

Design, analysis and optimization of three-piece scissor-type mechanized crossing bridge structure using Design of Experiments (DOE) method

Asghar Mahdian^{1*}, Behrooz Shahriari², Mohammad Kabiri³

1,2- Associate Professor, Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

3- M.Sc., Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT

In this research, the design and optimization of a three-piece mechanized scissor bridge with the ability to pass equipment through natural obstacles up to a distance of 30 meters is discussed. The bridge is modeled with a beam with I section and according to the classification document of loads passing through the bridge, it is subjected to standard static loading and is analyzed by design relationships and Abaqus software with stress and weight criteria. By examining the finite element solution results based on Von Mises criterion, critical areas and unusual deformations are investigated. The design parameters of the bridge are obtained by the central cube method using the method of designing experiments and optimization is done. The results show that to implement the bridge on the M60A1 chassis, the static balance of the chassis must be maintained during the bridging operation, and there are two methods for this. In the first method, the distance of the center of gravity of the chassis from the starting mechanism should be increased to increase the effect of the torque of the chassis compared to the fully open bridge, so the specified auxiliary load of 8 to 10 tons is attached to the chassis as a spare. In the second method, the bridge is designed on a trailer and the launch mechanism is removed from the chassis. The chassis as an auxiliary force in the static balance of the trailer has an effect when bridging. In this case, the loading can be upgraded from the MLC60 category to higher categories by redesigning the model. The optimization of the bridge structure by the method of designing experiments indicates a 30% reduction in the weight of the bridge and achieving a reliability factor of 1.6, and it shows its efficiency in the design of similar bridges.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 June 2024

Revise Date: 18 August 2024

Accept Date: 26 September 2024

Keywords:

Mechanized crossing bridge

Three-piece scissor-type

Design and analysis

Optimization

Design of experiments

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.422639.3252](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.422639.3252)

*Corresponding author: Asghar Mahdian

Email address: a.mahdian@mut-es.ac.ir

طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی سازه پل عبور مکانیزه سه تکه مدل قیچی به روش طراحی آزمایشات (DOE)

اصغر مهدیان^{۱*}، بهروز شهریاری^۲، محمد کبیری^۳

۱- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

۲- کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده

در این تحقیق به طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی پل عبور مکانیزه سه تکه مدل قیچی با قابلیت عبور تجهیزات از موانع طبیعی تا فاصله ۳۰ متر پرداخته می‌شود. مزیت این‌گونه پل‌ها، قابلیت تحرک و راه‌اندازی سریع و پل‌برداری از طرف مقابل است. پل با تیر با مقطع I مدل شده و مطابق با سند رده‌بندی بارهای عبوری از پل، تحت بارگذاری استاتیکی استاندارد قرار گرفته و توسط روابط طراحی و نرم‌افزار آباکوس با معیار تنش و وزن تحلیل می‌شود. با بررسی نتایج حل اجزاء محدود براساس معیار ون میز، نواحی بحرانی و تغییر شکل‌های نامتعارف بررسی می‌شوند. در نهایت پارامترهای طراحی پل با استفاده از روش طراحی آزمایشات، به روش مکعب مرکزی بدست می‌آیند و بهینه‌سازی انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که برای پیاده‌سازی پل بر شاسی M60A1 الزاماً باید تعادل استاتیکی شاسی حین عملیات پل‌گذاری حفظ شود که برای این کار دو روش وجود دارد. در روش اول باید فاصله مرکز ثقل شاسی از مکانیزم راه‌انداز افزایش یابد تا اثر گشتاور شاسی نسبت به پل کاملاً باز، بیشتر شود لذا بار کمکی مشخص شده ۸ تا ۱۰ تن به صورت یدک به شاسی متصل می‌شود. در روش دوم پل بر روی یک تریلر طراحی و مکانیزم راه‌اندازی از شاسی حذف می‌شود. شاسی به عنوان نیروی کمکی در تعادل ایستایی تریلر، هنگام پل‌گذاری تاثیر دارد در این حالت می‌توان با بازطراحی مدل، بارگذاری را از رده MLC60 تا رده‌های بالاتر ارتقا داد. بهینه‌سازی سازه پل به روش طراحی آزمایشات حاکی از کاهش ۳۰ درصدی وزن پل و دستیابی به ضریب اطمینان ۱.۶ بوده و کارایی آن را در طراحی پل‌های مشابه نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سازه پل عبور مکانیزه، پل سه تکه مدل قیچی، طراحی و تحلیل، بهینه‌سازی، طراحی آزمایشات.

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|----------------|---|--------------|---------------|------------------------|-----------------|------------|
| doi: | 10.22065/jsce.2024.422639.3252 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | https://doi.org/10.22065/jsce.2024.422639.3252 | ۱۴۰۴/۰۳/۳۱ | ۱۴۰۳/۰۷/۰۵ | ۱۴۰۳/۰۷/۰۵ | ۱۴۰۳/۰۵/۲۸ | ۱۴۰۳/۰۳/۲۳ |
| | | | | اصغر مهدیان | *نویسنده مسئول: | |
| | | | | a.mahdian@mut-es.ac.ir | پست الکترونیکی: | |

۱- مقدمه

پل‌های قابل حمل و استقرار سریع، برای موفقیت عملیات نظامی و تلاش‌های امداد رسانی در بلایای طبیعی ضروری هستند. این سازه‌ها می‌توانند مسیرهای دسترسی نیروها را در عملیات کشتی به ساحل و عبور از شکاف‌ها فراهم نمایند؛ پس از وقوع بلایای طبیعی، این پل‌ها می‌توانند راه‌های حیاتی جهت دسترسی جوامع آسیب دیده به غذا، آب و تجهیزات پزشکی را فراهم کنند [۱]. با پیش‌بینی بلایای طبیعی و انسانی به میزان ۵ برابر در ۵۰ سال آینده، این فناوری به طور فزاینده‌ای به یک جنبه حیاتی در زیرساخت‌های مهندسی عمران تبدیل خواهند شد [۲]. استفاده از پل‌های مکانیزه در طرح‌های مختلف با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی و نیازهایی جدید به وجود آمده، روند رو به توسعه داشته است. این پل‌ها برای عبور از موانعی همچون گسل‌ها، رودخانه‌ها، شکاف‌های عمیق و حتی پلهایی که قسمتی از آنها تخریب شده، طراحی و به کار گرفته می‌شوند. پل‌های مکانیزه علاوه بر تحرک و تحمل بار بالا، زمان راه‌اندازی بسیار کمتری دارند، در حالی که احداث پل‌های عمرانی از لحاظ هزینه و زمان راه‌اندازی در هر شرایطی امکان‌پذیر نیست. پل‌های نظامی به سه دسته پل-های تهاجمی، پل‌های تاکتیکی و پل‌های دائمی تقسیم‌بندی می‌شوند [۳]. راسل و همکاران [۱] پیشرفت‌های فناوری پل‌های با قابلیت استقرار سریع در قرن گذشته ایالات متحده آمریکا را برای اهداف نظامی یا امداد رسانی در بلایای طبیعی، برجسته کردند. کونورز و همکارش [۴] سیستم‌های پل‌های نظامی موجود در خارج از ایالات متحده آمریکا را جمع‌آوری و ارایه نمودند.

