

بررسی رفتار سازه‌های فضایی در عرشه پل‌ها با تغییرات قطر و ضخامت اعضا

محمدحسین تقی زاده ولدی^۱، دکتر علاءالدین بهروش^۲، دکتر احمد اکبرلو^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، s.taqizadeh@gmail.com

۲- عضو تمام وقت هیات علمی دانشگاه تبریز، behravesht@tabrizu.ac.ir

۳- عضو تمام وقت هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز akbarlou@iautabriz.ac.ir

چکیده

یک سازه فضایی بهینه به سازه‌ای اطلاق می‌شود که به کمترین تعداد اعضا یعنی کمترین میزان بار مرده و در عین حال کمترین خیز ممکن طرح شود به طوری که اهداف مهندسی و بهره برداران آن پروژه را میسر نماید. حال بنا به دلایلی نظیر سرعت و سهولت عملیات اجرا، سبک بودن و حمل آسان و از همه مهمتر قابلیت اجرا در دهانه‌های طولانی نسبت به نمونه‌های بتنی، اگر از این سیستم سازه‌ای به عنوان عرشه پل‌ها استفاده گردد، مستلزم بررسی دقیق خیزهای ناشی از بارهای متحرک ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری است. لذا شناخت عوامل تاثیرگذار بر تغییرات خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک یکی از مهمترین وظایف مهندسی این عرصه به شمار می‌آید. از مهمترین این عوامل می‌توان به تغییرات قطر اعضای یک سازه فضایی اشاره نمود که می‌تواند نقش بسزایی در تغییر مکان گره‌های آن سازه داشته باشد. لذا در این پژوهش با تغییر قطر تک تک اعضای یک سازه مشبک فضایی که به عنوان عرشه پل مورد استفاده قرار گرفته به بررسی خیزهای ناشی از بارهای مرده و زنده (متحرک) و همچنین کمانش اعضایی که تحت تاثیر این بارهای اعمالی قرار دارند، می‌پردازیم.

کلید واژه: سازه‌های فضایی، عرشه پل‌ها، قطر و ضخامت اعضا، خیز، کمانش

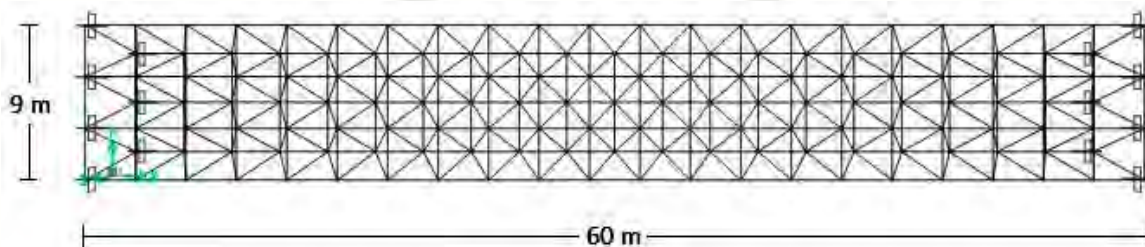
۱- مقدمه

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 فضا کار" توسط انجمن بین المللی پوسته‌ها و سازه‌های فضایی (IASS) در سال ۱۹۸۴ 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 [۱]. 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 روشن تر 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 اعضای با مقطع I شکل، مدل دوم از اعضای با مقطع دایروی توخالی و مدل سوم از اعضای 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 ارجحیت 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

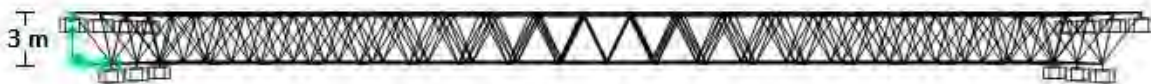
داریم با طرح دو نوع سازه فضایی با آرایش شبکه یکسان اما با قطر اعضای متفاوت که به عنوان عرشه پل مورد استفاده قرار گرفته، خیزهای ناشی از بارهای مرده و متحرک را در هر مدل مورد بحث و بررسی قرار دهیم.

۲- معرفی پل 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 ۶۰ 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 اعضای 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 اعضا به یکدیگر از گره مرو استفاده شده و کلیه اعضا دارای سطح مقطع یکسان با قطر ۱۶/۸۳ 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 [۳]، [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]. در دو طرف این عرشه فضایی یعنی به فاصله ۶۰ 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 [۴].



