

تحلیل رفتار سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها با تغییرات توپولوژی و تعداد لایه‌ها

محمد حسین تقی‌زاده ولدی: دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

mh.taghizadeh@khuisf.ac.ir

مهدیه پورهادی گوابری: مربی، گروه معماری، موسسه آموزش عالی مهرآیین بندرانزلی، انزلی، ایران

m.pourhadi@ut.ac.ir

چکیده

کاربرد سازه‌های فضاکار علی‌رغم سهولت و سرعت اجرا همواره محدود به پوشش سقف‌های با دهانه‌های طولانی است. در حالی که این نوع سازه‌ها که با مکانیزم پخش بار در کلیه اعضا، از مقاومت قابل قبولی در برابر بارهای وارده اعم از مرده و زنده برخوردار هستند، می‌توانند جایگزین مناسبی جهت بکارگیری در عرشه پل‌ها محسوب شوند. لذا در این مقاله با مدل‌سازی عددی یک عرشه مشبک فضاکار دو و سه لایه با توپولوژی‌های مختلف، رفتار آن در برابر بارهای مرده و متحرک ناشی از حرکت وسایل نقلیه موتوری مطابق آیین‌نامه آشتو، مورد بررسی قرار گرفت. فرم‌یابی هندسی توپولوژی‌های مختلف، با استفاده از جبر فرمکی توسط نرم‌افزار Formian 2.0 و مدل‌سازی عددی عرشه‌های فضاکار با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود SAP2000 و با تحلیل استاتیکی خطی صورت گرفت. نتایج نشان داد که عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده که از کمترین تعداد اعضا و گره‌ها نسبت به سایر توپولوژی‌ها برخوردار است، دارای کمترین خیز ناشی از بارهای مرده برابر با ۵ سانتی‌متر و عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده دارای کمترین خیز ناشی از بارهای متحرک برابر با ۵/۶ سانتی‌متر است. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های عرشه فضاکار از دو به سه لایه، به علت افزایش تعداد اعضا و گره‌های سازه، خیز ناشی از بارهای مرده بیشتر شده و به ۶/۸ سانتی‌متر می‌رسد؛ در حالی که این ازدیاد مصالح که باعث افزایش سختی سازه می‌شود منجر به کاهش خیز ناشی از بارهای متحرک برابر با ۴/۸ سانتی‌متر می‌گردد.

کلمات کلیدی: سازه‌های فضاکار، عرشه پل، توپولوژی، تعداد لایه‌ها، خیز

۱- مقدمه

از اوایل قرن بیستم میلادی هنگامی که اولین نمونه‌های سازه‌های مشبک فضاکار در سال ۱۹۰۳ توسط الکساندر گراهام بل ابداع و جهت استفاده در بال‌های کاپت قرار گرفت شاید کمتر کسی تصور می‌کرد که این ایده بدین سرعت پیشرفت کرده تا جایی که امروزه پروژه‌های بسیاری در سراسر دنیا، اجرا و به بهره‌برداری رسیده باشد (راماسوامی، ۲۰۰۴). با نگاهی به برخی پروژه‌های معروف نظیر سقف ترمینال منچستر انگلستان (۱۹۹۳)، سقف سالن ورزشی پالافولس اسپانیا (۱۹۹۳)، سقف استادیوم سیدنی استرالیا (۱۹۹۸) و بسیاری دیگر به این مهم پی می‌بریم که طرح سازه‌های فضاکار عمدتاً به منظور پوشش دهانه‌های بزرگ و به عنوان سقف مورد بهره‌برداری قرار گرفته است (چیلتون، ۲۰۰۹).

حال اینکه کاربردهای سازه‌های فضاکار تنها به این مورد محدود نمی‌شود و از آنجایی که این سیستم سازه‌ای با توزیع نیرو بین اعضای خود رفتاری سه بعدی را عرضه می‌کند بنابراین می‌تواند در مقابل اعمال بارهای بسیار بزرگ، اعم از بارهای مرده و زنده، مقاومت خوبی از خود نشان داده، به طوری که امروزه پیشنهادات جسورانه و گاه دور از ذهن توسط شرکت‌های طراح سازه‌های فضاکار در سراسر دنیا بیان شده است که از آنها می‌توان به پیشنهاد شرکت شیمیزو در ژاپن اشاره نمود که طرح یک شهر در هوا با شکل هرم را ارائه کرده به طوری که در ساعات کاری به بیش از یک میلیون نفر می‌رسد و بر روی یک سازه عظیم از خرپای فضاکار استوار است. در کشور ما جهت ساخت عرشه پل‌ها معمولاً از بتن استفاده می‌شود اما وزن بالای عرشه‌های بتنی و عدم امکان اجرای آنها با دهانه‌های طولانی و همچنین سرعت پایین و سختی عملیات اجرایی موجب گردیده که مهندسی 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 فضاکار به علت سبکی، سهولت و سرعت اجرا، جایگزین مناسبی برای عرشه پل‌ها به محسوب می‌شوند. از آنجایی که این نوع سازه‌ها دارای تنوع بسیار زیاد از لحاظ شکل و آرایش اعضا می‌باشند بنابراین انتخاب یک توپولوژی (آرایش شبکه) مناسب می‌تواند در رفتار سازه تاثیر بسزایی داشته باشد. در این مقاله به بررسی عددی رفتار سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها با تغییرات توپولوژی و تعداد لایه‌ها پرداخته می‌شود. به این منظور عرشه پل به صورت دو و سه لایه با توپولوژی‌های مختلف با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده، مربع روی مربع قطری و مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده با استفاده از نرم‌افزار Formian 2.0 فرم‌یابی و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود SAP2000 مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

