

Introducing an innovative approach for the construction of cable-stayed bridges that eliminates the necessity of final cable tension adjustments

Hamidreza Dehghani¹, Ehsan Dehghani^{2*}

1- PhD candidate, Faculty of Eng., University of Qom, Qom, Iran

2- Associate professor, Faculty of Eng., University of Qom, Qom, Iran

ABSTRACT

Cables are one of the most basic components of cable-stayed bridges in providing safety and optimal design conditions. Various methods have been provided to adjust the tension force of the cables to achieve the optimal conditions of the design forces of the cables and other bridge components. Also, different methods have been presented under the title of construction analysis methods, such as forward and backward methods, to ensure the achievement of the design forces of the cables during construction. Most of the proposed construction methods of cable-stayed bridges require multiple adjustment of the tension of the cables in each stage of construction, and due to implementation errors, the final geometric shape of the bridge does not match the expected specifications. In this research, by examining the theory of the effect of changes in the initial tension of the cables compared to the design assumptions on the stiffness, resistance and overall safety of the bridge, and citing its results, a new method for constructing cable-stayed bridges without the need to readjust the tension of the cables has been presented. For this purpose, in a case study, a three-span cable-stayed bridge was prepared and subjected to nonlinear static analysis. The results of the analysis of the proposed construction method showed that the final profile of the bridge had the same match with the expected profile and the modal period of the structure has changed by less than 4% compared to the design assumptions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 July 2023

Revise Date: 27 January 2024

Accept Date: 14 March 2024

Keywords:

Cable-stayed bridges
Cable tension adjustment
Construction method of cable-stayed bridges
Construction stage analysis
shakedown limit load

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.404594.3161>

*Corresponding author: Ehsan Dehghani
Email address: dehghani@qom.ac.ir

ارائه روشی جدید جهت ساخت پل‌های کابلی بدون نیاز به تنظیم نهایی کشش کابل‌ها

حمیدرضا دهقانی^۱، احسان دهقانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

چکیده

کابل‌ها یکی از اساسی‌ترین اجزای پل‌های کابل‌ایستا در تامین ایمنی و شرایط بهینه طراحی می‌باشند. روش‌های مختلفی برای تنظیم نیروی کشش کابل‌ها جهت دستیابی به شرایط بهینه نیروهای طراحی کابل‌ها و سایر اجزای پل ارائه شده‌است. همچنین روش‌های متفاوتی تحت عنوان روش‌های تحلیل حین ساخت همانند روش روبه جلو و روبه عقب ارائه شده‌اند تا از دستیابی به نیروهای طراحی کابل‌ها در زمان ساخت اطمینان حاصل شود. اکثر روش‌های ساخت ارائه شده پل‌های کابلی نیازمند تنظیم چند باره کشش کابل‌ها در هر مرحله ساخت بوده و با توجه به خطاهای اجرایی منجر به عدم تطابق شکل هندسی نهایی پل با مشخصات مورد انتظار می‌گردد. در این پژوهش با بررسی تئوری تأثیر تغییرات کشش اولیه کابل‌ها نسبت به فرضیات طراحی بر سختی، مقاومت و ایمنی کلی پل و با استناد به نتایج آن، روش جدیدی جهت ساخت پل‌های کابلی بدون نیاز به تنظیم مجدد کشش کابل‌ها ارائه شده‌است. به همین منظور در یک مطالعه‌ی موردی، یک پل کابل‌ایستا سه دهانه تهیه و تحت اثر تحلیل غیرخطی استاتیکی قرار گرفته و روش پیشنهادی ارائه شده جهت ساخت پل‌های کابل‌ایستا بر روی آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل روش ساخت پیشنهادی نشان داد پروفیل نهایی پل با پروفیل مورد انتظار تطابق یکسانی داشته و دوره تناوب سازه نسبت به فرضیات طراحی کمتر از ۴ درصد تغییر کرده است.

کلمات کلیدی: پل‌های کابل‌ایستا، تنظیم کشش کابل‌ها، روش ساخت پل‌های کابل‌ایستا، تحلیل مراحل ساخت، حد شیکدان

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۲/۰۷/۲۴	۱۴۰۲/۱۱/۰۷	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۳/۰۸/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.404594.3161
*نویسنده مسئول:		احسان دهقانی			
پست الکترونیکی:		dehghani@qom.ac.ir			

۱- مقدمه

کابل‌ها یکی از اساسی‌ترین اجزای پل‌های کابل‌ایستا می‌باشند. سختی این اعضا وابسته به میزان کشش موجود در آن‌ها بوده و جهت طراحی بهینه پل کابل‌ایستا می‌بایست مقدار کشش اولیه کابل‌ها تنظیم گردد. در همین راستا روش‌های مختلفی جهت تنظیم کشش کابل‌ها ارائه شده‌است، به نحوی که نیروهای طراحی مابقی اجزای پل و خود کابل‌ها بهینه گردند. طبق بررسی‌های مارتینز^۱ و همکاران تا سال ۲۰۲۰ حدود ۴۲ درصد تحقیقات مربوط به بهینه‌سازی پل‌های کابل‌ایستا به بحث تنظیم کشش کابل‌ها پرداخته‌اند [۱]. به طور کلی این روش‌ها را به سه دسته تقسیم می‌کنند: روش جابجایی [۲]، روش تعادل نیرو [۳] یا روش بار واحد [۴] و روش بهینه‌سازی [۵-۸].

اولین گام جهت طراحی پل‌های کابلی تعریف حالت هدف می‌باشد. در این مرحله میزان بار اعضای پل و یا شکل حالت بهره‌برداری پل با تنظیم میزان کشش اولیه کابل‌ها مشخص می‌شود [۹]. جهت دستیابی به این هدف حالات مختلف تنظیم کشش کابل‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۱۰]. با توجه به آن که میزان تغییر شکل و نیروهای اعضای پل‌های کابلی حین ساخت بسیار متغیر می‌باشد، در نظر گرفتن اثرات بارهای مختلف در حین ساخت از جمله بارهای دینامیکی، همانند بار باد [۱۱] یا زلزله [۱۲] بسیار مهم و ضروری به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به این نکته مهم که پل‌های کابلی دارای درجات نامعینی فراوانی می‌باشند، تغییر کشش یک رشته کابل هم می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر نیرو و تغییر شکل سایر اجزای پل داشته باشد. از این رو تحقیقات فراوانی در مورد فرآیند ساخت پل‌های کابلی انجام شده‌است تا از دستیابی به نیروهای هدف و طراحی پل اطمینان حاصل شود [۱۳-۱۵]. به عنوان مثال ژانگ^۲ یک مدل تنظیم کشش کابل در حین ساخت بر اساس مدل جایگزین کریجینگ^۳ ارائه داده است. این روش یک روش درونی‌یابی معقول به نیروهای هدف کابل‌ها مورد اجزا محدود اضافه‌ای می‌باشد و می‌تواند به طور موثر در یک روش تنظیم مرحله‌ای برای دستیابی معقول به نیروهای هدف کابل‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۱۶]. علاوه بر این، سازه‌های پیچیده شبیه به پل‌های کابلی می‌توانند با استفاده از روش‌های پایش سلامت [۱۲] کنترل و شناسایی شوند [۱۷، ۱۸]. همچنین به عنوان روشی دیگر جهت اطمینان از دستیابی به نیروهای هدف طراحی شده پل، نیروهای کابل‌ها حین ساخت و بهره‌برداری استخراج و مورد نظارت قرار می‌گیرند. از این داده‌ها می‌توان برای تنظیم مجدد مدل‌های مربوط به مدیریت و نگهداری سازه استفاده کرد [۱۹].

از اولین روش‌های تحلیل مراحل ساخت پل‌های کابلی می‌توان به روش تحلیل عقب‌گرد^۴ اشاره کرد. این روش شامل شروع از OSS^۵ (حالت نهایی هدف) و برجیدن گام به گام آن می‌باشد [۷، ۲۰-۲۲]. هر گام به صورت مجزا تحلیل شده و فرض بر این است که برهم‌نهی خطی مراحل قادر به شبیه‌سازی فرآیند ساخت و ساز می‌باشد [۷، ۲۵]. با این حال، این روش‌ها قادر به تجزیه و تحلیل اثرات پدیده‌های وابسته به زمان نخواهند بود [۲۳، ۲۴] مگر اینکه با یک فرآیند تکراری طولانی یا یک تحلیل روبه‌جلو^۶ ترکیب شوند. تحلیل مراحل ساخت روبه‌جلو برای حل همه این مشکلات پیشنهاد شده‌است [۲۰، ۲۶، ۲۷، ۲۸].

وانگ^۷ و همکاران در پژوهشی به ارائه و بررسی کامل روش‌های تحلیل ساخت روبه‌جلو و روبه‌عقب بر روی پل‌های کابلی طره آزاد پرداخته‌اند. در این پژوهش با بررسی یک مطالعه موردی تغییر شکل نهایی و نیروهای داخلی اعضای پل ناشی از تنظیم کشش کابل‌ها حین ساخت پل مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰].

با وجود انجام تحلیل‌های مراحل ساخت مختلف و تلاش برای رسیدن به حالت هدف تعریف شده، انحرافات بین نتایج به‌دست‌آمده در حین ساخت و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های مراحل ساخت وجود دارد. خطاهای حین ساخت به صورت عمده ناشی از دو بخش می‌باشند: خطای ناشی از جک‌های کشش کابل‌ها و یا خطاهای هندسی هنگام کنترل موقعیت عرشه پل [۳۰، ۳۱]. برای اطمینان از این‌که کابل‌ها به کشش طراحی خود رسیده‌اند، باید یک عملیات کشش مجدد جامع روی کل پل به صورت غیرعادی انجام

¹ Martins

² Zhang

³ kriging

⁴ Backward analysis

⁵ Objective Service Stage

⁶ Forward analysis

⁷ Wang

شود. این فرایند را نمی‌توان با روش کشش رشته به رشته همان‌طور که برای عملیات کشش اولیه کابل‌ها استفاده شده‌است انجام داد و بنابراین نیاز به یک فرآیند جامع‌تری می‌باشد. این مرحله تنظیم کشش مجدد کابل‌ها می‌تواند بسیار گران، زمان‌بر و فاقد دقت باشد. لوزانو^۸ و تورمو^۹ رویکرد جدیدی را برای مدل‌سازی ساخت پل‌های کابلی با استفاده از یک توالی واقعی از رویدادها در سایت ارائه کرده تا تنظیم نهایی کابل‌های پل به حداقل میزان ممکن برسد [۳۲].

