

Investigating the effect of sudden node failure on the progressive collapse analysis of tensegrity barrel vaults

Elham Ghandi^{1*}, Vahid Habibi Sheykh Ahmad²

1- Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mahagheh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Master Graduate, Faculty of Engineering, University of Mahagheh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Tensegrity structures are usually composed of a large number of members and connections and have a high degree of uncertainty. Due to the importance of the fact that tensegrity barrel vaults are used in applications such as: meeting halls, passenger terminals, sports stadiums as well as industrial and military applications and in case of any failure in the tensegrity structure of its roof, the possibility of human and financial injuries is very high; Sudden failure of the node (due to: weakness in the connection material or lack of proper connection of members to the node) can lead to local instability and in more critical conditions, lead to overall instability of the structure. As sudden failure in the members of the structure can lead to local or overall instability in the structure; however, due to the connection of several members in one node, sudden failure in one node can lead to more unstable conditions in the structure compared to the state of member failure. Therefore, in this research project, the effect of sudden node failure on the progressive collapse of two-layer tensegrity barrel vault consisting of square simplexes is investigated by performing nonlinear dynamic analyzes in Abaqus software. The results of the analyzes showed that in the analyzes corresponding to the remove of the lower layer nodes, global instability occurs, while for the remove of the upper layer nodes, no analysis has led to the global instability. Therefore, the sudden elimination of bottom layer nodes creates far more unstable conditions than the removal of top layer nodes in the structure. Also, in the analysis corresponding to the failure of the nodes located in the central part of the barrel vault, no global instability occurs. Therefore, the location of the removed node can be effective in the occurrence of instability.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 October 2024

Revise Date: 23 December 2024

Accept Date: 06 January 2025

Keywords:

Tensegrity barrel vault
Progressive collapse
Sudden failure of the node
Finite element
Nonlinear dynamic analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.480331.3532](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.480331.3532)

*Corresponding author: Elham Ghandi

Email address: ghandi@uma.ac.ir

بررسی تاثیر خرابی ناگهانی گره در تحلیل خرابی پیش‌رونده چلیک‌های کش‌بستی

الهام قندی^{۱*}، وحید حبیبی شیخ احمد^۲

۱- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

معمولا سازه‌های کش‌بستی از تعداد بسیار زیادی از اعضا و اتصالات تشکیل شده‌اند و دارای درجه نامعینی بالایی می‌باشند. نظر به اهمیت این موضوع که چلیک‌های کش‌بستی در کاربردهایی نظیر: سالن‌های اجتماعات، ترمینال‌های مسافری، استادبوم‌های ورزشی و همچنین کاربردهای صنعتی و نظامی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و در صورت بروز هر گونه خرابی در سازه کش‌بستی سقف آنها، احتمال صدمات جانی و مالی بسیار زیاد می‌باشد؛ خرابی ناگهانی در گره (در اثر: ضعف در مصالح اتصال یا عدم اتصال مناسب اعضا به گره) می‌تواند منجر به ناپایداری جزئی و در شرایط بحرانی‌تری، منجر به خرابی کلی سازه گردد. همچنانکه خرابی ناگهانی در اعضای سازه می‌تواند منجر به ایجاد ناپایداری جزئی یا کلی در سازه شود؛ اما با توجه به اتصال چندین عضو در یک گره، خرابی ناگهانی در یک گره می‌تواند در مقایسه با حالت خرابی عضو، منجر به شرایط ناپایداری در سازه شود. بنابراین در این مقاله تاثیر خرابی ناگهانی گره در خرابی پیش‌رونده چلیک دو لایه کش‌بستی متشکل از سادک‌های مربعی با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در نرم‌افزار ABAQUS بررسی می‌گردد. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن است که خرابی گره‌های لایه پایین چلیک منجر به ناپایداری کلی می‌شود، در حالی که به ازای اعمال خرابی ناگهانی در گره‌های لایه بالایی، هیچ تحلیلی منجر به ناپایداری کلی نشده است. بنابراین خرابی ناگهانی گره‌های لایه پایینی به مراتب شرایط ناپایداری نسبت به خرابی گره‌های لایه بالایی در سازه چلیک کش‌بستی ایجاد می‌کنند. همچنین در تحلیل‌های متناظر با خرابی گره‌های واقع در قسمت مرکزی چلیک در هیچ حالتی ناپایداری کلی اتفاق نمی‌افتد. بنابراین موقعیت مکانی گره خراب شده می‌تواند در وقوع ناپایداری موثر باشد.

کلمات کلیدی: چلیک کش‌بستی، خرابی پیش‌رونده، تحلیل دینامیکی غیرخطی، خرابی ناگهانی گره، اجزاء محدود.

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | |
|---|------------|---------------|------------------------------------|------------|------------|
| doi: | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| 10.22065/jsce.2025.480331.3532 | ۱۴۰۴/۰۲/۳۱ | ۱۴۰۳/۱۰/۱۷ | ۱۴۰۳/۱۰/۱۷ | ۱۴۰۳/۱۰/۰۳ | ۱۴۰۳/۰۷/۲۰ |
| الهام قندی ghandi@uma.ac.ir | | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | | |

۱- مقدمه

هر سازه‌ای در طول عمر خود، ممکن است در اثر اقدامات غیرمنتظره‌ای در معرض آسیب‌های موضعی کوچک قرار گیرد. این آسیب اولیه ممکن است در همان حد محدود بماند و یا می‌تواند افزایش یابد تا به سطح بیشتری از آسیب برسد. احتمال دوم معمولاً به عنوان خرابی پیش‌رونده شناخته می‌شود. به بیان ساده‌تر خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها را می‌توان به عنوان یک واکنش زنجیره‌ای تعریف کرد که در آن تحت عللی خاص (بارگذاری غیر متعارف مانند تصادف وسیله نقلیه، انفجار، حمله تروریستی یا خطای ساخت و طراحی) صدمه موضعی در ناحیه نسبتاً کوچکی از سازه رخ می‌دهد و در شرایطی این صدمه موضعی، به بخش‌های دیگری از سازه گسترش یافته و در نهایت به خرابی کلی سازه، منتهی می‌شود. اکثر تحقیقات و الزامات طراحی ارائه شده بر ارزیابی رفتار خرابی پیش‌رونده ساختمانهای چند طبقه متمرکز شده است. مطالعات کمی برای بررسی پاسخ سازه‌های فضاکار انجام شده است [۱]. چلیک کش‌بستی دو لایه^۱ یکی از انواع معمول سازه‌های فضاکار کش‌بستی^۲ است که دارای قابلیت‌هایی از قبیل پوشش دهانه‌های بزرگ بدون نیاز به تکیه‌گاههای میانی و همچنین داشتن فرم‌های بدیع معماری می‌باشد. به دلیل درجه نامعینی بالای این سازه‌ها، اغلب تصور می‌شود که قید اضافی کافی دارند به طوری که از دست دادن یک عضو باعث توزیع مجدد نیرو می‌شود که می‌تواند توسط سازه باقی مانده تحمل شود. بنابراین در مرحله طراحی، معمولاً خرابی پیش‌رونده این سازه‌ها هنگام خرابی برخی از اعضای آنها در نظر گرفته نمی‌شود. با این حال خرابی چندین سازه برجسته در گذشته نشان داده است که خرابی پیش‌رونده این سازه‌ها می‌تواند در پی از دست دادن چند عضو مهم اتفاق بیفتد. خرابی پیش‌رونده سقف سالن ورزشی هارتفورد در سال ۱۹۷۸ نمونه‌ای از خرابی مذکور است. به طور کلی، خرابی پیش‌رونده در مدت کوتاهی اتفاق می‌افتد. بنابراین، جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در یک سازه پس از وقوع غیرممکن است. این موضوع اهمیت درک پاسخ سازه را در هنگام از دست دادن اعضا افزایش می‌دهد. یکی از موثرترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده، روش تحلیل مسیر جایگزین است. در این روش، سازه معیوب در یک سطح بار مشخص (به عنوان مثال، سطح بار طراحی) برای بررسی عملکرد سازه تحت بارهای توزیع شده به دلیل از دست دادن اعضا، تحلیل می‌شود. سپس به منظور جلوگیری از انتشار خرابی موضعی، سازه به گونه‌ای طراحی می‌شود که خرابی موضعی (یعنی از دست دادن اعضا) را حفظ کند و مسیر جدیدی برای انتقال بارها ایجاد کند. مطالعات محدودی در رابطه با رفتار خرابی پیش‌رونده سازه‌های کش‌بستی در دهه‌های اخیر انجام شده است [۱]. شکسته‌بند و همکاران تأثیر از دست دادن اعضا بر رفتار شبکه‌های کش‌بستی را از طریق مطالعات عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که اثر حذف تدریجی اعضا بر سازه موضعی است، در حالی که حذف ناگهانی می‌تواند منجر به اثرات قابل توجهی شود [۲-۵]. نیک‌پور و شیدائی، موضوع خرابی پیش‌رونده را در چلیک دولایه فضاکار با پوشانه سبک تحت ترکیب بارهای مختلف بررسی نمودند. در مطالعه ایشان از اعضای با تنش بیشینه به عنوان اعضای بحرانی استفاده شده است [۶]. فرهودی و قندی با روش مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی، رفتار خرابی پیش‌رونده شبکه‌های دو لایه کش‌بستی با بافتار پیوسته و ناپیوسته متشکل از سادک‌های مثلثی را تحت بار بهره‌برداری مورد مطالعه قرار دادند [۷]. حبیبی شیخ احمد و قندی خرابی پیش‌رونده چلیک‌های دولایه کش‌بستی متشکل از سادک‌های مربعی را به روش اجزاء محدود مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مطالعه ایشان، اعضای که دارای تنش بیشتری تحت اثر سطح بار مورد نظر بودند به عنوان اعضای بحرانی جهت ایجاد خرابی اولیه در سازه انتخاب شدند. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن بود که حذف اعضای بحرانی لایه بالا و پایین چلیک منجر به کاهش محسوس در ظرفیت باربری سازه نمی‌شود [۸]. در ادامه این کار، حبیبی شیخ احمد و قندی حساسیت چلیک‌های کش‌بستی مذکور را به حذف دینامیکی عضو مورد مطالعه قرار دادند. ایشان از تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی استفاده کردند. نتایج تحلیل‌ها نشان‌دهنده رفتار نامطلوب سازه حین حذف دینامیکی اعضای فشاری بود [۹]. عابدی و روشن‌دل کلاچاهی به بررسی خرابی پیش‌رونده در سازه‌های فضاکار چلیکی دولایه به روش مسیر جایگزین پرداخته‌اند. در مطالعه ایشان ابتدا اعضای که کماتش آنها منجر به خرابی کلی سازه می‌شد به عنوان اعضای بحرانی انتخاب شده است. سپس تحلیل‌های مسیر جایگزین استاتیکی و دینامیکی غیرخطی هندسی و مصالح