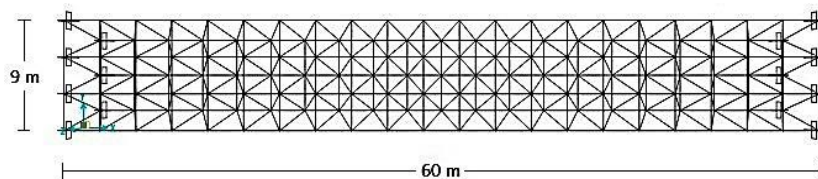
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- فرم‌یابی هندسی و مدل‌سازی عددی

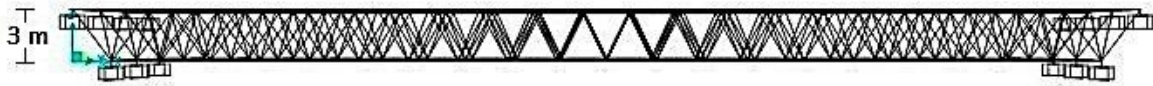
سازه مورد بحث از نوع پل با عرشه مشبک فضاکار با کاربری عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری بوده که از دو لایه با فاصله ۳ متر نسبت به یکدیگر تشکیل شده است. طول دهانه پل ۶۰ متر و عرض آن ۹ متر و دارای دو باند رفت و برگشت جهت عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری اعم از کامیون دو محوره (H) و سه محوره (HS) می‌باشد (آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها، ۱۳۷۹). طول اعضایی که در راستای محوره‌های X و Y قرار دارند در هر دو لایه فوقانی و تحتانی، یکسان و برابر ۳ متر اختیار شده است و طول اعضای قطری که بین دو لایه قرار گرفته است با توجه به آرایش اعضا، متفاوت می‌باشد. جهت اتصال اعضا به یکدیگر از گره مرو استفاده شده و کلیه اعضا دارای سطح مقطع یکسان با قطر ۱۶/۸۳ سانتی‌متر می‌باشد. یک دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و به طول و عرض یکسان با عرشه فضاکار، 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 فضاکار به عنوان عرشه پل‌ها می‌باشد، بنابراین از طرح این دال بتنی توسط نرم‌افزار صرف نظر شده و تنها بار ناشی از وزن آن به تعداد گره‌های لایه‌های فوقانی تقسیم و به صورت متمرکز بر محل گره‌های آن لایه اعمال گردیده است. فرم‌یابی هندسی آرایش اعضای این عرشه مشبک فضاکار با استفاده از جبر فرمکی توسط نرم‌افزار Formian 2.0 (نوشین، ۱۹۹۶) و تحلیل پایداری پل‌ها توسط نرم‌افزار اجزای محدود SAP2000 به روش تحلیل استاتیکی خطی انجام شده است (حبیب الله، ۲۰۰۷).

اصول طراحی پل‌ها بر اساس آیین‌نامه آشتو (۲۰۱۲) می‌باشد و در دو طرف این عرشه، یعنی به فاصله ۶۰ متر از یکدیگر، تکیه‌گاه‌های گیردار در هر دو لایه فوقانی و تحتانی تعبیه گردیده است. به علت آنکه در این پژوهش، بررسی رفتار عرشه فضاکار 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. همچنین به علت عدم قابلیت معرفی نوع گره‌ها در نرم‌افزار SAP2000، از وزن هر گره صرف نظر شده و اتصالات بین اعضا، از نوع مفصل فرض شده است تا از ایجاد لنگرهای خمشی در اعضا جلوگیری شود و اعضای این سازه مشبک فضاکار فقط به نیروهای محوری به صورت کشش یا فشار کار کنند (باجی و هاشمی، ۱۳۸۴). همچنین بارهای متحرک فقط در محل گره‌ها به سازه اعمال شده و از اعمال مستقیم این بارها بر اعضا اجتناب می‌گردد تا مانع از ایجاد لنگرهای خمشی در اعضا شود (حبیب الله، ۱۳۸۶). در شکل ۱ و ۲ به ترتیب پلان و نمای عرشه پل به صورت سازه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده نشان داده شده است.

