

**M. H. Taghizadeh Valdi\***

Department of Civil  
Engineering, Isfahan  
(Khorasgan) Branch, Islamic  
Azad University, Isfahan, Iran.

**e-mail:** mh.taghizadeh@khuif.ac.ir

**M. Pourhadi Gavabari**

Department of Architecture,  
Mehr-Aeen Higher Education  
Institute, Bandar Anzali, Iran.

**e-mail:** m.pourhadi@ut.ac.ir

## **Analysis of Behavior of Spatial Structures in Bridges Deck With Changes in Diameter and Length of Members**

*The use of spatial structures despite the ease and speed of execution is always limited to covering the roofs with long spans. While these types of structures, which by their mechanism of load distribution to all members, have acceptable resistance to incoming loads, both dead and live, can be a good alternative for use in bridges deck. Therefore, in this paper, numerical modeling of a two-layered lattice spatial deck with different diameter and length of members, its behavior against dead and live loads caused by moving motor vehicles according to the AASHTO Code is investigated. The geometrical forming of the different topologies was performed using Formex algebra by Formian 2.0 software and numerical modeling of spatial decks using SAP2000 finite element software with linear static analysis. The results showed that with increasing the diameter of the members of the double-layered lattice deck from 13.94 to 19.37 cm, the cross-sectional area and consequently the stiffness of the members increase, which leads to an increase in the stiffness of the whole structure and as a result it leads to an increase in its resistance to dead loads due to the weight of the structure and to the moving loads due to the passage of motor vehicles. Also, with increasing the length of the members of the double-layered lattice deck from 1.5 to 4.5 meters, the distance between the nodes has increased and the number of nodes and members of the two layers, and their between which most of the elements of the whole structure are located at this distance has decreased, and consequently it leads to a reduction in the dead loads of the structure and deflection due to these loads. On the other hand, because these nodes are selected from the joint type, which have freedom of movement in all directions, the reduction in the number of nodes leads to a relative decrease due to moving loads.*

**Keywords:** Spatial structures, Bridge deck, Diameter and length of members, Deflection.

---

\* Corresponding author

Received 11 March 2020, Revised 20 May 2020, Accepted 15 June 2020.

DOI: 10.22091/cer.2020.5328.1197

محمدحسین تقی‌زاده

ولدی\*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

پست الکترونیک:

mh.taghizadeh@khuif.ac.ir

مهديه پورهادی گوابری

گروه معماری، موسسه آموزش عالی مهرآیین بندرانزلی، انزلی، ایران.

پست الکترونیک:

m.pourhadi@ut.ac.ir

## تحلیل رفتار سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها با تغییرات قطر و طول اعضا

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 به‌کارگیری در عرشه پل‌ها محسوب شوند. بنابراین در این مقاله، با مدل‌سازی عددی یک عرشه مشبک فضاکار دو لایه با قطر و طول مختلف اعضا، رفتار آن در برابر بارهای مرده و متحرک ناشی از حرکت وسایل نقلیه موتوری مطابق آیین‌نامه آشتو، مورد بررسی قرار گرفت. فرم‌یابی هندسی، با استفاده از جبر فرمکسی 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 با افزایش قطر اعضای عرشه مشبک فضاکار دولایه از ۱۳/۹۴ به ۱۹/۳۷ سانتی‌متر، سطح مقطع و در نتیجه سختی اعضا افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش سختی کل سازه و مقاومت آن در برابر خیز ناشی از بارهای مرده در اثر وزن سازه و خیز ناشی از بارهای متحرک در اثر عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری می‌گردد. همچنین با افزایش طول اعضای عرشه مشبک فضاکار دولایه از ۱/۵ به ۴/۵ متر، فاصله بین گره‌ها افزایش یافته و تعداد گره‌ها و اعضای دو لایه و مابین آن که قسمت عمده المان‌های کل سازه در این فاصله قرار دارد، کاهش می‌یابد و به تبع آن منجر به کاهش بارهای مرده سازه و خیز ناشی از این بار می‌شود. از طرفی، چون این گره‌ها از نوع مفصلی انتخاب شده است که دارای آزادی حرکت در تمام جهات می‌باشند، بنابراین کاهش تعداد گره‌ها، کاهش نسبی خیز ناشی از بارهای متحرک را به دنبال دارد.

واژگان کلیدی: سازه‌های فضاکار، عرشه پل، قطر و طول اعضا، خیز.

گرفت [۱]. اما عمده کاربرد این سازه‌ها بین سال‌های ۱۹۲۵ تا ۱۹۷۵ است که می‌توان تاریخچه سازه‌های فضاکار را به سه مرحله تفکیک نمود: سازه‌های فضاکار باستانی، سازه‌های فضاکار پیش‌مدرن و سازه‌های فضاکار مدرن [۲-۷]. در سال ۱۹۲۴، اولین پوسته مشبک تک لایه نیم‌کره ساخته شده از فولاد در زایس پلانتاریوم<sup>۱</sup> آلمان ساخته شد. در سال ۱۹۲۵، اولین سازه پوسته نازک

### ۱- مقدمه

اولین نمونه‌های سازه‌های مشبک فضاکار از اوایل قرن بیستم میلادی و در سال ۱۹۰۳ توسط الکساندر گراهام بل ابداع و جهت استفاده در بال‌های کایت قرار

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱، بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶

DOI: 10.22091/cer.2020.5328.1197 شناسه دیجیتال

<sup>۱</sup> - Zeiss Planetarium

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 خرابای فضاکار استوار است [۱].

تقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی رفتار عرشه پل‌های ساخته شده با سازه‌های فضاکار دریافتند که تغییرات در قطر اعضا، می‌تواند در میزان خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک و کماتش حاصل از آن تأثیرگذار باشد [۹]. دیانت (۱۳۹۴) از سازه‌های فضاکار در مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های بتنی موجود استفاده نمود. این روش پیشنهادی ضمن کاهش هزینه‌های ساخت و ساز و مشکلات معمول در روش‌های مقاوم‌سازی، منجر به افزایش سرعت اجرا و بهبود ظرفیت لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح به دلیل افزایش چشمگیر ظرفیت برش پایه و سختی مدل مورد بررسی شد [۱۰]. مالک و همکاران (۱۳۹۴) به کاربردهای وسیع سازه‌های فضاکاری پرداخته است که تاکنون نادیده گرفته شده‌اند. آنها با اشاره به امکان استفاده از سازه‌های فضاکار به عنوان عرشه پل‌های تک و چند دهانه، اسکلت ساختمان‌های با ارتفاع کوتاه تا متوسط، عناصر مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها، جک‌ها و سکوه‌های فراساحلی، بازسازی و بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها و مناطق شهری با میراث فرهنگی غنی و پیکربندی گنبد با اشکال مختلف، به روشنی نشان دادند که سازه‌های فضاکار اسکلتی مدولار کاربردها و مزایای زیادی به منظور پاسخگویی به نیازهای جوامع معاصر در ترکیب اقتصاد و جنبه‌های زیست‌محیطی برای ایجاد سازه‌های پایدار با نگاهی به آینده دارد [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ محققان با بررسی کاربرد سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها و مقایسه مقادیر وزن و خیز در عرشه پل‌های تک دهانه و دو دهانه ساخته شده با سازه‌های فضاکار، پل‌های بتنی و پل‌های فلزی دریافتند که استفاده از سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها علی‌رغم سبکی و کاهش چشمگیر وزن نسبت به پل‌های بتنی و فلزی، از خیز بیشتری ناشی از بارهای مرده و متحرک در مقایسه با پل‌های مذکور

بتن مسلح به قطر ۴۰ متر در جنا<sup>۲</sup> آلمان ساخته شد. در سال ۱۹۷۵، سالن بدنسازی پونتیاک<sup>۳</sup> (۲۲۰ × ۱۶۸ متر)، به عنوان اولین سازه غشایی بادی (هوای فشرده) در ایالات متحده ساخته شد. برای سازه‌های فضاکار پیش‌مدرن که از اواسط قرن بیستم به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (مانند پوسته‌های نازک، خراباهای فضاکار، پوسته‌های مشبک و سازه‌های کابلی معمولی)، سازه‌های فضاکار جدید با ترکیبی از اشکال و مصالح مختلف سازه‌ای توسعه یافته است. سازه‌های فضاکار مدرن، سازه‌های سبک و کارآمدی هستند که از دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ براساس فن‌آوری‌های جدید و مصالح سبک با مقاومت بالا از قبیل غشاها و کابل‌های فولادی شروع شده است. این سازه‌ها شامل سازه‌های غشایی هوای فشرده، سازه‌های غشایی کابلی، سازه‌های خرابایی کابلی، سازه‌های گنبدی معلق، گنبدهای کابلی، پوسته‌های مشبک تک لایه و غیره هستند [۸]. با نگاهی به برخی پروژه‌های معروف نظیر سقف ترمینال منچستر انگلستان (۱۹۹۳)، سقف سالن ورزشی پالافولس<sup>۴</sup> اسپانیا (۱۹۹۳) و سقف استادیوم سیدنی استرالیا (۱۹۹۸) استنباط می‌گردد که طرح سازه‌های فضاکار عمدتاً به منظور پوشش دهانه‌های بزرگ و به عنوان سقف، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۱]. حال اینکه کاربردهای سازه‌های فضاکار تنها به این مورد محدود نمی‌شود و از آنجا 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 گاهاً دور از ذهن توسط شرکت‌های طراح سازه‌های فضاکار در سراسر دنیا بیان شده است که از آنها می‌توان به پیشنهاد شرکت شیمیزو<sup>۵</sup>

<sup>۲</sup>- Jena

<sup>۳</sup>- Pontiac

<sup>۴</sup>- Palafolls

<sup>۵</sup>- Shimizu Co.

فضاکار در عرشه پل‌ها با تغییرات قطر و طول اعضا و کنترل کمانش آنها در اثر بارهای مرده و متحرک ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری اعم از کامیون دو محوره (H) و سه محوره (HS) پرداخته می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

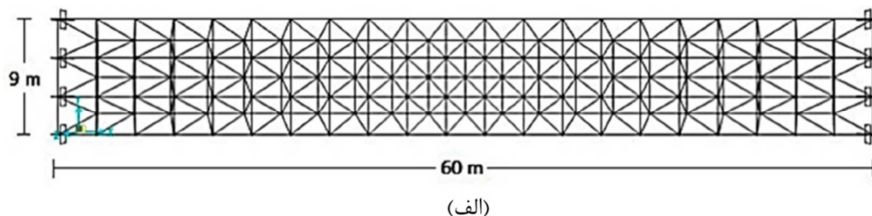
### ۲-۱- فرم‌یابی هندسی و مدل‌سازی عددی

سازه مورد بحث از نوع پل با عرشه مشبک فضاکار با آرایش شبکه مربع روی مربع جابه‌جا شده 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 به عرض ۳ متر جهت عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری اعم از کامیون دو محوره (H) و سه محوره (HS) می‌باشد و فاصله بین دو باند ۰/۵ متر و از طرفین عرشه پل، ۱/۲۵ متر می‌باشد [۱۵]. به منظور بررسی تأثیر قطر و طول اعضای عرشه بر خیز و نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک، شش مدل از عرشه مشبک فضاکار طراحی و مورد تحلیل قرار گرفت که در سه مدل، قطر اعضای عرشه برابر با ۱۳/۹۴، ۱۶/۸۳، ۱۹/۳۷ سانتی‌متر و در سه مدل دیگر، طول اعضای عرشه در راستای محور X برابر با ۱/۵، ۳ و ۴/۵ متر در نظر گرفته شده و جهت اتصال اعضا به یکدیگر از گره مرو استفاده می‌گردد. 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 مؤثر باشد و مسلماً سهمی از بارهای وارده را تحمل می‌کند و از آنجاکه هدف از این پژوهش بررسی رفتار سازه‌های فضاکار به عنوان عرشه پل‌ها می‌باشد، بنابراین از طرح این دال بتنی توسط نرم‌افزار صرف‌نظر شده و تنها بار ناشی از وزن آن به تعداد گره‌های لایه فوقانی تقسیم و به صورت