¹ Double-layer tensegrity barrel vault

² Tensegrity

³ Simplex

با حذف اعضای بحرانی انجام شده است [۱۰]. شن و همکاران به ارائه روشی برای شناسایی اعضای بحرانی در چهار نوع گنبد فضاکار تک لایه، پرداخته‌اند. ایشان با استفاده از روش تحلیل مسیر جایگزین غیرخطی با استفاده از صدها تحلیل دینامیکی غیرخطی مکانیزم‌های خرابی گنبد‌های مختلف را بررسی نموده‌اند [۱۱]. میرزاآقازاده و همکاران رفتار خرابی چلیک‌های کش‌بستی متشکل از واحدهای دو هرمی (DP)^۴ را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان مشاهده کردند که سازه‌های با بارگذاری متقارن ناپایداری نقطه دوشاخگی را تجربه می‌کنند در صورتیکه سازه‌های با بارگذاری نامتقارن ناپایداری نقطه حدی را تجربه می‌کنند [۱۲]. قندی و حبیبی شیخ احمد به شناسایی اعضای بحرانی چلیک دو لایه کش‌بستی متشکل از سادک‌های مربعی با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که اعضای با تنش بیشینه، بحرانی‌ترین اعضا نیستند و تحلیل‌های مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی آنها تحت شرایط این مطالعه، منجر به فروپاشی کلی، محلی و یا اولیه سازه نیز نمی‌شوند. موقعیت مرزی عضو محذوف، به تنهایی نمی‌تواند منجر به ایجاد ناپایداری در چلیک کش‌بستی شود. در حالت کلی، هر چه عضو مورد بررسی به مرکز چلیک نزدیکتر باشد، رفتار بحرانی‌تری مشاهده می‌شود [۱۳]. وانگ و همکاران اثر خرابی کابل یک گنبد معلق فضاکار را از طریق شبیه سازی عددی و انجام آزمایش مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد که خرابی کابل باعث نوسانات قابل توجهی در اعضای باقی مانده می‌شود و گنبد معلق سختی زیادی از خود نشان داد، به طوریکه هیچ رفتار خرابی یا شکست قابل توجهی مشاهده نشد [۱۴]. لو و همکاران اثر خرابی کابل سازه ریسمانی خرپایی ۶ متری را به صورت عددی و آزمایشگاهی، مورد ارزیابی قرار دادند و اشکال خرابی و مودهای شکست سازه را بدست آوردند [۱۵]. ژانگا و همکاران روش مدل‌سازی نوینی برای سازه خرپایی ریسمانی ارائه دادند. ایشان برای اولین بار عملکرد خرابی سازه‌های خرپایی بزرگ را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور ابتدا، مدل المان محدود یک سازه ریسمانی خرپایی مسطح با دهانه ۷۲ متری را برای مطالعه عملکرد خرابی پیش‌رونده سازه پس از خرابی کابل ایجاد کردند. سپس پاسخ دینامیکی سازه تحت بارهای مختلف را بدست آوردند. در تحقیق ایشان اثر پارامترهای تغییر سختی تکیه‌گاه ارتجاعی، سطح مقطع کابل و مدت زمان خرابی کابل بر پاسخ دینامیکی سازه و حالت خرابی پیش‌رونده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که پس از خرابی کابل، وضعیت تنش خرپا از یک قوس به یک تیر دو سر ساده تغییر می‌کند، در هنگام رسیدن به بار خرابی، سازه به جای رسیدن به موقعیت‌های تعادل جدید در عرض ۵ ثانیه فرو می‌ریزد. علاوه بر این، سازه با تکیه‌گاه ارتجاعی سخت‌تر، مقاومت بالاتری در برابر خرابی نشان داد. افزایش سطح مقطع کابل به سختی می‌تواند پاسخ دینامیکی سازه را کاهش دهد. با این حال، زمانی که زمان شکست آنی کابل از ۰/۱ ثانیه فراتر رفت، کاهش قابل توجهی در پاسخ دینامیکی سازه مشاهده شد [۱۶]. متین‌پور و همکاران رفتار ناپایداری و خرابی چلیک‌های مشبک تک لایه تقویت شده با کابل‌های خارج از صفحه جدید را در تلاش برای دستیابی به مدل مناسب مورد بررسی قرار داده‌اند. پارامترهای متعددی از جمله طول دهانه، نسبت ارتفاع به دهانه، طول میله‌ها و شرایط مرزی در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از مقدار معینی از پیش‌تنیدگی کابل‌ها، مدل‌ها تحت ترکیب بارهای معمولی از جمله بارهای مرده، برف، زلزله و باد طراحی شده‌اند. تحلیل المان محدود غیرخطی تحت توزیع بار برف متقارن و نامتقارن با در نظر گرفتن یک رفتار الاستوپلاستیک سخت‌شونده برای مصالح فولادی و یک رفتار الاستوپلاستیک برای مصالح کابلی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که خرابی بدون فروجهش دینامیکی، مکانیزم خرابی اصلی در همه مدل‌ها است. علاوه بر این، در الگوی بارگذاری متقارن، تأثیر آرایش تکیه‌گاه‌ها ناچیز است. همچنین نتایج نشان داد که کابل‌های خارج از صفحه در جهت‌های طولی چلیک‌های مشبک تک لایه تقویت شده با کابل، منجر به افزایش ناچیز بار خرابی می‌شود [۱۷]. خرابی پیش‌رونده گنبد‌های کابلی تقویت شده با کابل نیز توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته و راهکارهایی برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده آنها ارائه شده است [۱۸ و ۱۹]. اصغری و همکاران خرابی پیش‌رونده گنبد‌های هیبریدی کابلی که ترکیبی از حلقه‌های کش‌بستی و گنبد‌های کابلی است مورد بررسی قرار دادند و روش‌های مختلف تقویتی برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده آنها ارائه دادند [۲۰-۲۲].

همانطور که مشاهده شد در هیچ یک از مطالعات انجام شده پیشین، خرابی گره به عنوان عاملی در بررسی خرابی پیش‌رونده سازه کش‌بستی در نظر گرفته نشده است. در صورتی که به نظر می‌رسد وقوع خرابی اولیه در گره، به جهت اتصال چندین عضو در آن، منجر به

⁴ -Di-pyramid

رفتار ناپایداری در سازه شود. بنابراین در این مقاله به بررسی تاثیر خرابی ناگهانی گره در تحلیل خرابی پیش‌رونده چلیک‌های کش‌بستی دو لایه به روش عددی با نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS پرداخته می‌شود.

نمای کلی مقاله حاضر به صورت خلاصه عبارت است از:

- طراحی مقاطع اعضای سازه
- اعمال پیش‌تندگی جهت ایجاد پایداری در سازه
- انتخاب دو سطح بارگذاری
- محاسبه ضرایب رایلی متناسب با هر حالت بارگذاری و هر حالت حذف عضو
- انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی به ازای هر حالت حذف گره
- بررسی خروجی تحلیل و نتیجه‌گیری

۲- مدل‌سازی عناصر محدود

در این مقاله نرم‌افزار فرمین [۲۳] برای ایجاد هندسه چلیک کش‌بستی استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به صورت حرفه‌ای برای ایجاد اشکال هندسی مختلف در سازه‌های فضاکار استفاده می‌شود. پس از تعریف هندسه چلیک کش‌بستی، فایل‌های خروجی نرم‌افزار فرمین به نرم‌افزار ABAQUS [۲۴] انتقال داده می‌شود.

۲-۱- مدل‌سازی اعضا در ABAQUS

اعضای سازه‌های کش‌بستی به صورت اعضای فشاری و کششی مدل‌سازی می‌شوند. المان truss در نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی هر یک از این اعضا استفاده می‌شود. برای اعضای کششی که به صورت منحصراً کششی (سختی صفر اعضای کششی در تنش فشاری) عمل می‌کنند تنظیمات No Compression در حالت فعال در نظر گرفته می‌شود.

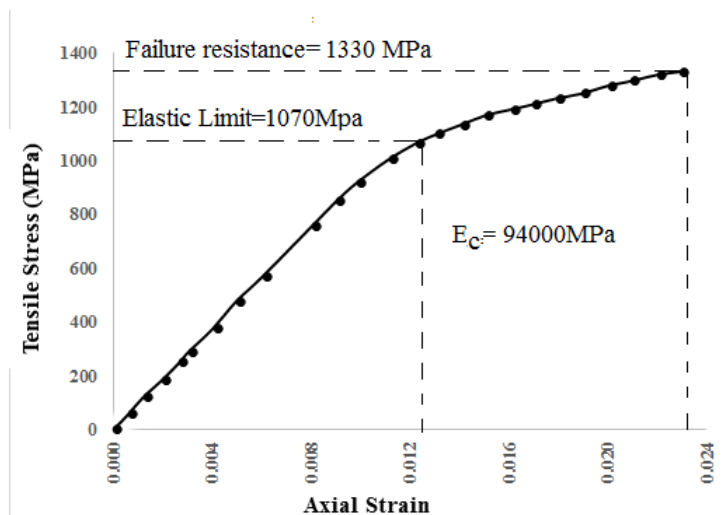
۲-۲- مدل‌سازی رفتار مصالح

با توجه به اینکه اعضای چلیک کش‌بستی مورد مطالعه از دو نوع فشاری و کششی می‌باشند، برای اعضای کششی از مقاطع کابلی با مشخصات مصالح مطابق شکل ۱ استفاده گردیده است. همچنین برای اعضای فشاری از مقاطع لوله‌ای استفاده شده است. در اعضای فشاری با توجه به اینکه یک ناکاملی اولیه در وسط طول آنها در نظر گرفته شده است، بنابراین برای مشخصات مصالح اعضای فشاری از نمودار تنش- کرنش شکل ۲ استفاده می‌گردد. جهت بدست آوردن نمودار مذکور، ابتدا در نرم‌افزار ABAQUS و در یک فایل جداگانه عضو مستقیم دوسر مفصل با مقطع لوله‌ای مدل‌سازی می‌شود. در وسط طول عضو، یک ناکاملی اولیه به اندازه یک‌هزارم طول آن در نظر گرفته می‌شود. عضو مورد نظر تحت بارگذاری محوری فشاری می‌گیرد. برای مصالح عضو مذکور مدول الاستیسیته $2E11$ پاسکال و ضریب پواسون $0/3$ لحاظ می‌شود. با استفاده از یک تحلیل استاتیکی غیرخطی، نمودار تنش-کرنش برای مصالح اعضای فشاری با ناکاملی مذکور بدست می‌آید [۱۳].