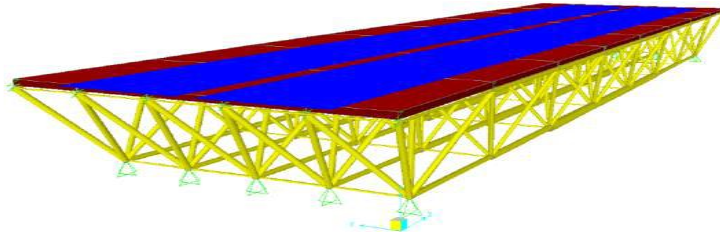


شکل ۱- پلان عرشه پل به صورت سازه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

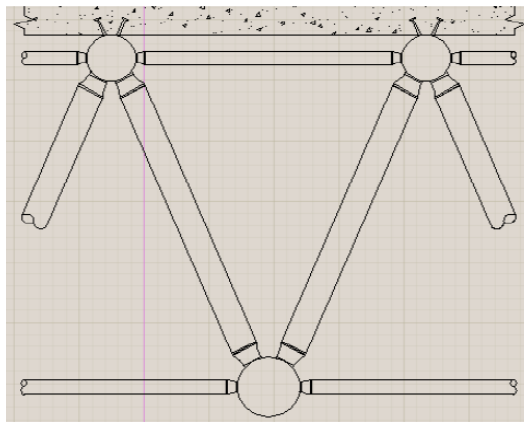


شکل ۲- نمای عرشه پل به صورت سازه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

در شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب شماتیکی از یک عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده به صورت تک دهانه و جزییات اجرایی آن با اتصالات بین اعضا از نوع سیستم مرو، نشان داده شده است.

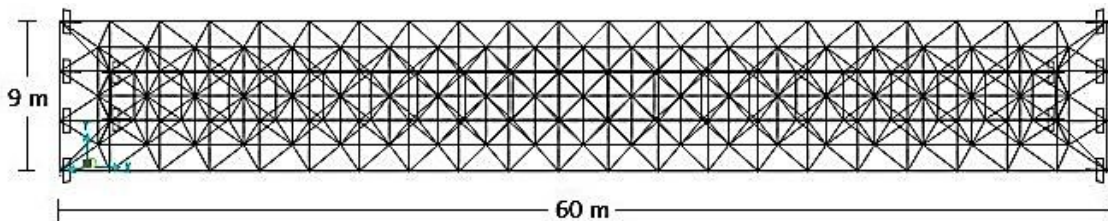


شکل ۳- عرشه مشبک فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (تقی زاده و بهروش، ۲۰۱۵)



شکل ۴- جزییات اجرایی عرشه مشبک فضاکار با اتصال مرو (تقی زاده و بهروش، ۲۰۱۵)

در شکل ۵ و ۶ به ترتیب پلان و نمای عرشه پل به صورت سازه فضاکار سه لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با ثابت نگه داشتن عمق (فاصله بین لایه‌های فوقانی و تحتانی) عرشه فضاکار با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده و ایجاد یک لایه میانی در عمق ۱/۵ متر از لایه فوقانی، تعداد لایه‌های عرشه مذکور به سه لایه افزایش می‌یابد. این کار منجر به افزایش تعداد گره‌ها به ۱۹۵ گره و تعداد اعضا به ۷۴۰ عضو می‌شود و با توجه به توپولوژی عرشه، به علت عدم وجود تکیه‌گاه در لایه میانی آن، گره‌های دو انتهای عرشه در لایه‌های فوقانی و تحتانی به صورت گیردار فرض می‌شود.



شکل ۵- پلان عرشه پل به صورت سازه فضاکار سه لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)



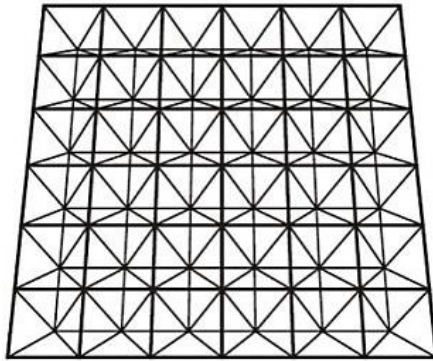
شکل ۶- نمای عرشه پل به صورت سازه فضاکار سه لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

۲-۲- انواع توپولوژی مورد استفاده در عرشه پل

مربع روی مربع جابه‌جا شده

در شکل ۷، آرایش اعضا به صورت مربع روی مربع جابه‌جا شده نشان داده شده است. این نوع آرایش اعضا به گونه‌ای است که در آن اعضای فوقانی شبکه نسبت به اعضای تحتانی به اندازه نصف یک مربع، در هر جهت جابه‌جا شده است (نوشین و همکاران، ۱۹۹۷). در این حالت اعضای جان، گره‌های شبکه فوقانی را به نقاط متناظر در شبکه تحتانی متصل می‌کنند و موجب ایجاد سلول‌های چهار وجهی یا نصف هشت وجهی می‌شوند. این عرشه فضاکار با توپولوژی مذکور که طول

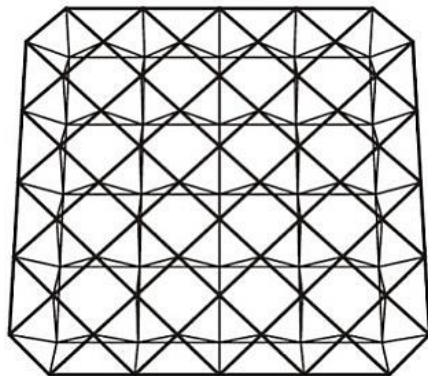
دهانه آن برابر با ۶۰ متر است دارای ۱۵۱ گره و ۵۰۴ عضو می‌باشد. اتصالات اعضا از نوع مفصلی بوده یعنی دارای ۶ درجه آزادی است. در هر یک از دو طرف عرشه هفت تکیه‌گاه از نوع گیردار قرار دارد که سهم لایه فوقانی چهار و سهم لایه تحتانی سه تکیه‌گاه بوده که به فاصله ۳ متر از یکدیگر قرار دارند.



