

## ارزیابی مقاومت سازه‌های شبکه دولایه فضاکار در برابر خرابی پیشرونده

محمدرضا شیدائی\* و کریم عابدی\*\*

گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت مقاله: ۸۳/۱/۱۶ - دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۴/۲)

**چکیده** - با توجه به اهمیت مسئله خرابی پیشرونده در سازه‌های شبکه دولایه فضاکار، ضروری است در هنگام طراحی این نوع سازه‌ها تدابیر خاصی برای پیشگیری از خطر وقوع خرابی پیشرونده اتخاذ شود. یکی از روشهای بسیار مناسب و مقبول برای طراحی مقاوم در برابر خرابی پیشرونده، استفاده از روش مسیر جایگزین است. در این روش اجازه وقوع خرابی موضعی در سازه داده می‌شود ولی در عین حال مسیره‌های جایگزین انتقال بار طوری فراهم می‌شوند که خرابی موضعی اولیه جذب شده و از انتشار آن در سازه و به تبع آن خرابی کلی سازه جلوگیری شود. ناگهانی بودن خرابی موضعی اولیه، خود می‌تواند منجر به اثرات دینامیکی شدیدی شود که در ارزیابی واکنش خرابی سازه باید مدنظر قرار گیرند. در این مقاله برای اعمال اثرات دینامیکی ناشی از خرابی موضعی اولیه، روش خاصی تحت عنوان روش مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی بسط داده شده است. روش مزبور با در نظر گرفتن ماهیت دینامیکی پدیده می‌تواند رفتار خرابی سازه و نیز خطر وقوع خرابی پیشرونده در سازه را به نحو واقع‌بینانه‌تری ارزیابی کند.

واژگان کلیدی: سازه شبکه دولایه فضاکار، خرابی پیشرونده، روش مسیر جایگزین، فروجهش دینامیکی، پس‌کمانش، پایداری.

## Investigation of Double-layer Grid Space Structure Resistance to Progressive Collapse

K. Abedi, M.R. Sheidaii

Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology

Department of Civil Engineering, Urmia University

**Abstract:** Considering the vulnerability of double-layer grid space structures to progressive collapse phenomenon, it is necessary to pay special attention to this phenomenon in the design process. Alternate path method is one of the most appropriate

\*\* - دانشیار

\* - استادیار

and accepted methods for progressive collapse resistant design of structures. Alternate Path Method permits local failure to occur but provides alternate paths around the damaged area so that the structure is able to absorb the applied loads without overall collapse. Following the sudden initial local failure event, severe dynamic effects may arise which should be taken into account in determining the realistic collapse behavior of the structure. In this paper, a new methodology based on alternate path method is presented to apply dynamic effects of initial local failure. The method is called nonlinear dynamic alternate path method. Due to its capability to take account of dynamic nature of the failure, this method can be used to evaluate realistic collapse behavior of the structure and to investigate the vulnerability of the structure to progressive collapse phenomenon.

**Keywords:** Double-layer grid space structures, Progressive collapse, Alternate path method, Dynamic snap-through, Post buckling, Stability

## فهرست علائم

C	ماتریس میرایی سازه	M	ماتریس جرم سازه
D	بردار تغییر مکان استاتیکی	P	بردار بار سازه
$D_{snap}$	بردار تغییر مکان استاتیکی ابتدای فروجهش	$P_{snap}$	بردار بار فروجهش
$D_d$	بردار تغییر مکان دینامیکی	$\alpha_m$	فاکتور میرایی جرم
K	ماتریس سختی سازه سالم	$\beta_s$	فاکتور میرایی سختی
$K'$	ماتریس سختی سازه آسیب دیده	$\xi_i$	نسبت میرایی مد i ام
$K_{snap}$	ماتریس سختی ابتدای فروجهش	$\omega_i$	فرکانس طبیعی مد i ام

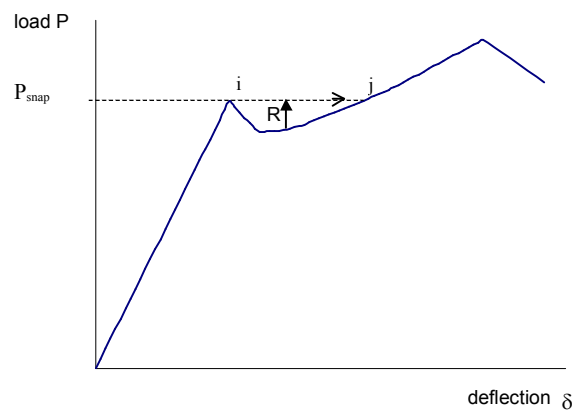
## ۱- مقدمه

شبکه‌های دو لایه فضاکار<sup>۱</sup> سیستم‌های پیش ساخته خاصی متشکل از دو شبکه موازی بالایی و پایینی بوده که اتصال این دو شبکه توسط اعضای قائم و یا مورب جان در اشکال مختلف انجام می‌پذیرد. شبکه‌های دو لایه فضاکار دارای مزایای مهمی چون وزن کم، سختی زیاد، شکل معماری مطبوع و قابلیت پوشش دادن فضاهای وسیع‌اند و از این رو امروزه به‌طور گسترده‌ای در انواع پروژه‌های ساختمانی بزرگ مقیاس، با دهانه‌های وسیع و عاری از ستون، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شواهد تجربی موجود در زمینه خرابی ناگهانی شبکه‌های دولایه فضاکار نشان‌دهنده آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر خطر خرابی پیشرونده<sup>۲</sup> است که به عنوان یک نمونه مهم می‌توان به خرابی سقف سالن ورزشی شهر هارتفورد در سال ۱۹۷۸ اشاره کرد [۲۰]. خرابی پیشرونده، انتشار زنجیروار خرابی به دنبال خرابی موضعی بخش کوچکی از سازه است، خرابی پیش آمده در سازه در قیاس با خرابی موضعی اولیه،

بسیار نامتناسب و بیش از اندازه است. خرابی اولیه در اثر عوامل متعددی همچون ضربه، تصادف، انفجار، عیوب مصالح و اتصالات، و به‌خصوص کماتش عضو فشاری ممکن است پیش آید. مکانیسم انتشار خرابی بدین صورت است که در اثر خرابی موضعی اولیه، باز توزیع نیروهای داخلی در سازه پدید می‌آید و این امر باعث اعمال نیروهای اضافی به سایر اعضای سازه می‌شود. در نتیجه ممکن است اعضای دیگری از سازه خراب شده و باز توزیع بیشتری در نیروهای داخلی سازه ایجاد شود، به این ترتیب خرابی در سازه انتشار یافته و حتی ممکن است به خرابی کلی سازه نیز منجر شود. در بعضی موارد نظیر کماتش ترد اعضای فشاری، فروریزی بار ناشی از خرابی موضعی به قدری سریع و ناگهانی است که سبب از بین رفتن موقتی پایداری سازه و فروجهش به وضعیت تعادل پایدار جدیدی در همین تراز بار می‌شود، شکل (۱)، انتقال به این وضعیت جدید معمولاً با تغییرات ناگهانی و شدیدی در تغییر شکل سازه همراه بوده و اثرات دینامیکی شدیدی را به همراه دارد. اثرات

خریبای فضایی که اعضای فشاری آنها دارای فروجهش دینامیکی در منطقه پس‌کمانشی<sup>۵</sup> خود هستند ارائه کرده است [۸ و ۹]. برخلاف روشهای پیشین که یک تحلیل استاتیکی انجام می‌دادند، او امکان واکنش دینامیکی سازه به دلیل وقوع فروجهش دینامیکی در اعضای کمانش‌یافته را مورد ملاحظه قرار داد. در این روش که به اصطلاح روش مبتنی بر سختی نامیده می‌شود ابتدا با انجام یک تحلیل استاتیکی غیرخطی، رفتار سازه تا مرحله فروجهش، موقعیت  $i$  از شکل (۱) و نیز بار فروجهش سازه ( $P_{snap}$ ) تعیین می‌شود. در طی فروجهش از موقعیت  $i$  به موقعیت  $j$  تعادل سازه به‌طور موقت از بین می‌رود و نیروی نامتعادل کننده  $R$  به سازه اعمال می‌شود که باعث شتابگیری و در نتیجه واکنش دینامیکی سازه می‌شود از این رو در روش پیشنهادی موریس، بلافاصله با رسیدن بار وارده به تراز بار فروجهش، تحلیل واکنش سازه به روش دینامیکی پیگیری می‌شود. بار وارد بر سازه بار استاتیکی ثابت فروجهش سازه،  $P_{snap}$ ، بوده و واکنش دینامیکی سازه نه به علت اعمال بار دینامیکی خارجی بلکه به واسطه کاهش ناگهانی سختی سازه پدیدار می‌شود.