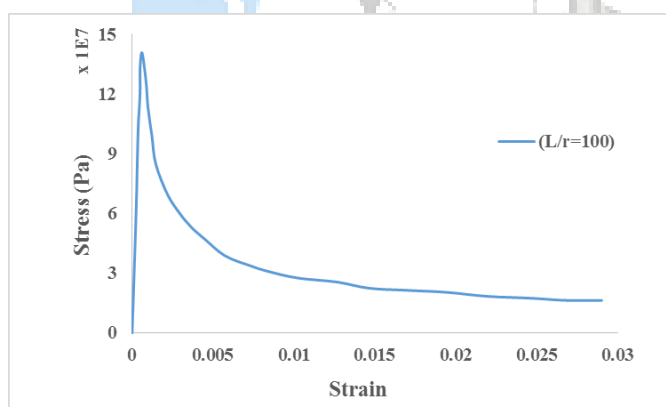
۳- مدل مورد مطالعه

چلیک کش‌بستی مورد مطالعه در این مقاله از تعداد ۱۴ مدول مربعی در راستای طولی چلیک و همچنین تعداد ۱۱ مدول در راستای دهانه آن تشکیل شده است. ابعاد مدول‌ها در چلیک کش‌بستی، $1/12 \times 1/12 \times 1/5$ متر می‌باشد (شکل ۳). طول چلیک، $15/68$ متر و طول دهانه آن، ۱۲ متر بوده و نسبت ارتفاع به دهانه، $0/1$ می‌باشد. تعداد اعضای کششی سازه مورد مطالعه در لایه بالایی، میانی و پایینی به ترتیب ۶۱۶، ۶۱۶ و ۳۳۳ عضو می‌باشد. در مجموع چلیک مذکور از ۱۵۶۵ عضو کششی و ۶۱۶ عضو فشاری تشکیل شده است.

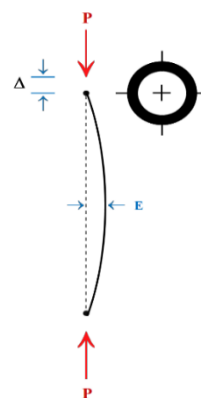
در این سازه، اعضای فشاری با طول‌های ۱/۷۷ و ۱/۷۹ متر و اعضای کششی با طول‌های ۱/۱۲، ۰/۸۲۴ و ۱/۳۷ متر می‌باشند. همچنین مطابق شکل ۴ تکیه‌گاه‌های سازه متصل به اعضای لایه پایینی چلیک در راستای طولی آن بوده و بصورت مفصلی ثابت می‌باشند.



شکل ۱: رفتار مصالح کششی در چلیک کش‌بستی [۲۵]



(ب)



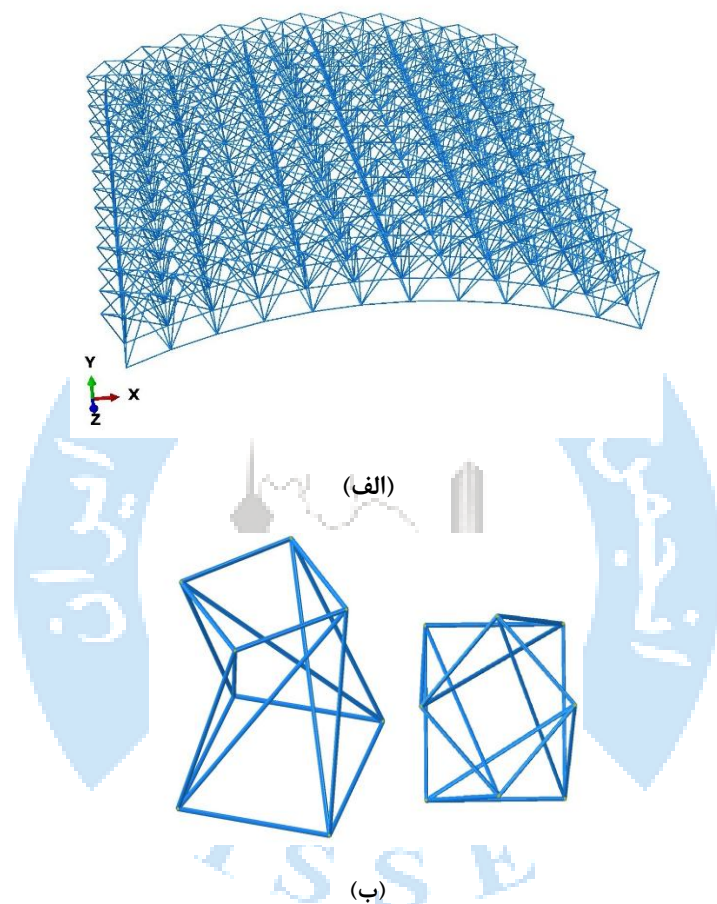
(الف)

شکل ۲: (الف) عضو فشاری با نکاملی اولیه، (ب) رفتار مصالح فشاری در چلیک کش‌بستی در نسبت لاغری ۱۰۰ [۱۳]

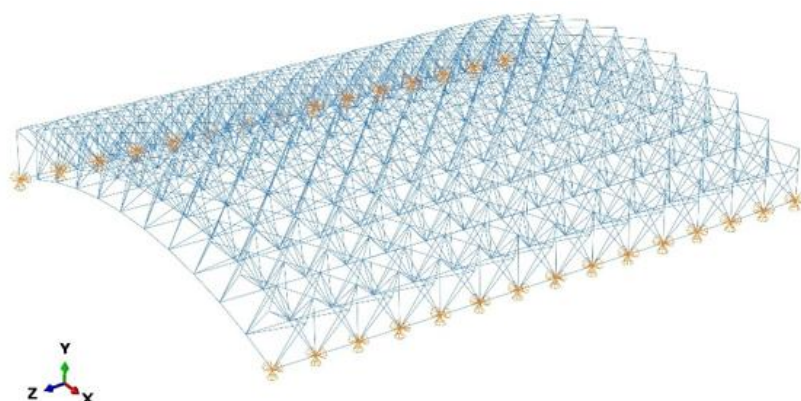
۳-۱- بارگذاری سازه

بارگذاری سازه مورد نظر شامل بار مرده و بار برف می‌باشد که به صورت گسترده در تمامی گره‌های لایه بالایی سازه وارد می‌شود (شکل ۵). با فرض بار مرده ۳۰۰ نیوتن بر متر مربع با در نظر گرفتن ابعاد سازه و تعداد گره‌های لایه بالایی، بار مرده هر گره ۱۷۰ نیوتن بدست می‌آید. با توجه به دینامیکی بودن تحلیل‌ها، بار مرده وارد بر هر گره بصورت جرمی اعمال می‌گردد. با در نظر گرفتن شتاب گرانشی ۹/۸۰۶ نیوتن بر متر مربع، مقدار جرم ناشی از بار مرده وارد در هر گره ۱۷/۳۴۵۱ کیلوگرم می‌باشد. با فرض بار برف متقارن ۱۰۵۰ نیوتن

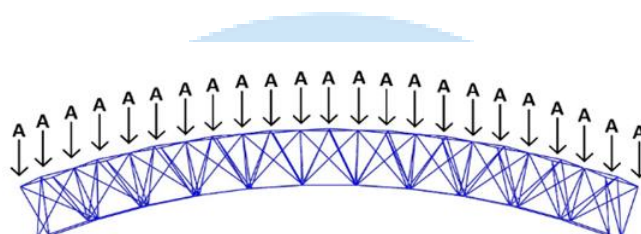
بر مترمربع، مقدار بار برف ۶۰۰ نیوتن به ازای هر گره بدست می آید که در صورت اعمال بار به صورت جرمی، جرم اعمالی بر هر گره ناشی از بار برف ۶۱/۲۱۸۲ کیلوگرم می باشد.



شکل ۳: (الف) بافتار چلیک کش بستنی مورد مطالعه، (ب) پلان و نمای سه بعدی مدول مربعی مورد استفاده



شکل ۴: شرایط تکیه‌گاهی چلیک کش‌بستی مورد مطالعه



شکل ۵: نحوه اعمال بار مرده در چلیک مورد مطالعه

برای طراحی سازه از الگوریتم ارائه شده توسط کویرانت^۵ [۲۶] استفاده می‌شود. بر این اساس، دو ترکیب بار ارائه می‌شود. ترکیب بار اول بصورت $G+Q+S$ می‌باشد؛ که در آن Q ، نماد بار برف، G ، بار مرده و S بار حاصل از پیش‌تنیدگی سازه می‌باشد. به ازای این ترکیب بار، حداکثر تغییر شکل سازه به یک‌دویستم ($1/200$) طول دهانه محدود می‌گردد. به ازای ترکیب بار دوم که به صورت $1.35G+1.5Q+1.2S$ می‌باشد؛ باید پایداری کلی سازه حفظ گردیده و سازه دچار خرابی جزئی و یا کلی نگردد. برای طراحی اعضای کششی و فشاری سازه از آیین‌نامه AISC360-10 [۲۷] استفاده می‌شود. مشخصات مقاطع اعضای فشاری و کششی در نظر گرفته شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقاطع اعضای چلیک کش‌بستی مورد مطالعه

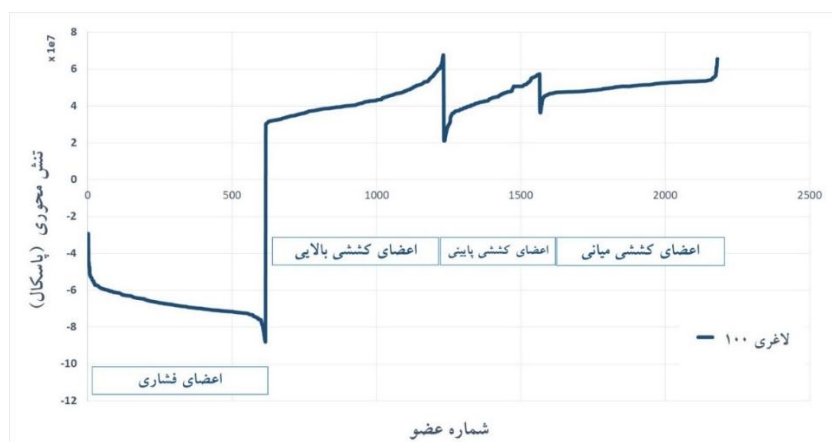
| نوع عضو | مساحت مقطع (cm^2) | شعاع داخلی (cm) | شعاع خارجی (cm) | ضخامت (cm) |
|---------|------------------------------|-----------------|-----------------|------------|
| کششی | 7.15 | --- | 1.51 | --- |
| فشاری | 7.00 | 2.28 | 2.72 | 0.44 |

۲-۳- پیش‌تنیدگی

سازه‌های کش‌بستی برای حفظ پایداری خود نیاز به اعمال پیش‌تنیدگی دارند. به منظور حصول پیش‌تنیدگی، تنش اولیه‌ای به اعضای کابلی سازه کش‌بستی اعمال می‌گردد. میزان تنش اولیه وارده با استفاده از روش ارائه شده توسط کویرانت [۲۶] تعیین می‌گردد. بر این اساس حداکثر پیش‌تنیدگی سازه باید به اندازه‌ای باشد که میانگین مجموع تنش اعضای فشاری بعد از اعمال تنش اولیه، حداکثر ۵۰٪ تنش کمانشی اعضای فشاری سازه باشد. مرحله پیش‌تنیدگی با استفاده از تنظیمات قسمت PREDIFINED FIELD MANAGER واقع

⁵ Quirant

در نرم افزار ABAQUS اعمال می گردد. نمودار تنش محوری اعضای مختلف سازه بر اساس شماره گذاری و دسته بندی انجام یافته سازه در شکل ۶ قابل مشاهده است.



