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1})$$

- ۳- تعیین نقطه بازتاب و محاسبه $f(r)$ ؛

$$r = 2m - x_{n+1}$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x(i)}{n}, i=1, \dots, n$$

- ۴- اگر $f(x_1) \leq f(r) \leq f(x_n)$ باشد، نقطه بازتاب r

جایگزین شده و سیمپلکس جدید تعیین شده و از مرحله ۱ محاسبات تکرار می‌شود؛

- ۵- اگر $f(x_1) \geq f(r)$ باشد، نقطه بازتاب گسترش یافته و مقدار تابع در نقطه گسترش یافته $f(s)$ محاسبه می‌شود.

$$S = m + 2(m - x_{n+1})$$

- ۶- اگر $f(s) \leq f(r)$ باشد، S با x_{n+1} جایگزین شده و سیمپلکس جدید تعیین شده و از مرحله ۱ محاسبات تکرار می‌شود. در غیر این صورت نقطه بازتاب (r) جایگزین x_{n+1} شده و سیمپلکس جدید تعیین شده و از مرحله ۱ محاسبات تکرار می‌شود.

جدول ۲. مشخصات مدل های مطالعه شده

Model	H_1/S	H_2/S	$L(m)$	$t(m)$
1	0			
2	0.15			
3	0.2	0.5	30,60,90	1.5
4	0.25			
5	0.3			

Table 2. The specifications of studied models.

شکل ۱. طرح کلی مدل های مطالعه شده

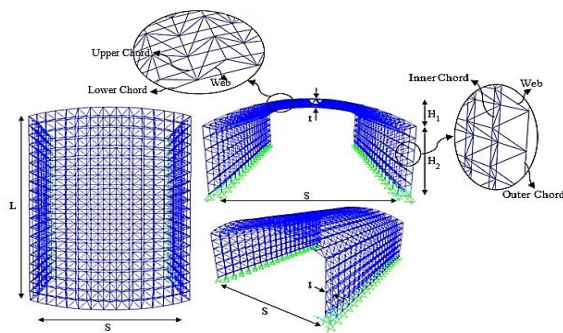


Fig. 1. General layout of the studied models.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی مصالح

Modulus of elasticity(E) MPa	Poisson's ratio(ν)	Yield stress(F_y) MPa	Coefficient of thermal expansion(α) 1/°C	Mass Density kg/m ³
2.1×10^5	0.3	240	12×10^{-6}	7850

Table 3. The mechanical properties of materials.

هر یک از مدل های مطالعه شده براساس بارهای ثقلی (بارهای مرده و برف)، بار باد و زلزله و براساس آیین نامه AISC-ASD89 طراحی شده است. بارگذاری برف در دو حالت بارگذاری متقارن و نامتقارن مطابق بحث ششم مقررات ملی ساختمان اعمال شده است. برای بار زلزله از استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم استفاده شده است. لازم به ذکر است جرم موثر لرزه ای برای هر مدل ۱۰۰ درصد بارمرده و ۴۰ درصد بار برف است. مقاطع انتخابی برای اعضای سازه های فضاکار مقطع لوله ای هستند که مشخصات مقاطع در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴. مقاطع اعضا

Range of section properties	$L=30,60,90m$		
	Chord of roof and wall	Web of wall	Web of roof
Section Area $A(cm^2)$	17.72-40.06	10.18-28.27	10.178-13.948
Diameter $D(cm)$	6-12	6-10	6-8
Thickness $t_w(cm)$	0.6-1.5	0.6-1	0.6

Table 4. The section properties of members.

۱- جابه جایی گرهی در تراز های مختلف سازه فضاکار مطالعه شده؛

۲- دریافت در ترازهای مختلف سازه فضاکار مطالعه شده؛

۷- محاسبه اختلاف پاسخ های سازه های حاصل از تحلیل پوش آور و تاریخچه زمانی غیرخطی؛

۸- الگوریتم fminsearch برای بدست آوردن مقادیر بهینه ضرایب نیروهای مودی (α) اجرا شده و زمانی که تابع هدف به کمترین مقدار خود برسد، الگوریتم خاتمه می یابد. تابع هدف در نظر گرفته شده مطابق رابطه (۱۱) است:

$$E = \sqrt{\sum_i^n (R_{NTHA} - R)_i^2} \quad (11)$$

که در آن E بردار اختلاف، i شماره ترازها، n تعداد ترازها، R_{NTHA} پاسخ های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و R پاسخ های حاصل از تحلیل پوش آور تحت الگوی بار مودی است. در صورتی که مقدار E از مقدار مشخص در نظر گرفته شده که در این مطالعه ۰/۰۰۱ است کمتر باشد، مقادیر بدست آمده برای ضریب α مقدار بهینه بوده و نتایج حاصل از تحلیل پوش آور با استفاده از ضرایب بهینه شده ملاک مقایسه با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی خواهد بود.