عابدی و پارک [۴، ۱۰ و ۱۱] انتشار دینامیکی فروجهش گرهی محلی در گندهای مشبک تک‌لایه با اتصالات گیردار را مورد بررسی قرار دادند، براساس یافته‌های این تحقیق اخیراً شیدائی و همکاران [۱۲ و ۱۳] انتشار دینامیکی خرابی در شبکه‌های دولایه فضاکار را با تاکید بر انرژی جنبشی آزاد شده در طی فروجهش و اثرات ضربه‌ای ناشی از آن مطالعه کرده‌اند. در روش پیشنهادی که به اصطلاح روش مبتنی بر انرژی نامیده می‌شود ابتدا براساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه، سرعت‌های اولیه متناظر با انرژی جنبشی ناشی از فروجهش گره‌های سازه، در موقعیت تغییرشکل انتهای فروجهش، موقعیت  $j$  از شکل (۱) محاسبه می‌شود. انرژی جنبشی ناشی از فروجهش گرهی در هر یک از گره‌های سازه، برابر با سطح محصور بین منحنی تعادل استاتیکی بار-تغییر مکان و خط افقی مستقیم مرسوم بین نقاط  $i$  و  $j$  از شکل نمونه (۱) است.



شکل ۱ - پدیده فروجهش دینامیکی

دینامیکی ناشی از فروجهش<sup>۳</sup> باعث افزایش بازتوزیع نیروها و افزایش خطر انتشار خرابی در سازه می‌شود. پدیده فروجهش دینامیکی در شبکه‌های دو لایه فضاکار یک پدیده ناپایداری ترکیبی است بدین مفهوم که در صورت وقوع پدیده فروجهش دینامیکی، به‌طور همزمان فروجهش گرهی در گره‌های سازه، و فروجهش عضوی در اعضای که دچار خرابی موضعی می‌شوند رخ می‌دهد [۳ و ۴]. در چنین مواردی برای ارزیابی صحیح رفتار خرابی سازه، تحلیل استاتیکی کافی نبوده و باید اثرات دینامیکی ناشی از خرابی به درستی در تحلیل در نظر گرفته شود.

ملاً و همکارانش [۵-۷] کوشش کردند روش‌های سیستماتیکی را برای تعیین واکنش سازه‌های خرابی تحت اثرات دینامیکی خرابی عضو، پایه‌ریزی کنند. در این تحقیقات اثر دینامیکی خرابی ترد در محدوده الاستیک و نیز اثر دینامیکی کاهش ناگهانی ظرفیت عضو به علت کمانش اولیه در منطقه پس‌کمانشی غیرالاستیک مورد بررسی قرار گرفت. نمایش اثر خرابی دینامیکی عضو، با کاهش ناگهانی نیروی وارد بر اتصال (به میزان کاهش ظرفیت باربری عضو)، و یا با اعمال شرایط اولیه بر تغییر مکانها، سرعتها و شتابهای گرهی انجام گرفت. ملاً و همکارانش در تحقیقی دیگر [۸]، از روش شبه نیرو<sup>۴</sup> برای مطالعه اثرات دینامیکی خرابی عضو در سازه‌های شبکه دولایه‌ای خرابی استفاده کردند. موریس روشی را برای ارزیابی ظرفیت نهایی سازه‌های

سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو روش اساسی طراحی مستقیم عبارت‌اند از روش مقاومسازی محلی ویژه<sup>۷</sup> و روش مسیر جایگزین<sup>۸</sup>. در روش مقاومسازی محلی ویژه، عناصر بحرانی<sup>۹</sup> سازه طوری طراحی می‌شوند که از مقاومت کافی برای تحمل بارهای غیرعادی برخوردار باشند. با توجه به کم بودن اطلاعات در مورد بارهای غیرعادی، ضرورت مشخص کردن یک بار غیرعادی ویژه، اشکالی برای این روش محسوب می‌شود، اشکال دیگر این روش تاکید بر مقاومت عناصر بحرانی به جای تاکید بر مقاومت کل سازه است اساس کار در روش مسیر جایگزین از ابتدا، تعیین مسیرهای جدید برای انتقال بار است. در این روش اجازه وقوع خرابی موضعی در سازه داده می‌شود ولی درعین حال مسیرهای جایگزین انتقال بار طوری فراهم می‌شوند که خرابی موضعی اولیه جذب شده و از انتشار آن و خرابی کلی سازه جلوگیری شود [۱۶]. برای اینکه سازه توان مقابله با خرابی پیشرونده را داشته باشد انتظار می‌رود که حداقل بتواند از بین رفتن هر یک از اعضای بحرانی را تحمل کند. در این روش برای ارزیابی خطر وقوع خرابی پیشرونده به جای اینکه بارهای غیرعادی بر سازه اعمال شوند عضوی از سازه حذف شده سپس با تحلیل سازه آسیب‌دیده، کنترل می‌شود که آیا با وجود از دست دادن عضو مزبور، سازه می‌تواند بارهای طراحی را تحمل کند یا خیر؟ بررسی روشهای مختلف کاهش خطر خرابی پیشرونده نشان می‌دهد که روش مسیر جایگزین، روشی جامع، منطقی و اقتصادی برای طراحی سازه به صورت مقاوم در برابر خرابی پیشرونده است و استفاده از آن متضمن تامین تمامیت سازه‌ای<sup>۱۰</sup> -مقاومت رضایتبخش در برابر خرابی پیشرونده- است [۱۷]. لذا در ادامه جنبه‌های مختلف روش مسیر جایگزین شرح داده می‌شود.

## ۲-۱- روش مسیر جایگزین خطی استاتیکی

در این روش با تحلیل استاتیکی خطی سازه‌ای که عضوی از آن حذف شده و تحت بار طراحی قرار گرفته است، نیروهای داخلی اعضا تعیین شده و ضریب ایمنی هر یک از اعضا با

سرعتهای اولیه متناظر به کمک رابطه کار-انرژی محاسبه می‌شوند [۱۲]. تحلیل دینامیکی واکنش فروجهش با اعمال سرعتهای اولیه مزبور و بار استاتیکی ثابت فروجهش به بافتار تحت کرنش نظیر موقعیت ز از شکل (۱) انجام می‌گیرد.

با توجه به اهمیت مسئله خرابی پیشرونده در سازه‌های شبکه دولایه فضاکار، ضروری است در طراحی این نوع سازه‌ها تدابیر خاصی برای پیشگیری از بروز پدیده خرابی پیشرونده اتخاذ شود بر این اساس در ادامه پس از تشریح استراتژیهای مختلف طراحی در برابر خرابی پیشرونده، الگوریتم مناسبی برای طراحی سازه‌های شبکه دولایه فضاکار به صورت مقاوم در برابر خرابی پیشرونده پیشنهاد شده که در آن عامل اثرات دینامیکی ناشی از خرابی نیز مدنظر قرار گرفته است.

## ۲- استراتژی طراحی

روشهای کاهش خطر خرابی پیشرونده به سه دسته اصلی (۱) روش کنترل حادثه، (۲) روش طراحی غیر مستقیم و (۳) روش طراحی مستقیم، قابل تفکیک‌اند [۱۴]. در روش کنترل حادثه سعی بر این است که از حادثه بار غیرعادی<sup>۶</sup> (نظیر اضافه بار تصادفی، انفجار، تصادف و ...) اجتناب کرده یا سازه در برابر آن محافظت شود و یا اینکه اثر بار غیرعادی کاهش داده شود. چون این روش توجهی به افزایش مقاومت ذاتی سازه به خرابی پیشرونده نداشته و از طرفی وابسته به عواملی است که خارج از کنترل طراح‌اند، لذا روش کارامدی نیست. در روش طراحی غیر مستقیم با فراهم کردن ترازهای حداقل معین مقاومت، پیوستگی و شکل پذیری برای اتصالات، اعضا و مصالح، استقامت سازه در برابر خرابی پیشرونده افزایش داده می‌شود [۱۵]، به عنوان مثال برای انجام این کار می‌توان در هنگام طراحی سازه، ضرایب اطمینان تمامی اعضای سازه را افزایش داد. این روش را نمی‌توان برای هر بافتار سازه‌ای به کار برد و فقط در سازه‌های عادی که ضوابط مربوطه قبلاً تدوین شده باشد کاربرد دارد. در روش طراحی مستقیم، مقاومت به خرابی پیشرونده و قابلیت جذب خرابی، مستقیماً در طراحی

در سازه تشدید می‌یابد. بنابراین با توجه به ماهیت دینامیکی پدیده خرابی، تحلیل مسیر جایگزین به روش استاتیکی تنها یک شبیه‌سازی تقریبی از رفتار واقعی سازه بوده و توجه به اثرات دینامیکی خرابی عضو برای ارزیابی واقع‌بینانه رفتار خرابی سازه ضروری است [۱۷].