شکل ۷- شبکه دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (آیین‌نامه سازه‌های فضاکار، ۱۳۸۹)

مربع روی مربع قطری

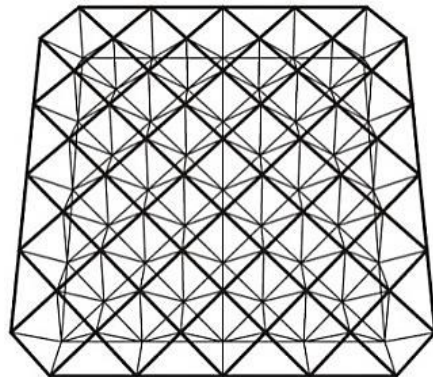
در شکل ۸، آرایش اعضا به صورت مربع روی مربع قطری نشان داده شده است. در این حالت اعضای شبکه تحتانی نسبت به اعضای شبکه فوقانی ۴۵ درجه می‌چرخد و اغلب دهانه آن بزرگتر از شبکه فوقانی است (نوشین و دیسنی، ۲۰۰۰). در این نوع آرایش شبکه اعضای جان، گره‌های شبکه فوقانی و تحتانی را به هم وصل می‌کند. عرشه با این نوع آرایش که طول دهانه‌ای یکسان با حالت قبل دارد از ۲۰۷ گره و ۶۳۴ عضو تشکیل یافته و اتصالاتی از نوع مفصلی بین اعضای آن حاکم است. در هر طرف این عرشه، پنج تکیه‌گاه گیردار تعبیه شده است که سهم لایه فوقانی و تحتانی به ترتیب سه و دو تکیه‌گاه می‌باشد که به فاصله ۳ متر از یکدیگر قرار دارند.



شکل ۸- شبکه دو لایه با آرایش مربع روی مربع قطری (آیین‌نامه سازه‌های فضاکار، ۱۳۸۹)

مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده

در شکل ۹، آرایش اعضا به صورت مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده نشان داده شده است. در این حالت، مربع‌ها در هر دو لایه فوقانی و تحتانی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به شبکه دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده، چرخیده‌اند (نوشین و دیسنی، ۲۰۰۱). عرشه فضاکار در این حالت با طول دهانه ۶۰ متر دارای ۲۴۷ گره و ۸۹۶ عضو می‌باشد که با اتصالات مفصلی به یکدیگر متصل شده‌اند. تعداد تکیه‌گاه‌های هر طرف این عرشه فضاکار، پنج تکیه‌گاه بوده که سه تکیه‌گاه در لایه فوقانی و دو تکیه‌گاه در لایه تحتانی با فاصله ۳ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند و همگی از نوع گیردار می‌باشند.



شکل ۹- شبکه دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده (آیین‌نامه سازه‌های فضاکار، ۱۳۸۹)

۲-۳- اصول طراحی و محدودیت‌ها

طراحی این پل بر اساس آیین‌نامه آشتو (۲۰۱۲)، انجام شده است. بارهای زنده وارد به عرشه به صورت زیر در نظر گرفته شده است که در حقیقت، بارهای زنده مذکور نماینده‌ای از وسایل نقلیه‌ای است که مجاز به عبور از عرشه این پل می‌باشد:

- ۱- بار کامیون دو محوره (H) و یا بار تیغه‌ای متناسب با آن
- ۲- بار کامیون سه محوره (HS) و یا بار تیغه‌ای متناسب با آن

بر اساس آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران، مقدار خیز مجاز ناشی از بار مرده مطابق رابطه (۱) نباید از $\frac{1}{240}$ طول دهانه و مقدار خیز مجاز ناشی از بار زنده (متحرک) برای عرشه پل‌ها با ملحوظ داشتن اثر ضربه مطابق رابطه (۲)، نباید از $\frac{1}{1000}$ طول دهانه پل تجاوز نماید (آیین‌نامه سازه‌های فضاکار، ۱۳۸۹).

$$\delta_1 = \frac{1}{240} L \quad (1)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{1000} L \quad (2)$$

که در آنها δ_1 و δ_2 به ترتیب حداکثر خیز ناشی از بار مرده و متحرک و L طول دهانه است. به منظور تعیین بار کمانش بحرانی در اعضای یک سازه فضاکار، ابتدا باید ممان اینرسی اعضا محاسبه گردد. با توجه به اینکه در سازه‌های فضاکار اغلب از عضوهای با مقاطع دایروی استفاده می‌گردد؛ لذا ممان اینرسی این مقاطع در هر دو جهت محورهای X و Y یکسان بوده و مطابق رابطه (۳) می‌باشد (طاحونی، ۱۳۹۳):

$$I = \frac{\pi r^2}{4} \quad (3)$$

که در آن π برابر با $3/14$ و r شعاع عضو است.

