بررسی رفتار عرشه پل‌های ساخته شده با سازه‌های فضاکار

محمدحسین تقی زاده*[۱]، علاءالدین بهروش[۲]، احمد اکبرلو[۳]

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات اصفهان

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

چکیده

در کشور ما جهت ساخت عرشه پل‌ها معمولاً از بتن استفاده می‌شود اما وزن بالای عرشه‌های بتنی و عدم امکان اجرای آنها به عنوان عرشه پل‌های با دهانه‌های طولانی موجب گردیده که مهندسین به فکر مصالح جدیدی باشند که علاوه بر سبکی و سهولت اجرا، مقاومت مناسبی نیز در مقابل بارهای وارده اعم از بارهای مرده و متحرک ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری از خود نشان داده و همچنین باعث تسریع اجرای پروژه نسبت به نمونه‌های ساخته شده با مصالح بتنی گردد. سازه‌های فضایی به علت سبکی، سهولت و سرعت اجرا، جایگزین مناسبی برای عرشه پل‌ها به حساب می‌آیند. از آنجایی که تغییرات ابعاد اعضا می‌تواند در میزان خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک تأثیرگذار باشد، بنابراین انتخاب یک قطر و ضخامت مناسب برای هر عضو، علاوه بر تأثیر در رفتار سازه و خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک، در کمانش هر عضو نیز تأثیر بسزایی خواهد داشت. لذا در این پژوهش با تغییرات قطر اعضا، به بررسی رفتار عرشه پل‌های ساخته شده با سازه‌های فضاکار می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: سازه‌های فضاکار، عرشه پل‌ها، قطر و ضخامت اعضا، خیز، کمانش.

Study on Behavior of Bridges Deck Built with Spatial Structures

Mohammad Hosein Taghizadeh*[1], Alaeddin Behravesh[2], Ahmad Akbarlou[3]

1- PhD Student in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Science and Research of Isfahan

2- Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Tabriz

Abstract

In our country, concrete is commonly used for the construction of bridges deck. But the Heavy weight of concrete decks and the impossibility of making them as long-span bridges deck has caused the engineers to think a new material that besides lightness and ease of implementation can provide a good resistance against applied loads including both dead loads and dynamic loads caused by the passage of motor vehicles and also it causes to accelerate the projects implementation in compared with the specimens has made by concrete materials. Space

* مؤلف مسئول: محمدحسین تقی زاده، s.tagizaddeh@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۳/۲۶ – تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۲/۲۵

structures due to the lightness, ease and speed of implementation, are considered a suitable replacement for deck bridges. Since the variations of members diameter and thickness can affect the behavior of structures and deflection due to dead and moving loads, so choosing an appropriate diameter and thickness for each member, in addition to impact on structures behavior and deflection of dead and moving loads, this factor has a major impact on buckling of members. Therefore, in this study by changing the member diameter, are investigate the behavior of bridges deck built with spatial structures.

Keywords: Spatial Structures, Bridges Deck, Members Diameter and Thickness, Deflection, Buckling.