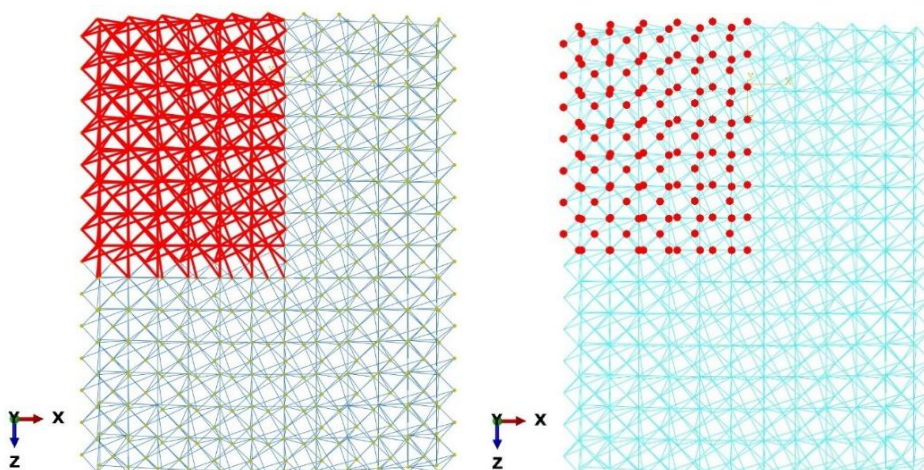
شکل ۶: تنش محوری اعضای مختلف سازه

۴- مراحل بررسی تاثیر خرابی ناگهانی گره در تحلیل خرابی پیش رونده

بعد از ساخت هندسه چلیک کش بستنی مورد مطالعه در نرم افزار فرمبیین، این مدل به نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS انتقال داده می شود. در نرم افزار ABAQUS تنظیمات مربوط به رفتار مصالح، مقاطع سازه، بارگذاری و تعریف تکیه گاه ها انجام می شود و بعد از اعمال پیش تنیدگی، چلیک کش بستنی طراحی می شود. برای انجام تحلیل های مسیر جابگزين غيرخطی دینامیکی، در یک مرحله جداگانه حذف گره انجام می شود و در گام بعدی از تحلیل DYNAMIC IMPLICIT استفاده می شود و نتایج به صورت عددی و نموداری حاصل می گردد.

۴-۱- تعیین گره های انتخابی برای حذف

چلیک کش بستنی مورد مطالعه، سازه متقارنی است. بنابراین فقط برخی از گره های سازه مطابق شکل ۷ برای حذف انتخاب می - شوند. در شکل مذکور گره های انتخاب شده، در میان کل گره های سازه قابل مشاهده است. گره های انتخاب شده هم شامل گره های لایه بالایی و هم شامل گره های لایه پایینی چلیک می شود. در شکل ۸ اعضای متصل به گره های انتخاب شده در میان کل اعضای سازه در پلان مشاهده می شود.



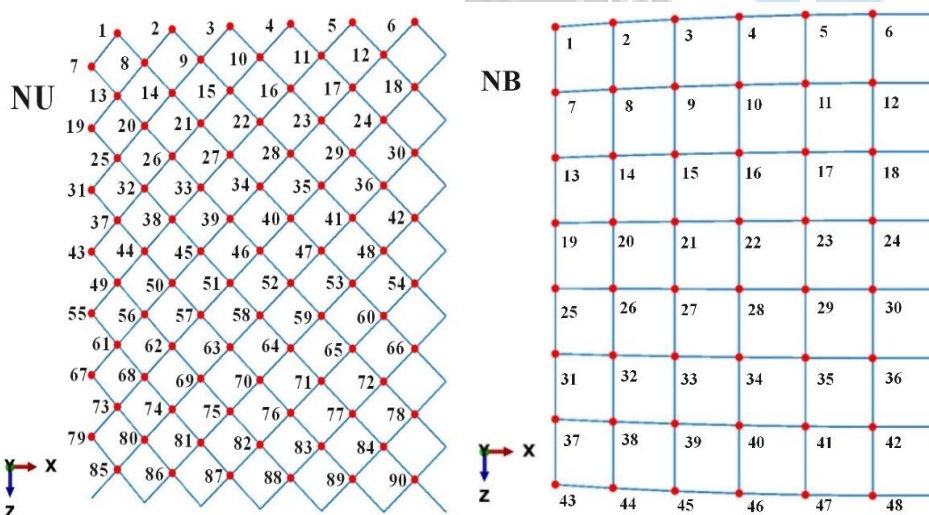
شکل ۷: موقعیت مکانی گره‌های انتخاب شده

شکل ۸: نمایش اعضای متصل به گره‌های انتخاب شده

نسبت به سایر گره‌های چلیک

در پلان

برای راحتی کار، شماره‌گذاری گره‌هایی که قرار است یک به یک حذف شوند، انجام می‌شود. بر این اساس، مطابق شکل ۹، گره‌های انتخاب شده در لایه پایین چلیک با نماد NB و شماره گره آن می‌باشد. به طور مثال به صورت NB1. در شکل ۱۰ گره‌های لایه بالایی چلیک مشاهده می‌شود. این گره‌ها با نماد NU و به همراه شماره‌های مشخص شده در شکل نمایش داده خواهند شد. برای مثال به صورت NU1.



شکل ۹: شماره‌گذاری گره‌های لایه پایین چلیک

شکل ۱۰: شماره‌گذاری گره‌های لایه بالای چلیک

۲-۴- سطح بارگذاری

برای شروع خرابی اولیه در سازه کش‌بستی مورد نظر دو سطح بارگذاری در نظر گرفته شده است، اولی سطح بار بهره‌برداری با ترکیب بار $(G + Q + S)$ ، بار برف، G ، بار مرده و S بار حاصل از پیش تنیدگی سازه) و دومی، سطح بار معرفی شده در مطالعات

شکسته‌بند و همکاران [۲] که بیشتر از سطح بار بهره‌برداری می‌باشد. سطح بار دوم، سطح باری انتخاب می‌شود که دو معیار زیر را برآورده کند:

الف) تحت بار وارده در اعضای سازه نیروی داخلی بزرگی ایجاد شده باشد.

ب) هیچگونه خرابی موضعی اعم از کمانش ستون و گسیختگی کابل اتفاق نیافتاده باشد.

بنابراین بار وارده بر سازه تا حدی که دو شرط فوق برقرار باشد افزایش داده می‌شود. در چلیک مورد مطالعه، میزان بار ۰/۸ بار نهایی انتخاب می‌گردد. بار نهایی سازه عبارت است از حداکثر باری که چلیک کش‌بستی مورد مطالعه در حالت استاتیکی و بدون خرابی هیچ عضوی تحمل می‌نماید. در تحقیق حاضر هر دو سطح بار بهره‌برداری و ۰/۸ بار نهایی جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مسیر جایگزین انتخاب می‌شوند.

۳-۴- میرایی

برای تحلیل دینامیکی غیر خطی، لازم است مشخصات میرایی مصالح سازه‌ای وارد شود. بنابراین قبل از تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی، تحلیل جداگانه‌ای برای تعیین مشخصات میرایی سازه انجام می‌شود. در این تحلیل هر یک از مراحل پیش‌تنیدگی، بارگذاری و باربرداری در مراحل جداگانه اعمال می‌شود. در نهایت تحلیل فرکانسی انجام شده و مشخصات میرایی سازه با استفاده از فرکانس‌های سازه به دست می‌آید. در مطالعات پیشین برای محاسبه ضرایب رایلی از مود پنجم و مود اول استفاده شده است. همچنین با در نظر گرفتن تحقیقات قبلی، ضرایب میرایی سازه‌های خرپایی در حدود ۱٪ الی ۲/۵٪ می‌باشد [۲۸]. در تحلیل دینامیکی، ضرایب رایلی α و β و زمان لازم برای حذف یک عضو به ترتیب بر اساس رابطه‌های (۱-۳)، (۲-۳) و (۳-۳) محاسبه شده و در تنظیمات مربوط به مشخصات مصالح اعمال می‌گردد.

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_5(0.015\omega_5 - 0.025\omega_1)}{\omega_5^2 - \omega_1^2} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2(0.025\omega_5^2 - 0.015\omega_1^2)}{\omega_5^2 - \omega_1^2} \quad (2)$$

$$\omega_{co} = 4\omega_o, \quad T_{co} = \frac{2\pi}{\omega_{co}}, \quad T = \frac{1}{20}T_{co} \quad (3)$$

در روابط مذکور، ω_1 فرکانس زاویه‌ای مود اول، ω_5 فرکانس زاویه‌ای مود پنجم، ω_o فرکانس زاویه‌ای مود اول و ΔT حداکثر زمان لازم برای حذف عضو می‌باشد.

۴-۴- تعداد حالات تحلیل

تعداد گره‌های انتخاب شده برای حذف ۱۳۸ می‌باشد. بنابراین تعداد ۱۳۸ تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف یک به یک تعداد ۱۳۸ گره مورد بررسی در این مطالعه انجام می‌شود. قبل از انجام تحلیل‌های دینامیکی مذکور، بصورت جداگانه به ازای حذف هر گره از سازه، تحلیل مقادیر ویژه برای مشخص شدن ضرایب میرایی متناسب همان حالت، انجام می‌شود.