گراناتا^{۱۰} و همکاران به ارائه یک روش ساخت پل کابلی با عرشه کامپوزیت پرداخته که در آن بجای تنظیم نیروی کابل‌ها، موقعیت عرشه پل حین نصب تنظیم می‌شود. در این پژوهش با بررسی سه روش مختلف تنظیم موقعیت عرشه پل، به بررسی نیروهای داخلی و تغییرشکل نهایی پل پرداخته و روشی که میزان نیروهای داخلی یکنواخت‌تر و تغییرشکل نهایی کمتر را می‌دهد به عنوان روش برتر و نهایی ساخت ارائه شده‌است. نکته قابل توجه در تحقیقات گراناتا و همکاران ضرورت تحلیل مراحل ساخت و در نظر گرفتن نیروهای به‌دست آمده از آن در طراحی سازه پل می‌باشد [۳۳].

در تمامی روش‌های ساخت پل‌های کابلی ارائه‌شده، با وجود دستیابی به حالت هدف و نیروهای طراحی در پایان ساخت پل، به دلایل متفاوتی از جمله اثرات عدم قطعیت و خود متعادل همانند بارهای حرارتی، جمع‌شدگی و خزش بتن، کشش کابل‌ها دوباره تغییر خواهند کرد [۳۴-۳۶]. این امر باعث می‌شود که اگر کشش‌های اولیه کابل با مقادیر بدست آمده از تجزیه و تحلیل‌های روش‌های مراحل ساخت تنظیم گردد، قطعات کارگذاری شده عرشه پل در روش‌های ساخت طره آزاد در انتها به یکدیگر نرسند. این موضوع منجر به این می‌شود که هنگام اجرا، قطعه آخر عرشه (قطعه کلید) تحت تغییرشکل‌ها و تنش‌های اولیه زیادی جهت کارگذاشتن قرار بگیرد.

در ادامه به ارائه روش جدیدی جهت ساخت پل‌های کابل‌ایستا پرداخته شده‌است که نیازمند تنظیم کشش کابل‌ها به میزان فرضیات طراحی و رسیدن به حالت هدف (OSS) نمی‌باشد. روش پیشنهادی معضلات ناشی از تنظیم مجدد کشش کابل‌ها در روش‌های ساخت موجود را نداشته و پروفیل نهایی پل پس از ساخت به میزان قابل قبولی با پروفیل طرح هندسی راه مطابقت خواهد داشت.

۲- مفاهیم بنیادی

همانطور که در تاریخچه تحقیقات ذکر شد، روش‌های مختلفی مانند تحلیل‌های عقب‌گرد و جلوگرد جهت محاسبه روند اجرای پل کابلی برای دستیابی به کشش‌های اولیه کابل در طراحی پل‌های کابلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما به دلیل وجود پارامترهای عدم قطعیت مانند خطاهای ساخت، اثرات خزش و انقباض، بارهای دمایی و غیره، کشش کابل و شکل اولیه پل با مفروضات طراحی اولیه متفاوت می‌گردد. از این‌رو در این پژوهش به ارائه روشی جدید جهت ساخت پل‌های کابل‌ایستا پرداخته شده‌است که نیازمند تنظیم کشش کابل‌ها به میزان فرضیات طراحی و رسیدن به حالت هدف (OSS) نمی‌باشد. عدم تنظیم کشش کابل‌ها به میزان فرضیات طراحی موجب ایجاد نگرانی‌هایی در مورد کاهش سختی، مقاومت نهایی و حد بار شیکدان^{۱۱} سازه می‌گردد. از این‌رو در ابتدا تأثیر تغییر کشش اولیه کابل‌ها نسبت به فرضیات طراحی بر پارامترهای رفتاری پل کابل‌ایستا، از جمله سختی، مقاومت و حد بار شیکدان، بصورت تئوری و با استفاده از قضایای بنیادین تحلیل پلاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این بخش آن است که با استناد به تئوری‌های تحلیل پلاستیک، عدم اثرگذاری کشش اولیه کابل‌ها بر رفتار سازه‌ای پل از جنبه‌های ذکر شده اثبات گردد. برای این منظور فرضیات و محدوده مورد بررسی پژوهش عبارتند از:

⁸ Lozano

⁹ Turmo

¹⁰ Granata

¹¹ Shakedown limit load

۱- کابل‌ها دارای حداقل تنش کششی $0.2F_u$ بوده و مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده را دارند. این فرض به معنی کنترل سازه طبق آیین‌نامه‌های طراحی و برقراری شروط تعادل و تسلیم در سازه می‌باشد.

۲- تغییر شکل‌های سازه در محدوده تغییر مکانهای کوچک می‌باشد.

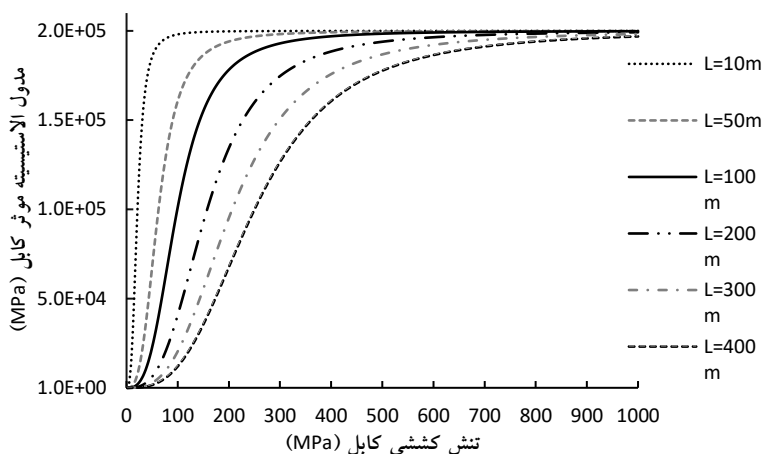
در بررسی تحلیلی، سازه دارای شکل‌پذیری کافی فرض می‌شود. امکان بررسی پدیده‌های شکست ترد مانند کمناش، خستگی و ... بصورت مجزا وجود دارد.

۱-۲ بررسی تغییرات سختی

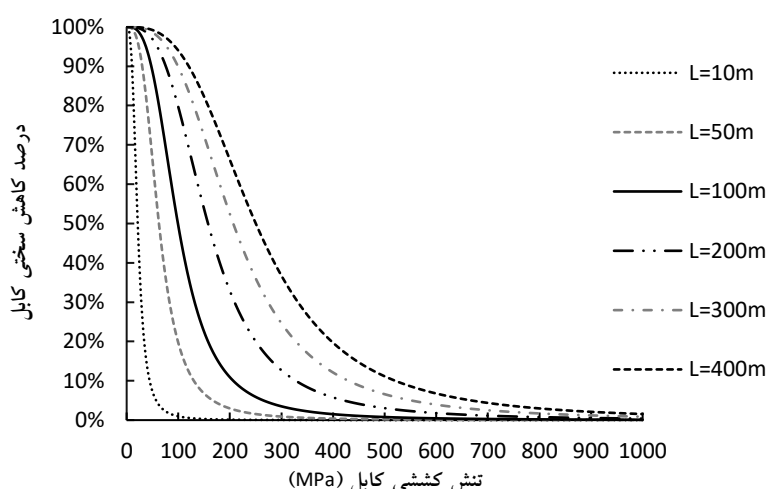
سختی قائم (ثقلی) پل‌های کابل‌ایستا ناشی از سختی کابل‌ها و اعضای اصلی پل، عرشه و دکل می‌باشد. با توجه به آن که در روش اجرای پیشنهادی صرفاً کشش کابل‌ها نسبت به فرضیات طراحی دچار تغییرات شده، بنابراین تغییرات سختی پل ناشی از تغییرات سختی کابل‌ها به علت تغییرات کشش اولیه آن‌ها می‌باشد. سختی محوری کابل با در نظر گرفتن اثر نیروی کششی را می‌توان با اصلاح مدول الاستیسته کابل صاف در نظر گرفت. مدول الاستیسته مؤثر کابل با توجه به رابطه ارائه شده توسط ارنست^{۱۲} محاسبه می‌شود [۳۷]:

$$E_{e,ff} = \frac{E_0}{1 + \frac{\lambda^2 l_k^2 E_0}{12\sigma^3}} \quad (1)$$

در رابطه فوق E_0 مدول الاستیسته کابل صاف، γ وزن مخصوص کابل، l_k طول افقی کابل و σ تنش کششی موجود در کابل می‌باشد. * تغییرات سختی محوری کابل را با تغییرات کشش کابل بر اساس رابطه فوق نشان می‌دهد. همچنین * درصد کاهش سختی کابل نسبت به کابل صاف را با تغییرات کشش کابل نشان می‌دهد.