پرکاربردترین نمونه پل‌های تهاجمی، با استفاده از خودروهای زرهی پل‌گذار^۱ (ALVB) نصب می‌شوند. خودروی زرهی پل‌گذار که شماتیک از آن در شکل ۱ نشان داده شده است یک وسیله نقلیه پشتیبانی رزمی است که به عنوان یک زیر گروه از خودروهای نظامی در نظر گرفته می‌شود و برای کمک به استقرار سریع تانک‌ها و نیروهای زرهی از میان موانع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۵۰ اولین نمونه خودروی زرهی پل‌گذار توسط ارتش آمریکا بر اساس تانک M48A2 ساخته شد؛ در این مدل با حذف برجک، شاسی تانک به سیستم راه‌انداز^۲ و پل قیچی^۳ مجهز گردید، اما پس از پایان تولید M48 در سال ۱۹۵۹، شاسی مشابه M60 طراحی و خودروی پل‌گذار M60A1 AVLB جایگزین مدل قبلی گردید. این خودرو که در شکل ۱ نشان داده شده است به پل دو تکه قیچی به وزن بیش از ۱۳ هزار کیلوگرم از جنس آلیاژ آلومینیوم و قابلیت عبور نیروی زرهی از موانع تا فاصله ۶۰ فوت مجهز است.



شکل ۱: خودرو زرهی پل‌گذار مجهز به پل دو تکه قیچی از جنس آلیاژ آلومینیوم و قابلیت عبور نیروی زرهی از موانع تا فاصله ۶۰ فوت [۱]

کلاس‌های بار نظامی^۴ در یکی از استانداردهای ارائه شده توسط ناتو بررسی شده‌اند. در این استاندارد وسایل نقلیه چرخ‌دار و شنی‌دار از کلاس بار نظامی MLC4 تا MLC150 متناظر با وزن خالص خودرو برحسب تن، دسته‌بندی می‌شوند. همچنین مقادیر وزن

¹ Armored Vehicle Launched Bridge (ALVB)

² Launcher

³ Scissor Type Bridge

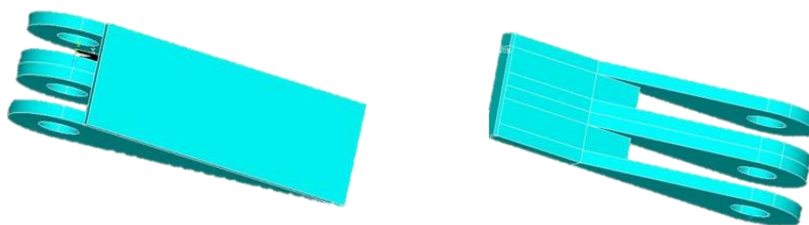
⁴ Military Load Classification (MLC)

ناخالص، تعداد محورها، فاصله محورها، بار محورها، عرض، طول، ابعاد شنی نیز در این استاندارد ارائه شده است [۵]. در پل‌های سه تکه نیز به واسطه افزایش مقاومت خمشی، مقطع I شکل استفاده می‌شود [۶]. با توجه به نیازهای مسئله مبنی بر دهانه پل تا فاصله ۳۰ متر و تحمل بار MLC60، طراحی باید با توجه به محدودیت‌ها انجام شده و طرح‌هایی که در آنها تنش و تغییر شکل‌ها بالا هستند بررسی و بازطراحی گردند. در تحقیق حاضر، به طراحی پل تهاجمی سه تکه بر اساس تحلیل استاتیکی اجزا محدود تحت بارگذاری خودروی شنی‌دار MLC60 پرداخته شده است. اساس این تحقیق، بر شرایط استاندارد بارگذاری بنا نهاده شده و کلیه پاسخ‌ها با توجه به این موضوع به دست آمده است. در این دسته استانداردها در خصوص چگونگی شکل پل بحثی به میان نیامده و این موضوع کاملاً به عهده طراح قرار گرفته است.

بر اساس استانداردهای نظامی، پل‌های عبور نظامی تحت طیف متفاوتی از بارها قرار می‌گیرند. کالنگی و سیدگام [۶] جهت دستیابی به مقاومت خمشی بالا، مدل‌سازی پل را بر اساس هندسه I شکل به دلیل برخورداری از ممان سطح بالاتر انجام دادند. در قدم اول، مدل اولیه پل بر مبنای تحمل بار MLC70 به طول ۳۰ فوت طراحی شده و سپس بارگذاری‌ها مطابق رده‌بندی MLC90 و MLC100 در سه موقعیت، مرکز پل، انتهای پل و یک چهارم پل اعمال شده است. با بررسی نتایج حاصل از تحلیل، با شناسایی موضعی که مقادیر تنش، بالاتر از تنش تسلیم است و انجام فرایند بازطراحی و سپس تحلیل تنش، میزان تنش از مقدار اولیه کمتر می‌شود. سرپیودیا و همکاران [۷] جهت افزایش ایمنی و مقاومت پل تحت بارگذاری ۸۰ تن، اعضای تحت تنش بالا را بازطراحی کرده و با بررسی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای بدست آمده و همچنین تحلیل هارمونیک، نتایج بدست آمده ایمنی سازه را تایید نمودند.

پترو و همکاران [۸] رفتار دینامیکی خودروی زرهی پل‌گذار را مطالعه کردند. در این تحقیق آزمایش‌های ارتعاش اجباری با استفاده از تحریک تکان دهنده برای برانگیختن حالت‌های خمشی عمودی AVLB انجام شد و از ۱۲۰ شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری پاسخ پل استفاده گردید و نتایج با نتایج حاصل از تحلیل المان محدود مقایسه شدند. سیا و همکارش [۹] تحلیلی را برای پیش‌بینی عمر خستگی خودروی زرهی پل‌گذار برای بارهای کلاس بار نظامی 70 و ۸۰ انجام داد. عمر خستگی با استفاده از رویکردهای تنش-عمر، کرنش-عمر و مکانیک شکست برآورد شد. تجزیه و تحلیل بر روی ۴ مؤلفه مختلف متمرکز شد، زیرا این مؤلفه‌ها بالاترین مقدار تنش را در طول آزمایش MLC 70 نشان دادند. رویکرد تنش-عمر محافظه‌کارانه‌ترین تخمین را از عمر خستگی ارائه کرد.

گارسیا و لامبرجت [۱۰] جهت بررسی رفتار پل ۶۰ فوتی تحت بارگذاری MLC60 از مدل اجزای محدود با المان SR4 استفاده شده است. بر اساس تحلیل مدل، با معیار ون میزز، بیشترین مقدار تنش در قسمت وسط پل و بین‌های مرکزی به دست می‌آید. با بررسی نتایج، تنش‌ها چندان تحت تاثیر سرعت قرار نمی‌گیرند و سرعت تنها بر خستگی و طول عمر پل تاثیر دارد. همچنین به دلیل اینکه عبور خودروهای زرهی از پل باید با سرعت پایین و بدون ترمزگیری و شتاب‌گیری باشد، تغییرات دینامیکی نیرو بسیار ناچیز و ثابت لحاظ شده و در نتیجه مسئله به صورت استاتیکی تحلیل شده است. همچنین بر طبق نتایج بیان شده توسط سوشیر و اوله [۱۱] با بررسی تحلیل خستگی پل، بین‌های مرکزی و محل اتصال مدول‌های پل تحت تاثیر بیشترین تنش قرار دارند. در نهایت مطابق شکل ۲، اتصالات، بازطراحی شده و اثرات تنش کاهش می‌یابد.