۴-۵- نقطه هدف

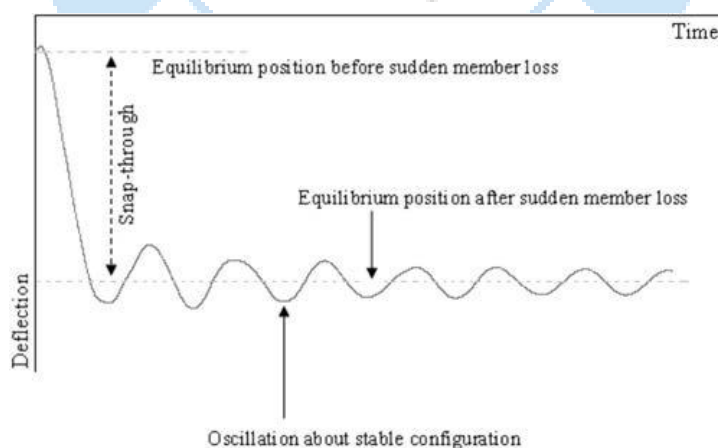
در تمامی تحلیل‌های دینامیکی مقاله حاضر، برای بررسی رفتار سازه از گره مرکزی واقع در لایه بالایی چلیک به عنوان نقطه هدف جهت کنترل تغییر مکان سازه استفاده می‌گردد.

۴-۶- گام بندی انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی

مرحله اول انجام تحلیل فرکانسی و تعیین ضرایب میرایی به ازای حذف هر یک از ۱۳۸ گره انتخاب شده می‌باشد. بعد از تعیین ضرایب میرایی، در تنظیمات، ضرایب رایی در هر تحلیل در مدل اصلی وارد می‌گردد. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر دو نوع سطح بار مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ بنابراین برای هر گره مورد نظر، دو بار ضرایب رایی محاسبه و اعمال می‌شود. در مدل اصلی، جهت انجام تحلیل مسیریگزین دینامیکی غیرخطی، در گام اول پیش‌تنیدگی اعمال گردیده (شکل ۶) و بارگذاری سازه وارد می‌گردد. در مرحله بعدی حذف گره‌های سازه در مدت زمان مشخص شده انجام می‌شود. در مرحله حذف گره، اعضای متصل به آن گره نیز تبدیل به اعضای صفر نیرویی می‌شوند، بنابراین در مرحله حذف گره، اعضای متصل به گره مورد نظر نیز حذف می‌شوند. بعد از مرحله بارگذاری به منظور حذف گره، در بخش Interaction نرم افزار Abaqus از قسمت Create Interaction در یک Step جداگانه با تحلیل Dynamic Implicit، یک Interaction از نوع Model Change انتخاب نموده و در قسمت Region مربوطه، گره مورد نظر و اعضای متصل به آن را انتخاب می‌شود. لازم به توضیح است در تنظیمات Step مربوط به حذف عضو در تنظیمات Time Period عدد کم ۰.۰۰۰۱ ثانیه را وارد می‌کنیم. تا حذف اعضا در حداقل زمان و با حداکثر تاثیر بر سازه اعمال شود. نهایتاً در یک تحلیل Dynamic Implicit بمدت ۵ ثانیه وضعیت پایداری سازه و انتشار احتمالی خرابی اولیه بررسی می‌گردد. با توجه به نمودار جابجایی - زمان سازه در مدت زمان مذکور، وضعیت پایداری و سایر جزئیات تحلیل، از نتایج حاصل شده برداشت و تفسیر می‌گردد.

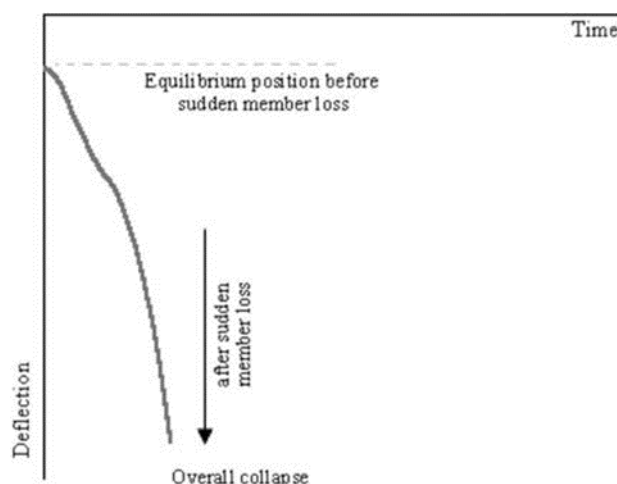
۴-۷- انواع مکانیزم‌های خرابی در سازه‌های کش‌بستی

در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی سازه‌های کش‌بستی دو مکانیزم خرابی مطرح می‌باشد. در شکل ۱۱ نوع اول مکانیزم خرابی به صورت نمودار تغییر شکل-زمان سازه قابل مشاهده است. در این نمودار ابتدا سازه دچار یک فروجهش دینامیکی می‌شود و بعد از اینکه به یک حالت تعادل جدید رسید، تحت تاثیر میرایی، با کاهش دامنه نوسان، در تعادل جدید خود ساکن می‌شود.



شکل ۱۱: نوع اول مکانیزم خرابی سازه کش‌بستی در تحلیل دینامیکی غیرخطی [۲]

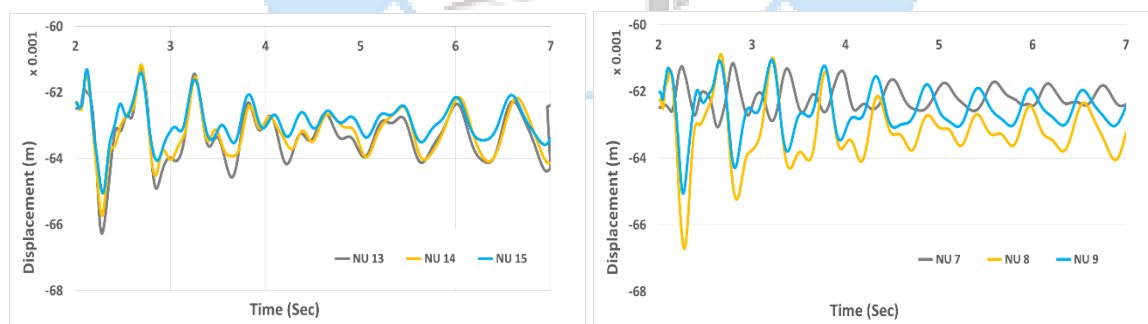
در مکانیزم نوع دوم خرابی سازه کش‌بستی در تحلیل دینامیکی غیرخطی، در ابتدای نمودار تغییر شکل سازه افزایش یافته و با افزایش زمان، سازه به خرابی کلی می‌رسد (شکل ۱۲). بنابراین در طی نوع اول مکانیزم خرابی، سازه بعد از تجربه ناپایداری اولیه، در وضعیت تعادل جدید خود باقی می‌ماند اما در نوع دوم مکانیزم خرابی سازه کش‌بستی، ناپایداری سازه منجر به فروپاشی کلی سازه می‌شود.



شکل ۱۲: نوع دوم مکانیزم خرابی سازه کش‌بستی در تحلیل دینامیکی غیرخطی [۲]

۴-۸- نتایج عددی

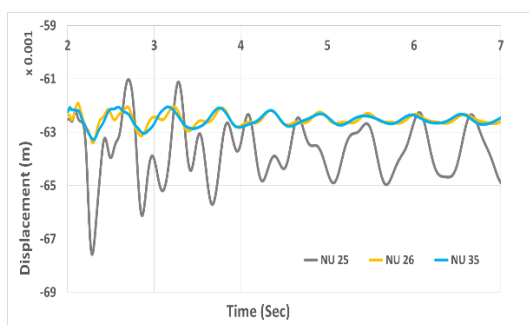
قبل از انجام تحلیل‌ها بر روی مدل مورد مطالعه باید از روش مدل‌سازی سازه مورد نظر و تحلیل‌های انجام شده اطمینان حاصل شود. از آنجاییکه صحت‌سنجی مدل مورد مطالعه در این مقاله به تفصیل در کار قبلی نویسندگان [۱۳] آمده است برای جلوگیری از تکرار مطالب، بخش صحت‌سنجی در این مقاله آورده نشده است. بعد از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره‌های مختلف سازه، نتایج به صورت نمودارهای جابجایی - زمان استخراج شده است. در شکل ۱۳ نمودار جابجایی-زمان متناظر با تحلیل‌های مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف هر یک از گره‌های NU7، NU8 و NU9 مشاهده می‌شود. در این شکل، بعد از حذف گره در هر سه تحلیل انجام شده، حالت پایدار سازه حفظ می‌شود. همچنین فرکانس نوسان در نمودارهای مربوط به حذف گره‌های NU8 و NU9 نزدیک به هم می‌باشد. در شکل ۱۴ نمودار جابجایی - زمان متناظر با تحلیل‌های مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی مربوط به حذف گره‌های NU13، NU14 و NU15 مشاهده می‌شود. در این شکل نیز به ازای حذف هر یک از گره‌های مذکور، حالت پایدار سازه حفظ می‌گردد.



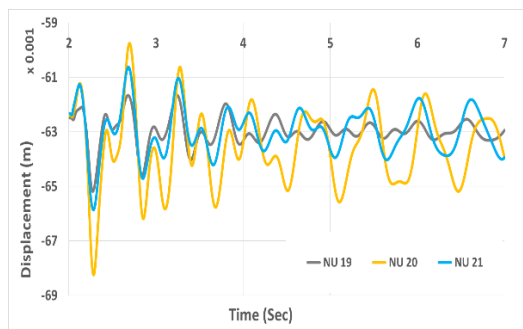
شکل ۱۴: نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گره‌های NU13، NU14 و NU15

شکل ۱۳: نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گره‌های NU7، NU8 و NU9

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف هر یک از گره‌های NU19، NU20، NU21، NU25، NU26 و NU35 مشاهده می‌شود. در شکل‌های مذکور، دامنه نوسان بعد از حذف ناگهانی گره متناظر آن در سازه متفاوت می‌باشد اما پایداری چلیک کش‌بستی حفظ می‌شود. دامنه نوسان در نمودار متناظر با حذف گره NU20 بیشتر از سایر تحلیل‌ها می‌باشد.