با تعیین ممان اینرسی مقاطع و خصوصیات مصالح اعضا، بار کمانش بحرانی در عضوهای یک سازه فضاکار مطابق رابطه (۴) تعیین می‌گردد (طاحونی، ۱۳۹۳):

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{KL^2} \quad (4)$$

که در آن π برابر با $3/14$ ، E مدول یانگ، I ممان اینرسی، K ضریب سختی و L طول عضو است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه فضاکار دو لایه

در جدول ۱، تعداد اعضای تشکیل دهنده عرشه‌های فضاکار دو لایه با توپولوژی‌های مختلف و خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک و خیز نهایی حاصل از مجموع آنها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد عرشه مشبک دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده دارای کمترین اعضا برابر با ۵۰۴ عضو و عرشه مشبک دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده دارای بیشترین اعضا برابر با ۸۹۶ عضو است. از این رو خیز ناشی از بارهای مرده در مدل اول به علت وزن کمتر سازه نسبت به سایر مدل‌ها کمتر بوده و برابر با ۵ سانتی‌متر است و خیز ناشی از بارهای مرده در مدل سوم به علت وزن بیشتر سازه نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بوده و برابر با ۹/۹ سانتی‌متر است. همچنین با افزایش تعداد اعضا و گره‌ها در عمق ثابت عرشه، سختی سازه افزایش یافته که این امر منجر به کاهش خیز ناشی از بارهای متحرک می‌شود. از این رو، عرشه مشبک دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده که شامل بیشترین تعداد اعضا و گره‌ها نسبت به سایر مدل‌ها است، به علت سختی بیشتر سازه، دارای خیز کمتر ناشی از بارهای متحرک برابر با ۵/۶ سانتی‌متر و عرشه مشبک دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده که شامل کمترین تعداد اعضا و گره‌ها است، به علت سختی کمتر سازه، دارای خیز بیشتر ناشی از بارهای متحرک برابر با ۷/۶ سانتی‌متر است.

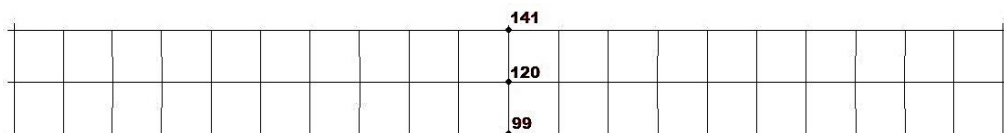
جدول ۱- خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک و ترکیبی در عرشه‌های فضاکار با توپولوژی‌های مختلف

عرشه‌های فضاکار با توپولوژی‌های مختلف	تعداد اعضا	خیز در اثر بار مرده (cm)	خیز در اثر بار متحرک (cm)	خیز نهایی (cm)
دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده	۵۰۴	۵	۷/۶	۱۲/۶
دو لایه با آرایش مربع روی مربع قطری	۶۳۴	۷/۵	۹/۲	۱۶/۷
دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده	۸۹۶	۹/۹	۵/۶	۱۵/۵

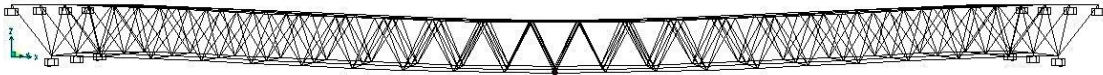
(ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

با مطالعه جدول ۱ ملاحظه می‌شود که مدل اول که یک عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده می‌باشد با کمترین تعداد اعضا، دارای کمترین خیز ناشی از بارهای مرده نسبت به سایر مدل‌ها با توپولوژی‌های مختلف بوده و مقدار آن برابر با ۵ سانتی‌متر است. از آنجایی که طبق توصیه آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای مرده در یک سازه فضاکار نباید از $\frac{1}{240}$ طول دهانه آن بیشتر باشد؛ لذا مطابق رابطه (۱) در مدل اخیر که طول دهانه‌ای برابر با ۶۰ متر دارد، بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای مرده برابر با ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. از این رو، خیز ناشی از بارهای مرده در تمامی مدل‌های مذکور در جدول ۱ با توپولوژی‌های مختلف، در محدوده قابل قبول مطابق آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران قرار دارد.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار خیز در این عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده در اثر بار مرده ناشی از وزن عرشه مشبک و دال بتنی فوقانی، در گره‌های ۹۹، ۱۲۰ و ۱۴۱ واقع در وسط دهانه و در لایه تحتانی عرشه رخ داده و به فاصله ۳۰ متر از طرفین آن قرار دارد.