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



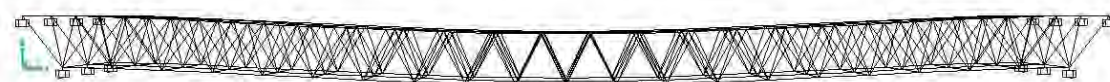
شکل ۲: نمای عرشه پل به صورت سازه فضایی دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

۳- بررسی خیز ناشی از بار مرده

همان طور که در شکل‌های ۳ و ۴ 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 ۱۴۱ رخ داده که در لایه تحتانی عرشه و به فاصله ۳۰ متر از طرفین آن قرار دارند و مقدار آن برابر با ۰/۰۵۰۶۹ 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 ۴: 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 $\frac{1}{340}$ طول دهانه تجاوز نماید [6]. 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 سانتی متر می‌باشد.

$$\delta = 5 < \frac{1}{240} \times 60 = 0.25 \text{ m} = 25 \text{ cm} \quad (1)$$

۴- 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 ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ می‌باشد که به صورت یک نیروی فشاری معادل ۲۵۰۶۱۰/۰۴ kgf بر این اعضا وارد می‌شوند.

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، ۱۳ و ۱۴ از لایه فوقانی به بیشترین میزان خود معادل ۰/۱۲۶۶۶ 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 ۵ 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 ۵۶۷۵۰۵/۰۱۲ kgf می‌باشد. از آن جهت که طول و قطر کلیه اعضای که در راستای محوره‌های X و Y قرار گرفته اند به صورت تیپ انتخاب شده و به ترتیب برابر با ۳ متر و ۱۶/۸۳ سانتی متر 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. البته این امر مشروط به آنست که کلیه اعضا از قطر و ضخامت یکسان برخوردار باشند.

حال با توجه به رابطه (۴) 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 محوره‌های X و Y یکسان می‌باشد. بنابراین مطابق رابطه (۳) خواهیم داشت :

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi \times 8.415^4}{4} = 3938.28 \text{ cm}^4 \quad (3)$$

بار کمانش بحرانی اعضا مطابق رابطه (۴) برابر است با:

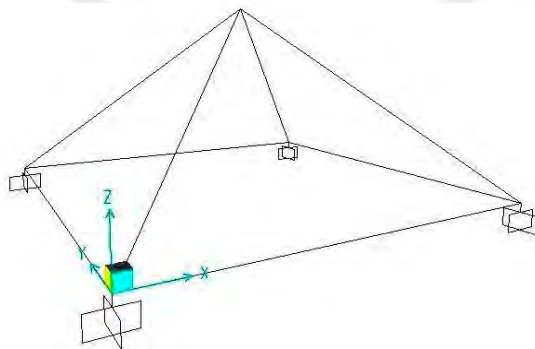
$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{KL^2} = \frac{\pi^2 \times 2.04 \times 10^6 \times 3938.28}{1 \times 300^2} = 881036.68 \text{ kgf} \quad (4)$$

از مقایسه این مقدار با بیشترین نیروی محوری فشاری در عضوهای مذکور که برابر با ۵۶۷۵۰۵/۰۱۲ kgf می‌باشد درمی‌یابیم 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 ۱۳/۹۴ سانتی متر 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 $0/06114$ متر نسبت به حالت اولیه تغییرمکان یافته است. این در حالی است که بیشترین مقدار خیز مدل اول در اثر بارهای مرده در حدود $0/05069$ متر بوده و می‌دانیم که در مدل قبل از عضوهایی به صورت مقاطع دایروی توپر با قطر $16/83$ سانتی متر استفاده شده است. حال در مدل اخیر با کاهش قطر تمامی اعضا به $13/94$ سانتی متر به خیزی برابر با $0/06114$ 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 اعضای 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 $13/97$ سانتی متر در نظر گرفته و در گره فوقانی به تغییرمکانی برابر با $10^{-6} \times 1/732$ دست یافته‌ایم که در واقع همان خیز ناشی از بارهای مرده می‌باشد. حال در مدل دوم، قطر کلیه اعضا را به $16/83$ سانتی متر افزایش داده و باز هم به صورت توپر در نظر می‌گیریم. مشاهده می‌شود که با وجود افزایش قطر اعضا، باز هم به تغییر مکان $10^{-6} \times 1/732$ 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. 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.