شکل ۱: مدل اتصال اولیه پل (سمت راست) و اتصال بهینه شده جهت کاهش اثرات تنش اتصالات مرکزی پل (سمت چپ) [۱۱]

تقاضا برای بهبود و پیشرفت در فناوری پل‌های با قابلیت استقرار سریع، پرداختن به طراحی و بهینه‌سازی این پل‌ها را در ادبیات مهندسی عمران ضروری ساخته است. در تحقیقات پیشین، بهینه‌سازی و کاهش وزن سازه پل، اغلب براساس حذف بخش‌هایی از اجزای

دارای تنش بسیار کم و انجام فرآیند سعی و خطا یا استفاده از نرم افزارهای دارای قابلیت بهینه سازی انجام گرفته است. با توجه به پیشرفت روزافزون الگوریتم های بهینه سازی مدرن و روش های نوین بهینه سازی نظیر روش های ابتکاری، فراابتکاری و همچنین روش طراحی آزمایشات^۵ (DOE)، استفاده از این روش ها می تواند در دستیابی به جوابی دقیق تر، حصول جواب با سرعت بیشتر و همچنین اطمینان از رسیدن به جواب بهینه مطلق و عدم گیرافتادن در جواب های محلی، بسیار سودمند باشد. در این تحقیق به طراحی، تحلیل و بهینه سازی پل عبور مکانیزه سه تکه مدل قیچی به روش طراحی آزمایشات پرداخته می شود. با توجه به زمان بر بودن و دقت پایین فرآیند طراحی با سعی و خطا و همچنین محدودیت های نرم افزارهای موجود، در این پژوهش با استفاده از روش بهینه سازی طراحی آزمایش ها که یک روش تحلیل آماری با دقت مناسب و زمان کم است، سازه پل عبور مکانیزه سه تکه مدل قیچی، مورد بهینه سازی قرار می گیرد. با استفاده از این روش یک شیوه جدید برای بهینه سازی سازه پل عبور مکانیزه سه تکه مدل قیچی ارائه می شود که قابلیت کاربرد جهت طراحی بهینه سازه پل های مشابه را دارد.

۲- روش تحقیق

با توجه به الزامات مساله از جمله طول پل و قیود جانمایی روی تانک پل گذار، پل، سه تکه و بر پایه شاسی خودروی زرهی پل گذار M60A1 AVL B طراحی می شود. این خودرو در حال حاضر با وزن ۴۲ تن، مجهز به پل دو تکه قیچی به وزن ۱۳/۳ تن می باشد که طول آن در حالت کاملا باز حدود ۲۲ متر را می پوشاند [۱۲]. پل سه تکه مورد نظر در این پروژه، مطابق شکل ۳ باید شکاف هایی تا فاصله ۳۰ متر و بر اساس استاندارد حداکثر وزن تانک را برابر با ۵۴/۴۳ تن، نتیجه بدهد.

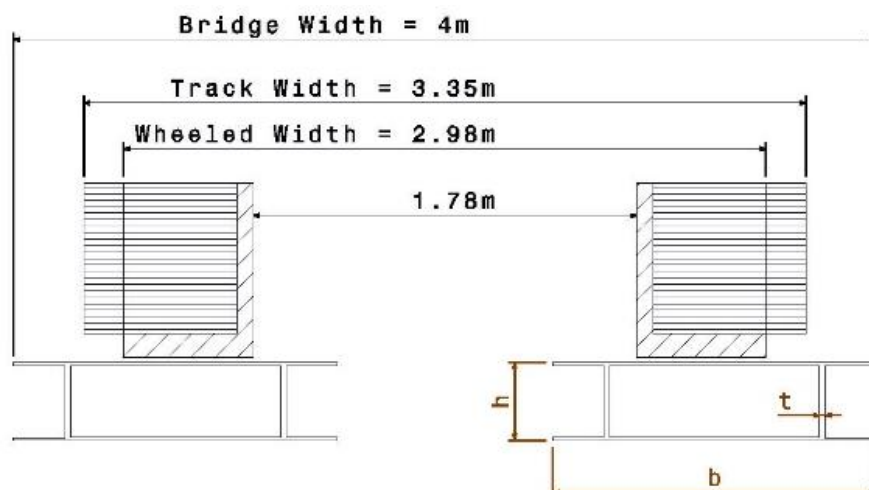
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|------------------|------------------------------------|--------------------------|--|---|--|
| MLC | Tracked Vehicles | Wheeled Vehicles | | | | |
| | | Axle Load [Tonnes] and Spacing [m] | Maximum Single Axle Load | Tire Load and Nominal Ground Contact Width [m] | Axle Load and nominal Ground Contact Length [m] | Axle Wheel Spacing and nominal Ground Contact Width [m] ⁽¹⁾ |
| 50 | | | | | | |
| 60 | | | | | | |

شکل ۲: استاندارد متریک ابعاد هندسی ورده بندی بار نظامی MLC60 [۵]

وزن پل سه تکه (W_3)، با توجه به وزن تانک و مقیدات دیگر به طور تقریبی برابر ۲۰ تن، تخمین زده می شود. با توجه به فولادهای موجود در کشور و هزینه تمام شده پل، حداکثر تنش، به میزان ۱۸۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می شود.

بر اساس استاندارد، موقعیت قرارگیری چرخ های دو خودروی شنی دار و چرخ دار از رده ۶۰، مطابق شکل ۴ است. بر این اساس مقدار پهنای کل پل ۴ متر، پهنای ماژول های پل (مقدار b) برابر ۱/۵ متر و ضخامت ورق (t) و ارتفاع (h) به عنوان مجهولات طراحی، در نظر گرفته می شوند.

⁵ Design of Experiments



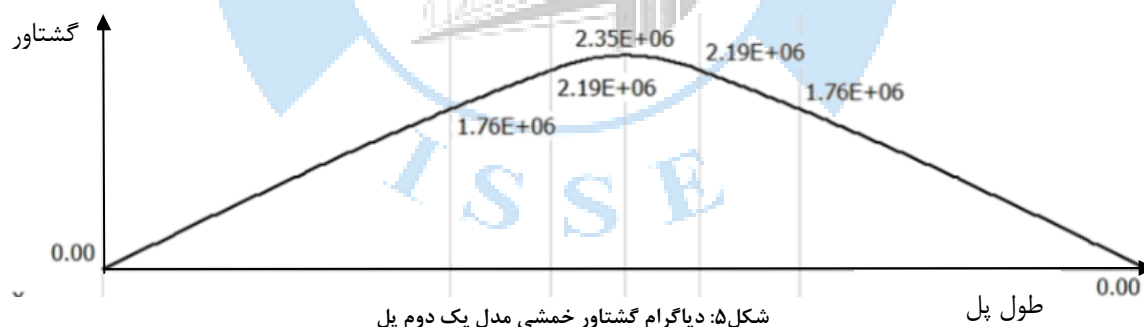
شکل ۳: موقعیت قرارگیری خودروهای شنی دار و چرخ دار روی پل