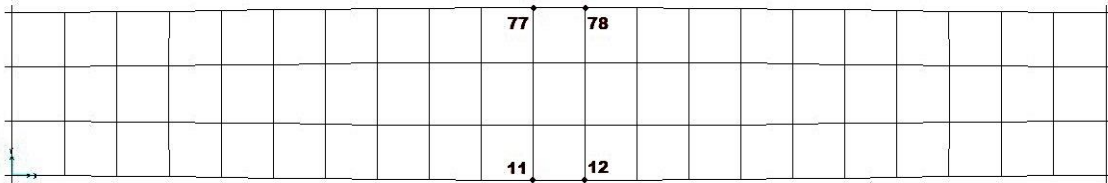


شکل ۱۰- محل بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای مرده در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

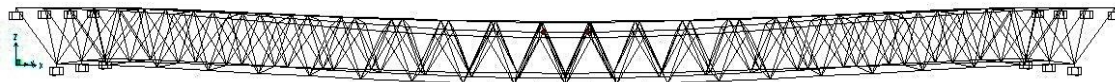


شکل ۱۱- بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای مرده در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

طبق توصیه آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران، بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای متحرک با ملحوظ داشتن اثر ضربه نباید از $\frac{1}{1000}$ طول دهانه تجاوز نماید. لذا بر طبق رابطه (۲) در مدل اخیر که طول دهانه‌ای برابر با ۶۰ متر دارد، بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای متحرک برابر با ۶ سانتی‌متر می‌باشد. از این رو، در بین مدل‌های مذکور در جدول ۱ با توپولوژی‌های مختلف، خیز ناشی از بارهای متحرک، تنها در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده در محدوده قابل قبول مطابق آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران قرار دارد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ملاحظه می‌شود که حداکثر میزان خیز در این عرشه فضاکار در اثر بار متحرک ناشی از حرکت وسایل نقلیه موتوری شامل کامیون‌های دو و سه محوره، مربوط به تغییر مکان گره‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ از لایه فوقانی عرشه می‌باشد.



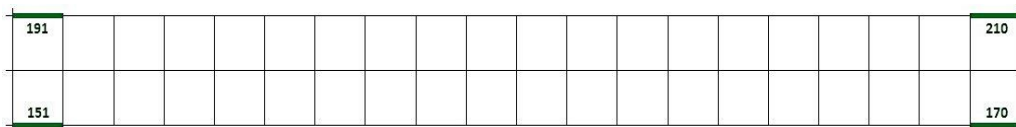
شکل ۱۲- محل بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)



شکل ۱۳- بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

۳-۲- کمانش اعضا ناشی از نیروهای محوری فشاری

همان‌طور که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک به ترتیب برابر با $250610/04 \text{ kgf}$ و 210 است که به صورت نیروی فشاری در عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ از لایه تحتانی عرشه اعمال می‌گردد. از این رو، مجموع نیروهای محوری فشاری تحت اثر بارهای مرده و متحرک در اعضای مذکور برابر با $567505/012 \text{ kgf}$ است. به علت این که طول و قطر کلیه اعضای که در راستای محورهای X و Y قرار گرفته‌اند به صورت تیپ انتخاب شده و به ترتیب برابر با ۳ متر و $16/83$ سانتی‌متر می‌باشند، لذا کنترل کمانش برای این چهار عضو مذکور کفایت می‌کند. سایر عضوهای قطری که به صورت مورب مابین لایه‌های فوقانی و تحتانی عرشه فضاکار قرار گرفته و از طول‌های متفاوتی برخوردار است، از محاسبه کمانش آنها به علت کم بودن نیروهای محوری فشاری نسبت به این چهار عضو، خودداری می‌شود. زیرا اگر یک یا چند عضو که دارای قطر و ضخامت یکسان با سایر اعضا، اما از طول و نیروی محوری فشاری بیشتری نسبت به آنها برخوردار است، کمانش قابل قبولی در مقابل این نیروها داشته باشد، سایر اعضا نیز در مقابل این بارهای وارده جوابگو بوده و نیازی به بررسی کمانش در آنها نمی‌باشد.



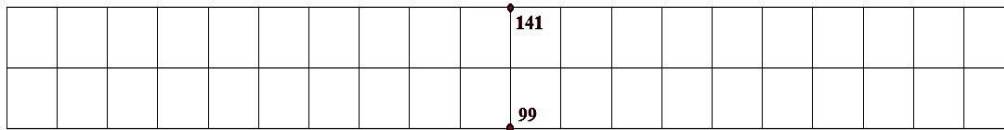
شکل ۱۴- محل بیشترین نیروی محوری فشاری ناشی از بارهای مرده و متحرک در لایه تحتانی عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

به منظور تعیین بار کمانش بحرانی در عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰، 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)، ممان اینرسی اعضای مذکور برابر با $3938/28 \text{ cm}^4$ است. از مقایسه این مقدار با بیشترین نیروی محوری فشاری در عضوهای مذکور که برابر با $567505/012 \text{ kgf}$ می‌باشد، ملاحظه می‌شود 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.