رابطه بین سختی مؤثر، طول و تنش موجود در کابل



درصد کاهش سختی کابل با تغییر تنش کششی اولیه کابل

همان گونه که از رابطه ارنست و نمودار ارائه شده در ۰ مشاهده می شود، تاثیر تغییرات تنش کششی موجود در کابل بر سختی محوری آن، با افزایش تنش کششی از حد مشخصی بسیار کاهش یافته و حدوداً بی تاثیر می گردد. حداقل تنش کششی موجود در کابلها طبق فرض صورت گرفته برابر $0.2F_u$ بوده و با توجه به آن که تنش گسیختگی کابل های رایج مورد استفاده در پلها در محدوده ۱۷۰۰ الی ۱۹۰۰ مگاپاسکال می باشد، حداقل تنش کششی موجود در کابلها طبق محدودیت $0.2F_u$ برابر ۳۵۰ مگاپاسکال می باشد. بنابراین طبق رابطه ارنست، با فرض طول افقی کابل برابر ۱۰۰ متر و تنش کششی ۳۵۰ مگاپاسکال، سختی موثر کابل برابر ۱۹۵۵۰۰ مگاپاسکال می گردد که حدود ۲ درصد نسبت به سختی کابل صاف کاهش یافته است. همچنین همان طور که از ۰ مشخص است، در صورت وجود حداقل کشش ۳۵۰ مگاپاسکال، درصد کاهش سختی کابل های با طول کمتر از ۲۰۰ متر کمتر از ۱۰ درصد می باشد. بنابراین در صورت تامین شرط وجود حداقل کشش مطابق آیین نامه های طراحی، تغییرات کشش کابلها تاثیر چندانی در سختی کل پل نخواهند داشت. در صورت افزایش طول کابلها از حد معمول، جهت اطمینان از عدم تغییر سختی پل، میزان حداقل کشش موجود در کابلها می تواند افزایش یابد.

۲-۲ بررسی تغییرات مقاومت نهایی پل

طبق اصل یکتایی تحلیل پلاستیک، در صورت وجود مجموعه ای از بارها بر روی یک قاب که باعث ایجاد لنگرهای خمشی متعادل و ایجاد مکانیزم شوند، در این صورت، بارها با بار شکست برابر هستند ($\lambda = \lambda_c$) [۳۸].

فرض می شود دو پل کابل ایستا با هندسه و مشخصات مقاطع یکسان موجود باشند و تنها کشش های اولیه کابلها بر روی دو سازه متفاوت باشد. کشش کابلها موجب بوجود آمدن یک توزیع نیروهای داخلی در عرشه و دکل می شود. این مجموعه نیروهای داخلی با بار خارجی برابر صفر تعادل داشته و یا به بیان دیگر خود متعادل هستند.

طبق اصل یکتایی تحلیل پلاستیک، در حالت بار فروریختگی پل اول، یک مجموعه لنگر متعادل (M^*) با بارهای ضریب دار خارجی ($\lambda_{c1}W$) وجود دارد که در هیچ یک از نقاط حد تسلیم را رد نکرده و ایجاد مکانیزم برای سازه نمی کند. مجموعه نیروهای داخلی سازه شامل اثرات کشش کابل نیز می باشند که با m^* نمایش داده می شود.

در صورت وجود یک مجموعه متعادل: ($\lambda_{c1}W, M^* + m^*$)

و یک مکانیزم سازگار: ($\delta^* + \theta^*$)

$$(M^* + m^*) \leq M_p$$

(۲)

$$\lambda_{c1} \sum W \delta^* = \sum (M^* + m^*) \theta^* = \sum M_p |\theta^*| \quad (3)$$

$$0 = \sum m^* \theta^* \quad (4)$$

با توجه به خود متعادل بودن لنگرها و نیروهای ناشی از کشش اولیه کابل‌ها، چنانچه هر مجموعه‌ای از کشش کابل‌ها در نظر گرفته شود، مجموع لنگرهای متعادل با بارهای خارجی و لنگرهای خودمتعادل ناشی از کشش کابل‌ها، مجدداً با بارهای خارجی در حال تعادل خواهد بود.

با توجه به عدم تغییر هندسه و سختی سازه، و همچنین عدم تغییر بارهای خارجی در پل دوم، همان توزیع لنگر متعادل پل اول در مکانیزم فروریختگی را می‌توان برای پل دوم نیز فرض نمود. این توزیع لنگرها با بارهای خارجی با ضریب λ_{c1} در حال تعادل هستند. همچنین با توجه به آن که مقاومت اعضای پل هیچ تغییری نکرده است، بنابراین شرط عدم تسلیم و برقراری مکانیزم نیز در پل دوم برقرار خواهد شد. بنابراین بر اساس قضیه یکتایی ضریب بار فروریختگی پل دوم نیز برابر ضریب بار فروریختگی پل اول خواهد بود ($\lambda_{c1} = \lambda_{c2}$).

بحث فوق نشان می‌دهد با وجود تغییر در کشش‌های اولیه کابل‌ها در دو حالت مختلف، از آنجا که این کشش‌ها نیروهای خودمتعادل داخلی ایجاد می‌کنند و در بار خارجی و مقاومت اعضاء تأثیری ندارند، حد بار فروریختگی آن‌ها و در نتیجه مقاومت نهایی سازه تغییری نخواهد کرد ($\lambda_{c1} = \lambda_{c2}$).

۲-۳ بررسی حد بار شیکدان

تغییر در نیروی کابل‌ها، می‌تواند منجر به تغییر در نیروهای داخلی سایر اعضای پل در آستانه حد تسلیم گردد. در این حالت، با توجه به عبور بارهای زنده از روی پل و تغییر متناوب بارگذاری پل، امکان رخ دادن پدیده پلاستیسیته متناوب^{۱۳} و تغییر شکل‌های پیش‌رونده^{۱۴} در پل موضوعی بحرانی و مهم می‌باشد. با توجه به این موضوع، اثر تغییر در کشش اولیه کابل‌ها و نیروهای موجود در پل بر حد بار شیکدان و پلاستیسیته متناوب به عنوان موضوعی مهم می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد.

در صورتی که سازه تحت اثر بارگذاری متناوب قرار داشته باشد، در هر نقطه از سازه نیروهای داخلی مقادیر متفاوتی را تجربه می‌کنند. این موضوع در مورد پل‌ها تحت اثر عبور بار متحرک نیز اتفاق می‌افتد. در این بخش احتمال وقوع پدیده‌های مختلف شیکدان یا تغییر شکل‌های پیش‌رونده با تغییرات کشش اولیه کابل‌ها در پل کابل‌ایستا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قضیه یکتایی حد شیکدان بیان می‌کند که «برای یک مجموعه بار اعمال شده به سازه با ضریب بار λ ، در صورتی که بتوان یک توزیع لنگر خودمعدالی (m_i^*) یافت که شرایط زیر را ارضا کند و مکانیزم فروریختگی ایجاد گردد، این ضریب بار برابر حد شیکدان λ_s می‌باشد.» [۳۹]. در این حالت چنانچه بارهای وارده با ضریب کوچکتری از λ_s بصورت متناوب به سازه اعمال شوند، پدیده شیکدان اتفاق می‌افتد، یعنی سازه پس از تجربه چند چرخه الاستوپلاستیک رفتار کاملاً الاستیک پیدا می‌کند.

$$m_i^* + \lambda M_i^{max} \leq M_p^{k(i)} \quad (5)$$

$$m_i^* + \lambda M_i^{min} \geq -M_p^{k(i)} \quad (6)$$

$$\lambda (M_i^{max} - M_i^{min}) \leq 2 M_y^{k(i)} \quad (7)$$

در روابط فوق M^{min} و M^{max} ، حداکثر و حداقل لنگر الاستیک وارد بر سازه تحت تمامی حالات بارگذاری متناوب می‌باشد. شرط سوم برای جلوگیری از پدیده پلاستیسیته متناوب می‌باشد. در صورتیکه تحت ضریب بار λ ، در حداقل یک نقطه از سازه شرط سوم

¹³ Alternating plasticity

¹⁴ incremental collapse

ارضاء نشود، اما سایر شروط برقرار باشند، پلاستیسته متناوب حاکم بر رفتار سازه خواهد بود. در ادبیات فنی به این حالت شیکدان پلاستیک نیز گفته می شود [۴۰].

چنانچه بارهای وارده تحت اثر ضریب اعمالی تولید یک مکانیزم فروریختگی کنند، لنگر واقعی باقیمانده پس از عبور بار از روی سازه (\bar{m}_j)، در لحظه مکانیزم سازه می بایست در روابط زیر صدق کند:

$$\bar{m}_j + \lambda M_j^{max} = M_p^{k(i)} \quad \text{if } \theta_j > 0 \quad (8)$$

$$\bar{m}_j + \lambda M_j^{min} = -M_p^{k(i)} \quad \text{if } \theta_j < 0 \quad (9)$$

جهت محاسبه λ_s می توان با بررسی تمامی حالت های مکانیزم محتمل و برقراری رابطه کار مجازی به روابط زیر دست یافت. با توجه به آن که لنگرهای باقیمانده در سازه خودم تعادل می باشند، پس کار انجام شده توسط آن ها برابر صفر می باشد.

$$\sum_{j=1}^{N_p} \bar{m}_j \theta_j = 0 \quad (10)$$

$$\lambda_s \sum_{j=1}^{N_p} \left(\frac{M_j^{max}}{M_j^{min}} \right) \theta_j = \sum_{j=1}^{N_p} M_p^{k(j)} |\theta_j| \quad (11)$$

بنابراین جهت محاسبه ضریب بار شیکدان، می بایست تمامی حالت های مکانیزم فروریختگی محتمل در نظر گرفته شود و ضریب بار طبق رابطه (۱۱) برای آن ها محاسبه شود. علاوه بر این مکانیزم های فروریختگی، مکانیزم های پلاستیسته متناوب نیز با رابطه (۱۲) در کلیه نقاط محتمل مورد بررسی قرار می گیرند.

$$\lambda_s (M_i^{max} - M_i^{min}) = 2M_y^{k(i)} \quad (12)$$

همان گونه که در روابط (۱۱) و (۱۲) مشاهده می شود، ضریب حد بار شیکدان λ_s را می توان بدون توجه به مقدار توزیع لنگر باقیمانده در سازه (\bar{m}_j) بدست آورد، و بنابراین توزیع لنگر باقیمانده تاثیری در میزان ضریب حد بار شیکدان ندارد.