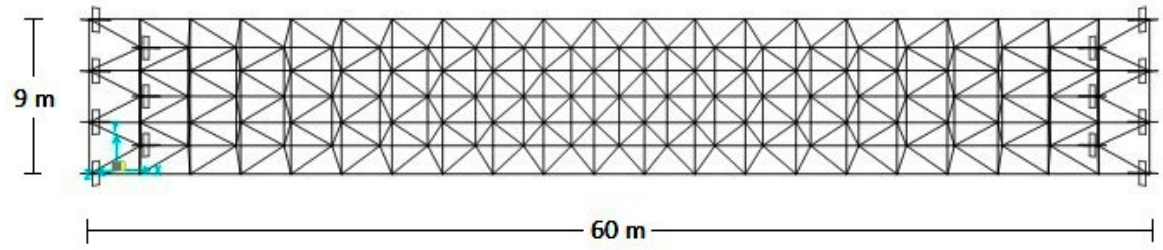
۱- مقدمه

با نگاهی به یک سازه فضایی آنچه که در وهله اول نظر هر بیننده‌ای را به خود جلب می‌کند طرح هندسی زیبا و آرایش منظم اعضای آن سازه می‌باشد که می‌توان آنرا برگی برگرفته از این طبیعت بی‌کران دانست. با استناد به گزارشی که در رابطه با "وضعیت موجود سازه‌های فضاکار" توسط انجمن بین المللی پوسته‌ها و سازه‌های فضایی (IASS) در سال ۱۹۸٤ انتشار یافت می‌توان یک سازه فضایی را به صورت یک سیستم سازه‌ای در نظر گرفت که از عضوهای خطی تشکیل یافته و طرز قرارگیری آنها به گونه‌ای است که بارها به صورت سه بعدی منتقل می‌شوند [۱۲]. بنابراین اعضای یک سازه مشبک فضایی مهمترین جز آن سازه محسوب می‌شود که هرگونه تغییر در شکل و خواص آن می‌تواند در رفتار کل سازه تاثیر بسزایی داشته باشد. برای روشن‌تر شدن این موضوع سه نوع سازه فضایی دو لایه را در نظر گرفته که آرایش اعضای آنها یکسان اما نوع مقاطع اعضا در هر مدل متفاوت باشد به طوری که مدل اول از اعضایی با مقطع I شکل، مدل دوم از اعضایی با مقطع دایروی توخالی و مدل سوم از اعضایی با مقطع مستطیلی توخالی تشکیل شده باشد. مسلماً رفتار این سازه‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و خیز ناشی از بارهای مرده و زنده در آنها یکسان نمی‌باشد. همان طور که می‌دانیم مقاطع دایروی و مستطیلی به علت شعاع ژیراسیون بزرگتر، در فشار عملکرد مناسبی داشته و نسبت به سایر مقاطع ارجهیت دارد و از آن جهت که در مقاطع دایروی توخالی، ممان اینرسی در همه جهات یکسان است لذا در طرح یک سازه فضایی عموماً از اینگونه مقاطع استفاده می‌شود. حال در این پژوهش قصد داریم با طرح دو نوع سازه فضایی با آرایش شبکه یکسان اما با قطر اعضای متفاوت که به عنوان عرشه پل مورد استفاده قرار گرفته، خیزهای ناشی از بارهای مرده و متحرک را در هر مدل مورد بحث و بررسی قرار دهیم.

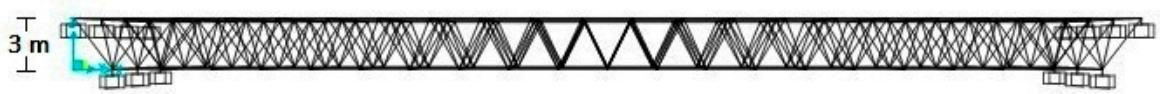
۲- معرفی مدل پیشنهادی

پل مورد بحث از نوع پل با عرشه مشبک فضایی با کاربری عبور مرور وسایل نقلیه موتوری بوده که مطابق آنچه که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود از دو لایه با فاصله ۳ متر نسبت به یکدیگر تشکیل یافته است. طول دهانه پل ٦۰ متر و عرض آن ۹ متر و دارای دو باند رفت و برگشت جهت عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری اعم از سواری و کامیون با کانتینر و بدون کانتینر می‌باشد. طول اعضایی که در راستای محورهای X و Y قرار دارند در هر دو لایه بالا و پایین، یکسان و برابر ۳ متر اختیار شده است و طول آن دسته از المان‌های قطری که بین دو لایه قرار گرفته است با توجه به آرایش المان‌ها، متفاوت می‌باشد. جهت اتصال عضوها به یکدیگر از گره مرو استفاده شده و کلیه عضوها دارای سطح مقطع یکسان با قطر ۱٦/۸۳ سانتی‌متر و به صورت توپر می‌باشد. یک دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و به طول و عرض یکسان با عرشه فضایی، بر روی لایه فوقانی آن به منظور ایجاد یک سطح صاف جهت عبور و مرور وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است. اما به علت آنکه وجود هر عنصر اضافی می‌تواند در سختی کل سازه موثر باشد و مسلماً سهمی از بارهای وارده را تحمل می‌کند و از آنجایی که هدف از این پژوهش بررسی رفتار سازه‌های فضایی به عنوان عرشه پل‌ها می‌باشد بنابراین از طرح این دال بتنی توسط نرم افزار صرف نظر شده و تنها بار ناشی از وزن آن به تعداد گره‌های لایه‌های فوقانی تقسیم و به صورت متمرکز بر تک تک گره‌های آن لایه

اعمال گردیده است. طرح آرایش المان‌های این عرشه مشبک فضایی توسط نرم افزار Formian و معرفی مشخصات سازه‌ای و آنالیز هر مدل توسط نرم افزار SAP2000 و به روش خطی صورت گرفته است [۱]، [۲]، [۳]، [٤]، [۵]، [١٤]. در دو طرف این عرشه فضایی یعنی به فاصله ٦٠ متر از یکدیگر تکیه‌گاه‌هایی در هر دو لایه بالا و پایین تعبیه گردیده که با توجه به نوع آرایش المان‌ها، در لایه فوقانی این عرشه مشبک فضایی هشت تکیه‌گاه و در لایه تحتانی آن شش تکیه‌گاه به چشم می‌خورد. به علت آنکه تنها بررسی رفتار عرشه فضایی ملاک کار است بنابراین از طرح پایه‌های منتهی به پی صرف نظر شده و تکیه‌گاه‌ها درست در محل هر پایه در لایه‌های فوقانی و تحتانی عرشه قرار داده شده است. از آنجایی که در نرم افزار SAP2000 قابلیت معرفی نوع گره‌ها وجود نداشته لذا از وزن هر گره صرف نظر شده و اتصالات بین اعضا را مفصلی فرض نموده‌ایم [۱۵].