برخوردار است [۱۲]. اسکندر و مالک (۱۳۹۵) به بررسی جنبه‌های فنی و اقتصادی سیستم سازه عرشه پل‌های متشکل از شبکه‌های دولایه فضاکار مختلط در مقایسه با پل‌های جعبه‌ای پیش‌ساخته پس‌کشیده بتنی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که برآورد اولیه احداث پل با سیستم فضاکار به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از پل جعبه‌ای پیش‌ساخته پس‌کشیده سگمنتال است و در صورت جایگزین کردن پل شبکه‌ای فضاکار با پل سگمنتال، امکان صرفه‌جویی چشمگیری فراهم می‌گردد. در عین حال، معضل برچیدن پل‌های بتنی سگمنتال با بهره‌گیری از سیستم پیشنهادی که قابل کاربرد مجدد و بازیافت است، مرتفع خواهد شد [۱۳]. تقی‌زاده ولدی و پورهادی گوآبری (۱۳۹۸) به بررسی رفتار سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها با تغییرات توپولوژی و تعداد لایه‌ها پرداختند. نتایج مطالعات آنها 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 و عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع مورب روی مربع مورب جابه‌جا شده دارای کمترین خیز ناشی از بارهای متحرک 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 می‌شود؛ در حالی که این ازدیاد مصالح کاهش خیز ناشی از بارهای متحرک را به دنبال دارد [۱۴].

در پژوهش‌های مورد بررسی اغلب به کاربرد سازه‌های فضاکار در مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها و همچنین کاربرد در عرشه پل‌ها از دیدگاه فنی، اقتصادی و توپولوژی (آرایش شبکه) پرداخته شده است. اما اثر تغییرات قطر و طول اعضا بر رفتار سازه‌های فضاکار مورد استفاده در عرشه پل‌ها و کمانش اعضای آن ناشی از بارهای مرده و متحرک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این مقاله، به بررسی عددی رفتار سازه‌های

فضاکار ملاک کار است، بنابراین از طرح پایه‌های منتهی به پی صرف‌نظر شده و تکیه‌گاه‌ها دقیقاً در محل هر پایه در لایه‌های فوقانی و تحتانی عرشه‌ها قرار داده شده است. همچنین به علت عدم قابلیت معرفی نوع گره‌ها در نرم‌افزار SAP2000، از وزن هر گره صرف‌نظر شده و اتصالات بین اعضا، از نوع مفصلی فرض شده است تا هر عضو دارای شش درجه آزادی باشد و به علت اینکه بارهای وارد بر عرشه این پل فقط به محل گره‌های لایه فوقانی اعمال می‌گردد، از ایجاد لنگرهای خمشی در آنها جلوگیری می‌شود و کلیه اعضای این عرشه مشبک فضاکار فقط به نیروهای محوری به صورت کشش یا فشار کار می‌کنند [۲۴]. در شکل ۱ پلان و نمای عرشه پل به صورت سازه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده نشان داده شده است.



شکل ۱- (الف) پلان و (ب) نمای عرشه پل به صورت سازه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

طراحی این پل براساس آیین‌نامه آشتو (۲۰۱۲)، انجام شده است [۲۳]. بارهای زنده وارد به عرشه به صورت زیر در نظر گرفته شده است که در حقیقت، بارهای زنده مذکور نماینده وسایل نقلیه‌ای است که مجاز به عبور از عرشه این پل می‌باشد:

۱- بار کامیون دوماحوره (H) و یا بار تیغه‌ای متناسب

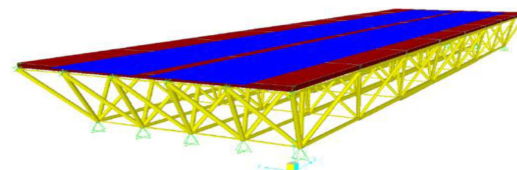
با آن

۲- بار کامیون سه‌محوره (HS) و یا بار تیغه‌ای

متناسب با آن

متمركز 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 [۱۶-۲۱] و رفتار پل‌ها توسط نرم‌افزار اجزای محدود SAP2000 به روش استاتیکی خطی بررسی شده است [۲۲]. اصول طراحی پل‌ها براساس آیین‌نامه آشتو (۲۰۱۲) می‌باشد [۲۳]. در دو طرف این عرشه، یعنی به فاصله ۶۰ متر از یکدیگر، تکیه‌گاه‌های گیردار در هر دو لایه فوقانی و تحتانی تعبیه گردیده است. این تکیه‌گاه‌ها شش درجه آزادی مهار شده دارند که سه تای آنها درجات آزادی انتقالی و سه تای دیگر درجات آزادی دورانی در سه محور متعامد X، Y و Z هستند و اعضای انتهایی عرشه را در همه جهت‌های طولی و پیچشی مهار می‌کند. به علت آنکه در این پژوهش، بررسی رفتار عرشه

در شکل ۲، 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، مشاهده می‌شود.



شکل ۲- عرشه مشبک فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی

مربع جابه‌جا شده [۱۲]

## ۲-۲- اصول طراحی و محدودیت‌ها

بررسی قرار دهیم، بنابراین بایستی وزن حاصل از دال بتنی عرشه را به صورت بار متمرکز به گره‌های شبکه فوقانی عرشه فضاکار اعمال نمود تا مدل به واقعیت نزدیک‌تر باشد. با فرض اینکه وزن واحد حجم بتن  $2400 \text{ kg/cm}^3$  است، بنابراین مطابق رابطه (۳) وزن دال بتنی به طول ۶۰ و عرض ۹ متر و ضخامت ۲۰ سانتی‌متر برابر با ۲۵۹۲۰۰ کیلوگرم است:

$$W = L \times B \times D \times \gamma_c \quad (3)$$

که در آن  $W$  وزن،  $L$  طول،  $B$  عرض و  $D$  ضخامت دال بتنی عرشه پل و  $\gamma_c$  وزن واحد حجم بتن است. سپس وزن دال بتنی عرشه به صورت بار متمرکز به گره‌های لایه فوقانی آن اعمال می‌گردد. بنابراین با توجه به اینکه تعداد گره‌های لایه فوقانی عرشه، برابر با ۸۸ گره می‌باشد، مطابق رابطه (۴) سهم هر گره از بار متمرکز ناشی از وزن دال بتنی برابر با  $2945/45$  کیلوگرم است:

$$P = \frac{W}{N_n} \quad (4)$$

در این رابطه، که  $P$  بار متمرکز ناشی از وزن دال بتنی وارد بر هر گره،  $W$  وزن دال بتنی و  $N_n$  تعداد گره‌های لایه فوقانی عرشه مشبک فضاکار است.