طبق شکل ۵، بیشترین گشتاور در ناحیه مرکزی پل به مقدار ۲۳۵۰ کیلونیوتن متر به دست می‌آید. باتوجه به داده‌های فوق، با استفاده از معادلات تنش خمشی و وزن مازول پل، ضخامت (t) و ارتفاع (h) بدست می‌آیند.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \rightarrow \sigma = \frac{(235 \times 10^4) \times c}{I} \quad (1-1) \quad (1)$$

$$W = mg = \rho l Ag \quad (2-1) \quad (2)$$

پارامترها و یکای محاسباتی مورد استفاده در تحقیق، بر اساس جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۵: دیاگرام گشتاور خمشی مدل یک دوم پل

جدول ۱: پارامترها و یکای محاسبات

| متغیر/ پارامتر - واحد | علائم | متغیر/ پارامتر - واحد | علائم |
|---------------------------------|----------|-----------------------------|--------|
| تنش - مگاپاسکال | σ | وزن - نیوتن | W |
| فاصله تا تار خنثی - متر | c | جرم - کیلوگرم | m |
| ارتفاع مازول - متر | h | چگالی - کیلوگرم بر متر مکعب | ρ |
| گشتاور خمشی - نیوتن متر | M | طول مازول - متر | l |
| ممان اینرسی سطح - متر به توان ۴ | I | سطح مقطع مازول - متر مربع | A |
| پهنای مازول - متر | b | ضخامت ورق - متر | t |

در معادله (۱) مقدار c برابر $\frac{h}{2}$ و σ برابر ۱۸۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. با صرف نظر از بعضی جملات در رابطه ۳ و حذف جمله $(\frac{1}{6} \times b \times t^3)$ ممان اینرسی سطح نیز به صورت ساده‌تر به صورت معادله (۴) مد نظر قرار می‌گیرد.

$$I = \left(\frac{1}{6} \times b \times t^3 + \frac{b \times t \times h^2}{2} \right) + \left(\frac{1}{6} \times t \times h^3 \right) \quad (3-1) \quad (3)$$

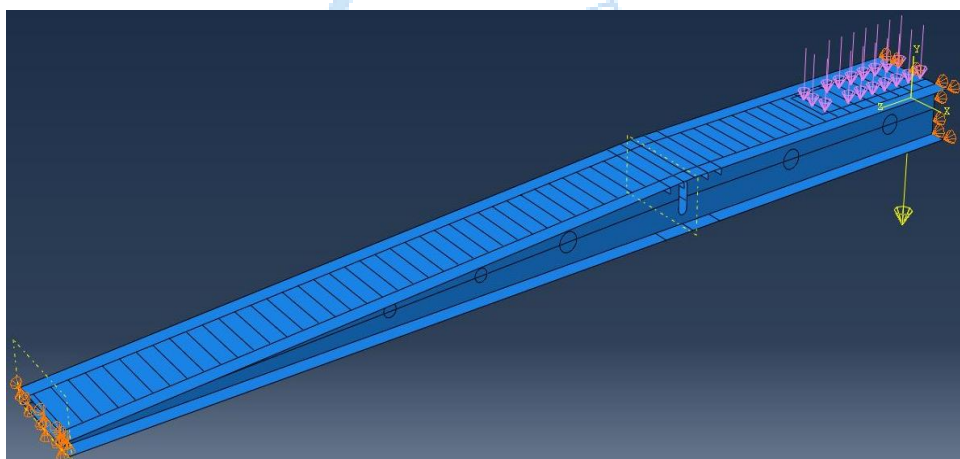
$$I = \left(\frac{1}{6} \times t \times h^3 + \frac{b \times t \times h^2}{2} \right) \quad (4-1) \quad (4)$$

از آنجا که در پل سه تکه، بیشترین گشتاور و تنش به ماژول وسط وارد می‌شود، معیار محاسبات و طراحی قرار می‌گیرد. با توجه به چیدمان اولیه، جرم این ماژول ۴ هزار کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود، بنابراین با جایگذاری پارامترها در معادلات (۱) و (۲) می‌توان نوشت:

$$\frac{235 \times 10^4 \times \frac{h}{2}}{\left(\frac{1}{6} \times t \times h^3 + \frac{b \times t \times h^2}{2} \right)} = 18 \times 10^7 Pa \quad (5-1) \quad (5)$$

$$t = \frac{4000}{157 \times 10^3 (1.5 + h)} \quad (6-1) \quad (6)$$

با حل دستگاه معادلات فوق مقادیر ضخامت (t) ۱۲ میلیمتر و ارتفاع (h) ۶۴ سانتیمتر بدست می‌آیند. حال با مشخص شدن پارامترهای طراحی، به دلیل ماهیت تقارن پل، مدل پوسته‌ای و یک‌چهارم پل در نرم‌افزار آباکوس (شکل ۶) با ماده مورد استفاده فولاد ST52 مطابق با خواص مکانیکی ارائه شده در جدول ۲ پایه‌گذاری و با انتساب المان مربعی S4R به مدل، فرایند تحلیل استاتیکی آن تحت بارگذاری MLC60 اجرا می‌شود. با هدف المان‌بندی بهتر، مدل با ابزار مناسب پارتیشن‌بندی شده و شرایط تقارن در راستای طولی و عرضی نیز در مدل پیش‌بینی شده است.



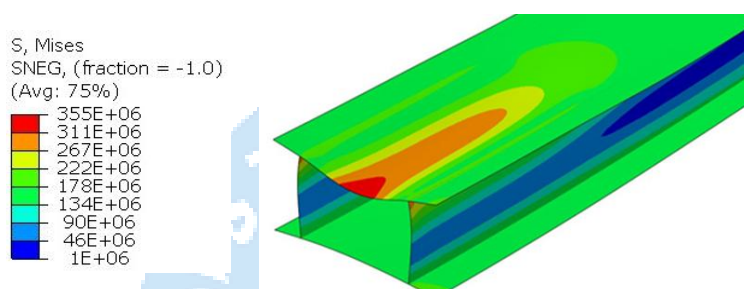
شکل ۴: مدل یک‌چهارم پل تحت بارگذاری خودروشنی‌دار در موقعیت وسط پل

جدول ۱: خواص مکانیکی فولاد ST52 [۵]

| ماده | تنش تسلیم (MPa) | مدول یانگ (MPa) | ضریب پواسون | چگالی (Kg/m ³) |
|--------------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------------------|
| Steel S355/ST52 | ۳۵۵ | ۲۱۰ | ۰.۲۹ | ۷۸۵۰ |

۳- بحث بر روی نتایج

با بررسی حل اجزا محدود توسط نرم افزار آباکوس، انتظار می رود تغییر شکل های ناشی از بارگذاری به خصوص ماکزیمم تنش در قسمت میانه پل با مقدار $\sigma = 180MPa$ همخوانی داشته باشد. شکل ۷ توزیع تنش در قسمت وسط پل را نمایش می دهد. در ورق بالا، در محل اعمال فشار شنی، به واسطه خمش موضعی، تنش و تغییر شکل بسیار بالایی ایجاد شده است، در حالی که در ورق پایین، توزیع تنش متناسب با محاسبات اولیه است.