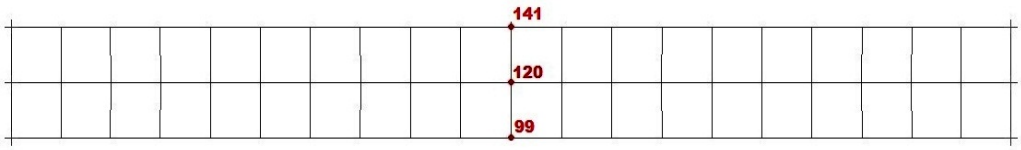
شکل ۱: پلان عرشه پل به صورت سازه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده



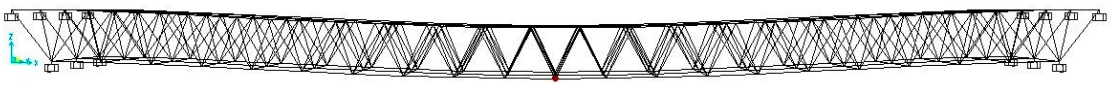
شکل ۲: نمای عرشه پل به صورت سازه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

۳- بررسی خیز ناشی از بار مرده

همان طور که در شکل‌های ۳ و ٤ ملاحظه می‌شود حداکثر میزان خیز در این عرشه فضایی در اثر بار مرده ناشی از وزن دال بتنی و وزن سازه مشبک عرشه، در گره‌های ۹۹، ۱۲۰ و ۱٤۱ رخ داده که در لایه تحتانی عرشه و به فاصله ۳۰ متر از طرفین آن قرار دارند و مقدار آن برابر با ۰/۰۵ متر است.



شکل ۳: محل بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای مرده در عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده



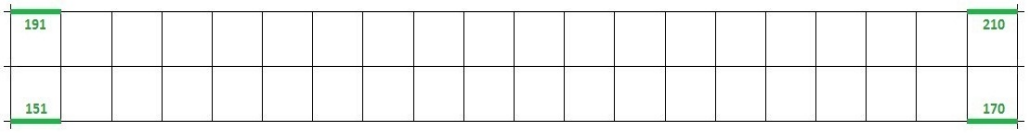
شکل ٤: خیز عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده، در اثر بارهای مرده

طبق توصیه آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران، حداکثر مقدار خیز ناشی از بارهای مرده نباید از $\frac{۱}{۲۴۰}$ طول دهانه تجاوز نماید [۱۷]. لذا بر طبق رابطه (۱) در مدل اخیر که طول دهانه‌ای برابر با ۶۰ متر دارد، حداکثر مقدار خیز ناشی از بارهای مرده برابر با ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد.

$$\text{خیز ناشی از بارهای مرده} : \delta = 5 < \frac{1}{240} \times 60 = 0.25\ \text{m} = 25\ \text{cm} \qquad (۱)$$

٤- بررسی نیروهای محوری ناشی از بار مرده

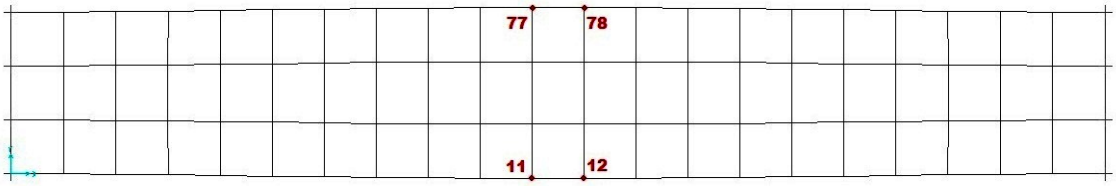
با نگاهی به شکل ۵ ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار این نیروهای محوری در لایه تحتانی عرشه مربوط به عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ می باشد که به صورت یک نیروی فشاری معادل ۲۵۰۶۱۰ kgf بر این اعضا وارد می‌شوند.



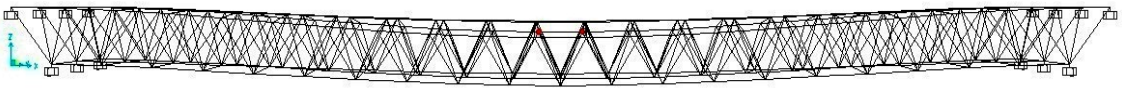
شکل ۵: محل بیشترین نیروی محوری فشاری ناشی از بارهای مرده در لایه تحتانی عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

۵- بررسی خیز ناشی از بار متحرک

حال با نگاهی به شکل‌های ٦ و ۷ ملاحظه خواهد شد که حداکثر میزان خیز در این عرشه فضایی در اثر بار متحرک ناشی از حرکت وسایل نقلیه موتوری نظیر کامیون‌های با کانتینر و بدون کانتینر مربوط به تغییرمکان گره‌های ۱۱، ۱۲، ۷۷ و ۷۸ از لایه فوقانی عرشه می‌باشد و مقدار آن برابر با ۰/۰۷ متر است.