علت اعمال بار ناشی از وزن دال بتنی عرشه به صورت متمرکز فقط بر گره‌های لایه فوقانی عرشه مشبک فضاکار و خودداری از اعمال آنها بر عضوهای سازه، آن است که اولاً در سازه‌های فضاکار بهتر است اعضا فقط به نیروهای محوری (کششی یا فشاری) طراحی شوند و حتی‌الامکان از به وجود آمدن لنگر خمشی در آنها ناشی از اعمال بار خارجی بر اعضای سازه اجتناب شود. ثانیاً فاصله گره‌ها از یکدیگر آنقدر زیاد نیست که نیاز به استفاده از لاپه‌هایی با فواصل معین، بر روی اعضا به منظور اتصال به عرشه بتنی باشد.

در جدول ۱، بیشترین خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا و با قطر اعضای  $13/94$ ،  $16/83$  و  $19/37$

بنابراین بر روی لایه فوقانی عرشه دو باند رفت و برگشت جهت عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری از قبیل کامیون با کانتینر و بدون کانتینر تعبیه گردیده که هر یک با ضریب ضربه  $1/3$  که در آیین‌نامه بارگذاری پل ایران نیز تأکید شده، بر عرشه این پل اعمال گردیده 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؛ بنابراین ممان اینرسی این مقاطع در هر دو جهت محورهای  $X$  و  $Y$  یکسان بوده و مطابق رابطه (۱) می‌باشد [۲۵]:

$$I = \frac{\pi r^2}{4} \quad (1)$$

که در آن  $r$  شعاع عضو است.

با تعیین ممان اینرسی مقاطع و خصوصیات مصالح اعضا، بار کمانش بحرانی در عضوهای یک سازه فضاکار مطابق رابطه (۲) تعیین می‌گردد [۲۵]:

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

که در آن  $E$  مدول یانگ،  $I$  ممان اینرسی،  $K$  ضریب سختی و  $L$  طول عضو است. مقدار عدد  $\pi$  نیز برابر با  $3/14$  در نظر گرفته شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- عرشه فضاکار دو لایه با قطر اعضای مختلف

به منظور بررسی تأثیر قطر اعضای عرشه بر خیز و نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک، سه مدل از عرشه مشبک فضاکار با قطر اعضای  $13/94$ ،  $16/83$  و  $19/37$  سانتی‌متر طراحی و تحلیل گردید، به طوری که طول اعضا در هر سه مدل، ثابت بوده و برابر با ۳ متر در نظر گرفته شد. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید چون از طرح قسمت بتنی عرشه این پل صرف‌نظر شده تا فقط رفتار سازه‌های فضاکار را به عنوان عرشه پل‌ها مورد

آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای مرده و متحرک با در نظر داشتن اثر ضربه، نباید به ترتیب از  $\frac{1}{240}$  و  $\frac{1}{1000}$  طول دهانه آن بیشتر باشد [۱۵].

سانتی‌متر نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این سه مدل از عرشه مشبک فضاکار فقط قطر اعضای سازه تغییر کرده است، بنابراین تعداد اعضا و گره‌ها بدون تغییر بوده و به ترتیب برابر با ۵۰۴ و ۱۵۱ است. طبق توصیه

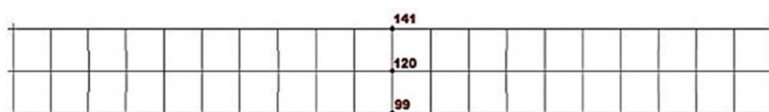
جدول ۱- بیشترین خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار با قطر اعضای مختلف

قطر اعضا (cm)	خیز ناشی از بار مرده (cm)	خیز ناشی از بار متحرک (cm)	خیز نهایی (cm)
۱۳/۹۴	۶/۱۲	۱۱/۰۵	۱۷/۱۵
۱۶/۸۳	۵/۰۷	۷/۶۲	۱۲/۶۲
۱۹/۳۷	۴/۵	۶/۰۶	۱۰/۵۶

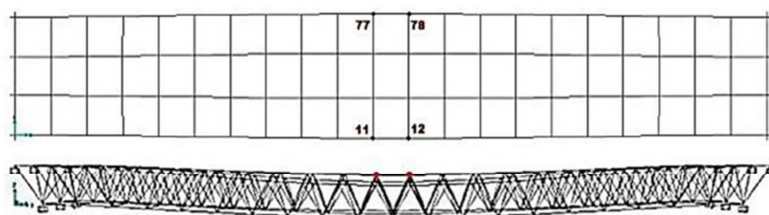
مدل‌های مذکور که طول دهانه‌ای برابر با ۶۰ متر دارند، بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای مرده برابر با ۲۵ سانتی‌متر است و مطابق جدول ۱، در هر سه مدل مذکور با قطر اعضای مختلف، خیز ناشی از بارهای مرده در محدوده قابل قبول براساس آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران قرار دارد.

باتوجه به شکل ۳- (ب) بیشترین مقدار خیز در اثر بار متحرک ناشی از حرکت وسایل نقلیه موتوری شامل کامیون‌های دو و سه محوره، در هر سه مدل با قطر اعضای مختلف، در گره‌های ۱۱، ۱۲، ۷۷ و ۷۸ واقع در وسط دهانه و در لایه تحتانی عرشه رخ داده است.