مطالعاتی که تاکنون در زمینه طراحی مقاوم در برابر خرابی پیشرونده در شبکه‌های دولایه فضاکار انجام گرفته، غالباً بر اساس تحلیل استاتیکی خرابی سازه استوار بوده‌اند و چگونگی اعمال اثرات دینامیکی ناشی از خرابی عضو در طراحی مقاوم در برابر خرابی پیشرونده، همواره به عنوان سؤال مهمی پیش روی طراحان قرار داشته است [۱۸] از این رو در ادامه روش جدیدی برای اعمال اثرات دینامیکی ناشی از خرابی ناگهانی عضو در تحلیل مسیر جایگزین بسط داده می‌شود.

### ۲-۳- روش مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی

نکته مهم در این روش، تعیین مدل رفتاری حذف عضو بحرانی است، در این تحقیق انتخاب مدل مناسب بر اساس تعریف روش مسیر جایگزین انجام می‌گیرد. بنا به تعریف در روش مسیر جایگزین، سازه‌ای که تحت بار طراحی قرار دارد و عضوی از آن از بین رفته است، مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا توان سازه برای بازتوزیع نیروهای ناشی از خرابی و خطر وقوع خرابی پیشرونده ارزیابی شود [۱۷]. بر این اساس مدل رفتاری عضوی که خراب می‌شود بدین صورت پیشنهاد می‌شود که عضو مزبور تا رسیدن بار سازه به تراز بار طراحی، عملکرد معمول خود را ایفا کند ولی با رسیدن بار سازه به تراز بار طراحی، در اثر از بین رفتن ناگهانی عضو، ظرفیت باربری آن بلافاصله به صفر کاهش یابد، ولی جرم آن کماکان به صورت آویخته بر سیستم باقی بماند. انتخاب چنین مدلی می‌تواند باعث بروز بیشترین اثرات دینامیکی به دنبال خرابی عضو در تراز بار طراحی شود، زیرا عضو مزبور تا تراز بار طراحی به جذب انرژی پرداخته و در تراز بار طراحی به یکباره تمامی انرژی جذب شده را پخش می‌کند. فرض چنین مدلی برای رفتار عضو بحرانی، سبب

تقسیم ظرفیت نهایی عضو بر نیرویی که عضو تحمل می‌کند، محاسبه می‌شود. اگر ضرایب ایمنی تمامی اعضا بزرگتر از واحد باشد، خرابی پیشرونده رخ نخواهد داد. براساس تعداد اعضای با ضریب ایمنی کوچک، می‌توان احتمال وقوع خرابی پیشرونده در سازه را تعیین کرد [۱۷].

### ۲-۲- روش مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی

روش مسیر جایگزین خطی استاتیکی هیچ اطلاعاتی در مورد نحوه انتشار خرابی در سازه نمی‌دهد بدین منظور نیاز به تحلیل غیرخطی سازه آسیب‌دیده است. در روش مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی سازه‌ای که عضوی بحرانی از آن حذف شده است ظرفیت باربری نهایی سازه آسیب‌دیده مزبور تعیین می‌شود. شکل ماتریسی معادلات تعادل استاتیکی سازه به صورت زیر است:

$$K' D = P \quad (1)$$

که در آن  $K'$  ماتریس سختی سازه آسیب‌دیده،  $D$  بردار تغییر مکان سازه و  $P$  بردار بار سازه است.

در این روش ضریب ایمنی سازه به صورت نسبت ظرفیت باربری نهایی سازه آسیب‌دیده بر بار طراحی سازه تعریف می‌شود. اگر ضریب ایمنی سازه کمتر از واحد باشد در این صورت اعمال بار طراحی به سازه مزبور سبب وقوع خرابی پیشرونده در سازه می‌شود.

در رابطه با به‌کارگیری روش مسیر جایگزین ذکر این نکته ضروری است که اگر از بین رفتن عضو به صورت تدریجی و آرام باشد بازتوزیع نیروها به تدریج انجام گرفته و تحلیل استاتیکی برای ارزیابی رفتار خرابی سازه کافی خواهد بود، اما اگر خرابی عضو به صورت ترد و ناگهانی بوده و سازه تحت اثر بار قرار داشته باشد در این صورت اثرات دینامیکی شدیدی می‌تواند بروز یابد. این اثرات دینامیکی باعث افزایش موقتی نیروهای اعضا شده و اگر این افزایش به حدی باشد که بتواند موجب خرابی اعضای دیگری از سازه شود خطر انتشار خرابی

تناوب طبیعی مد اول ارتعاش سازه تعیین شده و نمو زمانی مناسب برای تحلیل دینامیکی غیرخطی تخمین زده می‌شود و به کمک روش میرایی رایلی<sup>۱۱</sup> فاکتورهای میرایی مناسب برای در نظر گرفتن عامل میرایی در تحلیل دینامیکی غیرخطی تعیین می‌شود.

**مرحله سوم:** به محض رسیدن بار وارده به تراز بار فروجهش  $P_{snap}$ ، تحلیل دینامیکی سیستم آغاز می‌شود. معادلات دینامیکی حرکت سازه به صورت زیر خواهد بود:

$$M\ddot{D}_d + C\dot{D}_d + K(D_d + D_{snap}) = P_{snap} \quad (۴)$$

که در آن  $M$  ماتریس جرم سازه،  $C$  ماتریس میرایی سازه است.  $K$  ماتریس سختی سازه است که هم به تغییر مکان استاتیکی ابتدای فروجهش  $D_{snap}$  و هم به تغییر مکان دینامیکی  $D_d$  بستگی دارد. لازم به تذکر است که در این حالت واکنش دینامیکی سیستم نه به علت اعمال بار دینامیکی خارجی، بلکه تحت اثر بار استاتیکی خارجی و به علت کاهش ناگهانی سختی سازه به واسطه از بین رفتن ناگهانی عضو بحرانی پیش می‌آید. در این تحقیق برای حل معادلات دینامیکی غیرخطی حرکت از روش انتگرالگیری ضمنی گام به گام، بر مبنای روش شتاب میانگین ثابت نیومارک<sup>۱۲</sup>، استفاده شده است و ماتریس جرم سازه از نوع ماتریس جرم متمرکز در نظر گرفته شده است.

### ۳- تحلیل خرابی پیشرونده به روش مسیر جایگزین

#### بر روی یک سازه شبکه دولایه فضاکار نمونه

#### ۳-۱- طرح سازه

در نظر است برای پوشش محوطه‌ای به مساحت  $20 \times 20$  مترمربع، از سیستم شبکه دولایه فضاکاری مطابق شکل (۲) استفاده شود. این شبکه دولایه فضاکار از نوع انحراف‌دار<sup>۱۳</sup> با پلان مربعی و متشکل از  $5 \times 5$  چشمه مربعی است. این سازه در محل چهار گره گوشه‌ای لایه پایینی بر روی چهار تکیه‌گاه مفصلی ساده مستقر شده است. طراحی سازه به روش تنش مجاز و مطابق با ضوابط آیین‌نامه AISC انجام شده است. طراحی سازه به ازای بار گسترده یکنواخت  $3/25 \text{ kPa}$  که شامل

می‌شود رفتار سازه تا تراز بار طراحی، دقیقاً منطبق بر رفتار غیرخطی سازه سالم بوده و در تراز بار طراحی بلافاصله با افزایش تغییر شکل سازه، رفتار غیرخطی استاتیکی سازه از رفتار غیرخطی سازه آسیب‌دیده تبعیت کند. در صورتی که بار نهایی سازه آسیب‌دیده بیش از بار طراحی سازه باشد انتظار می‌رود حذف ناگهانی هریک از اعضای بحرانی در تراز بار طراحی، سبب بروز پدیده فروجهش دینامیکی در سازه شود. اعمال اثرات دینامیکی ناشی از فروجهش باعث بازتوزیع بیشتر نیروها و به وجود آمدن خطر وقوع خرابی پیشرونده در سازه می‌شود. فروجهش دینامیکی باعث افزایش بازتوزیع نیروها و تشدید خطر وقوع خرابی پیشرونده در سازه می‌شود بنابراین این لازم است با انجام تحلیل دینامیکی مشخص شود که آیا سازه آسیب‌دیده قادر به تحمل بار طراحی بدون پیش آمدن خرابی پیشرونده است یا خیر؟

برای تحلیل دینامیکی واکنش خرابی سازه می‌توان مراحل زیر را دنبال کرد:

**مرحله اول:** تحلیل استاتیکی غیرخطی برای به دست آوردن واکنش بار-تغییر مکان سازه تا قبل از رسیدن بار وارده به تراز بار فروجهش انجام می‌گیرد. شکل ماتریسی معادلات حاکم بر تعادل استاتیکی سازه به صورت زیر است:

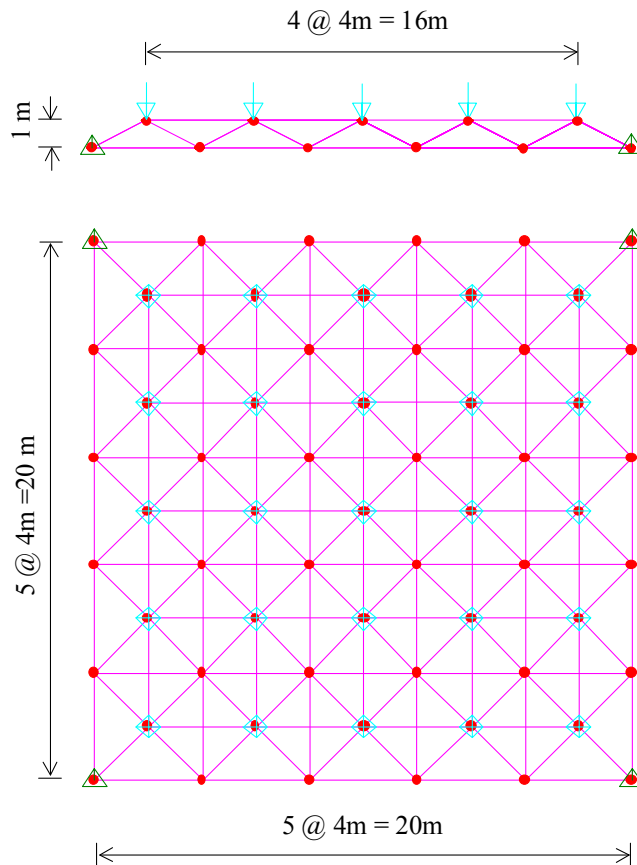
$$K D = P \quad (۲)$$

که در آن  $K$  ماتریس سختی سازه،  $D$  بردار تغییر مکان سازه و  $P$  بردار بار سازه است. پدیده فروجهش در سازه در تراز بار  $P_{snap}$  که در اینجا همان بار طراحی سازه است پدید می‌آید معادلات تعادل استاتیکی سازه در نقطه ابتدای فروجهش، موقعیت  $i$  از شکل (۱) به صورت زیر خواهد بود:

$$K_{snap} D_{snap} = P_{snap} \quad (۳)$$

که در آن  $D_{snap}$  نشانگر تغییر مکان استاتیکی ابتدای فروجهش و  $K_{snap}$  ماتریس سختی متناظر با آن است.

**مرحله دوم:** تحلیل خطی مقادیر ویژه برای تعیین فرکانسهای طبیعی ارتعاش سازه در حالت تعادل استاتیکی متناظر با وضعیت ابتدای فروجهش انجام می‌گیرد. بر این اساس زمان



شکل ۲ - بافتار شبکه دولایه فضاکار فرضی

جدول ۱ - مشخصات اعضای سازه

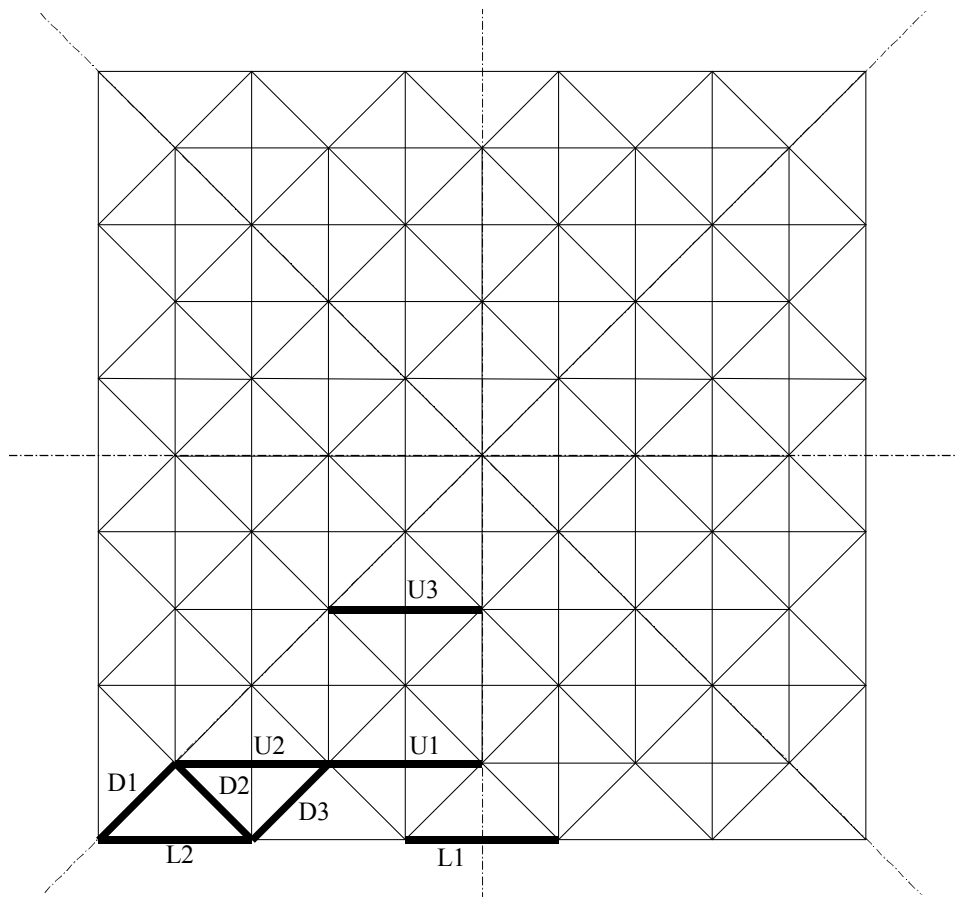
موقعیت عضو	نوع مقطع (mm)	سطح مقطع (mm <sup>2</sup> )	طول عضو (mm)	ضریب لاغری	حداکثر مقاومت فشاری عضو به روش تنش مجاز (N)	حداکثر مقاومت کششی عضو به روش تنش مجاز (N)	تیبندی اعضا
لایه بالا	۱۵۹,۰×۲۵,۰CHS	۱۰۵۲۴	۴۰۰۰	۸۳/۰	۱۰۷۶۰۴۰	۱۵۱۵۴۵۶	تیپ ۱
لایه پایین	۱۳۹,۷×۱۴,۲CHS	۵۵۹۹	۴۰۰۰	۸۹/۵	۵۴۸۳۵۲	۸۰۶۲۵۶	تیپ ۲
۴ عضو گوشه‌ای جان	۱۵۹,۰×۲۵,۰CHS	۱۰۵۲۴	۳۰۰۰	۶۲/۲	۱۲۲۲۲۰۰	۱۵۱۵۴۵۶	تیپ ۳
سایر اعضای جان	۱۳۹,۷×۱۴,۲CHS	۵۵۹۹	۳۰۰۰	۶۷/۱	۶۳۴۳۶۸	۸۰۶۲۵۶	تیپ ۴

الاستیک ۲۱۰۰۰۰ MPa، مطابق جدول (۱) انتخاب شده‌اند.

### ۲-۳- تعیین اعضای بحرانی سازه

به عنوان روشی ساده و موثر برای شناسایی اعضای بحرانی به این ترتیب عمل شده است که با تحلیل خطی سازه سالم، نیروهای داخلی اعضا محاسبه شده و اعضای که تحت

بار مرده  $1/25 \text{ k Pa}$  و بار زنده (سربار برف)  $2/00 \text{ k Pa}$  است انجام گرفته است. بارگذاری مزبور به صورت بارهای متمرکز گرهی در محل گره‌های لایه بالایی بر سازه اعمال شده است، به این ترتیب بار متمرکز گرهی متناظر با بار طراحی در هر گره لایه بالایی سازه برابر با  $52/00 \text{ kN} = 4^2 \times 3/25$  است. کلیه اعضا از نوع نیمرخ لوله‌ای<sup>۱۴</sup> با تنش تسلیم  $240 \text{ MPa}$  و ضریب



شکل ۳ - اعضای بحرانی سازه

ظرفیت نهایی اعضا بر اساس ضوابط آیین نامه AISC قبلاً محاسبه شده و در جدول (۱) آورده شده است.

