

بررسی میدانی و عددی گرادیان حرارتی پل بتنی-صندوقه‌ای «جناح»

هدایت ولادی^{۱*}، علیرضا عباس نژاد^۲، فرزاد رئیسی^۳

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز

۳- دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

Email: hveladi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۱۲/۹]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۱۰/۱۰]

چکیده

بارهای حرارتی غیریکنواخت از جمله گرادیان‌های حرارتی قائم و عرضی آثار مخربی در پل‌های صندوقه‌ای داشته و لازم است که در طراحی‌ها مورد توجه مهندسین قرار گیرد. در ضوابط ارائه شده در نشریه ۱۳۹ ایران به صورت کلی به مفاهیم و ضوابط گرادیان حرارتی پرداخته شده که با توجه به تنوع آب و هوایی در کشور ایران، متاسفانه ضوابط ارائه‌شده جوابگو نمی‌باشد. در این مقاله با انجام آزمایش میدانی روی پل صندوقه‌ای جناح در شهر تهران و با استفاده از تجهیزات ابزار دقیق، گرادیان‌های حرارتی قائم و عرضی محاسبه شده و با ضوابط ارائه‌شده در نشریه ۱۳۹ ایران مقایسه شد. داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که بیشترین دما در ساعت ۱۴:۳۰، ۳۳/۶ درجه سانتی‌گراد و اختلاف دمای بال فوقانی با تحتانی ۸/۸ درجه سانتی‌گراد است، در حالی که با در نظر گرفتن گرادیان جانبی، بیشترین اختلاف دما در ساعت ۱۱:۳۰ با مقدار ۲/۹ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. با اعمال گرادیان عمودی در مدل المان محدود پل جناح، بیشترین تنش حرارتی در تقاطع جان و بال بالایی با مقدار ۱/۹۶ مگاپاسکال و بیشترین انحراف ۴/۳۶ میلی‌متر در فاصله میانی پل ایجاد می‌شود. به عنوان راه حلی برای کاهش آثار منفی گرادیان‌های حرارتی، استفاده از عایق پلی‌یورتان در مدل FE پیشنهاد و مدل سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از عایق پلی‌یورتان به ضخامت‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ میلی‌متر می‌تواند دمای دال بالایی را به ترتیب از ۳۳/۶ به ۳۰/۵، ۲۹/۱۶، ۲۷/۵ و ۲۶/۴ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد، که منجر به کاهش تنش از ۱/۹۶ به ۱/۶۵، ۱/۳۵، ۰/۶۳ و ۰/۳۸ مگاپاسکال خواهد شد. همچنین با استفاده از عایق می‌توان انحراف پل را کاهش داد که در این مطالعه بیشترین انحراف دهانه ۴۸ متری با استفاده از عایق پلی‌یورتان به ضخامت‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ میلی‌متر از ۴/۳۶ به ۳/۵۷، ۲/۸۶، ۱/۶۳ و ۱/۰۷ میلی‌متر کاهش می‌یابد. همچنین راهکار مناسب برای کاهش تنش‌های حرارتی حاصل از گرادیان‌های حرارتی پیشنهاد و بررسی شد و نتایج مدلسازی نشان داد که با استفاده از عایق پلی‌یورتان، می‌توان میزان جذب انرژی خورشید توسط سطح فوقانی صندوقه را کاهش داد و به دنبال آن، تنش‌های حرارتی حاصل از گرادیان حرارتی را کاهش داد.

واژگان کلیدی: گرادیان حرارتی قائم و جانبی، پل‌های بتنی صندوقه‌ای، آزمایش میدانی، عایق پلی‌یورتان، تحلیل اجزا محدود.

مقدمه

با توجه به اینکه پل‌ها به عنوان عناصر کلیدی بزرگراه‌ها و جاده‌ها، در مقایسه با سایر اجزاء راه نیازمند هزینه قابل توجهی است، پس تمامی عواملی که باعث ایجاد خلل در عملکرد پل‌ها می‌شود، باید بررسی شد و در طراحی‌ها در نظر گرفته شوند [1]. یکی از عوامل تاثیرگذار، تاثیر تنش‌های حرارتی، ناشی از اختلاف دما در قسمت‌های مختلف پل‌ها می‌باشد و عدم در نظر گرفتن این نوع بارها در طراحی‌ها، می‌تواند بسیار مخاطره آمیز باشد [2, 3]. تغییرات دمایی در پل‌ها به دو صورت در نظر گرفته می‌شود. حالت اول که تحت عنوان تغییرات یکنواخت دمایی مطرح می‌شود، در طول پل باعث انبساط و انقباض یکنواخت عرشه غیر مقید می‌شود که در سازه‌های مقید در برابر تغییر شکل منجر به گسترش نیروی محوری در مقطع می‌شود. حالت دوم که تحت عنوان گرادیان حرارتی در نظر گرفته می‌شود، به دلیل ضریب انتقال حرارتی کم بتن ایجاد می‌شود. به عبارت بهتر، به دلیل تابش خورشید بر سطح فوقانی صندوقه‌ها، دمای بال بالایی افزایش می‌یابد، و به دلیل سایه بودن زیر صندوقه‌ها، دمای بال پایینی کاهش می‌یابد، با توجه به ضریب انتقال حرارتی کم بتن این دما در ارتفاع مقطع بصورت غیر خطی کاهش می‌یابد که این امر تحت گرادیان حرارتی قائم شناخته می‌شود [4, 5]. در نشریه ۱۳۹ تحت عنوان "آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها"، دو حالت برای در نظر گرفتن اثر اختلاف دما بین سطوح فوقانی و تحتانی عرشه پل بصورت زیر تعریف شده است [6, 7].