همان‌طور که در شکل ۳- (الف) ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار خیز در اثر بار مرده ناشی از وزن عرشه مشبک و دال بتنی فوقانی در هر سه مدل با قطر اعضای مختلف، در گره‌های ۹۹، ۱۲۰ و ۱۴۱ واقع در وسط دهانه و در لایه تحتانی عرشه رخ داده است. مطابق جدول ۱، از مقایسه خیز ناشی از بارهای مرده در عرشه‌های مشبک فضاکار با قطر اعضای مختلف استنباط می‌گردد که در اثر افزایش قطر اعضای سازه، سطح مقطع و در نتیجه سختی اعضا افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش سختی کل سازه و مقاومت آن در برابر خیز ناشی از وزن سازه می‌گردد. بنابراین براساس محدودیت‌های بیان شده، در



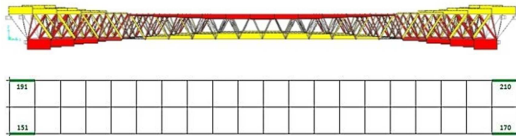
(الف)



(ب)

شکل ۳- محل بیشترین مقدار خیز ناشی از (الف) بارهای مرده و (ب) بارهای متحرک در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

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 ضخامتی 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 ۴- 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

در جدول ۲، مقادیر نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار دو لایه با قطر اعضای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هرچه قطر اعضای یک عرشه فضاکار کاهش یابد، چون از وزن کل سازه یعنی بارهای مرده آن کاسته می‌شود، نیروهای محوری ناشی از این بارها نیز کاهش می‌یابد. اما این امر لزوماً منجر به بیشتر شدن خیزهای ناشی از بارهای مرده نمی‌شود؛ زیرا همان‌گونه که ذکر شد با افزایش قطر اعضای یک عرشه فضاکار، سختی کل سازه بالا رفته و این امر کاهش خیزهای ناشی از بارهای مذکور را به دنبال خواهد داشت.

جدول ۲- نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار با قطر اعضای مختلف

قطر اعضا (cm)	نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده (kgf)	نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک (kgf)	مجموع نیروهای محوری (kgf)
۱۳/۹۴	۲۰۸۳۱۳/۶۱	۳۱۶۸۹۴/۹۷	۵۲۵۲۰۸/۵۸
۱۶/۸۳	۲۵۰۶۱۰/۰۴	۳۱۶۸۹۴/۹۷	۵۶۷۵۰۵/۰۱۲
۱۹/۳۷	۲۹۴۷۶۰/۶۷	۳۱۶۸۹۴/۹۷	۶۱۱۶۵۵/۶۴

اعضای مختلف، ملاحظه می‌شود که افزایش یا کاهش قطر اعضا هیچگونه تأثیری در افزایش یا کاهش این نیروها

مطابق جدول ۱، از مقایسه خیز ناشی از بارهای متحرک ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری، در عرشه‌های مشبک فضاکار با قطر اعضای مختلف، استنباط می‌گردد که در اثر کاهش قطر اعضای سازه، سطح مقطع و در نتیجه سختی اعضا کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش سختی کل سازه و مقاومت آن در برابر خیز ناشی از بارهای متحرک می‌گردد. بنابراین براساس محدودیت‌های بیان شده، در مدل‌های مذکور که طول دهانه‌ای برابر با ۶۰ متر دارند، بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای متحرک برابر با ۶ سانتی‌متر است و مطابق جدول ۱، در هر سه مدل مذکور با قطر اعضای مختلف، خیز ناشی از بارهای متحرک در محدوده قابل قبول مطابق آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران قرار ندارد.

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک در هر سه عرشه مشبک فضاکار دو لایه با قطر اعضای مختلف به صورت نیروی فشاری در عضوهای ۱۵۱، ۱۷۰، ۱۹۱ و ۲۱۰ از لایه تحتانی عرشه اتفاق می‌افتد. از این‌رو، به علت این که طول و قطر کلیه اعضای که در راستای محورهای X و Y قرار گرفته‌اند، به صورت تیپ انتخاب شده است؛ بنابراین کنترل کمانش برای این چهار عضو بحرانی کفایت می‌کند به شرط آن که محدودیت کمانشی را برآورده سازند. سایر عضوهای قطری که به صورت مورب مابین لایه‌های فوقانی و تحتانی عرشه فضاکار قرار گرفته و از طول‌های متفاوتی برخوردار است، از محاسبه

همچنین از مقایسه مقادیر نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک در عرشه‌های فضاکار دو لایه با قطر



است. در نتیجه، عضوهای مذکور بیش از حد مجاز کمانش خواهد کرد که منجر به ناپایداری کل سازه می‌شود. این در حالی است که با افزایش قطر اعضای سازه به  $۱۶/۸۳$  و  $۱۹/۳۷$  سانتی‌متر، به علت افزایش ممان اینرسی اعضا، بار کمانش بحرانی بیشتر می‌شود و مقادیر مجموع نیروهای محوری فشاری ناشی از بارهای مرده و متحرک در عضوهای مذکور، کمتر از بار کمانش بحرانی آن می‌گردد. از این‌رو، سازه از لحاظ کمانش اعضا، در حالت پایدار قرار خواهد داشت. لازم به ذکر است که هرچه قطر اعضا بیشتر شود، با افزایش ممان اینرسی اعضا و به تبع آن افزایش بار کمانش بحرانی سازه، اختلاف بین مقادیر مجموع نیروهای محوری فشاری ناشی از بارهای مرده و متحرک و بار کمانش بحرانی سازه بیشتر شده و ضریب اطمینان پایداری سازه در برابر کمانش افزایش می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود که در طراحی پل‌های مشبک فضاکار، قطر اعضا طوری انتخاب شود که اختلاف بین مقادیر مجموع نیروهای محوری فشاری ناشی از بارهای مرده و متحرک و بار کمانش بحرانی سازه چشمگیر نباشد و به منظور تأمین پایداری سازه در برابر کمانش، مقدار بار کمانش بحرانی کمی بیشتر از مقادیر نیروهای محوری فشاری در نظر گرفته شود.