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

است. از مقایسه این مقدار با تغییرمکان ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضایی مدل اول که قطر اعضایی برابر با ۱۶/۸۳ سانتی متر دارد و به تغییرمکانی برابر با ۰/۰۷۶۱۶ 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 ۳۱۶۸۹۴/۹۷ 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 ۱۶/۸۳ سانتی متر بوده و در همین عضوهای مذکور بیشترین مقدار این نیروها معادل ۳۱۶۸۹۴/۹۷ kgf شده است در می‌یابیم که افزایش یا کاهش قطر اعضا هیچ گونه 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. 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 ۱۳/۹۴ سانتی متر، باز هم در همان چهار گره ۱۱، ۱۲، ۷۷ و ۷۸ از لایه فوقانی به بیشترین میزان خود معادل ۰/۱۷۱۶۸ متر رسیده که در مقایسه با عرشه فضایی مدل قبل که قطر اعضای آن برابر با ۱۶/۸۳ متر بوده، افزایش یافته است.

۱۴- 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 ۱۶/۸۳ سانتی متر به ۱۳/۹۷ سانتی متر 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 ۵۲۵۲۰۸/۵۸۶ 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 سانتی متر 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 سانتی متر کاهش یافته است، ممان اینرسی اعضای عرشه طبق رابطه (۵) برابر است با:

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi \times 6.985^4}{4} = 1869.63 \text{ cm}^4 \quad (5)$$

بار کمانش بحرانی اعضا مطابق رابطه (۶) برابر است با:

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{KL^2} = \frac{\pi^2 \times 2.04 \times 10^6 \times 1869.63}{1 \times 300^2} = 418256.85 \text{ kgf} \quad (6)$$

از مقایسه این مقدار با بیشترین نیروی محوری فشاری که در عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ رخ داده است و معادل ۵۲۵۲۰۸/۵۸۶ kgf می‌باشد، در می‌یابیم 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 ۱۶/۸۳ سانتی متر که بیشترین نیروی محوری فشاری آن برابر با ۵۶۷۵۰۵/۱۲ kgf و بار کمانش بحرانی آن معادل ۸۸۱۰۳۶/۶۸ kgf می‌باشد، از لحاظ کمانش اعضا، سازه در حالت پایدار قرار دارد.

۱۵- نتیجه گیری

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 مهندسیین و طراحان سازه‌های مشبک فضایی توصیه اکید می‌شود که در طرح این گونه سازه‌ها، حتماً کمانش عضوهای 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.

مراجع

- [۱] جان چیلتون، ج. (۱۳۸۸). سازه‌های مشبک فضایی. ترجمه محمود گلابچی. دانشگاه تهران. ایران. چاپ سوم.
- [۲] جی اس راماسوامی، ج. (۱۳۸۳). تحلیل، طراحی و ساخت سازه‌های فضایی. ترجمه علی کاوه. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران. ایران. شماره نشریه ک-۳۸۲.
- [۳] اشرف حبیب الله، آ. (۱۳۸۶). برنامه عمومی تحلیل و طراحی سازه‌ها SAP2000. ترجمه افشین ترابی. سیمای دانش. تهران. ایران. چاپ دوم.
- [۴] حسن باجی، ج.، جواد هاشمی، ج. (۱۳۸۴). پروژه‌های کاربردی در تحلیل و طراحی کامپیوتری سازه‌ها. متفکران. تهران. ایران. چاپ چهارم.

- [5] مستوفی نژاد، د. ، فضیلتی، م. ، (۱۳۸۷)، بارگذاری و سیستم‌های باربر، انتشارات ارکان دانش. اصفهان. چاپ نهم.
- [6] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. (۱۳۸۹). آیین‌نامه سازه‌های فضاکار. تهران. ایران. نشریه شماره ۴۰۰.
- [7] معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها. ، (۱۳۷۹)، آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه شماره ۱۳۹)، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. تهران. چاپ اول.
- [8] Nooshin H, Disney P L, Formex Configuration Processing I, International Journal of Space Structures, Vol 15, 2000.
- [9] Nooshin H, Disney P L, Formex Configuration Processing II, International Journal of Space Structures, Vol 16, 2001
- [10] Nooshin H, Disney P L, Formex Configuration Processing III, International Journal of Space Structures, Vol 17, 2002.
- [11] Nooshin H, A Technique for Surface Generation, IASS Symposium, Stuttgart, Germany, October 1996.
- [12] Nooshin H, Disney P L and Champion O C, Computer-Aided Processing of Polyhedric Configurations, Chapter 12 in Beyond the Cube, Edited by J F Gabriel, John Wiley, 1997.