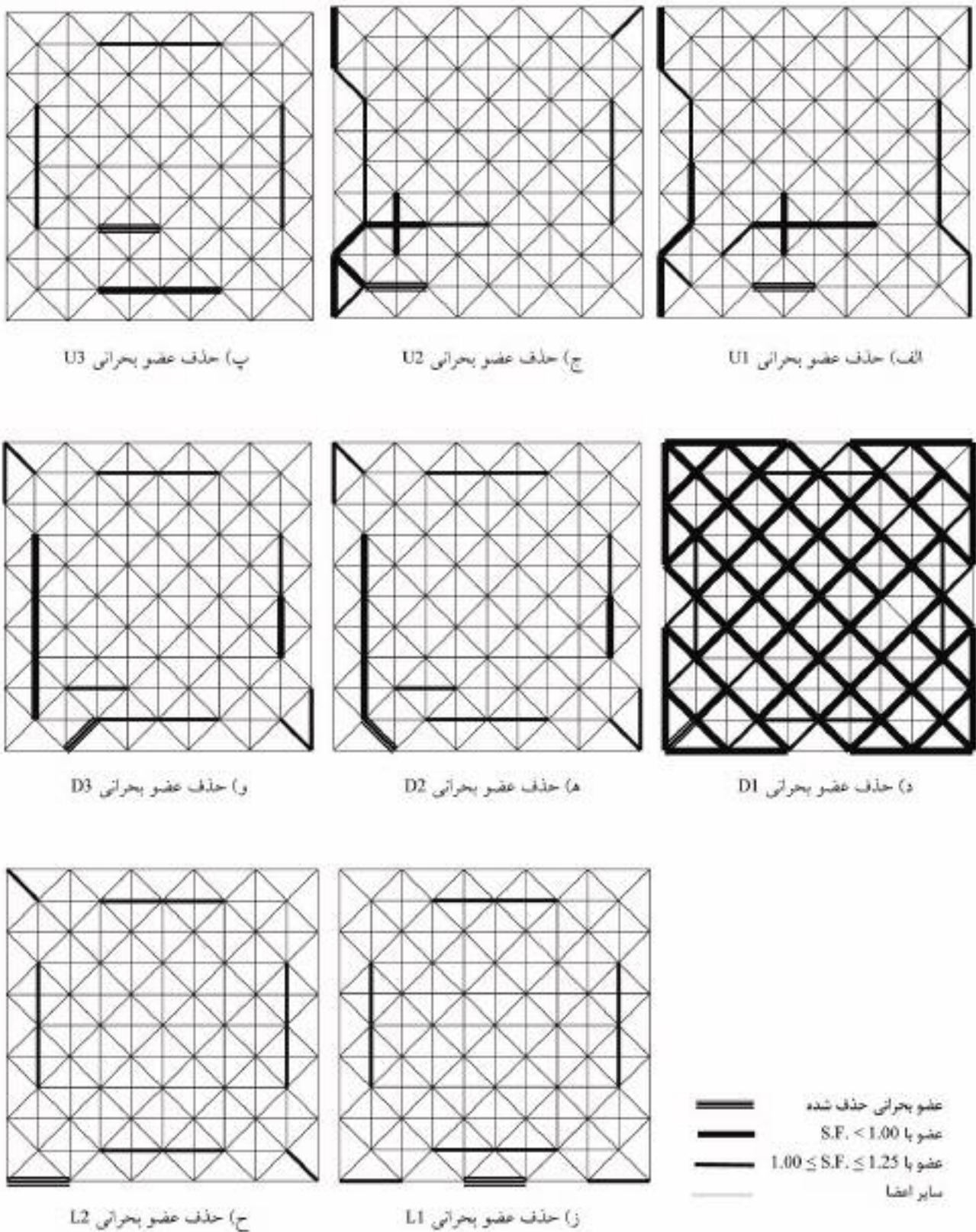
نتایج تحلیل مسیر جایگزین خطی به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی در شکل‌های (۴) به‌طور شماتیک نشان داده شده است و خلاصه نتایج در جدول (۲) آورده شده است. انتظار می‌رود تمام یا بخشی از اعضای که ضریب ایمنی آنها کمتر از  $1/00$  است در اثر اعمال بار طراحی به سازه آسیب‌دیده خراب شوند، اعضای نیز که ضریب ایمنی آنها بین  $1/00$  و  $1/25$  است مشکوک به خرابی‌اند. بر اساس نتایج تحلیل مسیر جایگزین خطی حذف اعضای بحرانی  $D1$ ،  $U1$  و  $U2$  منجر به خرابی بیشتری در سازه شده و ممکن است نهایتاً منجر به وقوع خرابی پیشرونده در سازه شود ولی حذف اعضای چون  $L1$  و  $L2$  خرابی کمتری در سازه پیش آورده و احتمال اینکه باعث بروز خرابی پیشرونده در سازه شوند، بسیار کمتر است. اعضای

نیروهای بزرگتری قرار می‌گیرند به عنوان اعضای بحرانی سازه انتخاب شده‌اند. بدیهی است که خرابی این اعضا منجر به باز توزیع نیروی بیشتری در سازه می‌شود. مطابق شکل (۳)، باتوجه به تقارن موجود اعضای بحرانی سازه اعضای  $U1$ ،  $U2$  و  $U3$  از لایه بالایی، اعضای  $L1$  و  $L2$  از لایه پایینی و نیز اعضای  $D1$ ،  $D2$  و  $D3$  از جان شبکه انتخاب شده‌اند.

### ۳-۳- نتایج تحلیل مسیر جایگزین خطی استاتیکی

تحلیل مسیر جایگزین خطی استاتیکی شبکه دولایه فضاکار، به ازای حذف هر یک از هشت عضو بحرانی سازه انجام شده است. در هر نوبت از تحلیل تنها یک عضو بحرانی سازه حذف شده و سازه تحت بار طراحی قرار گرفته است. ضریب ایمنی هر یک از اعضای سازه آسیب‌دیده با تقسیم ظرفیت نهایی عضو بر نیرویی که عضو مزبور تحمل می‌کند محاسبه شده است.



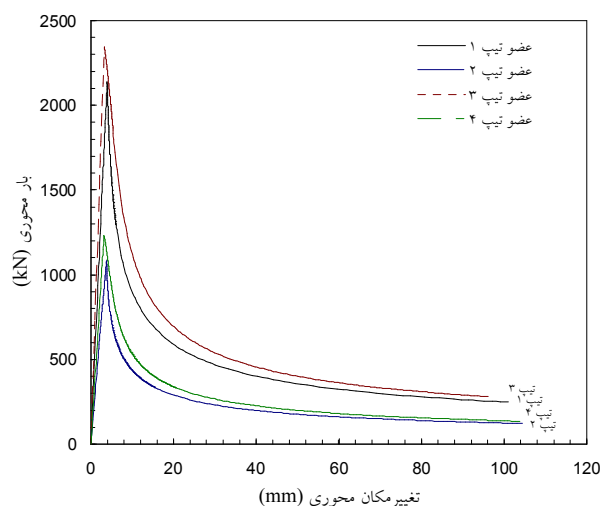


شکل ۴ - نتایج تحلیل مسیر جایگزین خطی استاتیکی به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی سازه

جدول ۲ - نتایج تحلیل مسیر جایگزین خطی

عضو بحرانی حذف شده	تعداد اعضا با ضریب ایمنی کمتر از ۱ (S.F. < ۱,۰۰)	تعداد اعضا با ضریب ایمنی بین ۱ و ۱,۲۵ (۱,۰۰ ≤ S.F. ≤ ۱,۲۵)
U1	۷	۹
U2	۶	۸
U3	۲	۶
L1	۰	۱۰
L2	۰	۱۰
D1	۱۰۴	۱۸
D2	۴	۱۰
D3	۴	۱۰

آسیب دیده به کمک تحلیل غیرخطی استاتیکی تعیین می شود. برای تحلیل واکنش خرابی سازه ابتدا بایستی مدل رفتار غیرخطی هر یک از اعضای سازه تعیین شود. در این تحقیق رفتار بار محوری-تغییر مکان محوری اعضا در کشش، به صورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است و برای تعیین رفتار اعضا در فشار فرض شده است که عضو دوسر مفصلی خرابی از انحنای اولیه کوچکی که از آن به عنوان ناکاملی اولیه تعبیر می شود، برخوردار باشد. حداکثر انحراف اولیه از تار وسط در محل وسط دهانه برابر با مقدار متداول  $\epsilon=0.001L$  در نظر گرفته شده است ( $L$  = طول عضو). با استفاده از روش عناصر محدود و با انجام تحلیل غیر خطی هندسی و مصالح، واکنش بار محوری-تغییر مکان محوری هر چهار تپ عضو سازه تحت اثر نیروی فشاری مطابق شکل (۵) به دست آمده است. در نهایت با استفاده از روش خطی سازی تکه ای-خطی، رابطه ایدئالی تنش-کرنش محوری اعضا مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شده است. در ادامه برای تحلیل غیرخطی واکنش خرابی سازه کافی است هر عضو سازه توسط تنها یک المان خرابی، که رفتار بار محوری-تغییر مکان محوری آن بر اساس مدل ایدئالی شکل (۶) مشخص می شود، مدلسازی شود. برای اعمال اثرات غیرخطی هندسی، روش لاگرانژی کلی<sup>۱۵</sup> بکار برده شده است، معیارهای مورد استفاده در تحلیل لاگرانژی کلی، معیار تنش دوم