۶- مدل های عددی

۱-۲- شکل هندسی و مشخصات مدل های مطالعه شده

در این مطالعه، ۱۵ سازه فضاکار چلیکی دولایه متکی بر دیوارهای فضاکار دو لایه که مشخصات آنها در جدول (۲) نشان داده شده است، مطالعه شده قرار گرفته است. در مدل های بررسی شده L و S طول سازه و دهانه سازه فضاکار، H_1 ارتفاع چلیک و H_2 ارتفاع دیوار و ضخامت دیوار فضاکار است (شکل ۱). در این مقاله طول دهانه و ضخامت دیوار فضاکار به ترتیب ۳۰ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت های ارتفاع دیوار فضاکار به طول دهانه $(\frac{H_1}{S})$ و ارتفاع سقف چلیکی به طول دهانه $(\frac{H_2}{S})$ سازه های فضاکار در جدول (۲) نشان داده شده است. نوع اتصالات اعضای سازه های بررسی شده مفصلی بوده و از تکیه گاه های مفصلی به عنوان شرایط مرزی سازه ها استفاده شده است. در جدول (۳) مشخصات مکانیکی مصالح نشان داده شده است.

است، شامل منحنی های ظرفیت، پروفیل جابجایی و پروفیل دررفت می باشند. همچنین خطای روش های پوش آور در تخمین جابجایی و دررفت سازه های مورد مطالعه محاسبه گردیده است. به منظور محاسبه خطای روش های پوش آور از رابطه لویز و پینهو استفاده شده است:

$$Error_d (\%) = 100 \times \frac{1}{n} \times \sqrt{\left(\frac{d_{i-NSP} - d_{i-NTHA}}{d_{i-NTHA}} \right)^2} \quad (12)$$

که در آن d_{i-NSP} پاسخ های حاصل از تحلیل پوش آور، d_{i-NTHA} پاسخ های حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی در تراز i ام و n تعداد تراز می باشد.

۸-۱- منحنی های ظرفیت

در این بخش، منحنی های ظرفیت مدل های مورد مطالعه از روش های پوش آور با میانگین منحنی های ظرفیت حاصل از تحلیل دینامیکی نموی مقایسه شده است. برای تعیین منحنی های ظرفیت حاصل از تحلیل دینامیکی نموی از بیشینه جابجایی گره های سازه و بیشینه برش پایه متناظر با بیشینه جابجایی گره ای در بازه زمانی ± 0.15 ثانیه استفاده شده است. همانطور که قبلاً اشاره گردید با توجه به سه بعدی بودن مدل های مورد مطالعه، تحلیل های دینامیکی نموی تحت رکوردهای زلزله انتخابی به صورت همزمان انجام گرفته است. در شکل ۳ منحنی های ظرفیت حاصل از تحلیل دینامیکی نموی همراه با میانگین و انحراف معیار و تحلیل های پوش آور برای مدل با نسبت خیز چلیک دولایه به طول دهانه $(\frac{H_1}{S})$ برابر 0.15 یک نسبت ارتفاع دیوار به طول دهانه $(\frac{H_2}{S})$ برابر 0.5 و طول برابر 30 متر نشان داده شده است.

شکل ۳. مقایسه منحنی های ظرفیت بدست آمده از تحلیل دینامیکی نموی و

تحلیل های پوش آور مورد مطالعه برای مدل ۲.

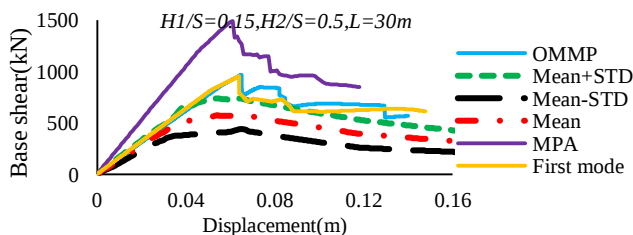


Fig. 3. Comparison of Capacity curves obtained from IDA and pushover methods for model 2.