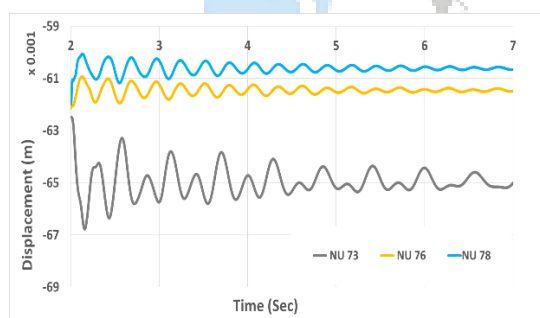


شکل ۱۶: نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل های
دینامیکی غیرخطی گره های NU25 ، NU26 و NU35

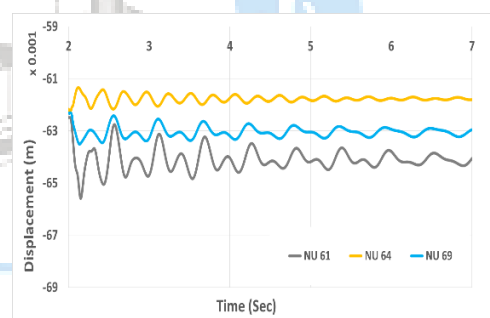


شکل ۱۵: نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل های
دینامیکی غیرخطی گره های NU19 ، NU20 و NU21

در شکل ۱۷ نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف هر یک از گره های NU61، NU64 و NU69 مشاهده می شود. در نمودار متناظر با حذف گره NU61، بعد از حذف گره، سازه دچار ناپایداری اولیه می شود و در ادامه حالت پایدار سازه حفظ می شود. در شکل ۱۸ نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی گره های NU73، NU76 و NU78 مشاهده می شود. مطابق شکل های یاد شده، نمودار متناظر با حذف گره NU73، بعد از حذف گره دچار ناپایداری اولیه می شود. در ابتدای نمودار افزایش جابجایی در سازه اتفاق می افتد و در ادامه سازه حالت پایدار خود را حفظ می کند. در نمودارهای متناظر با حذف گره های NU76 و NU78 نوسان اولیه در سازه تحت تاثیر میرایی آن کمتر شده و چلیک کشبستی حالت پایدار خود را حفظ می کند.



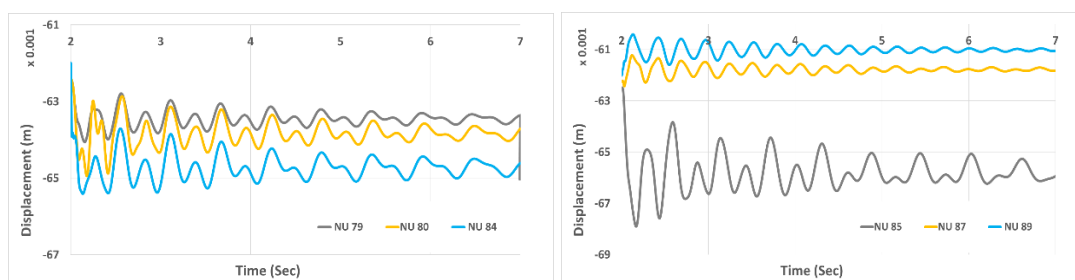
شکل ۱۸: نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل های
دینامیکی غیرخطی گره های NU73 ، NU76 و NU78



شکل ۱۷: نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل های
دینامیکی غیرخطی گره های NU61 ، NU64 و NU69

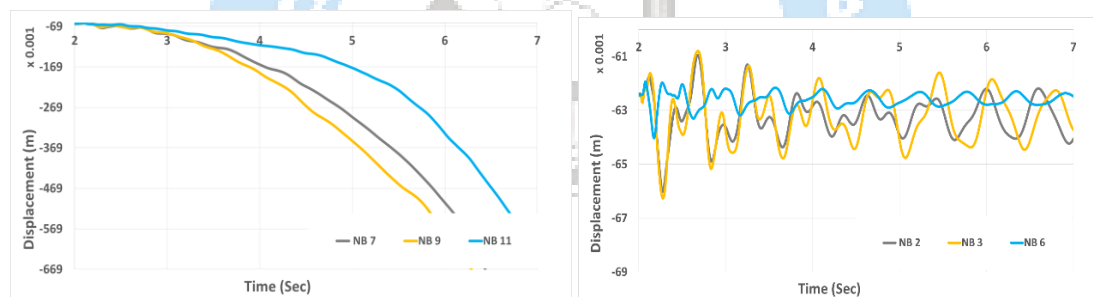
در شکل ۱۹ نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره های NU79، NU80 و NU84 مشاهده می شود. در این شکل، در نمودار متناظر با حذف گره NU84 بعد از حذف گره، ناپایداری اولیه مشاهده می شود و در ادامه سازه پایداری اولیه خود را دوباره بدست می آورد. در نمودارهای متناظر با حذف گره های NU79 و NU80 نیز میرایی، نوسان بوجود آمده در سازه را کمتر کرده و سازه بعد از حذف گره نیز پایداری خود را حفظ می نماید. در شکل ۲۰ نمودارهای جابجایی - زمان متناظر با تحلیل های مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره های NU87، NU89 و NU85 مشاهده می شود. در این شکل مشاهده می شود که در هیچ حالتی ناپایداری کلی در سازه اتفاق نمی افتد. نوسان سازه تحت تاثیر میرایی سازه از بین می رود و سازه پایداری اولیه خود را مجدداً بدست می آورد. آنچه در این شکل به نظر می رسد، این است که در نمودارهای متناظر با حذف گره های NU87 و NU89 سازه در انتهای زمان ۵ ثانیه، مقدار تغییر جابجایی کمتری را نسبت به جابجایی اولیه قبل از حذف عضو نشان می دهد. در حالی که در تحلیل

متناظر با حذف عضو NU85، سازه در انتهای ۵ ثانیه، مقدار جابجایی بیشتری را نسبت به جابجایی اولیه سازه قبل از حذف عضو نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گره‌های NU79، NU80 و NU84
شکل ۲۰: نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گره‌های NU85، NU87 و NU89

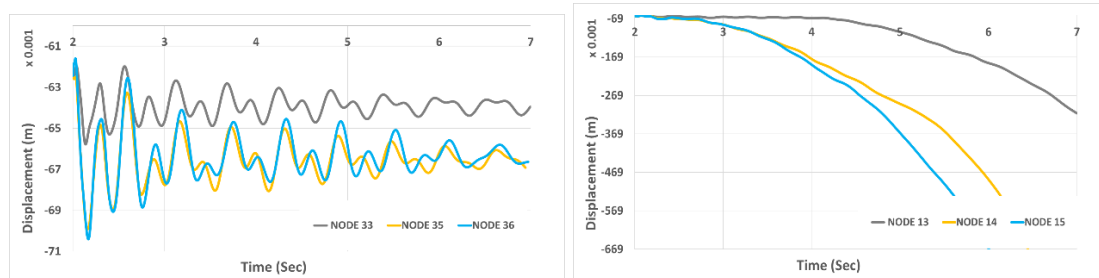
در شکل ۱۹ نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل‌های مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی گره‌های NB2، NB3 و NB6 مشاهده می‌شود. در هر سه نمودار، بعد از حذف گره سازه فقط تحت نوسان قرار می‌گیرد و با گذشت زمان و اثرگذاری میرایی، سازه حالت پایدار خود را حفظ می‌نماید. در این شکل دامنه نوسان در نمودارهای NB2 و NB3 بیشتر از نمودار NB6 می‌باشد. در شکل ۲۰ نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با حذف گره‌های NB7، NB9 و NB11 مشاهده می‌شود. برخلاف نمودارهای قبلی در این نمودارها سازه بعد از حذف عضو دچار یک ناپایداری کلی می‌شود و با گذشت زمان جابجایی آن افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹: نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گره‌های NB2 و NB3
شکل ۲۰: نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گره‌های NB7، NB9 و NB11

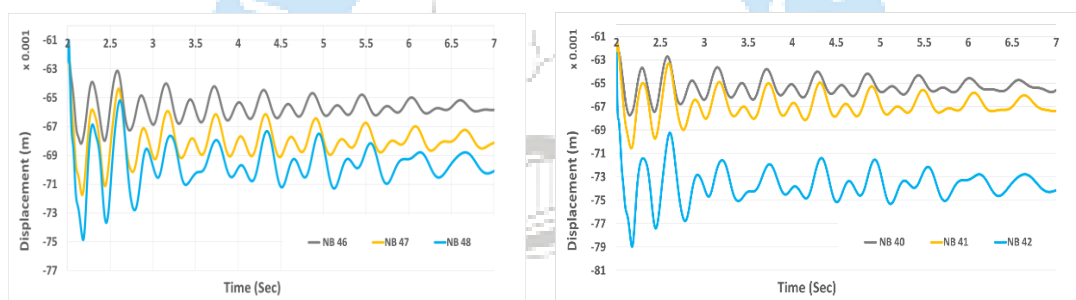
دینامیکی غیرخطی گره‌های NB2 و NB3 ، NB6 و NB3 ، NB7، NB9 ، NB11 و NB9

در شکل ۲۱ نیز نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره‌های NB13، NB14 و NB15 نشان می‌دهند که بعد از حذف گره، سازه ناپایداری کلی را تجربه می‌کند. در شکل ۲۲ نیز نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره‌های NB33، NB35 و NB36 مشاهده می‌شود. مطابق این شکل، سازه بعد از حذف گره‌های مذکور پایداری خود را حفظ می‌نماید و دامنه نوسان اولیه تحت تاثیر میرایی سازه کاهش می‌یابد. دامنه نوسان در نمودارهای مربوط به حذف NB35 و NB36 بیشتر از نمودار مربوط به حذف گره NB33 می‌باشند.



شکل ۲۱: نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل های
 دینامیکی غیرخطی گره های NB13 ، NB14 و NB15

در شکل ۲۳ نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره های NB40، NB41 و NB42 مشاهده می شود. نمودارهای متناظر با NB40 و NB41 بعد از حذف گره نوسان را تجربه می کنند و با گذشت زمان و اثرگذاری میرایی، سازه حالت پایدار خود را مجدداً بدست می آورد. نمودار متناظر با حذف گره NB42 بعد از حذف گره دچار یک ناپایداری اولیه می شود و در ادامه نوسان سازه تحت تاثیر میرایی کاهش یافته و سازه پایدار می شود. در شکل ۲۴ نمودار متناظر با تحلیل دینامیکی غیرخطی با حذف گره های NB46، NB47 و NB48 مشاهده می شود. در این شکل، در هر سه نمودار سازه بعد از حذف عضو دچار ناپایداری اولیه می شود و در ادامه نوسان سازه تحت تاثیر میرایی کاهش می یابد و سازه پایدار خود را مجدداً بدست می آورد.