با توجه به خودم تعادل بودن کشش های اولیه کابل ها، تأثیر کشش اولیه کابل ها نیز مشابه توزیع لنگرهای باقیمانده خودم تعادل می باشد. بنابراین میزان نیروی کششی کابل ها و لنگرهای اولیه موجود در پل تاثیری در مقدار حد شیکدان نداشته و مقاومت اعضای پل ($M_p^{k(i)}$) و سختی الاستیک پل که بر مقادیر M^{max} و M^{min} تأثیر گذار است، تنها عوامل موثر بر میزان حد شیکدان می باشند.

از آنجا که در روش پیشنهادی جدید صرفاً کشش های کابل ها با فرضیات طراحی یکسان نیست و تنش های ایجاد شده توسط آنها خودم تعادل می باشد، تأثیری در سختی، مقاومت و پدیده های مرتبط با بارهای متناوب نخواهند داشت. بنابراین تنظیم مجدد نیروی کابل ها پس از اجرا و یا بعد از بهره برداری به منظور دستیابی به نیروهای طرح اولیه پل، ضروری به نظر نمی رسد. بنابراین نتایج در ادامه روش جدید پیشنهادی جهت ساخت پل های کابلی بدون نیاز به تنظیم مجدد نیروی کابل ها ارائه می گردد.

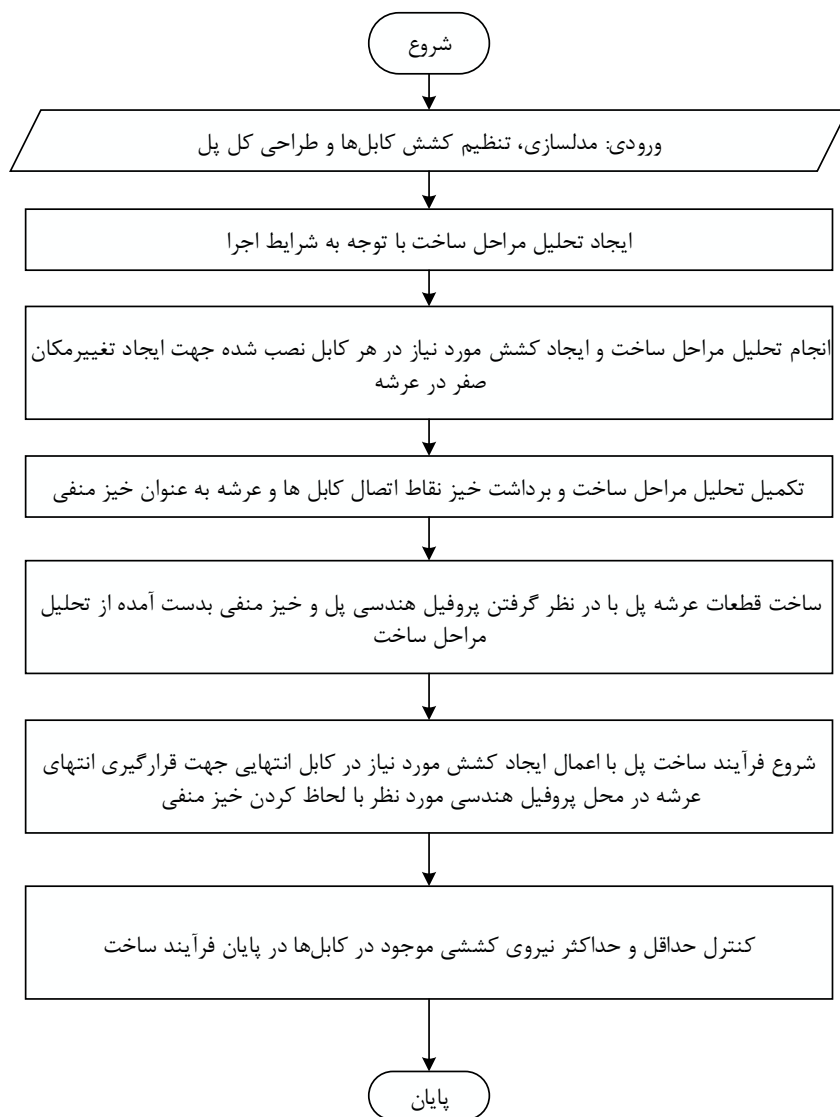
۲-۴ ارائه روش پیشنهادی ساخت پل های کابلی

با توجه به مقدمه ذکر شده مشاهده شد که تغییرات نیروهای کابلی اولیه نسبت به مفروضات طراحی اولیه، تأثیری بر مقاومت نهایی، سختی و حد بار شیکدان پل های کابلی نخواهد داشت. بنابراین در این پژوهش روشی جهت ساخت پل های کابل ایستا ارائه می شود که بر خلاف روش های ساخت موجود، نیازی به تنظیم مجدد کشش کابل در انتهای ساخت پل ندارد. در این روش، با انجام یک تحلیل مراحل ساخت در هر مرحله آخرین کابل متصل به عرشه به اندازه ای کشیده می شود که نقطه انتهایی نصب شده عرشه با پروفیل هندسی مورد انتظار پل مطابقت داشته باشد. پس از تکمیل مراحل ساخت میزان تغییر شکل نهایی پل برداشت شده و به عنوان خیز منفی بر روی

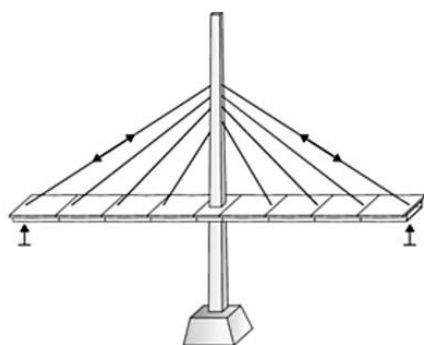
پروفیل هندسی پل اعمال می‌گردد. در حین ساخت پل پس از نصب هر قطعه عرشه، کابل انتهایی اتصال یافته به عرشه به میزانی کشیده می‌شود که مختصات عرشه با مختصات بدست آمده از تحلیل مراحل ساخت یکسان شود. در این روش شکل هندسی نهایی پل به میزان بسیار مطلوب (با خطای تغییر شکل کمتر از حد مجاز) با پروفیل مورد انتظار یکسان خواهد بود و مشکل اتصال برای قطعه کلید وجود نخواهد داشت. علاوه بر این، نیازی به تنظیم مجدد کشش کابل یا اعمال اثرات نامطلوب بر روی سازه نیست.

روش سنتی ساخت پل‌های کابلی شامل مراحل زیر است:

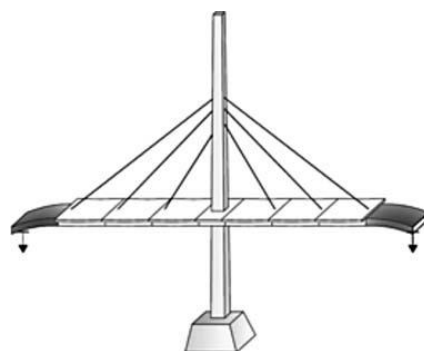
۱. تعیین نیروی کشش اولیه کابل‌ها بر اساس مفروضات طراحی اولیه.
 ۲. ساخت اجزای عرشه پل و نصب آنها.
 ۳. کشش کابل‌ها پس از نصب هر بخش عرشه و تنظیم مجدد کشش همه کابل‌های نصب شده بر اساس تجزیه و تحلیل در محل.
 ۴. اعمال بارهای آزمایشی برای بررسی رفتار سازه در شرایط واقعی.
 ۵. تنظیم مجدد کشش کابل برای دستیابی به نیروهای طراحی برای همه کابل‌ها.
- با این حال، روش پیشنهادی جدید برای ساخت پل کابلی شامل مراحل زیر است:
۱. ساخت اجزای عرشه پل و نصب آنها بر اساس پروفیل هندسی بدست آمده از تحلیل مراحل ساخت.
 ۲. پس از نصب هر قطعه عرشه، کابل نهایی متصل به آن قطعه به گونه ای کشیده می‌شود که انتهای نصب شده عرشه روی پروفیل هندسی مورد انتظار قرار می‌گیرد.
 ۳. ادامه این روند برای تمام بخش‌های عرشه.
 ۴. پس از اتمام نصب عرشه و کابل، بارهای آزمایشی به سازه اعمال می‌شود.
- این روش جدید مشکلات اتصال قطعه کلید و تنظیم مجدد کشش کابل را در انتهای ساخت پل برطرف می‌کند و همچنین تضمین می‌کند که هندسه نهایی پل با نیمرخ مورد نظر به میزان مطلوبی مطابقت دارد. علاوه بر این، این روش نیازی به تجزیه و تحلیل در محل و تنظیم مجدد کشش کابل ندارد. در ادامه روندنمای^{۱۵} روش ارائه شده تحلیل و ساخت پل‌های کابلی ارائه شده است.