شکل ٦: محل بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده



شکل ۷: خیز عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده در اثر بارهای متحرک

طبق توصیه آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران، حداکثر مقدار خیز ناشی از بارهای متحرک با ملحوظ داشتن اثر ضربه نباید از $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ طول دهانه تجاوز نماید [۱۷]. لذا بر طبق رابطه (۲) در مدل اخیر که طول دهانه‌ای برابر با ٦۰ متر دارد، حداکثر مقدار خیز ناشی از بارهای متحرک برابر با ٦ سانتی‌متر می‌باشد.

$$\text{خیز ناشی از بار متحرک} : \delta = 7.6\ \text{cm} > \frac{1}{1000} \times 60 = 6\ \text{cm} \qquad (۲)$$

٦- بررسی نیروهای محوری ناشی از بار متحرک

بیشترین مقدار نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک نیز در لایه تحتانی این عرشه مشبک فضایی و در همان عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ اتفاق افتاده که به صورت یک نیروی فشاری معادل ۳۱٦۸۹٤ kgf بر این اعضا اعمال می‌شوند (شکل ٥).

۷- بررسی خیز نهایی

خیز نهایی این سازه که در واقع مجموع خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک است، باز هم در همان چهار گره ۱۱، ۱۲، ۷۷ و ۷۸ از لایه فوقانی به بیشترین میزان خود معادل ۰/۱۳ متر رسیده که این مقدار در واقع همان خیز نهایی این پل در اثر بارهای وارده اعم از مرده و زنده (متحرک) می‌باشد.

۸- بررسی کمانش اعضای فشاری در عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

همان طور که در شکل ٥ ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار نیروهای محوری فشاری تحت اثر بارهای مرده و متحرک در همان عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ از لایه تحتانی عرشه اتفاق افتاده که معادل ٥٦۷٥۰٥ kgf می‌باشد. از آن جهت که طول و قطر کلیه اعضایی که در راستای محورهای X و Y قرار گرفته‌اند به صورت تیپ انتخاب شده و به ترتیب برابر با ۳ متر و ۱٦/۸۳ سانتی‌متر و از نوع توپر می‌باشند، لذا کنترل کمانش برای این چهار عضو مذکور کفایت می‌کند. سایر عضوهایی که به صورت مورب مابین این دو لایه بالا و پایین قرار گرفته و از طول‌های متفاوتی برخوردار هستند به علت کم بودن نیروهای محوری فشاری نسبت به این چهار عضو مورد نظر، از محاسبه کمانش آنها خودداری می‌شود. زیرا اگر یک یا چند عضو، بیشترین طول و بیشترین نیروی محوری را در بین سایر اعضا دارا باشد می‌تواند به عنوان نماینده کلیه اعضا به منظور بررسی کمانش، ملاک کار قرار گیرد، به طوری که اگر این عضو یا اعضای انتخاب شده در مقابل نیروهای محوری اعمالی از کمانش قابل قبولی برخوردار باشد سایر اعضا نیز در مقابل این بارهای وارده جوابگو بوده و نیازی به بررسی کمانش در آنها نمی‌باشد [٦]. البته این امر مشروط به آنست که کلیه اعضا از قطر و ضخامتی یکسان برخوردار باشند.

حال با توجه به رابطه (٤) بار کمانش بحرانی عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ را به دست می‌آوریم. برای این منظور ابتدا باید ممان اینرسی اعضا را محاسبه نموده که در مقاطع دایروی ممان اینرسی در هر دو جهت محورهای X و Y یکسان می‌باشد. بنابراین مطابق رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi \times 8.415^4}{4} = 3938.28 \quad cm^4 \qquad (۳)$$

بار کمانش بحرانی اعضا مطابق رابطه (٤) برابر است با:

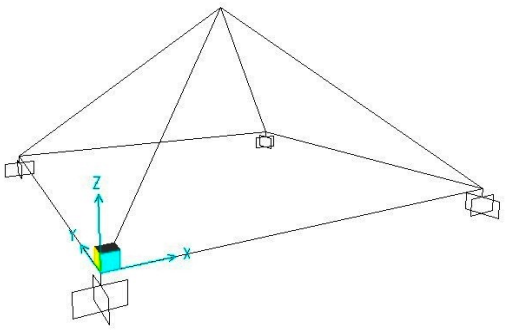
$$P_e = \frac{\pi^2 E I}{K L^2} = \frac{\pi^2 \times 2.04 \times 10^6 \times 3938.28}{1 \times 300^2} = 881036.68 \quad kgf \qquad (٤)$$

از مقایسه این مقدار با بیشترین نیروی محوری فشاری در عضوهای مذکور که برابر با ٥٦۷٥۰٥ kgf می‌باشد در می‌یابیم که این اعضا در مقابل نیروهای فشاری وارده مقاوم بوده و از آن جهت که در سایر اعضا، نیروهای محوری فشاری کوچک‌تری وجود دارد، لذا پایداری سازه از لحاظ کمانش اعضا تامین می‌باشد.

حال می‌خواهیم تاثیرات ناشی از کاهش قطر و ضخامت اعضای یک عرشه مشبک فضایی را بر تغییرات خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک بررسی نماییم. برای این منظور مجدداً عرشه فضایی مدل اخیر را در نظر گرفته و این بار قطر تمامی اعضای آنرا به ۱۳/۹٤ سانتی‌متر کاهش داده، به طوری که باز هم مانند مدل قبل برای این مدل نیز اعضای توپر در نظر گرفته شده است.