ندارد، زیرا تغییرات نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک، رابطه مستقیم با تغییرات نوع و وزن وسایل نقلیه عبوری از روی آن سازه و به عبارتی میزان ترافیک عبوری دارد؛ به طوری که اگر به جای کاهش یا افزایش قطر اعضا، بارهای ناشی از وسایل نقلیه را کاهش یا افزایش دهیم مسلماً نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک تغییر خواهد کرد. بنابراین تغییرات قطر اعضا فقط بر نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده تأثیرگذار بوده و نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک، متأثر از وسایل نقلیه تعریف شده می‌باشد.

در جدول ۳، مقادیر بار کمانش بحرانی در عرشه‌های فضاکار با قطر اعضای مختلف نشان داده شده است. از مقایسه این مقادیر با بیشترین مقادیر نیروهای محوری فشاری ناشی از بارهای مرده و متحرک که در عضوهای  $۱۵۱$ ،  $۱۷۰$ ،  $۱۹۱$  و  $۲۱۰$  رخ داده است ملاحظه می‌گردد که هرچه قطر اعضای یک عرشه مشبک فضاکار را کاهش دهیم، مطابق رابطه (۱) ممان اینرسی اعضای سازه کاهش یافته و در نتیجه مطابق رابطه (۲) بار کمانش بحرانی اعضا کمتر می‌شود. بنابراین در عرشه فضاکار دو لایه با قطر اعضا برابر  $۱۳/۹۴$  سانتی‌متر، مقادیر مجموع نیروهای محوری فشاری ناشی از بارهای مرده و متحرک از مقدار بار کمانش بحرانی مربوط به این اعضا فراتر رفته

جدول ۳- مقادیر مجموع نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک و بار کمانش بحرانی در عرشه‌های فضاکار با قطر اعضای مختلف

بار کمانش بحرانی (kgf)	ممان اینرسی (cm <sup>4</sup> )	مجموع نیروهای محوری (kgf)	قطر اعضا (cm)
۴۱۸۲۵۶/۸۵	۱۸۵۳/۶۲	۵۲۵۲۰۸/۵۸	۱۳/۹۴
۸۸۱۰۳۶/۶۸	۳۹۳۸/۲۷	۵۶۷۵۰۵/۰۱۲	۱۶/۸۳
۱۵۴۵۸۸۰/۰۲	۶۹۱۰/۱۶	۶۱۱۶۵۵/۶۴	۱۹/۳۷

شده است. به علت تغییرات طول اعضا و تعداد متفاوت گره‌ها در لایه فوقانی عرشه مشبک فضاکار، بار متمرکز اعمالی بر این گره‌ها ناشی از وزن دال بتنی پل که برابر با  $۲۵۹۲۰$  کیلوگرم است، متفاوت می‌باشد. از این‌رو، با

### ۳-۲- عرشه فضاکار دو لایه با طول اعضای مختلف

در جدول ۴، خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا و با طول اعضای  $۱/۵$ ،  $۳$  و  $۴/۵$  متر نشان داده

متمركز اعمالی ناشی از وزن دال بتنی، کاهش می‌یابد.

کاهش طول اعضای عرشه مشبک فضاکار، به علت افزایش تعداد گره‌ها، سهم گره‌های لایه فوقانی عرشه از بار

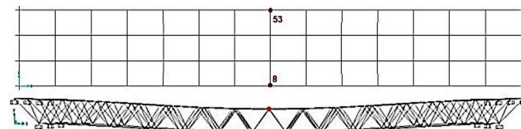
جدول ۴- خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار با طول اعضای مختلف

طول اعضا (m)	تعداد اعضا	تعداد گره‌ها	بار اعمالی به گره‌های لایه فوقانی عرشه ناشی از وزن دال بتنی (kg)	خیز ناشی از بار مرده (cm)	خیز ناشی از بار متحرک (cm)	خیز نهایی (cm)
۱/۵	۱۰۰۸	۲۹۸	۱۵۰۶/۹۷	۷/۸۷	۸/۷۷	۱۶/۶۴
۳	۵۰۴	۱۵۱	۲۹۴۵/۴۵	۵/۰۷	۷/۶۲	۱۲/۶۸
۴/۵	۳۳۶	۱۰۲	۴۳۲۰	۴/۱۴	۷/۱	۱۱/۲۴

محدوده قابل قبول مطابق آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران قرار دارد.

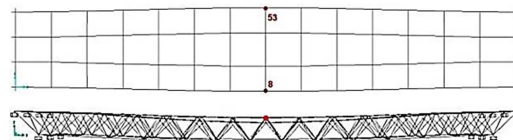
با مراجعه به جدول ۴ ملاحظه می‌شود که پس از افزایش طول اعضای عرشه مشبک فضاکار در راستای محور X از ۱/۵ متر به ۴/۵ متر، خیز ناشی از بارهای مرده ناشی از وزن عرشه مشبک و دال بتنی فوقانی به نحو چشمگیری کاهش یافته است؛ به طوری که مطابق شکل ۵، در گره‌های ۸ و ۵۳ از لایه فوقانی عرشه مشبک فضاکار به بیشترین مقدار خود می‌رسد. از مقایسه مقادیر خیزهای به دست آمده ناشی از بار مرده در سه مدل با طول اعضای مختلف، استنباط می‌گردد که هرچه طول اعضا بیشتر شود، یعنی فاصله بین گره‌ها افزایش یابد؛ تعداد گره‌ها و اعضای دو لایه و مابین آن که قسمت عمده المان‌های کل سازه در این فاصله قرار دارد، کاهش می‌یابد و به تبع آن منجر به کاهش بار مرده سازه و خیز ناشی از این بار می‌شود.