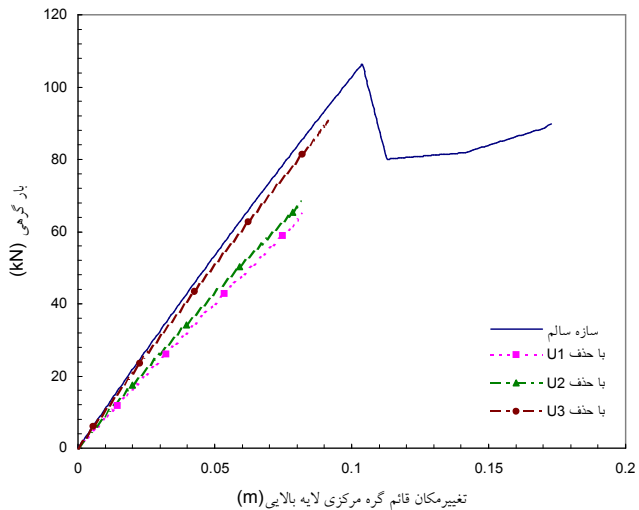


شکل ۵ - واکنش بار محوری-تغییر مکان محوری اعضا در فشار

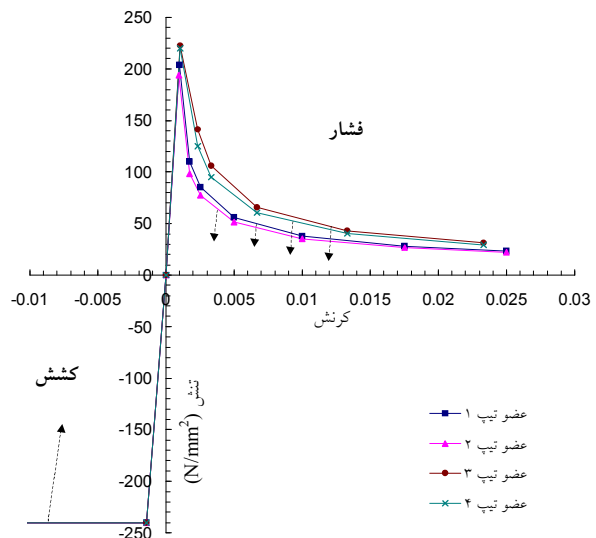
قطری گوشه ای (یعنی اعضای از نوع D1) بحرانی ترین اعضای سازه از نظر تمامیت سازه ای هستند.

### ۳-۴ - نتایج تحلیل مسیر جایگزین غیر خطی استاتیکی

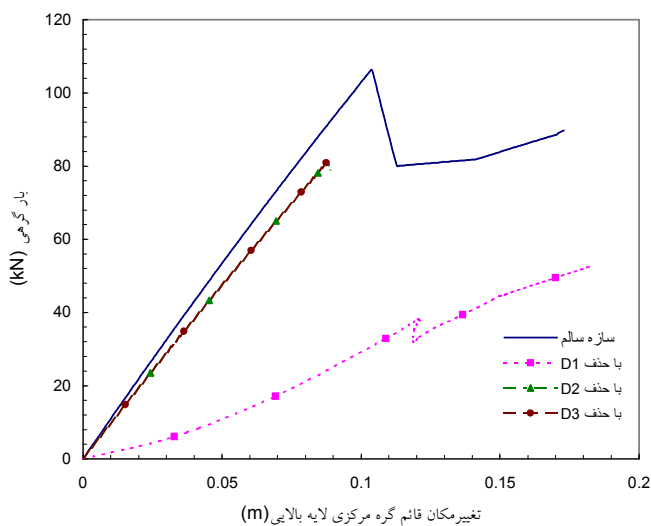
تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی شبکه دولایه فضاکار مزبور، به ازای حذف هر یک از هشت عضو بحرانی سازه انجام گرفته است. در هر نوبت از تحلیل تنها یک عضو بحرانی سازه حذف شده است و فرض شده که سازه از همان ابتدای تحلیل فاقد عضو بحرانی مزبور باشد. بار خرابی سازه



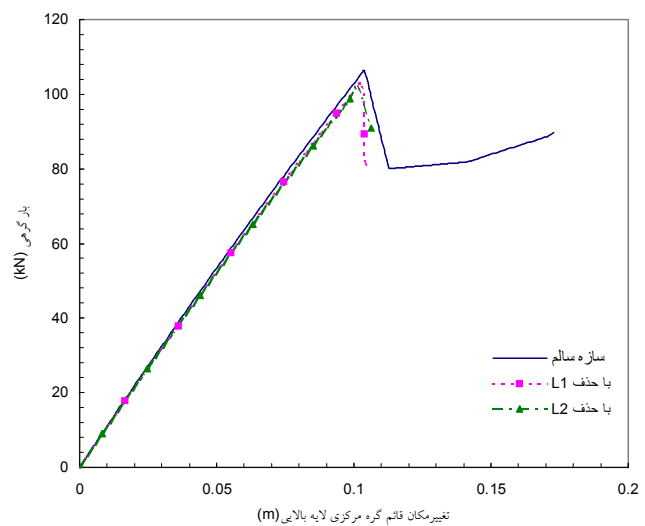
شکل ۷ - واکنش استاتیکی بار- تغییر مکان سازه به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی لایه بالایی



شکل ۶ - رابطه ایدئالی تنش-کرنش محوری اعضا



شکل ۹ - واکنش استاتیکی بار-تغییر مکان سازه به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی جان



شکل ۸ - واکنش استاتیکی بار- تغییر مکان سازه به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی لایه پایینی

سازه (که برابر با ۵۲/۰۰ kN است) محاسبه شده و در جدول (۳) ذکر شده است. بر اساس نتایج حاصله، از بین رفتن اعضای بحرانی D1، U1 و U2 به ترتیب بیشترین تاثیر را در کاهش ظرفیت باربری سازه داشته و از بین رفتن اعضای بحرانی L1 و L2 تاثیر بسیار جزئی در کاهش ظرفیت باربری سازه دارد که این موضوع با نتایج تحلیل مسیر جایگزین خطی استاتیکی نیز مطابقت دارد. اما همان طور که

پیولا-کیرشهف<sup>۱۶</sup> و معیار کرنش گرین-لاگرانژ<sup>۱۷</sup> بوده است. در تحلیل لاگرانژی کلی این معیارهای تنش و کرنش، به بافتار تغییر شکل نیافته اولیه ارجاع داده می شوند.

نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی سازه سالم و هشت سازه آسیب دیده در شکل‌های (۷) تا (۹) نمایش داده شده است. ضرایب ایمنی مربوط به تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی، با تقسیم بار خرابی سازه آسیب دیده بر بار طراحی

جدول ۳- نتایج تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی

عضو بحرانی حذف شده	بار خرابی سازه (kN)	ضریب ایمنی سازه
U1	۶۴,۸۲	۱,۲۵
U2	۶۸,۰۸	۱,۳۱
U3	۹۱,۰۹	۱,۷۵
L1	۱۰۲,۰۲	۱,۹۶
L2	۱۰۲,۷۱	۱,۹۷
D1	۵۲,۸۰	۱,۰۱
D2	۸۰,۹۲	۱,۵۶
D3	۸۰,۹۰	۱,۵۶

جدول (۴) به دست آمده است. زمان تناوب طبیعی مد اول ارتعاش سازه محاسبه شده و نمو زمانی همه تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برابر با  $\omega_1 T_1 < 0.1$  و  $\Delta t = 0.02 \text{ sec}$  در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش میرایی رایلی فاکتورهای میرایی مناسب برای در نظر گرفتن عامل میرایی در تحلیل دینامیکی تعیین شده است. در محاسبه این فاکتورها ضروری است برای مدهای بالاتر که دارای فرکانسهای بزرگتری هستند، نسبتهای میرایی بزرگتری در نظر گرفته شود از این رو نسبتهای میرایی مدهای اول و پنجم ارتعاش سازه، به ترتیب  $\xi_1 = 1.5\%$  و  $\xi_5 = 2.5\%$  فرض شده است و فاکتورهای میرایی رایلی یعنی  $\alpha_m$  و  $\beta_s$ ، به کمک معادلات زیر تعیین شده‌اند [۱۰]:

$$\alpha_m = 2\omega_1\omega_5(\xi_1\omega_5 - \xi_5\omega_1)/(\omega_5^2 - \omega_1^2) \quad (5)$$

$$\beta_s = 2(\xi_5\omega_5 - \xi_1\omega_1)/(\omega_5^2 - \omega_1^2) \quad (6)$$

$\omega_5$  و  $\omega_1$  به ترتیب فرکانس طبیعی اولین و پنجمین مد ارتعاش سازه‌اند. نتایج حاصله در جدول (۴) قید شده است. با توجه به مقادیر فرکانسهای طبیعی مد اول ارتعاش سازه، مشخص می‌شود که از بین رفتن اعضای D1، U1، U2، D2 و ... به ترتیب بیشترین کاهش را در فرکانس طبیعی ارتعاش سازه پدید می‌آورند. جالب توجه است که در بخشهای قبل نیز، بر اساس نتایج تحلیل مسیر جایگزین خطی و غیرخطی، به حساسیت بیشتر حذف این اعضا از نظر تمامیت سازه‌ای اشاره شده بود،

در جدول (۳) ملاحظه می‌شود همه ضرایب ایمنی به دست آمده در تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی، بزرگتر از واحد هستند بدین مفهوم که در صورت حذف هر یک از اعضای بحرانی، سازه آسیب دیده قادر به تحمل بار طراحی بدون ایجاد خرابی کلی در سازه خواهد بود، به عبارت دیگر روش مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی بروز خرابی پیشرونده در سازه را در تراز بار طراحی متفی می‌داند. البته این نکته مهم را نیز باید متذکر شد که در محاسبه ضرایب ایمنی روش مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی برخلاف روش مسیر جایگزین خطی استاتیکی، هیچ ضریب اطمینانی (در ارزیابی بار خرابی سازه آسیب دیده) دخالت داده نشده و این موضوع بایستی در هنگام مقایسه نتایج دو روش حتما مدنظر قرار گیرد.