۹- بررسی خیز ناشی از بار مرده

در اثر اعمال بارهای مرده نظیر بار ناشی از وزن دال بتنی روی عرشه و وزن هر یک از اعضا، تک تک گره‌های این عرشه مشبک فضایی دچار تغییرمکان شده به طوری که بیشترین مقدار این تغییرمکان‌ها مربوط به همان گره‌های ۹۹، ۱۲۰ و ۱۴۱ از لایه تحتانی می‌باشد که به مقدار ۰/۰۶ متر نسبت به حالت اولیه تغییرمکان یافته است. این در حالی است که بیشترین مقدار خیز مدل اول در اثر بارهای مرده در حدود ۰/۰۵ متر بوده و می‌دانیم که در مدل قبل از عضوهایی به صورت مقاطع دایروی توپر با قطر ۱۶/۸۳ سانتی متر استفاده شده است. حال در مدل اخیر با کاهش قطر تمامی اعضا به ۱۳/۹۴ سانتی‌متر به خیزی برابر با ۰/۰۶ متر دست یافته‌ایم که نسبت به مدل قبل که از اعضای قطورتر و به تبع سنگین‌تری برخوردار بوده بیشتر است. حال این سوال پیش می‌آید که چگونه در مدل اخیر که از اعضایی سبک‌تر در قیاس با مدل قبلی استفاده گردیده، خیز ناشی از بارهای مرده به جای کاهش نسبت به مدل قبل، افزایش یافته است؟ می‌خواهیم جواب این سوال را با یک مثال ساده تشریح نماییم. مطابق شکل ۸، یک خرپای سه بعدی را در نظر می‌گیریم که از پنج گره و هشت عضو تشکیل یافته به طوری که یک گره آن در لایه فوقانی و چهار گره آن در لایه تحتانی قرار گرفته و به چهار تکیه‌گاه گیردار متصل می‌باشد. بر تک گره لایه فوقانی که به صورت آزاد و بدون تکیه‌گاه قرار دارد هیچ نیرویی اعمال نگشته و سازه فقط تحت تاثیر بار ناشی از وزن خود اعضا است. در حالت اول، کلیه اعضا را به صورت دایروی توپر با قطر ۱۳/۹۷ سانتی‌متر در نظر گرفته و در گره فوقانی به تغییرمکانی برابر با $۱/۷۳۲ \times ۱۰^{-۶}$ دست یافته‌ایم که در واقع همان خیز ناشی از بارهای مرده می‌باشد. حال در مدل دوم، قطر کلیه اعضا را به ۱۶/۸۳ سانتی‌متر افزایش داده و باز هم به صورت توپر در نظر می‌گیریم. مشاهده می‌شود که با وجود افزایش قطر اعضا، باز هم به تغییر مکان $۱/۷۳۲ \times ۱۰^{-۶}$ رسیدیم که در همان تک گره فوقانی اتفاق افتاده است. این خیزهای یکسان به دست آمده از دو خرپای فضایی با قطر اعضای متفاوت بیانگر آنست که در سازه‌های مشبک فضایی، افزایش و کاهش قطر یا ضخامت اعضا هیچ گونه تاثیری در تغییرات خیزهای ناشی از بارهای مرده نخواهد گذاشت و این بدان علت است که چون در سازه‌های فضایی هر گره خود به تنهایی یک تکیه‌گاه مفصلی محسوب می‌شود و می‌دانیم که در تکیه‌گاه‌ها، همواره خیز برابر صفر بوده و در وسط هر عضو، خیز ناشی از وزن خود عضو بیشترین مقدار را دارا می‌باشد، بنابراین وزن اعضا هیچ گونه تاثیری در تغییرمکان گره‌ها نداشته و این تغییرمکان‌ها فقط ناشی از اعمال بارهای مرده خارجی بر روی آنها و یا اعضای منتهی به آن گره‌ها می‌باشد [۷]. در نتیجه هر عضو با هر قطر و ضخامتی، فقط منجر به ایجاد خیز در اعضا خواهد شد که مقادیر این خیزها در وسط عضو حداکثر و در دو انتهای هر عضو یعنی در گره‌ها صفر می‌باشد. لذا هر اندازه سطح مقطع یک عضو را افزایش یا کاهش دهیم در مقادیر خیزهای ناشی از بارهای مرده گره‌ها، تغییراتی یکسان حاصل می‌شود [۸].