با مراجعه به جدول ۴ ملاحظه می‌شود که پس از افزایش طول اعضای عرشه مشبک فضاکار در راستای محور X از ۱/۵ متر به ۴/۵ متر، خیز ناشی از بارهای مرده ناشی از وزن عرشه مشبک و دال بتنی فوقانی به نحو چشمگیری کاهش یافته است؛ به طوری که مطابق شکل ۵، در گره‌های ۸ و ۵۳ از لایه فوقانی عرشه مشبک فضاکار به بیشترین مقدار خود می‌رسد. از مقایسه مقادیر خیزهای به دست آمده ناشی از بار مرده در سه مدل با طول اعضای مختلف، استنباط می‌گردد که هرچه طول اعضا بیشتر شود، یعنی فاصله بین گره‌ها افزایش یابد؛ تعداد گره‌ها و اعضای دو لایه و مابین آن که قسمت عمده المان‌های کل سازه در این فاصله قرار دارد، کاهش می‌یابد و به تبع آن منجر به کاهش بار مرده سازه و خیز ناشی از این بار می‌شود.



شکل ۵- محل بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای مرده در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده بنابراین براساس محدودیت‌های بیان شده، در مدل‌های مذکور که طول دهانه‌ای برابر با ۶۰ متر دارند، بیشترین مقدار خیز مجاز ناشی از بارهای مرده برابر با ۲۵ سانتی‌متر است و مطابق جدول ۴، در هر سه مدل مذکور با قطر اعضای مختلف، خیز ناشی از بارهای مرده در

و گره‌های سازه، متعاقباً بار مرده سازه و به تبع آن نیروهای محوری ناشی از این بارها نیز افزایش خواهد یافت. از مقایسه مقادیر نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک در عرشه‌های فضاکار دو لایه با طول اعضای مختلف، ملاحظه می‌شود که کاهش طول اعضا، منجر به افزایش تعداد گره‌های آن می‌شود و چون این گره‌ها از نوع مفصلی انتخاب شده است که دارای آزادی حرکت در تمام جهات می‌باشند، بنابراین با اعمال بارهای متحرک، مسلماً افزایش نیروهای محوری را در اعضای عرشه مشبک فضاکار به دنبال خواهد داشت. بنابراین هرچه طول اعضای عرشه بیشتر و تعداد گره‌های آن کمتر باشد، تغییر مکان ناشی از بارهای متحرک در گره‌ها و به تبع آن نیروهای محوری ناشی از این بارها در اعضای عرشه مشبک فضاکار کمتر خواهد بود.



شکل ۶- محل بیشترین مقدار خیز ناشی از بارهای متحرک در عرشه فضاکار دو لایه با آرایش مربع روی مربع جابه‌جا شده

در جدول ۵، مقادیر بیشترین نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار دو لایه با طول اعضای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هرچه طول اعضای یک عرشه فضاکار افزایش یابد، از تعداد اعضا و گره‌های آن کاسته شده و در نتیجه وزن کل سازه یعنی بارهای مرده آن کاهش می‌یابد، از این‌رو، منجر به کاهش نیروهای محوری ناشی از این بارها می‌شود. همچنین هرچه طول اعضای یک عرشه فضاکار کاهش یابد، با ازدیاد تعداد اعضا

جدول ۵- بیشترین نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده و متحرک در عرشه‌های فضاکار با طول اعضای مختلف

طول اعضا (m)	نیروهای محوری ناشی از بارهای مرده (kgf)	نیروهای محوری ناشی از بارهای متحرک (kgf)	مجموع نیروهای محوری (kgf)
۱/۵	۳۹۲۳۲۸/۱۳	۳۵۷۳۱۰/۱۶	۷۴۹۶۳۸/۲۹
۳	۲۵۰۶۱۰/۰۴	۳۱۶۸۹۴/۹۷	۵۶۷۵۰۵/۰۱۲
۴/۵	۱۹۰۵۹۸/۱۰	۲۷۸۶۰۳/۳۳	۲۱۸۴۰۱/۴۳

اعضای عرشه که نیروهای محوری فشاری کمتری نسبت به این اعضا دارند در مقابل کماتش ناشی از بارهای مذکور مقاومت نموده و پایداری سازه از لحاظ کماتش اعضا تأمین می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی رفتار سازه‌های فضاکار در عرشه پل‌ها با تغییرات قطر و طول اعضا پرداخته شد. به این منظور، عرشه پل به صورت دو لایه با آرایش شبکه مربع روی مربع 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 با افزایش قطر اعضای عرشه مشبک فضاکار

با توجه به اینکه در هر سه مدل از عرشه مشبک فضاکار با طول اعضای مختلف، قطر اعضا یکسان و برابر ۱۶/۸۳ سانتی‌متر است، بنابراین در مقاطع دایروی که ممان اینرسی در هر دو جهت محورهای X و Y یکسان می‌باشد از رابطه (۱) تعیین می‌گردد که برابر با ۳۹۳۸/۲۸ سانتی‌متر مکعب است. از این‌رو، مطابق رابطه (۲) بار کماتش بحرانی اعضا برای هر سه مدل مذکور برابر با ۸۸۱۰۳۶/۶۸ kgf است. از مقایسه این مقدار با بیشترین نیروی محوری فشاری در عضوهای عرشه با طول اعضای ۱/۵، ۳ و ۴/۵ متر که به ترتیب برابر با ۷۴۹۶۳۸/۲۹ kgf، ۵۶۷۵۰۵/۰۱۲ و ۲۱۸۴۰۱/۴۳ می‌باشد، ملاحظه می‌شود که نیروی محوری فشاری در عضوهایی که مستعد کماتش هستند، کمتر از بار کماتش بحرانی است. بنابراین کلیه

سه مدل از عرشه مشبک فضاکار با طول اعضای مختلف، قطر اعضا یکسان و برابر  $16/83$  سانتی متر است، بنابراین در مقاطع دایروی که ممان اینرسی در هر دو جهت محورهای  $X$  و  $Y$  یکسان است، بار کمانش بحرانی اعضا برای هر سه مدل مذکور برابر بوده و ملاحظه شد که نیروی محوری فشاری در عضوهایی که مستعد کمانش هستند، کمتر از بار کمانش بحرانی است؛ از این رو پایداری سازه از لحاظ کمانش اعضا تأمین می‌باشد. بنابراین در طراحی سازه‌های مشبک فضاکار به عنوان عرشه پل‌ها، توصیه می‌شود که قطر و طول اعضای سازه طوری انتخاب گردد که اولاً خیز ناشی از بارهای مرده و متحرک به حداقل برسد؛ ثانیاً کمانش در اعضای سازه در حد مجاز بوده و منجر به فروپاشی آن نگردد.