شکل ۷: توزیع تنش و تغییر شکل در قسمت مرکزی پل

جرم اندازه گیری شده مدل (یک چهارم) در نرم افزار آباکوس، برابر با ۵۶۰۳ کیلوگرم به دست می آید. با این توصیف، مدل کامل پل بدون تاثیر سیستم های جانبی مانند سیستم هیدرولیک و سایر زیر سیستم ها، حداقل جرمی معادل ۲۲۴۱۲ کیلوگرم پیدا خواهد کرد. این وزن بالا برای پل موجب افزایش گشتاور پل نسبت به گشتاور وزن خودرو هنگام عملیات پل گذاری و پل برداری شده و آن را از حالت تعادل ایستایی خارج می نماید. شکل ۱ به خوبی بیانگر این موضوع می باشد.

مطابق رابطه ۳، کمیت ضخامت (t) بیشترین اثر را در وزن مدل دارد. به عبارت بهتر با کاهش ضخامت (t)، میزان وزن را کاهش داد اما تنش ایجاد شده افزایش می یابد. بر اساس تجربه برای افزایش مقاومت سازه در برابر تنش و تغییر شکل های ایجاد شده نیز میتوان از تمهیداتی همچون تقویت کننده ها و تیغه های تقویتی نصب شده زیر ورق بالایی و نصب لوله (تیر) های تقویتی در قسمت داخل پل به منظور افزایش مقاومت جان تیر در مقابل تغییر شکل جانبی استفاده نمود. بنابراین مقدار ضخامت (t)، ۸ میلیمتر در نظر گرفته می شود. برای محاسبه ارتفاع (h)، با استفاده از ممان اینرسی مدل اولیه و مشخص بودن ضخامت جدید (t)، مقدار ارتفاع (h) ۷۸ سانتیمتر به دست می آید.

رابطه (۸) با توجه به رابطه (۴) نوشته شده و به وسیله آن با شرط ثابت بودن ممان اینرسی در دو حالت می توان h_2 را به دست آورد.

$$I_1 = I_2 = I \rightarrow \left(\frac{b \times t_1 \times h_1^2}{2}\right) + \left(\frac{1}{6} \times t_1 \times h_1^3\right) = \left(\frac{b \times t_2 \times h_2^2}{2}\right) + \left(\frac{1}{6} \times t_2 \times h_2^3\right) \quad (۸)$$

$$\left(\frac{1.5 \times 0.012 \times 0.64^2}{2}\right) + \left(\frac{1}{6} \times 0.012 \times 0.64^3\right) = \left(\frac{1.5 \times 0.008 \times h_2^2}{2}\right) + \left(\frac{1}{6} \times 0.008 \times h_2^3\right)$$

$$h_2 = 0.78m$$

۴- بهینه‌سازی پل به روش طراحی آزمایش‌ها

هدف از بهینه‌سازی، دستیابی به نتیجه‌ای مطلوب در یک فرایند با فاکتورهای مشخص می‌باشد. از این تکنیک جهت کاهش زمان، هزینه و افزایش کیفیت استفاده می‌شود. در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی مدل طراحی شده، از روش طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌شود. طراحی آزمایش‌ها یک روش تحلیلی آماری برای مدل‌سازی و بررسی اثر متغیرهای ورودی یک فرآیند بر یک یا تعدادی از متغیرهای خروجی که تابع ناشناخته‌ای از متغیرهای ورودی هستند، می‌باشد [۱۳].

باید توجه داشت بعد از طراحی و انجام آزمایش‌ها، برای تحلیل داده‌ها از روش آنالیز واریانس استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از محاسبه واریانس و آزمون فرضیه‌ها با روش آزمون طرح عاملی^۶، فاکتورهای مؤثر و همچنین اثر تعامل‌های مهم مشخص می‌شوند. در روش طراحی آزمایش‌ها زمانی که تعداد فاکتور (ورودی)های مورد بهینه‌سازی زیاد باشد، تعداد آزمایش‌ها نیز بیشتر می‌گردد و به تبع آن زمان و هزینه بیشتری برای حل مسئله باید صرف گردد، به همین دلیل در این روش برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و زمان، ابتدا از طریق روش غربال‌گری، فاکتورهای مؤثر و یا فاکتورهایی که بیشترین اثر بر پاسخ (خروجی)های مسئله دارند شناسایی و سپس بهینه‌سازی مسئله با تعداد آزمایش‌ها کمتری انجام می‌پذیرد. از جمله روش‌های غربال‌گری می‌توان به روش فاکتوریل کامل و روش پلاکت برمان اشاره کرد. با توجه به این که در این تحقیق عمل بهینه‌سازی بر دو فاکتور ضخامت و ارتفاع تمرکز دارد، نیازی به غربالگری نمی‌باشد. به دلیل حجم بالای محاسبات در تحلیل داده‌ها، نرم‌افزارهای مختلفی برای این روش به وجود آمده که استفاده از آن را آسان نموده است. [۱۴-۱۷]

در این پژوهش از نرم‌افزار مینی‌تب^۷ استفاده شده است. در نرم‌افزار مینی‌تب پس از آنالیز آزمایش‌های طراحی شده، به همراه نتایج، نمودارها و جدول‌هایی ارائه می‌گردد که براساس برخی معیارها، نتایج اعتبارسنجی می‌گردند [۱۴-۱۷]:

- در جدول آنالیز واریانس، اگر مقدار P-Value مربوط به مدل کوچکتر از ۰/۰۵ نتایج مناسب و مورد تایید است.
 - در جدول خلاصه مدل، سه نوع RSquared یا ضریب هبستگی وجود دارد که معیاری برای بیان برازش مدل با داده‌های حاصل از آزمایش‌ها است. هر چه مقادیر این ضرایب به یک نزدیک‌تر باشد، مدل ارائه شده قوی و دقیق‌تر است.
 - برای بررسی درستی فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، نمودارهای باقیمانده که شامل نمودار احتمال نرمال، نمودار هیستوگرام، نمودارهای باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده و زمان است بررسی می‌گردند. در نمودار احتمال نرمال، توزیع مقادیر باید بر روی خط مربوطه یا نزدیک به خط باشند، در نمودار هیستوگرام توزیع مقادیر باید شکلی نزدیک به زنگوله داشته باشند و در نمودارهای باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده و زمان توزیع مقادیر نباید از روند خاصی تبعیت کنند.
- مطابق جدول ۳ اهداف و فاکتورهای مؤثر همراه با محدوده بهینه‌سازی مشخص شده است

جدول ۲: محدوده فاکتورهای بهینه‌سازی

| فاکتور | حد پایین | حد بالا |
|--------|----------|---------|
|--------|----------|---------|

^۶ Factorial design test

^۷ Minitab

| | | |
|---------------------|---------------------|------------|
| ۱۲ میلیمتر (0.012m) | ۸ میلیمتر (0.008m) | ضخامت (t) |
| ۷۸ سانتیمتر (0.78m) | ۶۴ سانتیمتر (0.64m) | ارتفاع (h) |

جدول ۴ آزمایش‌های طراحی شده به روش مکعب مرکزی را نمایش می‌دهد و مدل‌سازی پل بر اساس آن انجام شده است. پل طبق ضخامت و ارتفاع مشخص شده در هر آزمایش در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و نتایج تحلیل تنش و میزان وزن در هر آزمایش در ستون مربوطه ثبت شده است.