۷-۲- چگونگی مدل سازی سازه ها در نرم افزار OpenSees

در این مقاله، به منظور مدل سازی سازه های فضاکار از نرم افزار اپنسیس [19] استفاده شده است. با توجه به آنکه تحت اثر نیروهای زلزله، اعضا دچار کمانش، تسلیم شدگی و حتی دچار خرابی می شوند، پس مدل سازی رفتار هیستریتیک اعضا تحت بارگذاری چرخه ای ضروری است. بدین منظور از المان تیر-ستون غیرخطی با قابلیت پلاستیسته گسترده (روش فایبر) در مقطع استفاده شده است. همچنین برای نشان دادن کمانش عضوی، هر عضو به دو المان با ناکاملی اولیه به اندازه 0.01 طول عضو در وسط هر عضو تقسیم شده است. این ناکاملی منجر به کمانش عضو تحت بار فشاری می شود. برای بیان رابطه تنش-کرنش مصالح فولاد از مصالح تک محوره steel02 با سخت شدگی ایزوتروپیک استفاده شده است. در مدل سازی اعضای سازه های فضاکار به منظور مدل سازی اتصال مفصلی، از المان zero-length در محل اتصال اعضا استفاده شده است. در شکل (۲) نمونه ای از پاسخ بارمحوری-جابجایی محوری عضو سازه فضاکار با نسبت لاغری 50 نشان داده شده است.

شکل ۲- جابه جایی محوری- نیروی محوری عضو با ناکاملی.

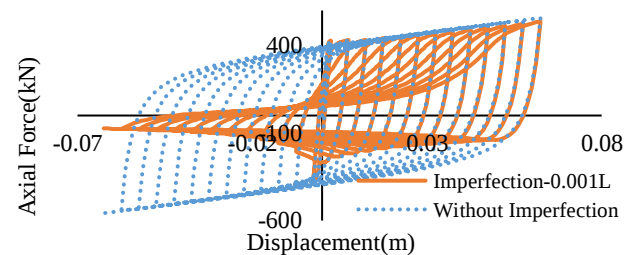


Fig. 2. Axial load-axial displacement of member with imperfection.

۷- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی دقت روش های پوش آور در سازه های فضاکار چلیکی دولایه متکی بر دیوار فضاکار دولایه، از تحلیل دینامیکی نموی (IDA) استفاده شده است. بدین منظور علاوه بر تحلیل پوش آور تحت الگوی ترکیب مودی بهینه، تحلیل پوش آور تحت مود اول سازه و تحلیل مودال پوش آور برای ارزیابی سازه های مورد مطالعه استفاده شده است. پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفته

است. همچنین در شکل (۴) شماره گذاری ترازها در دیوار و سقف چلیکی دو لایه برای مدل ۲ ($\frac{H_1}{S}=0.15$ ، $\frac{H_2}{S}=0.5$ و $L=30m$) نشان داده شده است.

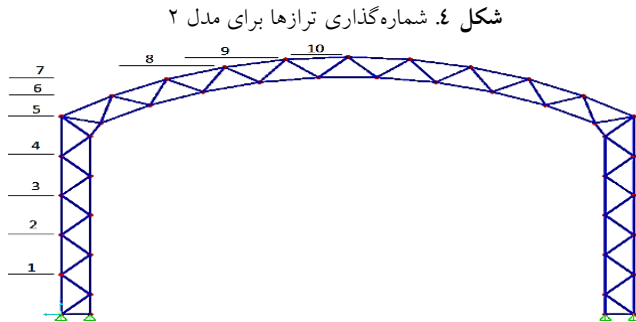


Fig. 4. The level numbering for model 2.