شکل ۲۲: نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل های
 دینامیکی غیرخطی گره های NB40 ، NB41 و NB42

شکل ۲۳: نمودارهای جابجایی-زمان متناظر با تحلیل های
 دینامیکی غیرخطی گره های NB46 ، NB47 و NB48

خلاصه نتایج مربوط به همه ی تحلیل های انجام یافته، در جدول های ۲ تا ۵ آورده شده است. در این جدول ها، نوع گره و ترتیب شماره گذاری خانه های آن، دقیقاً مطابق شماره گذاری همان نوع گره در شکل های ۹ و ۱۰ می باشد. برای خانه های جدول در سطر اول و ستون اول، نماد گره در کنار خانه ی مربوطه مشخص شده است. برای گره های دیگر که نماد آنها در جدول نوشته نشده است، از ترتیب سطری و ستونی متناظر آنها در شکل های ۹ و ۱۰ استفاده می شود (به عنوان مثال در جداول مذکور با توجه به اشکال ۹ و ۱۰، محل تلاقی ستون NU6 و سطر NU43 جابجایی گره NU48 می باشد و یا محل تلاقی سطر NB43 و ستون NB2 جابجایی گره NB44 می باشد). داده های جدول های مذکور، بیشترین دامنه نوسان در تحلیل متناظر آن گره می باشد. با توجه به اینکه، بیشترین دامنه نوسان (در بین تحلیل هایی که منجر به خرابی کلی نگردیده اند) به اندازه ۱۶/۵۲۱ میلی متر و مربوط به گره NB42 می باشد؛ بنابراین، همه ی داده های جداول ۴ تا ۷ نسبت به عدد مذکور هم پایه می شوند. در مواردی بعد از حذف گره مورد نظر، ناپایداری محلی اتفاق افتاده است و برای جلوگیری از توقف تحلیل بار برخی از گره های مجاور حذف شده است. تحلیل های متناظر با این حالت در جداول مذکور، با رنگ متن قرمز مشخص شده است. همچنین در گره های متناظر با تحلیل هایی که در آن ناپایداری اولیه مشاهده می شود، با رنگ زمینه زرد مشخص شده

- است. در جدول ۲ نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره‌های NU تحت بار بهره‌برداری مشاهده می‌شود. در این جدول مشاهده می‌شود که:
- در هیچ تحلیلی ناپایداری کلی اتفاق نیفتاده است.
 - در مواردی بعد از حذف گره مورد نظر، ناپایداری محلی اتفاق افتاده است و برای جلوگیری از توقف تحلیل بار برخی از گره‌های مجاور حذف شده است. تحلیل‌های متناظر با این حالت در جدول فوق، با رنگ متن قرمز مشخص شده است.
 - در اکثر تحلیل‌های متناظر با حذف گره‌های نزدیک تکیه‌گاه، ناپایداری محلی اتفاق افتاده است.
 - در تمامی تحلیل‌های متناظر با حذف گره‌های شماره ۷ تا ۱۲ ناپایداری محلی اتفاق افتاده است.
 - در جدول مذکور مشاهده می‌شود که در حالت کلی هرچه به میانه چلیک در راستای طولی آن نزدیکتر می‌شویم، تعداد تحلیل‌هایی که ناپایداری اولیه در آن اتفاق افتاده است، بیشتر می‌شود. در مورد گره‌هایی که بصورت مرزی در میانه راستای طولی چلیک قرار دارند، ناپایداری اولیه با تعداد بیشتری مشاهده می‌شود.
 - میانگین جابجایی‌های سازه در هر سطر و ستون جدول بصورت اعدادی به رنگ مشکی نوشته شده است. با توجه به مورد ذکر شده مشاهده می‌شود که، لزوم وقوع ناپایداری نامطلوبتر در سازه همیشه ارتباط مستقیمی با جابجایی در سازه ندارد. توضیح اینکه، در برخی از سطرها و ستون‌های جدول که تعداد ناپایداری اولیه یا محلی کمتری دارند، میانگین‌های بدست آمده برای جابجایی سازه نسبت به سطرها و ستون‌هایی که تعداد ناپایداری اولیه یا محلی بیشتری دارند، اعداد بیشتر هستند. به عنوان مثال: در سطر دوم از بالای جدول، میانگین جابجایی ۶٪ ثبت شده است و تعداد ناپایداری محلی شش مورد در این سطر اتفاق افتاده است در حالی که در سطر آخر میانگین جابجایی ۱۱٪ مشاهده می‌شود و فقط در یک تحلیل ناپایداری اتفاق افتاده است.
 - در برخی از تحلیل‌ها، جابجایی سازه بعد از حذف عضو کاهش یافته است. مورد فوق در تحلیل‌های متناظر با گره‌های واقع در میانه چلیک در راستای دهانه‌ی آن بیشتر مشاهده می‌شود. مورد ذکر شده در جدول با رنگ زمینه سبز مشخص شده است.
 - تحلیل متناظر با گره ۷۸ دارای بیشترین جابجایی با مقدار ۳/۴۳ میلی‌متر می‌باشد.
 - تحلیل متناظر با گره ۶ دارای کمترین جابجایی با مقدار ۰/۲۴ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲: نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره‌های NU تحت بار بهره‌برداری

| | NU1 | NU2 | NU3 | NU4 | NU5 | NU6 | AVG |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| NU1 | 7% | 4% | 3% | 2% | 2% | 1% | 3% |
| NU7 | 9% | 7% | 7% | 3% | 4% | 4% | 6% |
| NU13 | 3% | 3% | 3% | 3% | 3% | 4% | 3% |
| NU19 | 8% | 13% | 10% | 6% | 5% | 5% | 8% |
| NU25 | 13% | 4% | 4% | 4% | 4% | 6% | 6% |
| NU31 | 4% | 5% | 6% | 4% | 4% | 4% | 5% |
| NU37 | 6% | 3% | 4% | 4% | 5% | 8% | 5% |
| NU43 | 3% | 4% | 4% | 3% | 2% | 4% | 3% |
| NU49 | 6% | 3% | 4% | 7% | 7% | 12% | 7% |
| NU55 | 3% | 6% | 4% | 3% | 2% | 3% | 3% |
| NU61 | 8% | 3% | 5% | 9% | 9% | 17% | 9% |
| NU67 | 4% | 9% | 6% | 3% | 3% | 2% | 5% |
| NU73 | 10% | 3% | 6% | 11% | 14% | 21% | 11% |
| NU79 | 5% | 12% | 8% | 5% | 9% | 8% | 8% |
| NU85 | 12% | 3% | 8% | 11% | 19% | 14% | 11% |
| AVG | 7% | 5% | 6% | 5% | 6% | 8% | |

در جدول ۳ نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره‌های NU تحت بارگذاری ۰/۸ بار نهایی مشاهده می‌شود. در این جدول:

- خرابی کلی در هیچ حالتی اتفاق نیافتاده است.
- در دو حالت ناپایداری اولیه توام با افزایش جابجایی مشاهده می‌شود.
- در پنج حالت ناپایداری اولیه توام با کاهش جابجایی مشاهده می‌شود.
- معمولاً در تحلیل‌های متناظر با حذف گره‌های تکیه‌گاهی دامنه نوسان بیشتری مشاهده می‌شود.
- بیشترین جابجایی در تحلیل متناظر با گره NU20 می‌باشد.
- کمترین جابجایی در تحلیل‌های متناظر با گره NU5 و NU6 مشاهده می‌شود.
- همانطور که انتظار می‌رود دامنه نوسان در تحلیل‌های تحت ترکیب بار ULS ۰/۸ بیشتر از ترکیب بار SLS می‌باشد.

جدول ۳: نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی به ازای حذف گره‌های NU تحت بارگذاری ۰/۸ بار نهایی

| | NU1 | NU2 | NU3 | NU4 | NU5 | NU6 | AVG |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| NU1 | 7% | 4% | 3% | 2% | 1% | 1% | 3% |
| NU7 | 8% | 27% | 18% | 7% | 3% | 3% | 11% |
| NU13 | 20% | 17% | 9% | 5% | 4% | 4% | 10% |
| NU19 | 16% | 35% | 21% | 12% | 9% | 7% | 17% |
| NU25 | 31% | 6% | 3% | 2% | 2% | 4% | 8% |
| NU31 | 5% | 13% | 11% | 9% | 6% | 7% | 8% |
| NU37 | 13% | 3% | 2% | 2% | 3% | 5% | 5% |
| NU43 | 4% | 8% | 6% | 5% | 5% | 7% | 6% |
| NU49 | 12% | 3% | 3% | 4% | 4% | 8% | 6% |
| NU55 | 5% | 7% | 4% | 4% | 6% | 8% | 6% |
| NU61 | 19% | 3% | 4% | 5% | 4% | 10% | 7% |
| NU67 | 7% | 11% | 7% | 6% | 6% | 12% | 8% |
| NU73 | 26% | 3% | 5% | 7% | 5% | 12% | 10% |
| NU79 | 10% | 15% | 10% | 9% | 7% | 21% | 12% |
| NU85 | 33% | 3% | 6% | 7% | 10% | 4% | 11% |
| AVG | 14% | 10% | 8% | 6% | 5% | 7% | |

در جدول ۴ نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی گره‌های NB تحت بار بهره‌برداری مشاهده می‌شود. در این جدول مشاهده می‌شود:

- در هیچ تحلیلی ناپایداری کلی سازه اتفاق نیفتاده است.
- در برخی از تحلیل‌ها، ناپایداری محلی یا اولیه اتفاق افتاده است.
- در حالت کلی، میانگین جابجایی در سطرها و ستون‌ها بیشتر از جابجایی‌های مربوط به حذف گره‌های لایه بالایی سازه است.
- تحلیل متناظر با گره NB42 دارای بیشترین جابجایی با مقدار ۸/۹۳۷ میلی متر می‌باشد.
- تحلیل متناظر با گره NB13 دارای کمترین جابجایی با مقدار ۰/۳۵۵ میلی متر می‌باشد.
- در راستای دهانه چلیک هرچه به میانه نزدیکتر می‌شویم، میانگین جابجایی ستون‌های جدول افزایش می‌یابد.
- در هیچ یک از تحلیل‌های متناظر با گره‌های تکیه‌گاهی، حذف گره منجر به ناپایداری اولیه محلی نمی‌شود.
- در راستای طولی و دهانه چلیک هرچه به میانه نزدیکتر می‌شویم تعداد ناپایداری‌های اولیه بیشتر می‌شود.
- بیشترین تعداد ناپایداری در تحلیل متناظر با ستون دوم از سمت چپ و سطر دوم از بالا اتفاق افتاده است.
- در جدول ۵ نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی گره‌های NB تحت بارگذاری ۰/۸ بار نهایی مشاهده می‌شود. در این جدول:
- در تحلیل‌های متناظر با حذف ۱۱ گره خرابی کلی مشاهده می‌شود.
- در تحلیل‌های متناظر با حذف ۱۵ گره، ناپایداری اولیه توأم با افزایش جابجایی مشاهده می‌شود.
- با توجه به میانگین جابجایی‌ها، در راستای طولی چلیک هر چه به میانه آن، نزدیکتر می‌شویم، جابجایی سازه افزایش می‌یابد.
- با توجه به میانگین جابجایی‌ها، در راستای عرضی چلیک هر چه به میانه آن نزدیکتر می‌شویم جابجایی آن افزایش می‌یابد.
- بیشترین مقدار جابجایی در کل تحلیل‌های انجام یافته در این مطالعه در تحلیل متناظر با گره NB40 تحت ترکیب بار ۰/۸AULS مشاهده می‌شود.
- کمترین جابجایی در تحلیل‌های متناظر با گره NB19 مشاهده می‌شود.