### ۳-۵- نتایج تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی

تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی سازه، با حذف ناگهانی هر یک از هشت عضو بحرانی سازه انجام شده است، در هر نوبت از تحلیل تنها یک عضو بحرانی سازه، به طور ناگهانی در تراز بار طراحی حذف شده و واکنش دینامیکی خرابی سازه تعیین شده است. قبل از اینکه اقدام به تحلیل دینامیکی سازه شود، ابتدا تحلیل خطی مقادیر ویژه در تراز بار طراحی انجام گرفته و فرکانسهای طبیعی ارتعاش سازه مطابق

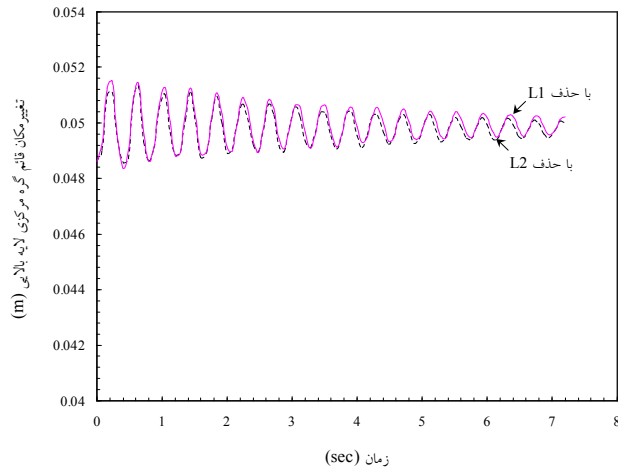
جدول ۴ - نتایج تحلیل مقادیر ویژه

سازه	$\omega_1$	$\omega_5$	$T_1$	$\alpha_m$	$\beta_s$
سالم	۱۵,۹۷۷	۵۲,۴۵۰	۰,۳۹۵	۰,۲۶۱	$۸,۵۸۷ \times ۱۰^{-۴}$
U1 حذف شده	۱۲,۴۰۷	۵۱,۹۰۹	۰,۵۰۶	۰,۲۳۷	$۸,۷۵۰ \times ۱۰^{-۴}$
U2 حذف شده	۱۳,۵۳۳	۴۹,۳۰۴	۰,۴۷۰	۰,۲۳۷	$۹,۱۶۵ \times ۱۰^{-۴}$
U3 حذف شده	۱۵,۷۲۰	۵۱,۶۲۰	۰,۴۰۰	۰,۲۵۶	$۸,۷۲۵ \times ۱۰^{-۴}$
L1 حذف شده	۱۵,۷۲۱	۵۲,۵۰۱	۰,۴۰۰	۰,۲۶۰	$۸,۵۸۲ \times ۱۰^{-۴}$
L2 حذف شده	۱۵,۷۴۲	۵۲,۳۱۰	۰,۳۹۹	۰,۲۵۹	$۸,۶۱۲ \times ۱۰^{-۴}$
D1 حذف شده	۳,۹۸۳	۴۳,۸۹۷	۱,۵۷۸	۰,۱۰۲	$۱۰,۸۵۹ \times ۱۰^{-۴}$
D2 حذف شده	۱۴,۷۱۶	۵۱,۶۵۱	۰,۴۲۷	۰,۲۵۲	$۸,۷۳۵ \times ۱۰^{-۴}$
D3 حذف شده	۱۴,۷۶۹	۵۱,۹۲۱	۰,۴۲۵	۰,۲۵۳	$۸,۶۸۹ \times ۱۰^{-۴}$

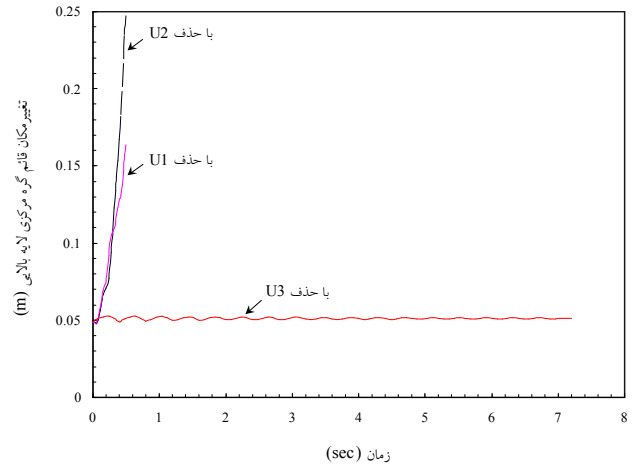
است، در تراز بار طراحی با خرابی ناگهانی عضو U3 فروجهش دینامیکی پدید آمده و به دنبال ارتعاش موقتی ناشی از اثرات دینامیکی فروجهش، مجدداً تعادل استاتیکی سازه در وضعیت تعادل استاتیکی جدیدی که منطبق بر منحنی رفتار استاتیکی سازه آسیب‌دیده است ایجاد می‌شود، در این حالت بار وارد بر سازه را می‌توان تا تراز بار خرابی سازه آسیب دیده افزایش داد. از بین رفتن اعضای بحرانی D1، U1 و U2 همان‌گونه که در شکل‌های (۱۰) و (۱۲) نشان داده شده است باعث خرابی کلی در سازه می‌شود. از بین رفتن این اعضا با اثرات دینامیکی بسیار شدیدی همراه است به طوری که سازه قادر به تحمل بار بازتوزیع شده نبوده و خراب می‌شود، یعنی از بین رفتن هر یک از اعضای D1، U1 و U2 در تراز بار طراحی سبب انتشار خرابی و وقوع خرابی پیشرونده در سازه می‌شود. پس در این سه حالت برخلاف مسیر جایگزین غیرخطی استاتیکی، ضریب ایمنی سازه بیشتر از یک نبوده و لازم است تدابیر خاصی برای پیشگیری از وقوع پدیده خرابی پیشرونده اتخاذ شود. منحنی کامل رفتار بار-تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه به ازای حذف ناگهانی عضو U1 در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در اینجا نیز تا پیش از خرابی عضو U1 در تراز بار طراحی، رفتار بار-تغییر مکان سازه منطبق بر رفتار استاتیکی سازه سالم بوده و در تراز بار طراحی به دنبال خرابی ناگهانی عضو U1، پدیده

نتیجه اینکه میزان کاهش فرکانس سازه در اثر حذف عضو بحرانی، خود می‌تواند به عنوان معیاری مناسب برای تعیین احتمال وقوع خرابی پیشرونده در سازه، مورد توجه و مطالعه قرار گیرد.