شکل (۵) نتایج پروفیل های جابه جایی حاصل از تحلیل های پوش آور و تحلیل دینامیکی نموی در ترازهای مختلف برای مدل با نسبت خیز چلیک دولایه به طول دهانه ($\frac{H_1}{S}$) برابر ۰/۱۵، یک نسبت ارتفاع دیوار به طول دهانه ($\frac{H_2}{S}$) برابر ۰/۵ و طول برابر ۳۰ متر را در سه جهت طولی، عرضی و قائم نشان می دهند. مقایسه نتایج نشان می دهد که روش پوش آور مبتنی بر ترکیب مودی بهینه در جهت طولی هماهنگی مناسبی با میانگین نتایج تحلیل دینامیکی نموی دارد. در جهت عرضی نیز روش های پوش آور مبتنی بر مود بهینه و مود اول سازه نتایج قابل قبولی داشته و با افزایش نسبت خیز چلیک به طول دهانه از دقت روش پوش آور تحت الگوی مود اول کاسته شده، در حالی که همچنان روش پوش آور مبتنی بر مود بهینه قابلیت پیش بینی تقاضای مهندسی با دقت کافی را دارد. همچنین بررسی نتایج در جهت قائم نشان دهنده توانایی روش پوش آور مبتنی بر ترکیب مودی در تخمین پاسخ های لرزه ای در مقایسه با سایر روش ها است. در خصوص روش مودال پوش آور نیز مشاهده می شود که این روش توانایی تخمین جابه جایی در گره های واقع در دیوار فضاکار را داشته و با انتقال به سقف، دقت روش مذکور کاهش می یابد. در جدول (۶) خطای روش های پوش آور مطالعه شده نشان است که نتایج نشان دهنده درصد خطای کم روش پوش آور پیشنهادی در مقایسه با سایر روش ها می باشد.

جدول ۵. مقایسه نتایج برش پایه و سختی اولیه در مدل مورد مطالعه

	OMMP	MPA	First mode	IDA
$H_1/S=0, H_2/S=0.5, L=30m$				
Base shear (kN)	2312.53	2848.57	2056.44	1444
Initial stiffness(kN.m)	58400	98226.5	56035.58	62787
Error (%)	6.98	56.44	10.75	-
$H_1/S=0.15, H_2/S=0.5, L=30m$				
Base shear(kN)	967	1488.6	1296.79	581.9
Initial stiffness(kN.m)	15641.9	26155.14	22027.42	13459.4
Error (%)	16.22	94.3	63.6	-
$H_1/S=0.2, H_2/S=0.5, L=30m$				
Base shear(kN)	972.76	1626.53	1242.6	740.16
Initial stiffness(kN.m)	13463.3	27105.7	17226.2	14234.7
Error (%)	5.42	90.4	21	-
$H_1/S=0.25, H_2/S=0.5, L=30m$				
Base shear(kN)	1238.2	1772.3	1064.53	716.77
Initial stiffness(kN.m)	18016.21	27920.9	13690.3	14059.1
Error (%)	28.14	98.59	2.62	-
$H_1/S=0.3, H_2/S=0.5, L=30m$				
Base shear(kN)	791.3	1460.5	947.01	610.8
Initial stiffness(kN.m)	10409.12	23871.8	11199.8	11814.37
Error (%)	6.89	102	5.21	-

Table 5. Result comparison on the base shear and initial stiffness of studied models.

لازم به ذکر می باشد منحنی های ظرفیت حاصل از تحلیل های پوش آور در دو جهت افقی تعیین گردیده و سپس با استفاده از روش SRSS ترکیب شده است. مقایسه منحنی های ظرفیت نشان می دهد که روش پوش آور با استفاده از ترکیب مودی بهینه نتایج نزدیکتری با تحلیل دینامیکی نسبت به دو روش پوش آور دیگر نشان می دهد.

در جدول (۵) برش پایه و سختی اولیه منحنی های ظرفیت بدست آمده از تحلیل دینامیکی نموی و تحلیل های پوش آور ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که روش پوش آور مبتنی بر ترکیب مودی بهینه دقت قابل قبولی در تخمین سختی اولیه و برش پایه با منحنی ظرفیت حاصل از تحلیل دینامیکی نموی را دارد.

۸-۲- پروفیل جابه جایی

در این قسمت پروفیل های جابه جایی در هر تراز مدل برای ارزیابی دقت روش های پوش آور انتخاب شده است. مقایسه پاسخ های حاصل از تحلیل پوش آور با میانگین نتایج تحلیل دینامیکی نموی (IDA) در جابه جایی کل برابر با $\frac{1}{100}$ ارتفاع سازه انجام شده

۳-۸- پروفیل دررفت

در این بخش نمودار دررفت مدل‌های بررسی شده متناظر با جابه جایی برابر $\frac{1}{100}$ ارتفاع سازه برای ارزیابی دقت روش‌های پوش‌آور بررسی شده است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور و تحلیل دینامیکی نمودی در دو جهت طولی، عرضی در شکل (۶) نشان داده شده است.