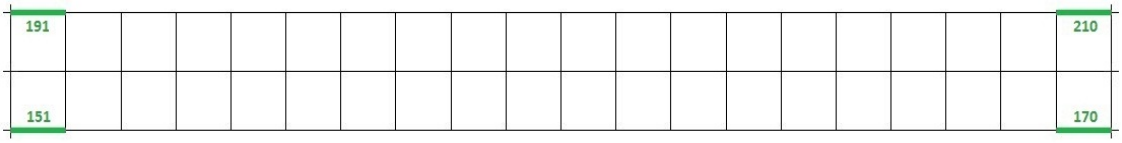
شکل ۸: خرپای فضایی تحت تاثیر بار ناشی از وزن خود

حال با نگاهی مجدد به خیز به دست آمده ناشی از بارهای مرده در مدل اخیر که برابر با ۰/۰۶ متر شده بود به این مهم پی خواهیم برد که با وجود اینکه در این عرشه فضایی، قطر اعضا به ۱۳/۹۷ سانتی‌متر کاهش یافته اما مقادیر خیز ناشی از بارهای مرده نسبت به مدل دوم که

از اعضایی به قطر ۱۶/۸۳ سانتی‌متر تشکیل شده، افزایش پیدا کرده است و چون می‌دانیم تغییرات قطر یا ضخامت اعضا هیچ گونه تاثیری در افزایش یا کاهش خیزهای گره‌ها نخواهد داشت بنابراین این تفاوت خیزهای ناشی از بارهای مرده بین دو مدل با قطر اعضای متفاوت، در اثر اعمال بارهای مرده خارجی نظیر بار ناشی از وزن دال بتنی روی عرشه، بر گره‌های لایه فوقانی آن می‌باشد و با اینکه مقدار این بار در هر دو عرشه یکسان بوده ولی در مدل اول خیز بیشتری مشاهده می‌شود که این به علت سختی متفاوت دو مدل می‌باشد. بدیهی است که هرچه قطر و ضخامت اعضا بیشتر باشد، سازه از سختی بیشتری برخوردار بوده در نتیجه در اثر اعمال بارهای خارجی تغییرمکان‌های کمتری در گره‌های سازه پدید می‌آید [۹]. این بدان معناست که اگر بارهای مرده خارجی که در اینجا همان وزن ناشی از دال بتنی روی عرشه می‌باشد را حذف کنیم، تک تک گره‌های هر دو مدل به یک اندازه تغییرمکان خواهد داد، هرچند که سطح مقطع اعضای دو مدل متفاوت باشد. یعنی در واقع بارهای مرده ناشی از وزن اعضا زمانی در تغییرمکان گره‌ها تاثیرگذارند که یک یا چند بار مرده خارجی بر گره‌ها یا اعضای آن سازه مشبک فضایی اعمال گردد [۱۰].

۱۰- بررسی نیروهای محوری ناشی از بار مرده

همان طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، پس از آنکه ضخامت تک تک اعضا را از ۱۶/۸۳ سانتی‌متر به ۱۳/۹۴ سانتی‌متر کاهش دادیم، باز هم بیشترین مقدار نیروهای محوری ناشی از بار مرده در عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ از لایه تحتانی این عرشه فضایی اتفاق افتاده که به صورت یک نیروی فشاری معادل kgf ۲۰۸۳۱۳ بر این اعضا وارد می‌شود. از مقایسه این مقدار با نیروی محوری ناشی از بار مرده در عرشه مدل اول که قطر اعضای آن برابر با ۱۶/۸۳ سانتی‌متر بوده و در همین عضوهای مذکور بیشترین مقدار این نیروها معادل kgf ۲۵۰۶۱۰ شده است در می‌یابیم که هرچه قطر اعضای یک عرشه فضایی کاهش یابد، چون از وزن کل سازه یعنی بارهای مرده آن کاسته می‌شود، لذا نیروهای محوری ناشی از این بارها نیز کاهش می‌یابد. اما این امر لزوماً منجر به کاسته شدن خیزهای ناشی از بارهای مرده نمی‌شود؛ زیرا همان طور که ذکر شد با کاهش قطر اعضای یک عرشه فضایی، سختی کل سازه کمتر شده و این امر افزایش خیزهای ناشی از بارهای مذکور را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۹: محل بیشترین نیروی محوری ناشی از بارهای مرده در عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

۱۱- بررسی خیز ناشی از بار متحرک

این موضوع در مورد خیزهای ناشی از بارهای متحرک اعمال شده متفاوت می‌باشد؛ به طوری که افزایش یا کاهش قطر و ضخامت اعضا تاثیر مستقیم بر میزان تغییرمکان‌های تک تک گره‌های این عرشه مشبک فضایی دارد. در اثر اعمال بارهای متحرک ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری، گره‌های عرشه مدل اول که قطر اعضایی برابر با ۱۳/۹۷ سانتی‌متر داشته، تغییرمکان داده به طوری که در گره‌های ۱۱، ۱۲، ۷۷ و ۷۸ از لایه فوقانی به بیشترین مقدار خود یعنی ۰/۱۱ متر رسیده است. از مقایسه این مقدار با تغییرمکان ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضایی مدل اول که قطر اعضایی برابر با ۱۶/۸۳ سانتی‌متر دارد و به تغییرمکانی برابر با ۰/۰۷ متر در همان گره‌های مذکور دست یافته است، به تفاوت سختی‌های دو مدل پی می‌بریم و این بدان معناست که وقتی قطر یا ضخامت المان‌های یک سازه مشبک فضایی را

کاهش می‌دهیم در واقع با اینکار سختی کل آن سازه را کاسته‌ایم و برعکس وقتی قطر یا ضخامت المان‌های یک سازه فضایی را زیاد می‌کنیم یعنی سختی آنرا افزایش می‌دهیم.