جدول ۴: نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی گره‌های NB تحت بار بهره‌برداری

| | NB1 | NB2 | NB3 | NB4 | NB5 | NB6 | Avg |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| NB1 | 6% | 5% | 7% | 4% | 7% | 8% | 6% |
| NB7 | 29% | 23% | 23% | 15% | 9% | 8% | 18% |
| NB13 | 2% | 10% | 10% | 15% | 11% | 11% | 10% |
| NB19 | 3% | 8% | 10% | 12% | 14% | 14% | 10% |
| NB25 | 4% | 9% | 10% | 13% | 17% | 18% | 12% |
| NB31 | 5% | 11% | 12% | 15% | 22% | 22% | 14% |
| NB37 | 7% | 12% | 14% | 17% | 21% | 54% | 21% |
| NB43 | 8% | 13% | 15% | 19% | 26% | 27% | 18% |
| Avg | 8% | 11% | 13% | 14% | 16% | 20% | |

جدول ۵: نتایج متناظر با تحلیل مسیر جایگزین دینامیکی غیرخطی گره‌های NB تحت بارگذاری ۰/۸ بار نهایی

| | NB1 | NB2 | NB3 | NB4 | NB5 | NB6 | Avg |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

| | | | | | | | |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| NB1 | 12% | 22% | 23% | 11% | 8% | 10% | 14% |
| NB7 | Unstable | Unstable | Unstable | Unstable | Unstable | Unstable | - |
| NB13 | Unstable | Unstable | Unstable | Unstable | Unstable | 31% | - |
| NB19 | 6% | 15% | 22% | 27% | 32% | 30% | 22% |
| NB25 | 7% | 14% | 16% | 26% | 35% | 37% | 23% |
| NB31 | 10% | 17% | 20% | 28% | 45% | 48% | 28% |
| NB37 | 14% | 21% | 24% | 32% | 49% | 100% | 40% |
| NB43 | 17% | 22% | 26% | 35% | 56% | 75% | 39% |
| Avg | 11% | 19% | 22% | 26% | 38% | 47% | |

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، پس از ارائه اجزای مدل سازی عناصر محدود برای چلیک کشبستی، برای بررسی تاثیر حذف ناگهانی گره بر روی خرابی پیشرونده چلیک های کشبستی، تحلیل های مسیر جایگزین غیرخطی دینامیکی به ازای حذف تک تک گره های انتخابی انجام شده است و خروجی تحلیل ها در قالب نمودارهای جابجایی زمان بیان شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل ها به صورت زیر ارائه می شود.

۱. در تحلیل های متناظر با ترکیب بار ۰/۸ بار نهایی، خرابی کلی در تحلیل های مربوط به حذف ۱۱ گره مشاهده می شود. در حالی که در تحلیل های تحت ترکیب بار بهره برداری هیچگونه خرابی کلی مشاهده نمی شود.
۲. در تحلیل های متناظر با ترکیب بار ۰/۸ بار نهایی نسبت به ترکیب بار بهره برداری دامنه نوسان بیشتری مشاهده می شود.
۳. در حالت کلی دامنه نوسان در تحلیل های متناظر با حالت حذف گره های لایه پایین چلیک بیشتر از حالت حذف گره های لایه بالایی می باشد.
۴. در تحلیل های متناظر با حذف گره های لایه پایین چلیک ناپایداری کلی مشاهده می شود، در حالی که به ازای حذف گره های لایه بالایی هیچ تحلیلی منجر به ناپایداری کلی نشده است. بنابراین حذف ناگهانی گره های لایه پایینی به مراتب شرایط ناپایداری نسبت به حذف گره های لایه بالایی را در سازه ایجاد می کنند.
۵. در تحلیل های متناظر با گره های واقع در قسمت مرکزی چلیک در هیچ حالتی ناپایداری کلی اتفاق نمی افتد. بنابراین موقعیت مکانی گره حذف شده می تواند در وقوع ناپایداری یا عدم آن موثر باشد.
۶. ناپایدارترین تحلیل ها مربوط به تحلیل های متناظر با حذف گره های NB7 تا NB17 تحت بارگذاری ۰/۸ بار نهایی می باشد و در این حالت ها ناپایداری کلی اتفاق افتاده است. بنابراین انجام مطالعات بیشتر برای بررسی دقیق تر دلیل اتفاق این موضوع در گره های ذکر شده می تواند مفید باشد.

نتایج بدست آمده در این بخش، مربوط به سازه چلیک کشبستی دو لایه مورد نظر در این مقاله است. در ادامه این کار می توان اثر پارامترهای دیگر همچون ارتفاع قوس چلیک، طول دهانه، ضخامت قوس، ابعاد مدول ها و شرایط تکیه گاهی، همچنین اثر انواع بارگذاری ها از قبیل بار برف نامتقارن، بار باد، آتش سوزی و ... را در بررسی رفتار خرابی پیشرونده چلیک کشبستی دو لایه در نظر گرفت.

مراجع

- [1] Abedi, K. and Sheidaii, MR. (1401). Investigation of double-layer grid space structure resistance to progressive collapse. *Numerical methods in engineering (In persian)*, 26(1), 149-164.
- [2] Shekastehband, B., Abedi, K. and Chenaghlou, MR. (2011). Sensitivity analysis of tensegrity systems due to member loss. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(9), 1325-40.

- [3] Shekastehband, B., Abedi, K., Dianat, N. and Chenaghloou, MR. (2012). Experimental and numerical studies on the collapse behavior of tensegrity systems considering cable rupture and strut collapse with snap-through. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 47 (7), 751–768.
- [4] Shekastehband, B. and Abedi, K. (2014). Dynamic propagation of snap-through buckling in tensegrity structures, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 14 (01), 1350049.
- [5] Shekastehband, B. and Abedi, K. (2013). Collapse behavior of tensegrity systems due to cable rupture, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 13 (05), 1250079.
- [6] Nikpour, H. and Shidaei, MR. (2016). Investigation of progressive collapse in double-layer barrel-vaults space structure with light cover under different load combination. *2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Crisis Management*, Tehran, <https://civilica.com/doc/662164>.
- [7] Farhudi, F. (2016). Investigating the progressive collapse behavior of double-layer tensegrity grids consisting of triangular simplexes. *Master's thesis in civil engineering*, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil.
- [8] Habibi Sheikh Ahmad, V., Ghandi, E. and Akrami, V. (2018). Sensitivity analysis of double-layer tensegrity barrel-vaults to the static removal of the member. *11th National Congress of Civil Engineering*, Shiraz, <https://civilica.com/doc/918132>.
- [9] Habibi Sheikh Ahmad, V. and Ghandi, E. (2022). Analysis of the sensitivity of double-layer tensegrity barrel-vaults to the dynamic removal of the member, *2th International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art in the Statement of the Second Step of the Revolution*, Tabriz, <https://civilica.com/doc/1613910>
- [10] Abedi, K. and Kolachahi, SR. (2018). Investigation into the double-layer barrel vault space structure resistance to progressive collapse. In *Proceedings IRF2018: 6th International Conference Integrity-Reliability-Failure*, Lisbon, Portugal.
- [11] Yan, S., Zhao, X., Rasmussen, K. J. and Zhang, H. (2019). Identification of critical members for progressive collapse analysis of single-layer latticed domes. *Engineering Structures*, 188, 111-120.
- [12] Mirzaaghazadeh, K., Abedi, K. and Shekastehband, B. (2020) Collapse behavior of tensegrity barrel-vault structures based on di-pyramid (DP) units. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(11), 2050119.
- [13] Ghandi, E. and Habibi Sheikh Ahmad, V. (2022). Identification of Critical Members in the Progressive Collapse Analysis of Two-Layer Tensegrity Barrel Vaults. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 7(3), 26-44.
- [14] Wang, XX., Chen, ZH., Yu, YJ. and Liu, HB. (2017). Numerical and experimental study on loaded suspendome subjected to sudden cable failure. *Journal of Constructional Steel Research*, 137358-371.
- [15] Lu, JY., Zhang, HY. and Wu, XL. (2021). Experimental study on collapse behaviour of truss string structures under cable rupture. *Journal of Constructional Steel Research*, 185(2), 106864.
- [16] Zhang, H., Lu, J., Wu, X. and Li, N. (2024). Progressive Collapse Behavior of Large-span Truss String Structures Subjected to Cable Failure. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(4), 1379-1391.
- [17] Matinpour, MH., Abedi, K. and Shekastehband, B. (2021). Collapse behavior of cable-stiffened single-layer barrel vaults with novel forms of out-of-plane cables. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 21(10), p.2150135.
- [18] Tian, LM., Wei, JP., Huang, QX. and Ju, JW. (2021). Collapse-resistant performance of long-span single-layer spatial grid structures subjected to equivalent sudden joint loads. *Journal of Structural Engineering*, 147(1), p.04020309.
- [19] Tian, LM., Bai, C. and Zhong, WH. (2021). Experimental study and numerical simulation of partial double-layer latticed domes against progressive collapse in member-removal scenarios. *Structures* (29), 79-91.
- [20] Asghari, R., Abedi, K. and Chenaghloou, MR. (2020). Investigation into pre-stress modes and optimal layout of a new hybrid cable-strut system. *Advances in Structural Engineering*, 23(7), 1259-1275.
- [21] Asghari, R., Abedi, K., Chenaghloou, MR. and Shekastehband, B. (2022). Retrofitting of hybrid cable domes against strut buckling using di-pyramid (DP) module and force-limiting devices (FLD). *Thin-Walled Structures*, 180, p.109737.

- [22] Asghari, R., Abedi, K., Chenaghloou, MR. and Shekastehband, B. (2023). Retrofit strategies for mitigating progressive collapse of hybrid and traditional cable domes. *Journal of Constructional Steel Research*, 204, p.107807.
- [23] Nooshin, H. and Disney, P. (2000). Formex Configuration Processing I. *International Journal of Space Structures*, 15, 1-52.
- [24] ABAQUS -Theory Manual. (1995). Hibbit, Karlsson. and Sorensen Inc., Providence, Rhode Island, USA.
- [25] Shekastehband, B., Abedi, K. and Dianat, N. (2013). Experimental and numerical study on the self-stress design of tensegrity systems. *Meccanica*, 48(10), 2367-89.
- [26] Quirant, J., Kazi-Aoual, MN. and Motro, R. (2003). Designing tensegrity systems: the case of a double layer grid. *Engineering structures*, 25(9), 1121-30.
- [27] Ansi, B., 2010. AISC 360-10-specification for structural steel buildings. *Chicago AISC*.
- [28] Tatemichi, I., Hatato, T., Anma, Y. and Fujiwara, S. (1997). Vibration tests on a full-size suspen-dome structure. *International Journal of Space Structures*, 12(3- 4), 217-224.