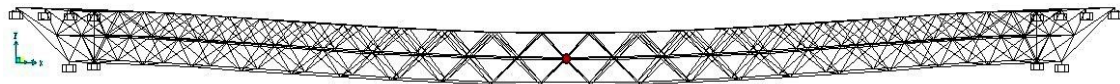
۳-۳- خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه فضاکار سه لایه

همان‌طور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می‌شود، در اثر اعمال بارهای مرده شامل وزن اعضا و دال بتنی روی عرشه مشبک فضاکار، گره‌های این سازه دچار تغییر مکان شده که بیشترین مقدار آن مربوط به گره‌های ۹۹ و ۱۴۱ از لایه میانی بوده و برابر با $6/8$ سانتی‌متر می‌باشد. از مقایسه این مقدار با بیشترین تغییر مکان ناشی از بارهای مرده در مدل اول که یک عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده است، افزایش نسبی خیز ناشی از بارهای مرده مشاهده

می‌گردد. به طوری که با افزایش تعداد لایه‌های این عرشه مشبک فضاکار از دو به سه لایه، مسلماً تعداد المان‌ها که در عرشه دو لایه برابر با ۱۵۱ گره و ۵۰۴ عضو است، در عرشه سه لایه به ۱۹۵ گره و ۷۴۰ عضو افزایش می‌یابد. این افزایش تعداد گره‌ها و اعضا رابطه مستقیم با افزایش مقدار خیز ناشی از بارهای مرده دارد. زیرا وقتی تعداد گره‌ها و اعضای یک سازه مشبک فضاکار افزایش می‌یابد، در واقع با این کار بارهای مرده آن سازه افزایش یافته و در نتیجه خیز ناشی از بارهای مرده بیشتر می‌شود. به همین علت توصیه می‌شود که یک سازه فضاکار به کمترین تعداد اعضا و در نتیجه کمترین مقدار بار مرده طرح شود.

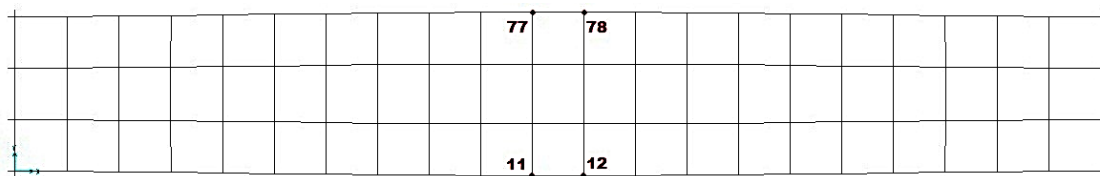


شکل ۱۵- محل بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای مرده در عرشه فضاکار سه لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

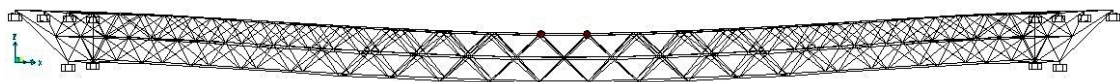


شکل ۱۶- بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای مرده در عرشه فضاکار سه لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

با نگاهی به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ملاحظه می‌شود که در اثر اعمال بارهای متحرک، در گره‌های ۱۱، ۱۲، ۷۷ و ۷۸ که در وسط دهانه این عرشه مشبک فضاکار و در لایه فوقانی آن قرار دارند، بیشترین مقدار تغییر مکان رخ داده است و مقدار آن برابر با $\frac{4}{7}$ سانتی‌متر می‌باشد. از مقایسه این مقدار با خیز به دست آمده ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده که برابر با $\frac{7}{6}$ سانتی‌متر است، ملاحظه می‌گردد که افزایش تعداد لایه‌ها بدون تغییر در عمق عرشه، به علت افزایش سختی کل سازه منجر به کاهش چشمگیر خیز ناشی از بارهای متحرک می‌شود. زیرا با افزایش تعداد لایه‌های یک سازه مشبک فضاکار، در واقع تعداد اعضا گره‌های سازه و به عبارتی مقدار مصالح آن افزایش می‌یابد و به علت اینکه ازدیاد حجم مصالح در یک عمق ثابت اتفاق افتاده است، لذا سختی سازه افزایش یافته و در نتیجه مقادیر خیز ناشی از بارهای متحرک کاهش می‌یابد.