روندنامی روش ساخت پیشنهادی پل‌های کابلی :



ب: نصب کابل و کشیدن آن تا قرارگیری انتهایی عرشه در محل پروفیل مورد نظر

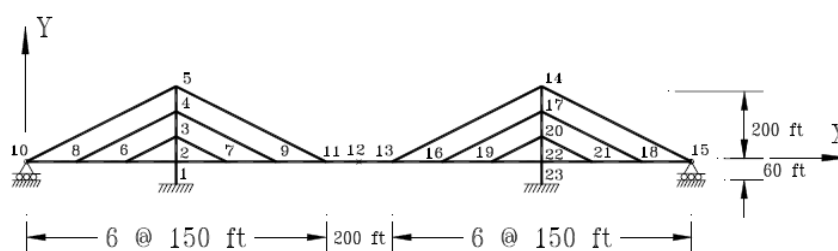


الف: نصب قطعه عرشه

شکل کلی مراحل روش پیشنهادی ساخت پل‌های کابلی با اعمال خیز منفی مورد نیاز در هر گام :

۳- معرفی مطالعه موردی و روش تحلیل

مدل موردی بررسی شده در این پژوهش، مدل مرجع ارائه شده در پژوهش وانگ و همکاران می‌باشد [۲۰]. این نمونه یک پل کابلی چنگ متقارن با سه دهانه می‌باشد که در نرم‌افزار اجزا محدود (23.3.1) SAP2000 [۴۱] مدلسازی شده‌است. روش ساخت پل از نوع طره آزاد دو طرفه انتخاب گردیده‌است. این پل دارای دو ستون به ارتفاع ۲۶۰ فوت و ۱۲ کابل است که به شکل موازی چیده شده‌اند. دهانه اصلی پل ۱۱۰۰ فوت و دهانه جانبی ۴۵۰ فوت می‌باشد. جهت مدلسازی کابل‌ها در مدل اجزا محدود از ۱۲ جزء کابل در نرم‌افزار استفاده شده‌است. جزء مورد نظر دارای رفتار غیرخطی هندسی جهت محاسبه مدول الاستیسیته موثر کابل می‌باشد. همچنین از ۱۴ جزء قابی برای اعضای عرشه و ۸ جزء قابی برای دکل‌ها استفاده شده‌است. طول هر قطعه تیر ۵۰ فوت و تنها قطعه نهایی (کلید) دارای طول ۱۰۰ فوت می‌باشد. روش تحلیل بصورت غیرخطی مراحل ساخت و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی اعضا می‌باشد. از در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح صرف نظر گردیده‌است. ۰ نمای کلی پل و مشخصات بارگذاری و مصالح را نشان می‌دهد.



نمای کلی پل [۲۰]

جدول ۱: مشخصات مصالح و بارگذاری [۲۰]

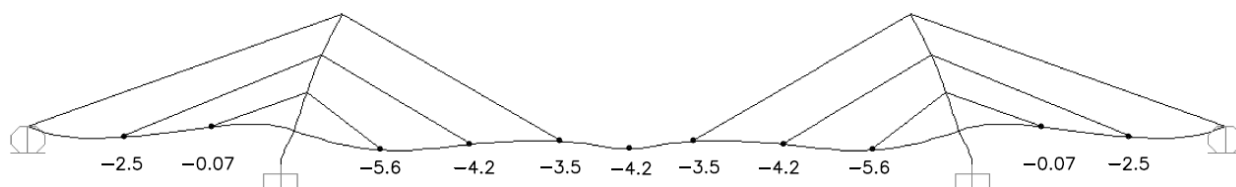
	مدول الاستیسیته (ksf)	مساحت (ft ²)	ممان اینرسی (ft ⁴)	بار مرده (kips/ft)
عرشه	۴۳۲۰۰۰۰	۳/۴۴	۱۳۱	۶
۴-۵	۴۳۲۰۰۰۰	۳/۲	۶۰	۰
۳-۴	۴۳۲۰۰۰۰	۲/۹	۵۰	۰
دکل	۴۳۲۰۰۰۰	۲/۴۵	۴۰	۰
۱-۲	۴۳۲۰۰۰۰	۲/۱۸	۲۴/۴	۰
کابل	۴۳۲۰۰۰۰	۰/۴۵۲	۰	۰/۲۲۱
داخلی	۴۳۲۰۰۰۰	۰/۱۷۴	۰	۰/۰۸۵

جهت صحت‌سنجی تحلیل‌های عددی انجام شده، از نتایج تحلیل ارائه شده در پژوهش وانگ و همکاران استفاده شده‌است [۲۰]. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم شکل‌یابی ارائه شده میزان کشش کابل‌های پل در هر گام ساخت و تغییر مکان انتهایی عرشه نصب شده ارائه شده‌است. از این‌رو جهت صحت‌سنجی تحلیل‌های حین ساخت صورت‌گرفته، کابل‌های نصب شده در هر گام به مقدار کشش کابل‌های ارائه‌شده در پژوهش وانگ کشیده شده و میزان تغییر مکان انتهایی عرشه با پژوهش مرجع مقایسه گردیده‌است (جهت مشاهده اطلاعات تکمیلی به شکل ۱۰ پژوهش مرجع رجوع شود). در جدول ۲ مقایسه نتایج بدست‌آمده جهت صحت‌سنجی ارائه شده‌است.

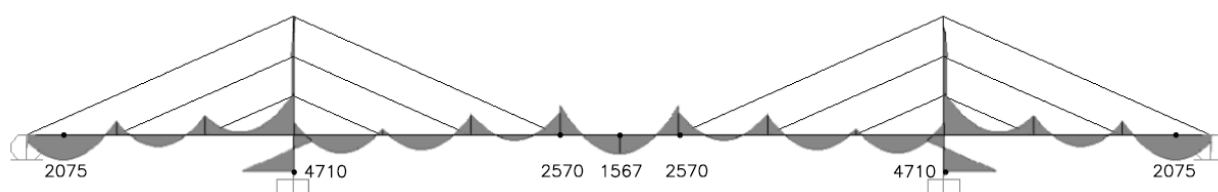
جدول ۲: مقایسه تغییرشکل‌های بدست آمده ناشی از تحلیل حین ساخت پژوهش مرجع [۲۰] و حاضر

مرحله ساخت	شماره کابل	میزان کشش اعمال شده (ton)	تغییر مکان انتهای عرشه (سانتی‌متر)		نسبت
			پژوهش حاضر	مدل مرجع	
۳	۳-۶	۳۶۹	۰/۷۹	۰/۷۷	۱/۰۲۵
	۳-۷	۳۶۹			
	۳-۶	۸۳۰			
	۳-۷	۸۳۰			
۵	۴-۸	۴۹۸	۱/۶۰	۱/۶۵	۰/۹۷
	۴-۹	۴۹۸			
	۳-۶	۹۲۱			
	۳-۷	۹۲۰			
	۴-۸	۱۱۳۸			
	۴-۹	۱۱۱۰			
۸	۵-۱۰	۱۱۲۱	۴/۲	۴/۰۴	۱/۰۴
	۵-۱۱	۱۱۳۷			

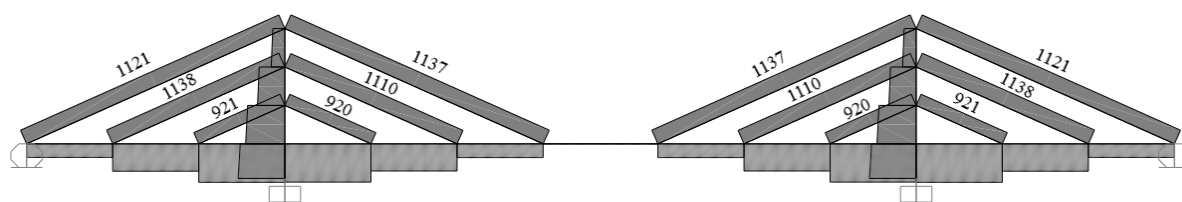
در ۰ تغییرشکل تنظیم شده پل تحت کشش کابل‌ها و نیروهای وارده به پل ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد هدف طراحی پل مورد نظر تنظیم تغییرشکل صفر برای عرشه پل بوده است. این هدف طراحی می‌توانست به هر روش دیگری که در مقدمه ذکر شد صورت پذیرد و در روش ساخت ارائه شده در این پژوهش تاثیری نخواهد داشت. در ۰ و ۰ نمودار لنگر خمشی و نیروی محوری اعضای پل تحت اثر کشش اولیه کابل‌ها و بارهای وارده بر پل مشاهده می‌گردد. همچنین شکل ۱۰ و ۱۱ مدهای اول و دوم سازه و دوره تناوب‌های آن‌ها را نشان می‌دهد.



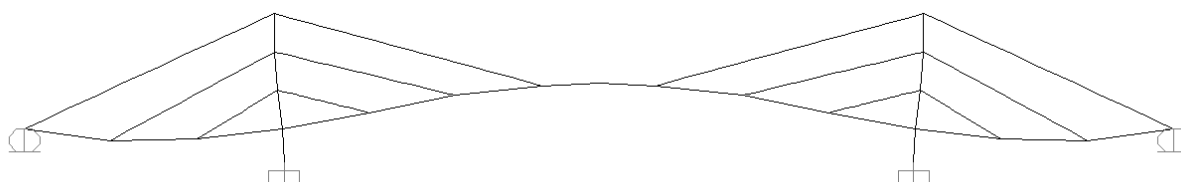
تغییرشکل قائم پل تحت کشش اولیه کابل‌ها و بارهای وارده (cm)



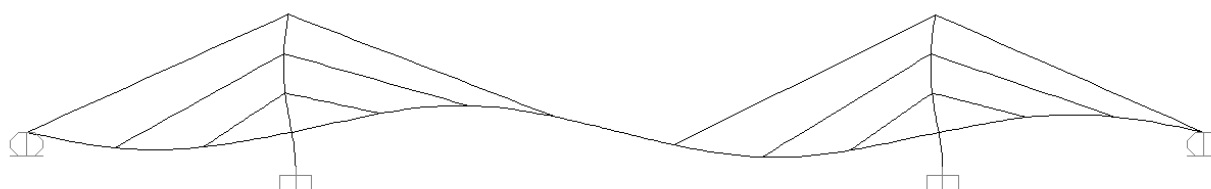
لنگر خمشی پل تحت کشش اولیه کابل‌ها و بارهای وارده (ton.m)