۱۲- بررسی نیروهای محوری ناشی از بار متحرک

بیشترین مقدار نیروهای محوری ناشی از بار متحرک نیز در همان عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ از لایه تحتانی این عرشه فضایی می‌باشد که به صورت یک نیروی فشاری معادل ۳۱٦۸۹٤ kgf بر این اعضا وارد می‌شود. از مقایسه این مقدار با نیروی محوری ناشی از بار متحرک در عرشه مدل اول که قطر اعضای آن برابر با ۱٦/۸۳ سانتی‌متر بوده و در همین عضوهای مذکور بیشترین مقدار این نیروها معادل ۳۱٦۸۹٤ kgf شده است در می‌یابیم که افزایش یا کاهش قطر اعضا هیچ‌گونه تاثیری در افزایش یا کاهش نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک در اعضا ندارد. زیرا تغییرات نیروهای محوری ناشی از این بارها، رابطه مستقیم با تغییرات وسایل نقلیه عبوری از روی آن سازه دارد؛ به طوری که اگر به جای کاهش قطر اعضا، بارهای ناشی از وسایل نقلیه را کاهش دهیم مسلماً نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک تغییر خواهد کرد [۱۱]. بنابراین تغییرات قطر اعضا فقط بر نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده تاثیرگذار بوده و نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک، متأثر از وسایل نقلیه تعریف شده می‌باشد.

۱۳- بررسی خیز نهایی

خیز نهایی این عرشه مشبک فضایی با قطر اعضایی برابر با ۱۳/۹٤ سانتی‌متر، باز هم در همان چهار گره ۱۱، ۱۲، ۷۷ و ۷۸ از لایه فوقانی به بیشترین میزان خود معادل ۰/۱۷ متر رسیده که در مقایسه با عرشه فضایی مدل قبل که قطر اعضای آن برابر با ۱٦/۸۳ متر بوده، افزایش یافته است.

۱٤- بررسی کمانش در عضوهای فشاری با کاهش قطر و ضخامت آنها

این موضوع در مورد قطر و ضخامت اعضا در یک سازه مشبک فضایی نیز صادق است به طوری که تغییرات قطر و ضخامت هر یک از اعضا، منجر به تغییرات کمانش در آنها می‌شود. برای بررسی این موضوع همان عرشه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده را در نظر گرفته با این تفاوت که این بار قطر هر عضو را از ۱٦/۸۳ سانتی‌متر به ۱۳/۹۷ سانتی‌متر کاهش داده و تغییرات کمانش را در آنها مورد بررسی قرار می‌دهیم. همان طور که می‌دانیم در اثر اعمال بارهای مرده و متحرک، تک تک اعضای این عرشه مشبک فضایی تحت تاثیر نیروهای محوری اعم از کششی یا فشاری قرار گرفته و از آنجایی که کمانش اعضا ناشی از نیروی محوری فشاری می‌باشد، لذا بیشترین مقدار این نیرو باز هم در عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ اتفاق افتاده به طوری که برابر با ۵۲۵۲۰۸ kgf بوده و ناشی از مجموع بارهای مرده و متحرک می‌باشد. حال با توجه به اینکه قطر اعضای این عرشه مشبک فضایی برابر با ۱۳/۹۷ سانتی‌متر است، بار کمانش بحرانی عضوهای مذکور را محاسبه نموده و به مقایسه آن با بیشترین نیروی محوری فشاری در این اعضا می‌پردازیم. بنابراین با توجه به اینکه در عرشه اخیر قطر اعضا به ۱۳/۹۷ سانتی‌متر کاهش یافته است، ممان اینرسی اعضای عرشه طبق رابطه (۵) برابر است با:

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi \times 6.985^4}{4} = 1869.63 \ \ cm^4 \qquad (۵)$$

بار کمانش بحرانی اعضا مطابق رابطه (٦) برابر است با:

$$P_e = \frac{\pi^2 E I}{K L^2} = \frac{\pi^2 \times 2.04 \times 10^6 \times 1869.63}{1 \times 300^2} = 418256.85 \quad kgf \qquad (٦)$$

از مقایسه این مقدار با بیشترین نیروی محوری فشاری که در عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ رخ داده است و معادل ۵۲۵۲۰۸ kgf می‌باشد، در می یابیم که هرچه قطر یا ضخامت اعضای یک عرشه مشبک فضایی را کاهش دهیم، ممان اینرسی آن عضوها کاهش یافته و در نتیجه بار کمانش بحرانی اعضا بیشتر می‌شود. لذا در عرشه فضایی اخیر که قطر اعضایی معادل ۱۳/۹۷ سانتی متر دارد، نیروی محوری فشاری در عضوهای مذکور به بیشترین مقدار خود رسیده و از مقدار بار کمانش بحرانی مربوط به این عضوها فراتر رفته است. در نتیجه عضوهای مذکور بیش از حد مجاز کمانش خواهد کرد که منجر به ناپایداری کل سازه می‌شود. این در حالی است که عرشه فضایی قبل با اعضایی به قطر ۱۶/۸۳سانتی‌متر که بیشترین نیروی محوری فشاری آن برابر با ۵۶۷۵۰۵ kgf و بار کمانش بحرانی آن معادل ۸۸۱۰۳۶ kgf می‌باشد، از لحاظ کمانش اعضا، سازه در حالت پایدار قرار دارد.