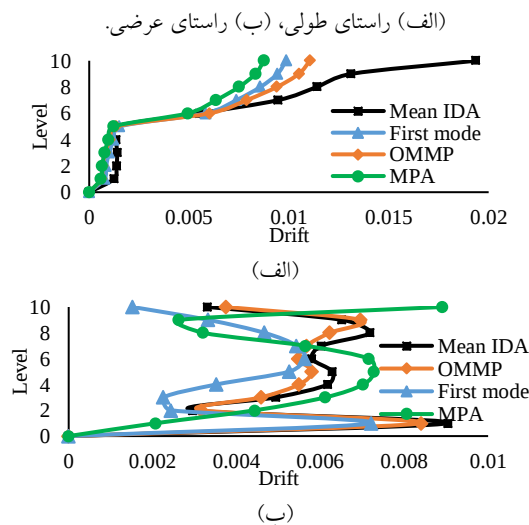
شکل ۶. مقایسه پروفیل دررفت برای مدل ۲؛ $(H_1/S=0.15, H_2/S=0.5)$ 

Fig. 6. Comparison of drift profile of model-2 $(H_1/S=0.15, H_2/S=0.5)$; (a) Longitudinal (b) transvers directions.

جدول ۷. مقایسه درصد خطای روش‌های پوش‌آور در پیش‌بینی پاسخ‌های دررفت

راستای طولی	OMMP	First mode	MPA
$H_1/S=0, H_2/S=0.5, L=30m$	8%	46%	42%
$H_1/S=0.15, H_2/S=0.5, L=30m$	8.32%	9.94%	12.28%
$H_1/S=0.2, H_2/S=0.5, L=30m$	5.33%	7.63%	13.16%
$H_1/S=0.25, H_2/S=0.5, L=30m$	8.00%	10.65%	10.55%
$H_1/S=0.3, H_2/S=0.5, L=30m$	9.91%	9.78%	12.74%
راستای عرضی	OMMP	First mode	MPA
$H_1/S=0, H_2/S=0.5, L=30m$	3.59%	6.78%	5.08%
$H_1/S=0.15, H_2/S=0.5, L=30m$	7.569%	11.328%	10.949%
$H_1/S=0.2, H_2/S=0.5, L=30m$	12.46%	10.34%	25.38%
$H_1/S=0.25, H_2/S=0.5, L=30m$	8.16%	10.46%	13.25%
$H_1/S=0.3, H_2/S=0.5, L=30m$	5.35%	12.51%	13.89%

Table 7. Error comparison of pushover methods in the estimation of drift responses.

نتایج نشان می‌دهد که در جهت طولی تمامی روش‌ها در گره‌های روی دیوار نتایج نزدیکی با نتایج تحلیل دینامیکی نمودی داشته و در سقف فضاکار، روش پوش‌آور مبتنی بر مود بهینه نتایج

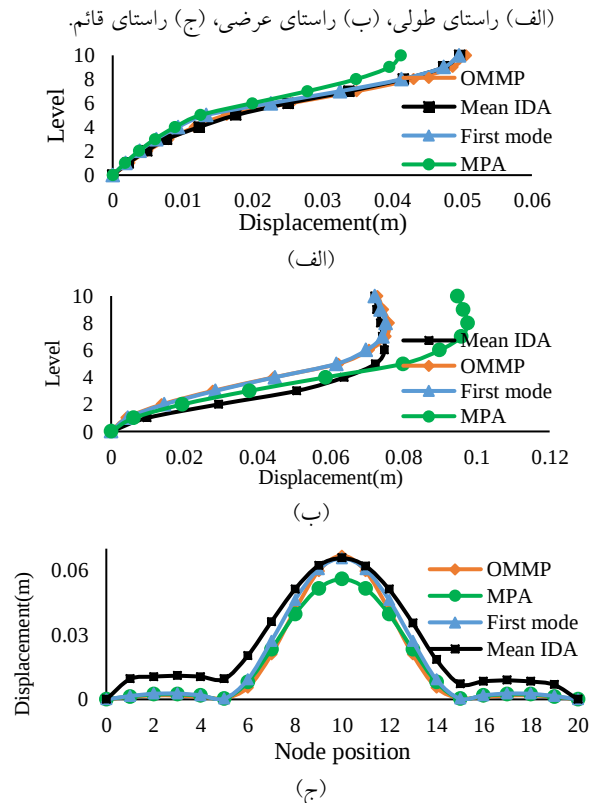
شکل ۵-مقایسه پروفیل جابجایی برای مدل ۲؛ $(H_1/S=0.15, H_2/S=0.5)$ 