جدول ۳: آزمایش‌های مکعب مرکزی جهت مدل‌سازی پل

| آزمایش | ارتفاع (متر) | ضخامت (متر) | وزن (کیلوگرم) | تنش (مگاپاسکال) |
|--------|--------------|-------------|---------------|-----------------|
| ۱ | ۰/۷۱ | ۰/۰۱۰ | ۴۷۸۰ | ۱۷۸ |
| ۲ | ۰/۷۱ | ۰/۰۱۰ | ۴۷۸۰ | ۱۷۸ |
| ۳ | ۰/۶۴ | ۰/۰۰۸ | ۳۷۳۵ | ۲۴۰ |
| ۴ | ۰/۷۱ | ۰/۰۰۸ | ۳۸۲۳ | ۲۱۳ |
| ۵ | ۰/۷۱ | ۰/۰۱۰ | ۴۷۸۰ | ۱۷۸ |
| ۶ | ۰/۷۸ | ۰/۰۱۲ | ۵۸۶۸ | ۱۳۸ |
| ۷ | ۰/۷۱ | ۰/۰۱۰ | ۴۷۸۰ | ۱۷۸ |
| ۸ | ۰/۶۴ | ۰/۰۱۰ | ۴۶۷۰ | ۲۰۰ |
| ۹ | ۰/۷۸ | ۰/۰۱۰ | ۴۸۹۰ | ۱۶۰ |
| ۱۰ | ۰/۷۱ | ۰/۰۱۲ | ۵۷۳۵ | ۱۵۴ |
| ۱۱ | ۰/۷۸ | ۰/۰۰۸ | ۳۹۱۲ | ۱۹۲ |
| ۱۲ | ۰/۶۴ | ۰/۰۱۲ | ۵۶۰۴ | ۱۷۲ |
| ۱۳ | ۰/۷۱ | ۰/۰۱۰ | ۴۷۸۰ | ۱۷۸ |

با بررسی نتایج آنالیز داده‌های آزمایش و مدل ارائه شده برای تنش و وزن پل، معیارهای اعتبار سنجی مورد تایید می‌باشند. مقادیر ضرایب همبستگی وزن و تنش در جدول ۵ نزدیک به یک می‌باشند. مقدار P-Value مدل در آنالیز واریانس جدول ۶ کمتر از ۰/۰۵ و برابر صفر می‌باشند.

جدول ۵: ضرایب همبستگی وزن پل (سمت راست) و ضرایب همبستگی تنش پل (سمت چپ)

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|----------|--------|-----------|------------|
| 0.487950 | 99.98% | 99.96% | 99.79% |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|----------|---------|-----------|------------|
| 0.281475 | 100.00% | 100.00% | 100.00% |

جدول ۶: مقدار P-Value مدل پل در آنالیز واریانس وزن و تنش

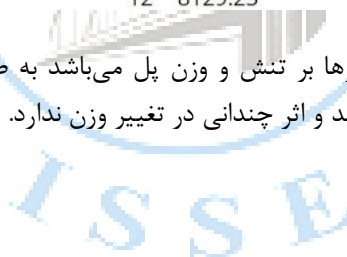
Analysis of Variance

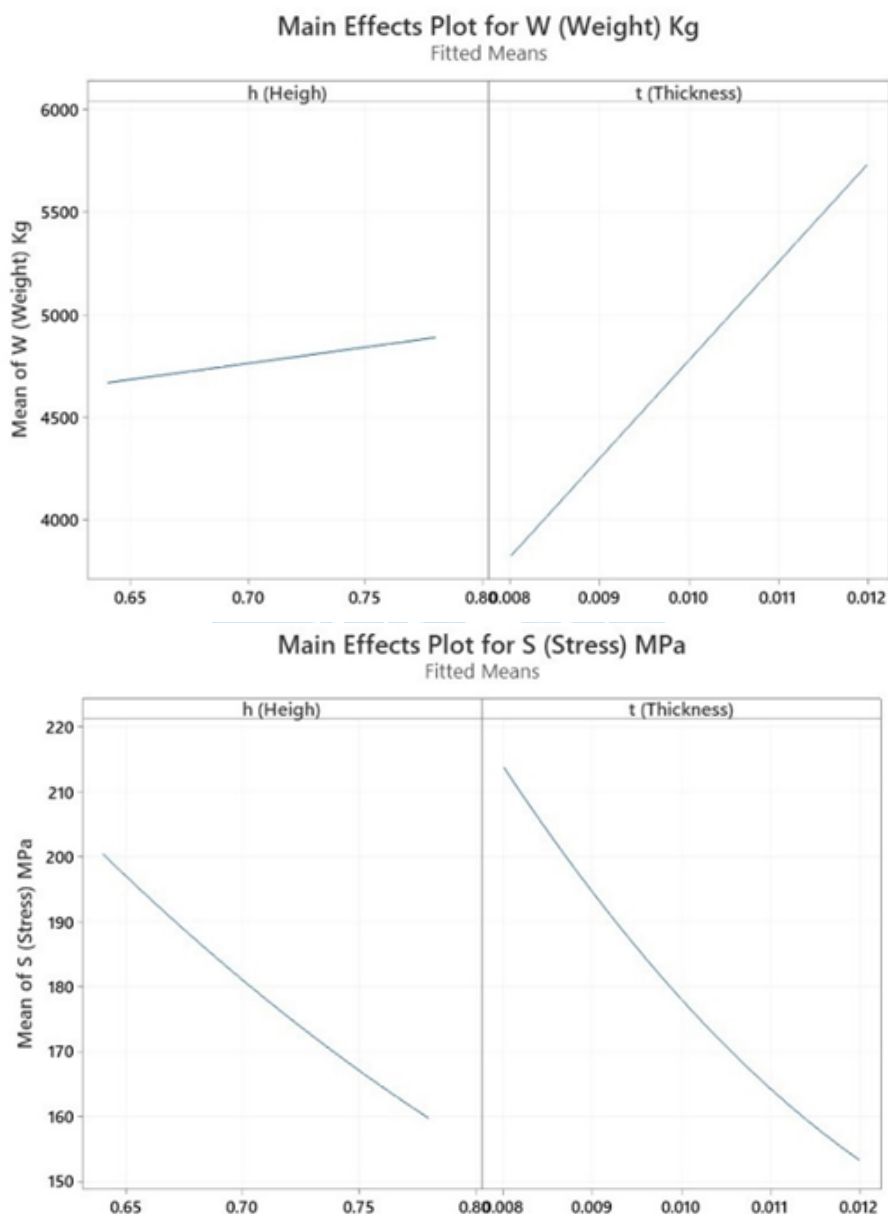
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-----------------------------|----|---------|---------|-------------|---------|
| Model | 5 | 5560242 | 1112048 | 14036009.23 | 0.000 |
| Linear | 2 | 5558348 | 2779174 | 35078073.94 | 0.000 |
| h (Heigh) | 1 | 72820 | 72820 | 919118.79 | 0.000 |
| t (Thickness) | 1 | 5485528 | 5485528 | 69237029.09 | 0.000 |
| Square | 2 | 1 | 1 | 7.38 | 0.019 |
| h (Heigh)*h (Heigh) | 1 | 0 | 0 | 4.57 | 0.070 |
| t (Thickness)*t (Thickness) | 1 | 1 | 1 | 14.19 | 0.007 |
| 2-Way Interaction | 1 | 1892 | 1892 | 23883.53 | 0.000 |
| h (Heigh)*t (Thickness) | 1 | 1892 | 1892 | 23883.53 | 0.000 |
| Error | 7 | 1 | 0 | | |
| Lack-of-Fit | 3 | 1 | 0 | * | * |
| Pure Error | 4 | 0 | 0 | | |
| Total | 12 | 5560242 | | | |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-----------------------------|----|---------|---------|----------|---------|
| Model | 5 | 8127.56 | 1625.51 | 6827.15 | 0.000 |
| Linear | 2 | 7940.83 | 3970.42 | 16675.75 | 0.000 |
| h (Heigh) | 1 | 2480.67 | 2480.67 | 10418.80 | 0.000 |
| t (Thickness) | 1 | 5460.17 | 5460.17 | 22932.70 | 0.000 |
| Square | 2 | 137.73 | 68.87 | 289.23 | 0.000 |
| h (Heigh)*h (Heigh) | 1 | 11.05 | 11.05 | 46.40 | 0.000 |
| t (Thickness)*t (Thickness) | 1 | 83.55 | 83.55 | 350.90 | 0.000 |
| 2-Way Interaction | 1 | 49.00 | 49.00 | 205.80 | 0.000 |
| h (Heigh)*t (Thickness) | 1 | 49.00 | 49.00 | 205.80 | 0.000 |
| Error | 7 | 1.67 | 0.24 | | |
| Lack-of-Fit | 3 | 1.67 | 0.56 | * | * |
| Pure Error | 4 | 0.00 | 0.00 | | |
| Total | 12 | 8129.23 | | | |