۱۵- نتیجه‌گیری

وقتی قطر یا ضخامت المان‌های یک سازه مشبک فضایی را کاهش می‌دهیم در واقع با اینکار سختی کل سازه را کاسته و در نتیجه تغییرمکان در گره‌ها افزایش می‌یابد. عکس این موضوع نیز درباره افزایش قطر یا ضخامت المان‌های یک سازه مشبک فضایی صحت دارد؛ به طوری که با افزایش قطر یا ضخامت اعضای یک سازه فضایی، سختی آن افزایش یافته و به تبع آن تغییرمکان گره‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی هرچه قطر یا ضخامت یک عضو را که تحت تاثیر نیروهای محوری فشاری قرار دارد، کاهش دهیم مسلماً کمانش آن عضو افزایش می‌یابد. لذا به مهندسین و طراحان سازه‌های مشبک فضایی توصیه اکید می‌شود که در طرح این گونه سازه‌ها، حتماً کمانش عضوهایی را که تحت تاثیر نیروهای محوری فشاری قرار دارند، بررسی نموده و از قابل اعتماد بودن آنها در مقابل این نیروها که منجر به ایجاد کمانش در عضو می‌شوند، اطمینان حاصل نمایند.

۱۶- مراجع

[1] Nooshin, H. Disney P L.; "Formex Configuration Processing I, International Journal of Space Structures", Vol 15. (2000).

[2] Nooshin, H. Disney P L.; "Formex Configuration Processing II, International Journal of Space Structures", Vol 16. (2001).

[3] Nooshin, H. Disney P L.; "Formex Configuration Processing I, International Journal of Space Structures", Vol 15. (2000).

[4] Nooshin, H.; "A Technique for Surface Generation" IASS Symposium. Stuttgart. Germany. (1996).

[5] Nooshin, H. Disney, PL. Champion, OC.; "Computer-Aided Processing of Polyhedric Configurations". Chapter 12 in Beyond the Cube, Edited by J F Gabriel, John Wiley. (1997).

[6] Abedi, K. ; "Instability Behavior and Collapse Analysis of Space Structures", Proceeding of the First National Conference on Space Structure, Iran, Tehran, May 15-17, (2000).

[7] Makowski, Z.S. , "Analysis, Design and Construction of Double Layer Grids", Granada Publishing Ltd. , London and New York, 1-85, (1981).

[8] Koushky, A.L., Dehdashty, G. Firouz, A. "Nonlinear Analysis of Double Layer Grids with Composite Nodes under Symmetric and Unsymmetric Gravity Loads", International Journal of Space Structures, 22 (2), 133-140, (2007).

[9] Sheidaii, M.R., Abedi, K., Behravesh, A. "An Investigation into the Collapse Behavior of Double Layer Grid Space Structures", Proceeding of the LUSAS User Conference, London, England, (2000).

[10] Sheidaii, M.R., Abedi, K., Behravesh, A. "Collapse Behavior of Double Layer Space Trusses", Proceeding of the IASS Symposium on Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures, Nagoya, Japan, (2001).

[11] Sheidaii, M.R., Abedi, K., Behravesh, A. "An Investigation into the Collapse Behavior of Double Layer Space Trusses", Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, 27(B1), (2003).

[۱۲] جان چیلتون ، ج. "سازه‌های مشبک فضایی". ترجمه محمود گلابچی. دانشگاه تهران. ایران. چاپ سوم. (۱۳۸۸).

[۱۳] جی اس راماسوامی، ج. "تحلیل، طراحی و ساخت سازه‌های فضایی". ترجمه علی کاوه. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران. ایران. شماره نشریه ک-۳۸۲. (۱۳۸۳).

[۱٤] اشرف حبیب الله، آ. "برنامه عمومی تحلیل و طراحی سازه‌ها SAP2000". ترجمه افشین ترابی. سیمای دانش. تهران. ایران. چاپ دوم. (۱۳۸٦).

[۱۵] حسن باجی، ح. جواد هاشمی، ج. "پروژه‌های کاربردی در تحلیل و طراحی کامپیوتری سازه‌ها". متفکران. تهران. ایران. چاپ چهارم. (۱۳۸٤).

[۱٦] مستوفی نژاد، د. ، فضیلتی، م. "بارگذاری و سیستم‌های باربر". انتشارات ارکان دانش. اصفهان. چاپ نهم. (۱۳۸۷).

[۱۷] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. "آیین‌نامه سازه‌های فضاکار". تهران. ایران. نشریه شماره ٤۰۰. (۱۳۸۹).

[۱۸] معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها. "آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه شماره ۱۳۹)"، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. تهران. چاپ اول. (۱۳۷۹).