Figure 5. Comparison of displacement profile of model-2 $(H_1/S=0.15, H_2/S=0.5)$; (a) longitudinal (b) transvers (c) vertical directions.

جدول ۶- مقایسه درصد خطای روش‌های پوش‌آور در پیش‌بینی پاسخ‌های جابجایی

راستای طولی	OMMP	First mode	MPA
$H_1/S=0, H_2/S=0.5, L=30m$	8.38%	8.53%	9.00%
$H_1/S=0.15, H_2/S=0.5, L=30m$	1.75%	3.54%	6.77%
$H_1/S=0.2, H_2/S=0.5, L=30m$	3.29%	3.80%	10.14%
$H_1/S=0.25, H_2/S=0.5, L=30m$	4.67%	5.14%	7.57%
$H_1/S=0.3, H_2/S=0.5, L=30m$	5.95%	7.02%	10.25%
راستای عرضی	OMMP	First mode	MPA
$H_1/S=0, H_2/S=0.5, L=30m$	3.91%	7.86%	7.67%
$H_1/S=0.15, H_2/S=0.5, L=30m$	2.81%	2.27%	13.31%
$H_1/S=0.2, H_2/S=0.5, L=30m$	6.17%	6.77%	13.64%
$H_1/S=0.25, H_2/S=0.5, L=30m$	5.15%	6.08%	11.44%
$H_1/S=0.3, H_2/S=0.5, L=30m$	5.59%	10.41%	11.06%
راستای قائم	OMMP	First mode	MPA
$H_1/S=0, H_2/S=0.5, L=30m$	4.106%	11.719%	13.31%
$H_1/S=0.15, H_2/S=0.5, L=30m$	15.61%	14.06%	14.84%
$H_1/S=0.2, H_2/S=0.5, L=30m$	10.41%	13.16%	16.15%
$H_1/S=0.25, H_2/S=0.5, L=30m$	10.20%	12.87%	15.65%
$H_1/S=0.3, H_2/S=0.5, L=30m$	3.01%	6.34%	9.58%

Table 6- Error comparison of pushover methods in the estimation of displacement responses.

نتایج تحلیل دینامیکی نمودی دارد. در جهت عرضی نیز روش های پوش آور مبتنی بر مود بهینه و مود اول سازه نتایج قابل قبولی داشته و با افزایش نسبت خیز چلیک به طول دهانه از دقت روش پوش آور تحت الگوی مود اول کاسته شده، در حالی که همچنان روش پوش آور مبتنی بر مود بهینه قابلیت پیش بینی تقاضای مهندسی با دقت کافی را دارد. همچنین بررسی نتایج در جهت قائم نشان دهنده توانایی روش پوش آور مبتنی بر ترکیب مودی در تخمین پاسخ های لرزه ای در مقایسه با سایر روش ها است.

۳- نتایج نشان می دهد که در مقایسه بین روش های پوش آور، روش پوش آور مبتنی بر الگوی بار مودی بهینه قابلیت پیش بینی در جهت برای سقف و دیوار فضاکار را داشته و روش های مودال پوش آور و پوش آور تحت مود اول سازه قابلیت پیش بینی پاسخ های لرزه ای در دیوار فضاکار را با دقت قابل قبولی داشته و در سقف فضاکار نتایج قابل قبولی را نشان نمی دهد.