شکل ۱۷- محل بیشترین خیز ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضاکار سه لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)



شکل ۱۸- بیشترین خیز ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضاکار سه لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده (ماخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی عددی رفتار سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها با تغییرات توپولوژی و تعداد لایه‌ها پرداخته شد. به این منظور عرشه پل به صورت دو و سه لایه با آرایش شبکه مختلف شامل مربع روی مربع جابه‌جا شده، مربع روی مربع قطری و مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده با استفاده از نرم‌افزار Formian 2.0 طراحی و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود SAP2000 مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده که از کمترین تعداد اعضا و گره‌ها نسبت به سایر توپولوژی‌ها برخوردار است، دارای کمترین خیز ناشی از بارهای مرده برابر با ۵ سانتی‌متر و عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده دارای کمترین خیز ناشی از بارهای متحرک برابر با $\frac{5}{6}$ سانتی‌متر است. با این حال در کلیه مدل‌ها با توپولوژی‌های مذکور، بیشترین خیز ناشی از بارهای مرده در محدوده مجاز آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران قرار دارد؛ در حالی که در بین این مدل‌ها، تنها عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده دارای خیز ناشی از بارهای متحرک در محدوده مجاز آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران است. بنابراین در بین توپولوژی‌های مورد بررسی جهت کاربرد در عرشه پل‌های فضاکار، بهترین توپولوژی از حیث کمترین خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک مربوط به آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده است.

همچنین مشخص گردید که وقتی یک عرشه مشبک فضاکار به صورت سه لایه اجرا می‌شود، در واقع با این کار تعداد اعضا و گره‌های سازه و به عبارتی بارهای مرده آن افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش خیز ناشی از این بارها می‌شود و در مدل اخیر برابر با $\frac{6}{8}$ سانتی‌متر است. اما همین ازدیاد مصالح که در اثر افزایش تعداد لایه‌ها به وجود می‌آید، افزایش سختی سازه را به همراه دارد که این امر منجر به کاهش خیز ناشی از بارهای متحرک را برابر با $\frac{4}{8}$ می‌گردد. بنابراین توصیه می‌شود که در طرح یک سازه مشبک فضاکار با هر نوع کاربری وقتی با محدودیت عمق سازه مواجه هستیم، به طوری که نمی‌توان با افزایش فاصله بین دو لایه فوقانی و تحتانی، ممان اینرسی سازه را افزایش داد، استفاده از سازه‌های مشبک فضاکار به صورت چند لایه، تدبیری مناسبی جهت کاهش خیزهای ناشی از بارهای متحرک است؛ هرچند که افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش بارهای مرده و در نتیجه افزایش خیزهای ناشی از این بارها می‌شود که می‌تواند با افزایش وزن کل سازه منجر به ازدیاد هزینه‌های اجرای پروژه گردد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان صمیمانه از همکاری و راهنمایی‌های دکتر علاءالدین بهروش در این مقاله تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- منابع

۱. آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه شماره ۱۳۹). ۱۳۷۹. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. تهران: معاونت امور فنی. دفتر امور فنی و تدوین معیارها.
۲. آیین‌نامه سازه‌های فضاکار (نشریه شماره ۴۰۰). ۱۳۸۹. تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور.
۳. باجی، حسن، و سید جواد هاشمی. ۱۳۸۴. پروژه‌های کاربردی در تحلیل و طراحی کامپیوتری سازه‌ها. تهران: متفکران.
۴. چیلتون، جان. ۲۰۰۰. سازه‌های مشبک فضایی. ترجمه محمود گلابچی. ۱۳۸۸. تهران: دانشگاه تهران، موسسه چاپ و انتشارات.
۵. حبیب‌الله، اشرف، و ادوارد ویلسون. ۲۰۰۵. برنامه عمومی تحلیل و طراحی سازه‌ها SAP2000. ترجمه افشین ترابی، و رضا پاشایی. ۱۳۸۶. تهران: سیمای دانش.
۶. راماسوامی، جی اس، میک اکهوئوت، و جی آر سورش. ۲۰۰۲. تحلیل، طراحی و ساخت سازه‌های فضایی. ترجمه علی کاوه. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
۷. طاحونی، ش. ۱۳۹۳. طراحی سازه‌های فولادی (روش تنش مجاز و روش حدی - LRFD). تهران: علم و ادب.
۸. مستوفی‌نژاد، داود، و مهدی فضیلتی. ۱۳۸۷. بارگذاری و سیستم‌های باربر. اصفهان: ارکان دانش.
9. AASHTO LRFD. 2012. Bridge Design Specifications. 6th Edition.
10. Nooshin, H. 1996. A Technique for Surface Generation, IASS Symposium, Stuttgart, Germany.
11. Nooshin, H., and M. Moghimi. 2007. Formex formulation of freeform structural surfaces. 2nd National Conference on Space Structures. Tehran. Iran.
12. Nooshin, H., and P. L. Disney. 2000, Formex configuration processing I, International Journal of Space Structures. 15 (1): 1-52.
13. Nooshin, H., and P. L. Disney. 2001. Formex configuration processing II. International Journal of Space Structures. 16 (1): 1-56.
14. Nooshin, H., and P. L. Disney. 2002. Formex configuration processing III. International Journal of Space Structures. 17 (1): 1-50.
15. Nooshin, H., P. L. Disney, and O. C. Champion. 1997. Computer-Aided Processing of Polyhedric Configurations. Chapter 12 in Beyond the Cube. Edited by J F Gabriel. John Wiley.
16. Taghizadeh, M. H., and A. Behraves. 2015. Application of Spatial Structures in Bridge Deck. Civil Engineering Journal. 1 (1): 1-8.