نیروی محوری پل تحت کشش اولیه کابل‌ها و بارهای وارده (ton)



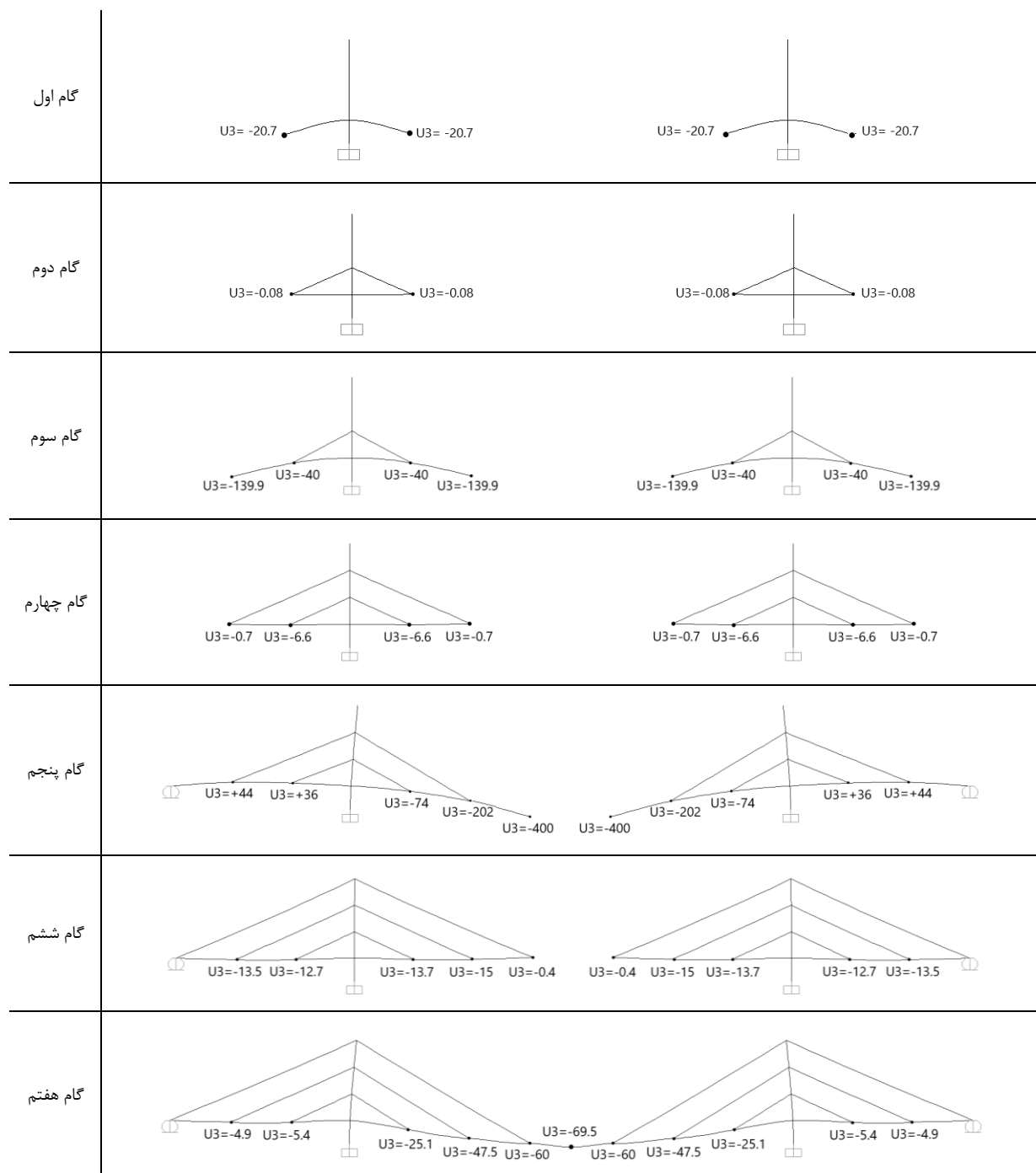
مد اول سازه (T=2.57 sec)



مد دوم سازه (T=2.25 sec)

۴- تحلیل روش ساخت پیشنهادی

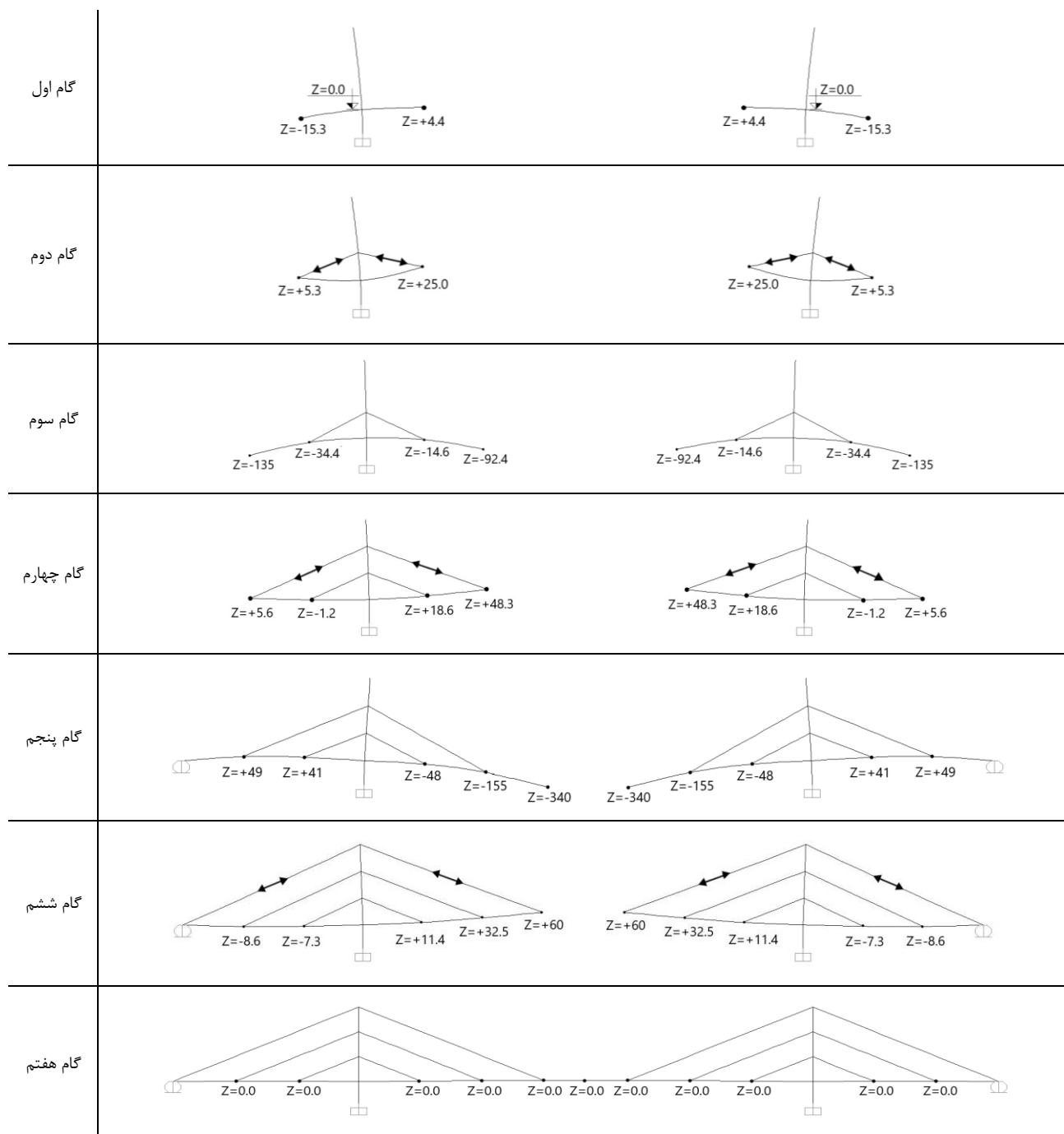
همانطور که در روندنمای روش پیشنهادی ذکر گردید، پس از تنظیم نیروی کشش کابل‌ها و طراحی اعضای پل، می‌بایست با استفاده از یک تحلیل مراحل ساخت میزان خیز منفی مورد نیاز جهت ساخت پل را بدست آورد. جهت برپایی پل مورد نظر ۷ مرحله تحلیل تعریف شده‌است. در هر مرحله پس از نصب قطعه عرشه، کابل‌های اتصال انتهای عرشه به دکل نصب شده و تا حدی کشیده می‌شوند که تغییرمکان سر عرشه به صفر برسد. در ادامه فرآیند گام به گام تحلیل مراحل ساخت صورت گرفته و تغییرشکل قطعه نصب شده تحت بارهای وارده به آن ارائه شده‌است.