نمودارهای شکل ۸، بیانگر اثر اصلی فاکتورها بر تنش و وزن پل می‌باشد به طوری که با افزایش ضخامت، تنش کاهش و وزن افزایش می‌یابد و با افزایش ارتفاع، تنش کاهش می‌یابد و اثر چندانی در تغییر وزن ندارد.





شکل ۵: اثر اصلی فاکتورها بر وزن و تنش پل

اکنون با صدق معیارهای اعتبارسنجی و بررسی میزان اثر فاکتورهای اصلی بر متغیر پاسخ، هدف نهایی، کمینه کردن متغیر پاسخ می‌باشد؛ بنابراین هدف از بهینه‌یابی فاکتورها، کاهش تنش و وزن پل می‌باشد. مقادیر بهینه فاکتورها و پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار طبق جدول ۷ می‌باشد. بنابراین در صورتی که مقادیر ارتفاع ۷۸ سانتیمتر و ضخامت ۸/۶ میلی‌متر باشد، طبق پیش‌بینی نرم‌افزار، مقدار تنش ۱۸۱ مگاپاسکال و وزن ۴۲۰۸ کیلوگرم بدست می‌آید.

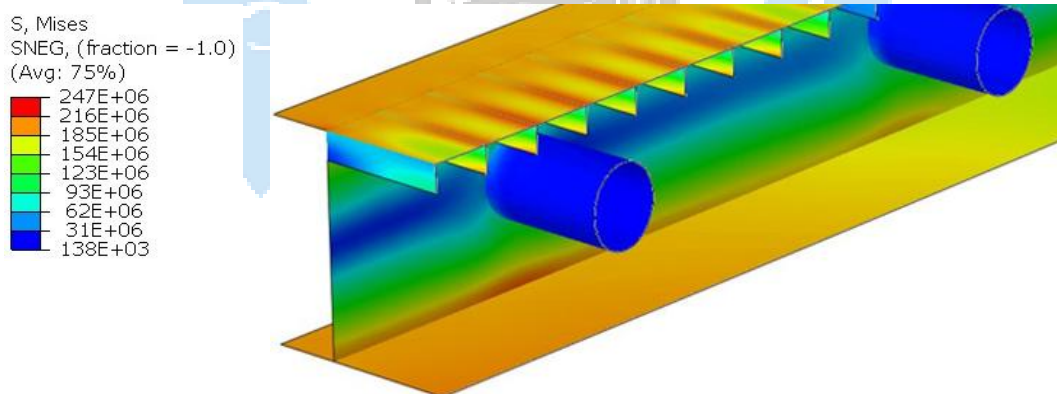
جدول ۷: مقادیر بهینه فاکتورهای موثر بر تنش و وزن پل و پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار

| Solution | h (Height) | t (Thickness) | S (Stress) | W (Weight) | Composite Desirability |
|----------|------------|---------------|------------|------------|------------------------|
| | | | MPa | Kg | |
| | | | Fit | Fit | |
| 1 | 0.78 | 0.0086061 | 180.924 | 4208.54 | 0.671263 |

باتوجه به این که مقدار تنش در ورق‌های جان تیر کمتر می‌باشد، مقدار ضخامت این ورق ۵ میلیمتر و همچنین به دلیل این که ضخامت ورق نمی‌تواند به صورت اعشار (۸/۶ میلیمتر) باشد، ورق بالایی و پایینی ۸ میلیمتر در نظر گرفته می‌شوند، از طرفی با نصب تقویت کننده‌ها در سازه، نتایج تحلیل مدل بهینه شده در شکل ۹ بیانگر کاهش تنش و تغییر شکل‌های نامتعارف در سازه می‌باشد. جدول ۸ نتایج تحلیل مدل اولیه (بهینه نشده) و مدل نهایی (بهینه شده) ارائه می‌دهد، با مقایسه مقادیر به دست آمده، وزن مدل نهایی به مراتب ۳۰ درصد کاهش یافته و ضریب اطمینان سازه مدل بهینه ۱/۶۵ می‌باشد. رابطه (۹) نمایانگر ضریب اطمینان در طراحی و رابطه (۱۰) نشانگر درصد کاهش وزن سازه بعد از بهینه‌سازی است.

$$S.F = \frac{S_y}{S} = \frac{355 \text{ MPa}}{215 \text{ Mpa}} = 1.65 \quad (9)$$

$$\left(\frac{m_{\text{first}} - m_{\text{optimized}}}{m_{\text{first}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{22412 - 15784}{22412} \right) \times 100\% \approx 30\% \quad (10)$$



شکل ۹: توزیع تنش مدل بهینه شده (نمای برش خورده) پل و کاهش تنش و تغییر شکل‌های نامتعارف در سازه

جدول ۸: نتایج تحلیل مدل قبل و بعد از بهینه‌سازی پل

| | | |
|-------|-----------------|----------------|
| ۳۵۵ | تنش (مگاپاسکال) | مدل بهینه نشده |
| ۲۲۴۱۲ | وزن (کیلوگرم) | |
| ۲۱۵ | تنش (مگاپاسکال) | مدل بهینه شده |
| ۱۵۷۸۴ | وزن (کیلوگرم) | |

۵- نتیجه گیری

با بررسی نتایج تحلیل مربوط به مدل اولیه، به دلیل وجود فشار بالای شنی در اثر تماس با ورق بالایی پل، این ورق تحت تنش بالایی قرار می‌گیرد. برای رفع این مشکل بالا بردن مقاومت خمشی تیر از روش‌های اصلی است. این افزایش از دو راه امکان پذیر است اول افزایش ضخامت ورق که از لحاظ اقتصادی و افزایش وزن مناسب نیست، دوم استفاده از تیغه‌های تقویت کننده نصب شده زیر ورق و لوله‌های تقویتی متصل شده به جان تیرها به نحوی که از تغییر شکل جانبی جان تیرها جلوگیری کند. در این راستا نتایج زیر حاصل گردید:

۱- در قسمت‌هایی از پل که تحت تنش بالاتری قرار دارند می‌توان تنها ضخامت را در آن قسمت افزایش داد تا اثر افزایش ضخامت در آن قسمت تاثیر چندانی در وزن سازه نداشته باشد.