References

۹- مراجع

1. Council, A.T., *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Report No. SSC 96-01: ATC-40, 1996. 1.
2. Agency, F.E.M., *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. 2003: Fema.
3. FEMA, A., 440, *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. FEMA-440, Redwood City, 2005.
4. Engineers, A.S.O.C., *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06)*.: *Rehabilitation Requirements*; . 2007: American Society of Civil Engineers.
5. Paret, T.F., et al. *Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects*. in *Proceedings of the eleventh world conference on earthquake engineering*. 1996.
6. Chopra, A.K. and R.K. Goel, *A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings*. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2002. 31(3): p. 561-582.
7. Poursha, M., F. Khoshnoudian, and A. Moghadam, *A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings*. *Engineering Structures*, 2009. 31(2): p. 591-599.
8. Poursha, M., F. Khoshnoudian, and A. Moghadam, *The extended consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of two-way unsymmetric-plan tall buildings under influence of two horizontal components of ground motions*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014. 63: p. 162-173.

نزدیکی به تحلیل دینامیکی نمودی را نشان می دهد. در جهت عرضی نیز روش مذکور در مقایسه با سایر روش های پوش آور مطالعه شده نتایج قابل قبولی را نشان می دهد. در جدول (۷) خطای روش های پوش آور در پیش بینی دریافت در گره های مختلف سازه بررسی شده است که نتایج نشان می دهد که روش پوش آور مبتنی بر ترکیب مودی بهینه داری خطای کمتری نسبت به سایر روش ها دارد.

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش به ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه های فضاکار چلیکی دولایه متکی بر دیوارهای عمودی دولایه با استفاده از تحلیل پوش آور پرداخته شده است. علاوه بر آن، در این مطالعه از بهینه سازی به منظور بهبود و افزایش دقت تحلیل پوش آور استفاده شده است. برای انجام تحلیل پوش آور، از ترکیب ضریب دار نیروهای مودی غالب استفاده شده و سپس ضرایب نیروهای مودی براساس الگوریتم بهینه سازی تا تعیین الگوی بار بهینه، بهینه سازی می شود. به منظور ارزیابی دقت روش مذکور، مدل های مختلف با نسبت های مختلف خیز به دهانه سقف چلیک دولایه و یک نسبت ثابت ارتفاع دیوار فضاکار دولایه به طول دهانه انتخاب شده و پس از طراحی هر یک از سازه ها، تحلیل پوش آور تحت الگوی بار بهینه شده انجام می گیرد. پاسخ های حاصل از تحلیل پوش آور تحت الگوی بار بهینه شده با نتایج تحلیل دینامیکی نمودی (افزایشی) و دو روش تحلیل پوش آور تحت مود اول سازه و تحلیل پوش آور مودال مقایسه شده است. نتایج تحلیل نشان داد که:

۱- مقایسه منحنی های ظرفیت حاصل از تحلیل دینامیکی نمودی و روش های تحلیل پوش آور نشان می دهد که روش پوش آور مبتنی بر ترکیب مودی بهینه دقت قابل قبولی در تخمین برش پایه و سختی اولیه را دارد. همچنین نتایج نشان داد که روش مودال پوش آور قابلیت پیش بینی تقاضای لرزه ای در سازه های مورد مطالعه را ندارد.

۲- مقایسه نمودارهای جابه جایی متناظر با $\frac{1}{100}$ ارتفاع سازه های فضاکار مطالعه شده نشان می دهد که روش پوش آور مبتنی بر ترکیب مودی بهینه در جهت طولی هماهنگی مناسبی با میانگین

- using a series of multimodal pushover analyses. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2013. **54**(1): p. 27-37.
16. Vamvatsikos, D. and C.A. Cornell, *Incremental dynamic analysis*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2002. **31**(3): p. 491-514.
 17. P695, F., *Quantification of building seismic performance factors*. Prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, 2009.
 18. Kalkan, E. and S.K. Kunnath. *Method of modal combinations for pushover analysis of buildings*. in *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. 2004.
 19. McKenna, F., et al., *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)[Computer Software]*, Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, CA. Available from: <http://opensees.berkeley.edu/PacificEarthquakeEngineeringResearchCenter:NGADatabase>. (Accessed December, 2013). http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database, 2000.
 9. Kreslin, M. and P. Fajfar, *The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011. **40**(14): p. 1571-1589.
 10. Poursha, M. and M.A. Amini, *A single-run multi-mode pushover analysis to account for the effect of higher modes in estimating the seismic demands of tall buildings*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015. **13**(8): p. 2347-2365.
 11. Amini, M.A. and M. Poursha, *A non-adaptive displacement-based pushover procedure for the nonlinear static analysis of tall building frames*. Engineering Structures, 2016. **126**: p. 586-597.
 12. Shayanfar, M.A., et al., *Optimization of modal load pattern for pushover analysis of building structures*. Struct. Eng. Mech, 2013. **47**(1): p. 119-129.
 13. Nakazawa, S., et al. *Study on Seismic Response Estimation Based on Pushover Analysis for Membrane Structures Supported by Substructure*. in *Proceedings of the*. 2005.
 14. Kato, S., S. Nakazawa, and K. Saito. *Two-modes pushover analysis for reticular domes for use of performance based design for estimating responses to severe earthquakes*. in *Proc. IASS Symposium*. 2005.
 15. Ohsaki, M. and J. Zhang, *Prediction of inelastic seismic responses of arch-type long-span structures*