نتایج تحلیل مراحل ساخت جهت محاسبه خیز منفی مورد نیاز (cm):

همانگونه که مشاهده می‌شود، تغییرمکان دو سر طره پل با یکدیگر یکسان بوده و قطعه آخر عرشه (قطعه کلید)، دچار مشکلی جهت کارگذاری نخواهد شد و بدون اعمال نیروی اولیه اضافی به این قطعه، مطابق طول قطعه برش خورده کار گذاشته می‌شود. همچنین با توجه به وزن و بارهای وارده بر روی قطعه آخر، تغییرشکل پل در گام آخر برابر صفر نشده و پروفیل هندسی پل با طرح هندسی مورد انتظار متفاوت می‌گردد. از این رو تغییرمکان تمامی گره‌های اتصال کابل به عرشه در گام آخر برداشت شده و به عنوان خیز منفی به پروفیل هندسی اولیه پل اضافه می‌گردد. در ادامه با اعمال خیز منفی محاسبه شده به هندسه اولیه پل، تحلیل مراحل ساخت بار دیگر تکرار شده و این بار در هر گام، کابل اجرا شده مرحله آخر تا حدی کشیده می‌شود که رقوم ارتفاعی انتهای آخرین عرشه بر روی پروفیل خیز منفی محاسبه شده قرار گیرد. در ۰ مراحل ساخت پل و رقوم ارتفاعی عرشه پل در هر مرحله نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود

در صورت اعمال خیز منفی محاسبه شده در ساخت عرشه و هنگام کشش کابل‌ها حین نصب، تغییر شکل نهایی پل برابر صفر و پروفیل هندسی مورد نیاز خواهد شد. شایان ذکر است با توجه به وجود خطاهای حین ساخت و همچنین خطاهای محاسبات خیز امکان تغییر جزئی در پروفیل نهایی پل وجود دارد. این موضوع در ساخت کلیه سازه‌ها وجود دارد و از آنجا که مقادیر خیزهای منفی نسبت به هندسه سازه خیلی کوچک می‌باشند، تاثیری در رفتار پل نخواهند داشت. در روش پیشنهادی، کشش کابل‌ها فقط در یک مرحله و پس از نصب کابل‌ها انجام می‌شود و در انتهای ساخت نیازی به تنظیم مجدد کشش کابل‌ها جهت رسیدن به حالت هدف محاسباتی نمی‌باشد. در عین حال با روش ارائه شده می‌توان با دقت مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌های پیشین پل را بصورت مرحله‌ای اجرا نمود و در نهایت بدون تغییر در سختی و مقاومت پل به هندسه مدنظر رسید.

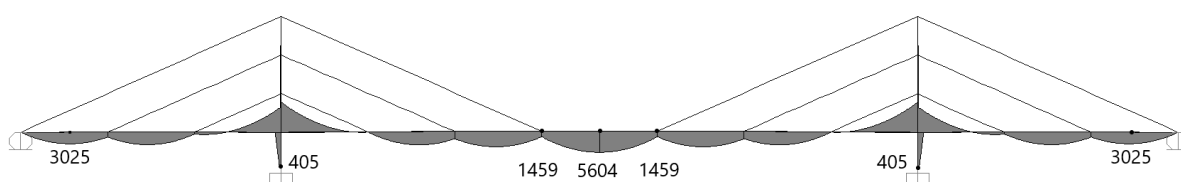


رقوم ارتفاعی عرشه تحت تحلیل مراحل ساخت روش پیشنهادی (cm)

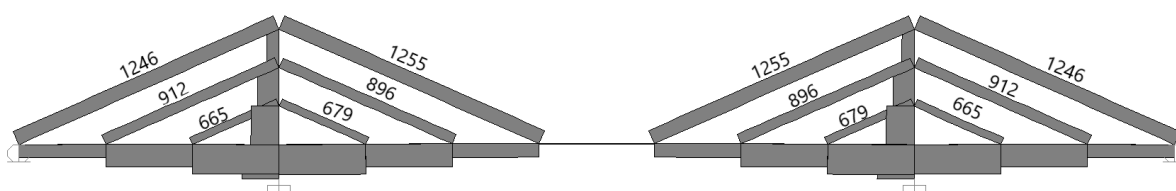
در ۰ و ۰ نمودار لنگر خمشی و نیروی محوری پل تحت کشش اولیه کابل‌ها و بارهای وارده پس از تحلیل مراحل ساخت ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان لنگرها و نیروهای محوری وارده به سازه با میزان نیروهای تنظیم شده جهت طراحی (۰ و ۰) متفاوت است. همان گونه که در مقدمه نیز اثبات گردید، تغییر نیروهای داخلی سازه نسبت فرضیات طراحی، تا مادامی که این تغییرات ناشی از اثرات خود متعادل همچون کشش اولیه کابل‌ها باشد، تاثیری در مقاومت نهایی، سختی و حد بار شیکدان سازه نداشته و نگرانی بابت تغییر شکل‌ها و مقاومت کلی سازه وجود ندارد. البته با توجه به آن که کابل‌ها دارای شکل پذیری کافی نمی‌باشند و شکست تدریجی را تجربه خواهند کرد، می‌بایست کنترل گردد که نیروی ایجاد شده در کابل‌ها از حد مقاومت نهایی آن‌ها بیشتر نگردد. همچنین با توجه به از بین رفتن سختی کابل‌ها تحت نیروهای فشاری و کاهش سختی آن‌ها در حد نیروهای کششی کم، حداقل نیروی موجود در کابل‌ها نیز می‌بایست کنترل گردد. همان گونه که در بخش ۱-۲-۱ نشان داده شد تنش‌های کششی کابل‌ها می‌بایست مابین محدوده 0.2Fu تا 0.9Fu باشد. جدول ۳ محدوده مجاز نیروی کششی کابل‌ها در انتهای فرایند ساخت را نشان می‌دهد.

جدول ۳: محدوده مجاز نیروی کششی کابل‌ها در انتهای فرایند ساخت

	تنش گسیختگی کابل (MPa)	مساحت (m ²)	حداقل کشش مجاز (ton)	حداکثر کشش مجاز (ton)
کابل خارجی	۱۰۰۰	۰/۰۴۲	۹۴۴	۴۳۰۰
کابل داخلی	۱۰۰۰	۰/۰۱۶	۳۶۰	۱۶۰۰

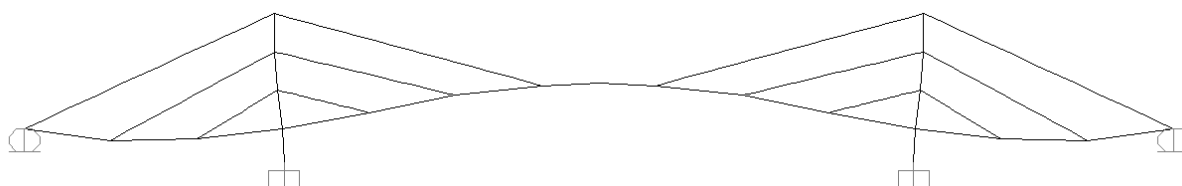


لنگر خمشی پل تحت کشش اولیه کابل‌ها و بارهای وارده پس از تحلیل مراحل ساخت (ton.m):

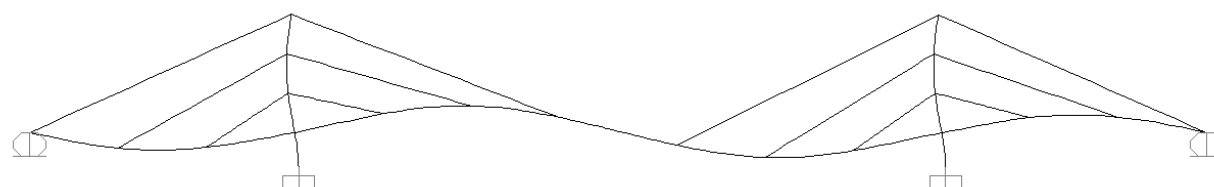


نیروی محوری پل تحت کشش اولیه کابل‌ها و بارهای وارده پس از تحلیل مراحل ساخت (ton):

همان گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، نیروی کششی کابل‌ها در انتهای فرایند ساخت در محدوده مجاز فرض شده قرار گرفته است. از این رو نگرانی بابت شکست ترد کابل‌ها و یا کاهش زیاد سختی کابل‌ها ناشی از کشش کم در آن‌ها وجود نخواهد داشت. در ادامه مدهای اول و دوم سازه و دوره تناوب‌های آن‌ها پس از اجرای روش مراحل ساخت ارائه شده نشان داده شده است.



: مد اول سازه (T=2.53 sec)



: مد دوم سازه (T=2.35 sec)

با مقایسه دوره تناوب سازه پس از انجام تحلیل مراحل ساخت پیشنهادی (شکل ۱۶ و ۱۷) و دوره تناوب سازه با کشش کابل‌های بهینه شده جهت طراحی سازه (شکل ۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌شود که دوره تناوب مود اول سازه حدود ۱/۵ درصد و دوره تناوب مود دوم حدود ۴ درصد تغییر کرده‌اند. بنابراین روش پیشنهادی جدید علی‌رغم دستیابی به نیروهای داخلی متفاوت با فرضیات طراحی، مقاومت و سختی کلی سازه را تحت تاثیر قرار نداده و بدون نیاز به تنظیم مجدد کشش کابل‌ها، پروفیل هندسی مورد نیاز پل را در انتهای ساخت ارائه می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی روش‌های ساخت پل‌های کابلی موجود و ارائه روشی جدید جهت ساخت پل‌های کابلی پرداخته شده‌است. در این راستا اثرات تغییرات کشش کابل‌ها بر مقاومت، سختی و حد شیکدان سازه به صورت تئوری بررسی شده‌است. همچنین مدل‌های تحلیلی دوبعدی از یک پل کابل‌ایستا تهیه و تحت اثر تحلیل غیرخطی استاتیکی قرار گرفته و روش پیشنهادی ارائه شده جهت ساخت پل‌های کابل‌ایستا بر روی آن مورد بررسی قرار گرفته‌است. بر اساس نتایج بدست آمده از این مطالعه و با در نظر گرفتن فرضیات و محدودیتها موجود، از مهمترین نتایج بدست آمده از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- با استناد به قضایای بنیادین تحلیل پلاستیک و قضایای شیکدان و رفتار کابل‌ها در محدود مجاز طراحی، تغییرات کشش کابل‌ها ناشی از اثرات خودمتعادل، تأثیری در سختی الاستیک، مقاومت نهایی و حد بار شیکدان سازه نخواهد داشت. همچنین این اثرات تأثیری در رفتار سازه در رخ دادن پدیده پلاستیسیته متناوب و خستگی کم‌چرخه نخواهند داشت.
- ۲- تحلیل مودال انجام شده بر روی سازه طراحی شده اولیه با کشش کابل‌های بهینه شده و سازه اجرا شده با روش مراحل ساخت پیشنهادی نشان داد که تغییرات دوره تناوب سازه ناشی از تغییرات کشش کابل‌ها کمتر از ۴ درصد می‌باشد.
- ۲- یک روش پیشنهادی اجرای مرحله‌ای پل برای رسیدن به پروفیل تغییرمکان مورد نظر پل بدون نیاز به تنظیم مجدد کشش کابل‌ها ارائه گردید. نتایج تحلیل روش پیشنهادی نشان داد پروفیل نهایی پل دقیقاً منطبق بر پروفیل هندسی مورد انتظار می‌گردد.
- ۳- با توجه به تنظیم تغییرمکان انتهای عرشه در هر مرحله از ساخت، مشکلات نصب قطعه انتهایی (کلید) در روش اجرای پیشنهادی به حداقل می‌رسد.
- ۴- در روش پیشنهادی اجرای پل علی‌رغم متفاوت بودن نیروی کششی کابل‌ها و تنشهای داخلی اعضاء نسبت به مقداری که در مدل محاسباتی اولیه منظور گردیده؛ مقاومت نهایی، سختی و دوام پل تحت تاثیر این موضوع قرار نمی‌گیرد.