۲- برای پیاده‌سازی پل بر شاسی M60A1 الزاما باید تعادل استاتیکی شاسی حین عملیات پل‌گذاری حفظ شود، یک راه کار باید فاصله مرکز ثقل شاسی از مکانیزم راه‌انداز افزایش یابد تا اثر گشتاور شاسی نسبت به پل کاملا باز بیشتر شود، بدین منظور اتصال یک بار کمکی مشخص شده (۸ تا ۱۰ تن) به صورت یدک به شاسی می‌باشد.

۳- برای حفظ تعادل استاتیکی شاسی حین عملیات پل‌گذاری می‌توان طراحی پل بر روی یک تریلر انجام پذیرد. در این روش مکانیزم راه‌اندازی از شاسی حذف می‌شود به علاوه اینکه شاسی به عنوان نیروی کمکی در تعادل ایستایی تریلر، هنگام پل‌گذاری تاثیر دارد در این حالت می‌توان با بازطراحی مدل، بارگذاری را از رده MLC60 تا رده‌های بالاتر ارتقا داد و حجم ترافیک عبوری از پل افزایش یابد از طرفی امکان طراحی پل با قابلیت پوشش موانع بیش از ۳۰ متر وجود دارد.

۴- در تحقیقات پیشین، بهینه‌سازی و کاهش وزن سازه پل، اغلب براساس حذف بخش‌هایی از اجزای دارای تنش بسیار کم و انجام فرآیند سعی و خطا یا استفاده از نرم‌افزارهای دارای قابلیت بهینه‌سازی انجام گرفته است. نظر به محدودیت‌های این نرم‌افزارها و با توجه به پیشرفت روزافزون الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدرن و روش‌های نوین بهینه‌سازی نظیر روش‌های ابتکاری، فراابتکاری و همچنین روش طراحی آزمایشات، استفاده از این روش‌ها می‌تواند در دستیابی به جوابی دقیق‌تر، حصول جواب با سرعت بیشتر و همچنین اطمینان از رسیدن به جواب بهینه مطلق و عدم گیرافتادن در جواب‌های محلی، بسیار سودمند باشد.

۵- بهینه‌سازی سازه پل به روش طراحی آزمایشات حاکی از کاهش ۳۰ درصدی وزن پل و دستیابی به ضریب اطمینان ۱.۶ بوده و کارایی آن را در طراحی پل‌های مشابه نشان می‌دهد.

۶- استفاده از روش‌های مدرن بهینه‌سازی در طراحی پل‌ها و افزایش متغیرهای طراحی و ورود قیدهای مختلف رفتاری و هندسی می‌تواند منجر به طراحی پل با هزینه کمتر و کارایی بیشتر گردد. همچنین تلفیق این روش‌ها با روش طراحی آزمایشات می‌تواند علاوه بر مزایای ذکر شده، با وجود متغیرهای طراحی زیاد، زمان طراحی و هزینه‌های آن را به صورت چشمگیر کاهش دهد.

مراجع

- [1] Russell, B. R., & Thrall, A. P. (2013). Portable and rapidly deployable bridges: Historical perspective and recent technology developments. *Journal of Bridge Engineering*, 18(10), 1074-1085.
- [2] Thomas, A. S., & Kopczak, L. R. (2005). From logistics to supply chain management: the path forward in the humanitarian sector. *Fritz Institute*, 15(1), 1-15.
- [3] Gareth, R. T. and Bernard, J. S. (2013). A Rapidly Deployable Bridge System. In: *Proceedings of the Structures Congress*. Pittsburgh: ASCE Press, 565-667.
- [4] Shaun C. Connors, Christopher F. Foss (2011), *Jane's Military Vehicles and Logistics*, 32nd ed., Janes Information Group.
- [5] Hornbeck, B., Kluck, J. and Connor, R. (2005). *Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap Crossing Equipment*. Report published in the united states USA.
- [6] Kalangi, C. and Sidgam, Y. (2016). Design and Analisis of Armored Vehicle Launched Bridge (AVLB) for Static Loads. *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*, 4(10), 2321-0613.
- [7] Srividya, D. V. and Raju, B. and Kondayya, D. (2014). Design Optimization of Armored Vehicle Launched Bridge for Structural Loads. *IPASJ International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, 2(9): 64-72.
- [8] Petro, S., CHEN, S. E., Venkatappa, S., GangaRao, H., & Culkin, A. (1999). The dynamic behavior of an armored vehicle launched Bridge. In SPIE proceedings series (pp. 21-26).
- [9] Sia, B., & Engineer, G. (2008). Fatigue life prediction for armored vehicle launched bridge (AVLB) for MLC70 and MLC 80 loads.
- [10] Garcia, R. P. and Lambrecht, S. G. (1992). *Finite Element Analysis of the Armored Vehicle Launched Bridge (AVLB)*, Warren: U. S. Army Tank-Automotive Command.
- [11] Sushir, D. J. and Ulhe, P. N. (2013). Failure Analysis of Center Pin Joint Used in Heavy Assault Bridge. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 7(1): 05-11.
- [12] Hedadquarters, Department of the Army. (2009). *Technical Manual: Operator's Manuals for Launcher, M48A5 Tank Chassis, NSN 5420-01-076-6096 (EIC: ARE), Launcher, M60A1 Tank Chassis, NSN 5420-00-889-2020 (EIC: ARC), Transporting for bridge armored-vehicle launched: Scissoring-type, class 60 or class 70*, Washington D. C.
- [13] Gunter, B., Coleman, D. (2014). *A DOE Handbook: A Simple Approach to Basic Statistical Design of Experiments*. USA: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- [14] Anderson, M. J., Whitcomb, P. K. (2015). *DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation*. 3rd Edition. USA: Productivity Press.
- [15] Anderson M. J., Whitcomb, P. K. (2016). *RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments*. 2nd Edition. USA: Productivity.
- [16] Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments*. 10th Edition. USA: Wiley.
- [17] Shahriari, B., Mahdian, A., Shirani, M., Sahraei and M., Ismailian, M., (2023). Thickness optimization of the airplane wing box components by the design of experiments method. *Journal of Solid and Fluid Mechanics (JSFM)*, 13(1),1-4.