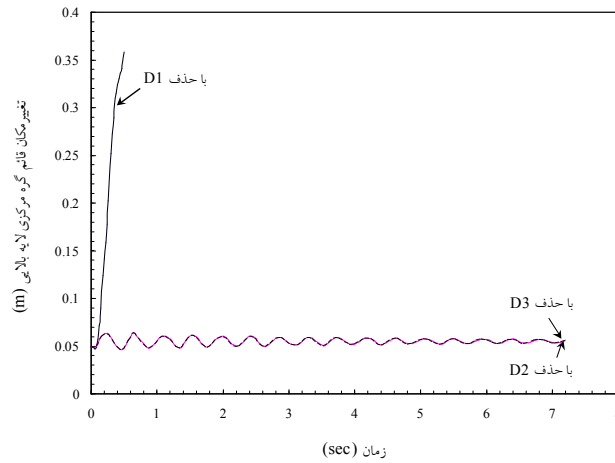
با انجام تحلیل غیرخطی دینامیکی، واکنش زمانی تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه، به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی لایه‌های بالایی، پایینی و جان سازه، به ترتیب مطابق شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) به دست آمده است. بر اساس نتایج مزبور، از بین رفتن هر یک از اعضای بحرانی U3، D2، D3، L1 و L2 بدون اینکه باعث خرابی اعضای دیگری از سازه شود فقط منجر به ایجاد ارتعاش جزئی موقتی در سازه شده است که این ارتعاش به واسطه عامل میرایی به تدریج مستهلک می‌شود و بار وارد بر سازه را می‌توان تا تراز بار خرابی سازه آسیب‌دیده افزایش داد. از بین رفتن هیچ‌یک از اعضای مزبور باعث بروز خرابی پیشرونده در سازه نشده و ضرایب ایمنی در مقایسه با روش مسیر جایگزین غیرخطی بدون تغییر باقی می‌مانند. به عنوان نمونه منحنی کامل بار-تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه به ازای حذف ناگهانی عضو U3، در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تا قبل از رسیدن بار وارده به تراز بار طراحی یعنی تا پیش از خرابی عضو U3 رفتار بار-تغییر مکان سازه منطبق بر رفتار استاتیکی سازه سالم



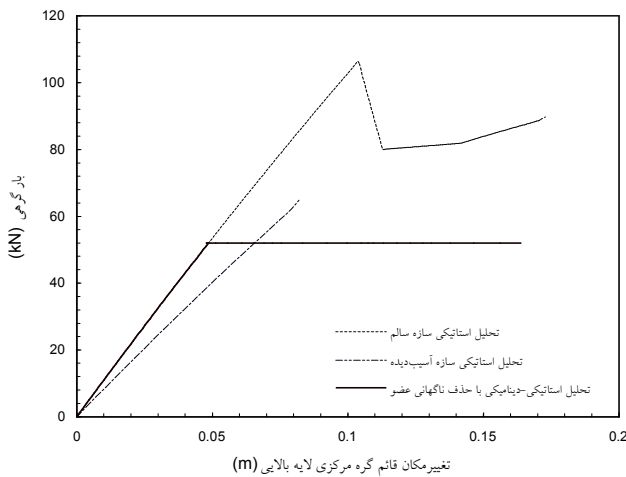
شکل ۱۱ - واکنش زمانی تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی لایه پایینی



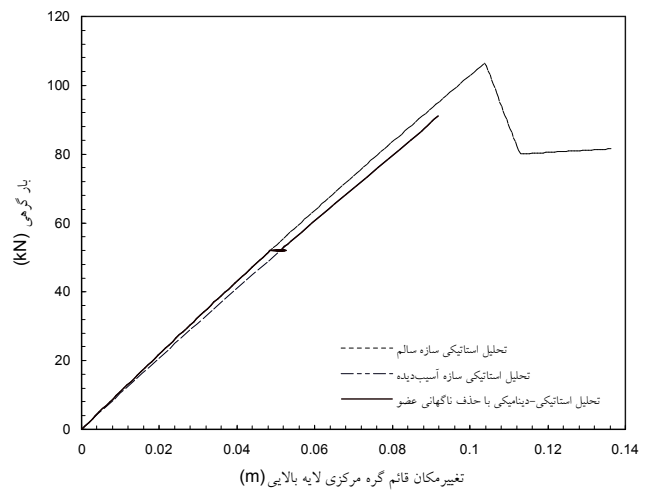
شکل ۱۰ - واکنش زمانی تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی لایه بالایی



شکل ۱۲ - واکنش زمانی تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه به ازای حذف هر یک از اعضای بحرانی جان



شکل ۱۴ - واکنش کامل بار-تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه به ازای حذف عضو بحرانی U1



شکل ۱۳ - واکنش کامل بار-تغییر مکان گره مرکزی لایه بالایی سازه به ازای حذف عضو بحرانی U3

طراحی شبکه‌های دولایه فضاکار به صورت مقاوم در برابر خرابی پیشرونده ضروری است تدابیر خاصی برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی ناشی از خرابی اعضا در تحلیل و طراحی سازه اتخاذ شود. روش مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی که جزئیات آن در این مقاله مطرح شده است به خاطر منظور کردن اثرات مزبور، روش مناسبی برای ارزیابی واقع‌بینانه خطر خرابی پیشرونده در سازه است. نتایج تحلیل مسیر جایگزین سازه شبکه دولایه فرضی نشان‌دهنده اهمیت و ضرورت به‌کارگیری روش مزبور برای تعیین صحیح رفتار خرابی سازه است.

فروجهش دینامیکی ایجاد می‌شود که به علت اثرات دینامیکی شدید آن، سبب ناپایداری سازه و بروز خرابی پیشرونده در سازه می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

خرابی ناگهانی اعضای شبکه‌های دولایه فضاکار با اثرات دینامیکی شدیدی می‌تواند همراه باشد، اثرات دینامیکی مزبور باعث بازتوزیع بیشتر نیروهای داخلی سازه و به تبع آن تشدید خطر بروز خرابی پیشرونده در سازه می‌شوند بنابراین برای

#### واژه نامه

- |                                       |                                     |                             |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1. double layer grid space structures | 7. specific local resistance method | 12. Newmark                 |
| 2. progressive collapse               | 8. alternate path method            | 13. offset                  |
| 3. snap-through                       | 9. critical                         | 14. Circular hollow Section |
| 4. pseudo force method                | 10. structural integrity            | 15. total Lagrangian        |
| 5. post buckling                      | 11. Rayleigh                        | 16. Piola-Kirchhoff         |
| 6. abnormal load                      |                                     | 17. Green-Lagrange          |

#### مراجع

- Smith, E.A., and Epstein, H., "Hartford Coliseum Roof Collapse: Structural Sequence and Lesson Learned," *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 52, No. 4, pp. 59-62, 1980.
- Schmidt, L., Morgan, P., and Hanaor, A., "Ultimate Load Testing of Space Trusses," *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 108, No. 6, pp. 1326-1335, 1982.
- Davies, G., and Neal, B.G., "The Dynamical Behavior of a Strut in a Truss Framework," *Proceedings of the Royal Society*, London, England, A253, pp. 542-562, 1959.
- Abedi, K., "Instability Behaviour and Collapse Analysis of Space Structures," *Proc. of 1st Iranian National Conf. on Space Structures*, S. Malek, ed., Tehran, 2000.
- Malla R., Wang B., and Nalluri B., "Dynamic Effects of Progressive Member Failure on the Response of Truss Structures," *Dynamic Response and Progressive Failure of Special Structures*, R. Malla, ed., ASCE, New York, N.Y., pp. 60-76, 1993.
- Malla R., and Wang B., "A Method to Determine Dynamic Response of Truss Structures During Sudden Consecutive Member Failure," *Proc. of Space Structures-4*, G.A.R. Parke and C.M. Howard, eds., Vol. 1, Thomas Telford, London, England, pp. 413-422, 1993.
- Malla R.B., and Nalluri B., "Dynamic Effects of Member Failure on the Response of Truss Type Space Structures," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 32, No. 3, pp. 545-551, 1995.
- Morris, N., "Effect of Member Snap on Progressive Failure Collapse of Space Structures," *Dynamic response and progressive failure of special structures*, R. Malla, ed., ASCE, New York, N.Y., pp. 17-31, 1993.
- Morris, N., "Effect of Member Snap on Space Truss Collapse," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 119, No. 4, pp. 870-886, 1993.
- Abedi, K., and Parke, G.A.R., "Progressive Collapse of Single-Layer Braced Domes," *International Journal of Space Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 291-306, 1996.
- Abedi K., "Propagation of Local Instabilities in Braced Domes," Ph.D. thesis, Univ. of Surrey, England, 1996.
- Sheidaii, M.R., Parke, G.A.R., Abedi, K., and Behraves, A., "Dynamic Snap-through Buckling of Truss-type Structures," *International Journal of Space Structures*, Vol. 16, No. 2, pp. 85-93, 2001.
- Sheidaii, M.R., "An Investigation into the Progressive Collapse Behavior of Double Layer

- Grid Space Structures,” Ph.D. thesis, Univ. of Tabriz, Iran, 2001.
14. Burnett, E.F.P., “The Avoidance of Progressive Collapse: Regulatory Approaches to the Problem.” *NBS-GCR 75-48*, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1975.
  15. Fintel M., and Schults D., “A Philosophy for Structural Integrity of Large Panel Buildings,” *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 21, No. 3, pp. 46-69, 1976.
  16. Leyendecker, E.V., and Ellingwood, B., “Design Methods to Reducing the Risk of Progressive Collapse in Buildings,” Building Science 98, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1977.
  17. Murtha-Smith, E.A., “Alternate Path Analysis of Space Trusses for Progressive Collapse,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 9, pp. 1978-1999, 1988.
  18. Malla, R., and Serrette, R., “Double-layer Grids: Review of Dynamic Analysis Methods and Special Topics,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.122, No. 8, pp. 882-892, 1996.