### قدردانی

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

دولایه از  $13/94$  به  $19/37$  سانتی متر، سطح مقطع و در نتیجه سختی اعضا افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش سختی کل سازه و مقاومت آن در برابر خیز ناشی از بارهای مرده در اثر وزن سازه و خیز ناشی از بارهای متحرک در اثر عبور و مرور وسایل نقلیه موتوری می‌گردد. همچنین به علت افزایش ممان اینرسی اعضا، بار کمانش بحرانی بیشتر می‌شود و چون نیروی محوری فشاری در عضوهایی که مستعد کمانش هستند، کمتر از بار کمانش بحرانی است؛ از این رو سازه از لحاظ کمانش اعضا، در حالت پایدار قرار دارد. با افزایش طول اعضای عرشه مشبک فضاکار دولایه از  $1/5$  به  $4/5$  متر، فاصله بین گره‌ها افزایش یافته و تعداد گره‌ها و اعضای دو لایه و مابین آن که قسمت عمده المان‌های کل سازه در این فاصله قرار دارد، کاهش می‌یابد و به تبع آن منجر به کاهش بار مرده سازه و خیز ناشی از این بار می‌شود. از طرفی، چون این گره‌ها از نوع مفصلی انتخاب شده است که دارای آزادی حرکت در تمام جهات می‌باشند، بنابراین کاهش تعداد گره‌ها، کاهش نسبی خیز ناشی از بارهای متحرک را به دنبال دارد. همچنین با توجه به اینکه در هر

### مراجع

- [1] Chilton, J. (2000). *Space grid structures*. Architectural press.
- [2] Shilin, D. O. N. G. (2009), "The development history, innovation, classification and practical application of spatial structures", *Spatial Structure*, 15(3), 22-43.
- [3] Shilin, D. O. N. G. (2010), "Development and expectation of spatial structures in China", *Journal of Building Structures*, 31(6), 38-51.
- [4] Dong, S.L., Luo, Y.Z., & Zhao, Y. (2009). *Analysis, design and construction of new space structure*. China Architecture and Building Press, China.
- [5] Liu, X.L. (2003). *Modern space structures*. Tianjing: Tianjing University Press.
- [6] Saitoh, M. (2006). *Development and prospect of space structure— past, present, future of space structure design*. Beijing: China Architecture and Building Press.
- [7] Mei, J.K., Liu, D.M., & Yao, Y.X. (2002). *Thinking of structure and construction of long-span structures*. Beijing: China Architecture and Building Press.
- [8] Ramaswamy, G. S., & Eekhout, M. (2002). *Analysis, design and construction of steel space frames*. Thomas Telford.
- [9] Taghizadeh, M. H., Behraves, A., & Akbarlou, A. (2015). "Study on behavior of bridges deck built by spatial structures", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2(1), 46-55.
- [10] Dianat, P. (2014). "Use of space structures in seismic reinforcement of existing concrete structures", *the 4th National Conference on Spatial Structures*, Tehran, May 19-20.
- [11] Maalek, S., Maalek, R., & Maalek, B. (2014), "Largely neglected areas of application of skeletal space structures", *the 4th National Conference on Spatial Structures*, May 19-20.
- [12] Taghizadeh, M.H., & Behraves, A. (2015), "Application of spatial structures in bridges deck", *Civil Engineering Journal*, 1(1), 1-8.

- [13] Eskandar, H., & Maalek, S. (2016). "Investigation of technical and economic aspects of deck structure system of bridges deck consisting of two-layer mixed spatial grids in comparison with prefabricated post-tensioned concrete box-girder bridges", *the 9th International Congress on Civil Engineering*, Mashhad, May 10-1.
- [14] Taghizadeh Valdi, M. H., & Pourhadi Gavabari, M. (2020). "Analysis of spatial structures behavior in bridges deck with topology and layers changes", *Journal of Architecture*, 2(13), 1-8.
- [15] Vice presidency for Strategic Planning and Supervision, (2010). Code of practice for skeletal steel space structures of Iran, No 400.
- [16] Nooshin, H. (1996), "A Technique for Surface Generation", *IASS Symposium*, Stuttgart, Germany.
- [17] Nooshin, H., & Moghimi, M. (2007), "Formex formulation of freeform structural surfaces", *2nd National Conference on Space Structures*, Tehran. Iran.
- [18] Nooshin, H., & Disney, P.L. (2000), "Formex configuration processing I", *International Journal of Space Structures*, 15(1), 1-52.
- [19] Nooshin, H., & Disney, P.L. (2001), "Formex configuration processing II", *International Journal of Space Structures*, 16(1), 1-56.
- [20] Nooshin, H., & Disney, P.L. (2002), "Formex configuration processing III", *International Journal of Space Structures*, 17(1), 1-50.
- [21] Nooshin, H., Disney, P.L. & Champion, O.C. (1997). Computer-aided processing of polyhedric configurations. Chapter 12 in *Beyond the Cube*. Edited by J.F. Gabriel. *John Wiley*.
- [22] Habibullah, A., & Wilson, E. (2005). *General program of structures analysis and design SAP2000*. Translated by Afshin Torabi, and Reza Pashaei, 1st Edition, Simaye Danesh Publications.
- [23] AASHTO LRFD. (2012). *Bridge design specifications. 6th Edition*.
- [24] Baji, H., & Hashemi, S. J. (2005). *Applied projects in computerized analysis and design of structures*. 4th Edition, Motafakeran Publications.
- [25] Tahooni, S. (2014). *Design of steel structures (allowable stress method and limit state design - LRFD)*. 1st Edition, Elm va Adab Publications.