- از جمله زمینه‌های تحقیقاتی جهت بهبود و تکمیل روش پیشنهادی ارائه شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- ۱- پیاده‌سازی روش موجود بر روی مدل‌های سه بعدی با اشکال مختلف دکل‌ها، انواع مختلف عرشه‌ها و چیدمان‌های متفاوت کابل‌ها
 - ۲- بررسی اثرات وابسته به زمان حین ساخت و پدیده‌های شکست ترد مانند کمانش، خستگی و ...
 - ۳- پیاده‌سازی روش ارائه شده بر روی دیگر روش‌های ساخت پل‌های کابلی از جمله روش طره یک‌طرفه
 - ۴- بررسی بیشتر محدودیت‌های روش ارائه شده با در نظر گرفتن شکل‌پذیری محدود برای اجزای خمشی

مراجع

- [1] Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negro, J.H.J.O. (2020) Optimization of cable-stayed bridges: A literature survey, *Adv. Eng. Softw.*, 149, p. 102829.
- [2] Wang, P.H., T.C. Tseng, and C.G. Yang, (1993), Initial shape of cable-stayed bridges. *Computers and Structures*. 46(6): p. 1095-1106.
- [3] Chen, D.W., et al.(2000), Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method. *Computers and Structures*. 74(1): p. 1-9.
- [4] Janjic, D., M. Pircher, and H. Pircher,(2002) The unit load method - Some recent applications. *Advanced Steel Structures*, 2: p. 831-837.
- [5] Feng, Y., Lan, C., Briseghella, B. and et al. (2022) Cable optimization of a cable-stayed bridge based on genetic algorithms and the influence matrix method. *Eng. Optim.* 54(1), pp. 20-39.
- [6] Ha, M.-H., Q.-A. Vu, and V.-H. Truong,(2018) Optimum Design of Stay Cables of Steel Cable-stayed Bridges Using Nonlinear Inelastic Analysis and Genetic Algorithm. *Structures*. 16: p. 288-302.
- [7] Fathali, M.A., E. Dehghani, and S.R.H. Vaez.(2020) An approach for adjusting the tensile force coefficient in equivalent static cable-loss analysis of the cable-stayed bridges. *Structures*. Elsevier.
- [8] M. Ravan , A.R. Ghiami Azad (2023) Optimization of cable pre-tensioning force in cable-stayed bridges by simplifying the structural model with a case study of Lali bridge. *Sharif Journal of Civil Engineering*.
- [9] Lozano-Galant, J.A., et al.(2012), Analysis of the construction process of cable-stayed bridges built on temporary supports. *Engineering Structures*, 40: p. 95-106.
- [10] Hassan, M., A. Nassef, and A. El Damatty,(2012) Determination of optimum post-tensioning cable forces of cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 44: p. 248-259.
- [11] Øiseth, O., A. Rönquist, and R. Sigbjörnsson,(2011) Time domain modeling of self-excited aerodynamic forces for cable-supported bridges: A comparative study. *Computers and Structures*, 89(13-14): p. 1306-1322.
- [12] Morgenthal, G., R. Sham, and B. West,(2010) Engineering the tower and main span construction of stonecutters bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 15(2): p. 144-152.
- [13] Fabbrocino, F., Modano, M., Farina, I. and et al. (2017) Optimal prestress design of composite cable-stayed bridges. *Compos. Struct.* 169, pp. 167-172.
- [14] Guo, J., Yuan, W., Dang, X. and et al. (2019) Cable force optimization of a curved cable-stayed bridge with combined simulated annealing method and cubic B-Spline interpolation curves. *Eng. Struct.* 201, p. 109813.
- [15] Reddy, P., J. Ghaboussi, and N.M. Hawkins,(1999) Simulation of construction of cable-stayed bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 4(4): p. 249-257.
- [16] Zhang, J. and F.T.K. Au, (2014) Calibration of initial cable forces in cable-stayed bridge based on Kriging approach. *Finite Elements in Analysis and Design*, 92: p. 80-92.
- [17] Shiradhonkar, S.R. and M. Shrikhande, (2011) Seismic damage detection in a building frame via finite element model updating. *Computers and Structures*, 89(23-24): p. 2425-2438.

- [18] Danai, K., S.A. Civjan, and M.M. Styciekiewicz,(2012) Direct method of damage localization for civil structures via shape comparison of dynamic response measurements. *Computers and Structures*, 92-93: p. 297-307.
- [19] Posenato, D., et al. (2010), Methodologies for model-free data interpretation of civil engineering structures. *Computers and Structures*, 88(7-8): p. 467-482.
- [20] Wang, P.H., T.Y. Tang, and H.N. Zheng, (2004) Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods. *Computers and Structures*, 82(4-5): p. 329-346.
- [21] Wang, Z., Zhang, N., Du, X. and et al. (2021) Multi-objective optimization of cable forces and counterweights for universal cable-stayed bridges. *J. Adv. Transp.*
- [22] Behin, Z. and D.W. Murray,(1992) A substructure-frontal technique for cantilever erection analysis of cable-stayed bridges. *Computers and Structures*, 42(2): p. 145-157.
- [23] Erkmen, R.E. and M.A.(2011) Bradford, Time-dependent creep and shrinkage analysis of composite beams curved in-plan. *Computers and Structures*, 89)1-2 :(p. 67-77.
- [24] Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negro, J.H.J.O. (2015) Cable stretching force optimization of concrete cable stayed bridges including construction stages and time-dependent effects. *Struct. Multidiscip. Optim.* 51,pp. 757-772
- [25] Lozano-Galant, J.A., et al.(2012), Forward Algorithm for the construction control of cable-stayed bridges built on temporary supports. *Engineering Structures*, 40: p. 119-130.
- [26] Lozano-Galant, J.A., et al. (2014), Modifications of the stress-state of cable -stayed bridges due to staggered construction of their superstructure. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9(4): p. 241-250.
- [27] Lozano-Galant, J.A., et al. (2013), Direct simulation of the tensioning process of cable-stayed bridges. *Computers and Structures*, 121: p. 64-75.
- [28] Lozano-Galant, J.A. and J. Turmo,(2014) Creep and shrinkage effects in service stresses of concrete cable-stayed bridges. *Computers and Concrete*, 13(4): p. 483-499.
- [29] Lozano-Galant, J.A. and J. Turmo, (2014) An algorithm for simulation of concrete cable-stayed bridges built on temporary supports and considering time dependent effects. *Engineering Structures*, 79: p. 341-353.
- [30] Song, C., Xiao, R. and Sun, B. (2018) Optimization of cable pre-tension forces in long-span cable-stayed bridges considering the counterweight. *Eng. Struct*, 172, pp. 919– 928.
- [31] Chen, D., H. Xiang, and X. Zheng,(1993) Construction control of PC cable-stayed bridge. *Civil Eng*, 26(1): p. 1-11.
- [32] Lozano-Galant, J.A., D. Xu, and J. Turmo. (2018) Tensioning process update for cable stayed bridges. in *Proceedings of the 4th Congrès International de Géotechnique-Ouvrages-Structures: CIGOS 2017*, 26-27 October, Ho Chi Minh City, Vietnam 4. Springer.
- [33] Granata, M.F., et al. (2012), Construction stages of cable-stayed bridges with composite deck. *Bridge Structures*, 8(3-4): p. 93–106.
- [34] Khan, I., et al. (2015) Temperature effect on continuous modal parameter identification of cable stayed bridge. in *IABSE Conference: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, Geneva, Switzerland, September 2015.
- [35] Wang ,X.Y., et al. (2013) Relationship of cable tension and temperature based on long-term monitoring data on the cable-stayed bridge. in *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publ.
- [36] Fu, Y. and J.T. DeWolf, (2004) Effect of differential temperature on a curved post-tensioned concrete bridge. *Advances in Structural Engineering*, 7(5): p. 385-397.
- [37] Ernst, J., Der (1965) E-Modul von Seilen unter berucksichtigung des Durchhanges. *Der bauingenieur*, 40(2): p. 52-55.
- [38] Baker, J. and J. Heyman, (1969) *Plastic design of frames 1 fundamentals.*: Cambridge University Press.
- [39] Neal, B.G. (1963), *The plastic methods of structural analysis.*: Wiley.
- [40] Dollevoet, R. (2010) , *Design of an Anti Head Check profile based on stress relief*. Enschede: University of Twente Host,.

[41] CSI, "SAP2000 (23.3.1) Integrated Software for Structural Analysis and Design," Computers and Structures Inc., Berkeley, California.