Optimization of modal load pattern for pushover analysis in double-layer barrel vault roof with vertical double-layer walls

Mohammad kheirollahi¹, Karim abedi^{2*}, Mohammad reza chenaghlou³

1 PHD candidate of structural engineering, Faculty of civil engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
m_kheirollahi@sut.ac.ir

2* Professor of structural engineering, Faculty of civil engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
k_abedi@sut.ac.ir, corresponding author

3 Professor of structural engineering, Faculty of civil engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran,

*mrchenaghlou@sut.ac.ir

Abstract

Nonlinear time history analysis (NL-THA) is the most accurate method to estimate the seismic demand of structures and predict their failure. To that end, extensive efforts have been made to develop fast and convenient methods to carry out nonlinear static analyses. In recent years, pushover methods have been widely used as a suitable tool to evaluate the seismic performance of structures. Also, various advanced pushover procedures have been proposed to take into account the effect of higher modes and the change in the dynamic properties of structures in the nonlinear phase. Therefore, different pushover procedures have been further developed for this purpose. The nonlinear static analysis has been widely employed to evaluate the nonlinear behavior of structures. The pushover analysis was first expanded in a number of studies to investigate buildings. Not many studies have been conducted on the seismic demand of latticed space structures. In the present work, therefore, an optimization procedure has been employed to refine the performance of the pushover analysis in estimating the seismic response of double-layer barrel vault roofs with vertical double-layer walls. In the method proposed herein, the coefficients of the modal load combinations of the studied structures have been optimized using the simplex algorithm to find the optimum load pattern. Fifteen models with various rise-to-span and height-to-span ratios were considered to assess the accuracy of the proposed method in predicting the seismic demand of these structures. The models were analyzed using the OpenSees software. In order to model the buckling behavior of the members, each member was divided into two nonlinear beam-column elements with an initial imperfection of 0.1% at its mid-node. The models were designed with the dead, snow, temperature, and earthquake loads having been considered. All of the mentioned loads, with the exception of snow load, were applied to the structures as concentrated nodal loads. The snow load, by contrast, was applied to the structures in two symmetric and asymmetric patterns in accordance with the sixth volume of the Iranian national code of buildings. For earthquake loads, the 4th edition of the Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings was used. It should be noted that the seismic mass of the roof of each model was calculated by considering the entirety of the dead load in addition to 40% of the snow load. In the design process of each model, the dead, snow, temperature, and earthquake load combinations were formulated based on the AISC-ASD89 standard. The sections of the members of the structures were chosen from hollow tubular sections, with their slenderness ratios limited to 100. Afterwards, pushover analyses were performed using the optimized load pattern. The obtained results were compared to those of the incremental dynamic analyses (IDA) and two other well-known pushover methods, namely the MPA and the conventional first-mode pushover analysis. The results revealed that the proposed pushover method can provide a good estimation of the base shear and initial stiffness of the structures when compared to dynamic analyses. In addition, an increase in the rise-to-span ratio of the roof causes an improvement in the accuracy of the proposed pushover method. Also, in comparison with the MPA and conventional pushover procedures, the responses produced by the proposed method are closer to those generated by dynamic analyses. In addition, a comparison of the obtained drift patterns reveals that the results of both the pushover and incremental dynamic analyses along the longitudinal direction of the wall are quite close to each other. Another advantage of the proposed pushover method is that it also produces acceptable results on the nodes on the roof of the space structure. Also, along the transverse direction, the proposed method yields better results.

Keywords: nonlinear time history analysis, seismic demand, incremental dynamic analyses, Pushover analysis, double-layer barrel vault roof, double-layer wall.