در حالت ۱، فرض می‌شود که تابش خورشید روی سطح فوقانی و در سطح تحتانی عرشه سایه باشد.

در حالت ۲، یخبندان روی سطح فوقانی عرشه پل باشد.

حال تغییرات دمای بالا و پایین عرشه برای در نظر گرفتن تنش‌های حرارتی مطابق جدول تعریف شده است.

با توجه به تنوع آب و هوایی در کشور ایران، اعداد موجود در جدول فوق به خوبی نمی‌تواند گرادیان‌های حرارتی قائم را شبیه‌سازی نماید، پس برای بررسی دقیق‌تر آثار گرادیان‌های

حرارتی، لازم است تا با استفاده از تجهیزات ابزار دقیق و نصب سنسورها به تخمین گرادیان حرارتی پرداخته و با اعمال در مدل المان محدود تاثیرات این نوع تنش‌ها بررسی شود.

جدول ۱. اختلاف دما در سطوح فوقانی و تحتانی عرشه پل‌ها به درجه سانتیگراد

Seasonal Condition	Bridge type		
	Composite	Concrete	Steel
State 1	10	7	10
State 2	7	3.5	5

Table 1. Temperature difference in the top and bottom surface of the bridge deck (°C)

کائو و همکارانش [8]، از مدل المان محدود سه‌بعدی (3D) استفاده کرده و پل Zhanjiang با دهانه اصلی ۴۸۰ متر را مدلسازی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که گرادیان دمای بدست آمده در پل مورد بررسی، بزرگتر از مقادیر در نظر گرفته شده در طراحی می‌باشد. وست گیت و همکارانش [9]، آثار بارهای حرارتی در پل معلق تامار (Tamar) را بررسی نمودند. پایش داده‌های دمایی در سازه فوق، نشان داد که پیک دمایی در سازه معلق در مقایسه با کابل‌ها در زمان‌های مختلفی رخ می‌دهد و این امر باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در قسمت‌های مختلف پل می‌شود. چن و همکارانش [10]، به بررسی دما و تنش حرارتی در پل بتنی صندوقه‌ای آزادراه شیمان (Shiman) در چین، پرداختند. این پل دارای ۳ دهانه بوده و طول هر یک از دهانه‌های آن ۴۲، ۷۶ و ۴۲ متر می‌باشد. آنها با استفاده از سنسورهای ترموکوپل و نصب آنها مطابق شکل (۱)، به ثبت دماهای قسمت‌های مختلف صندوقه پل مذکور پرداختند.

گرادیان حرارتی قائم ترسیم شده برای پل مذکور، مطابق شکل (۲) بوده و با اعمال گرادیان حرارتی در مدل المان محدود پل، تنش‌های حرارتی تا ۶ مگاپاسکال و در وسط دهانه ایجاد شد.

شکل ۳. مدل عددی ساخته شده توسط لی و همکارانش از پل نانجینگ [12]

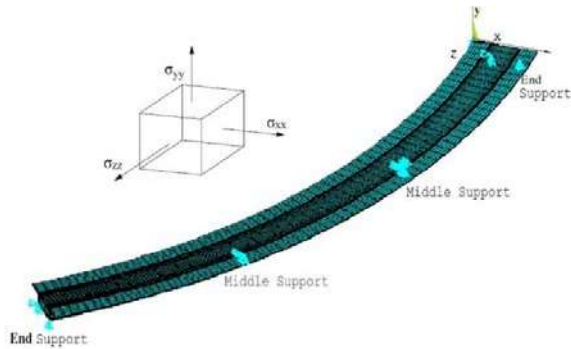


Fig. 3. Numerical model of Nanjing concrete bridge by Lee et.al. [12]

اصولاً گرادیان حرارتی در پل‌ها به پارمترهای مختلفی از جمله، موقعیت قرارگیری دهانه پل، طول و عرض جغرافیایی، میزان سرعت باد، ابعاد صندوقه، طول دهانه و ... بستگی دارد [13, 14]. برای بررسی دقیق‌تر آثار گرادیان حرارتی، ضروری است تا با انجام آزمایش میدانی، به ثبت دما در ساعات مختلف روز پرداخته شود [15, 16]. همچنین با اعمال تغییرات دمایی در مدل‌های نرم‌افزاری، می‌توان آثار نامطلوب این نوع تنش‌ها را در رفتار سازه‌ها مشاهده نمود [17, 18]. در مقالات منتشر شده در مراجع مختلف، به محاسبه تنش‌های حاصل از گرادیان‌های حرارتی با انجام آزمایش میدانی و اعمال در مدل المان محدود، پرداخته شده و رفتار سازه‌ها تحت این گرادیان‌های حرارتی ثبت شده، بررسی شده و بعد از شناسایی نقاط ضعف سازه‌ها، سازوکار تقویتی مختلف با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف اقتصادی و اجرایی ارایه شده است [19, 120].

در این پژوهش، آثار گرادیان‌های حرارتی در ایجاد تنش‌های حرارتی روی پل جناح واقع در تهران مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه نشریه ۱۳۹ ایران به صورت کلی ضوابط مربوط به گرادیان حرارتی را ارایه نموده، و این ضوابط جوابگوی تمام پل‌های مورد طراحی در ایران نیست، پس با انجام آزمایش میدانی و نصب حس گرهای حرارتی در صندوقه بتنی، گرادیان‌های حرارتی قائم و عرضی برای پل

شکل ۱. موقعیت نصب ترموکوپل‌ها، الف) برای ترسیم گرادیان قائم، ب) برای ترسیم گرادیان عرضی

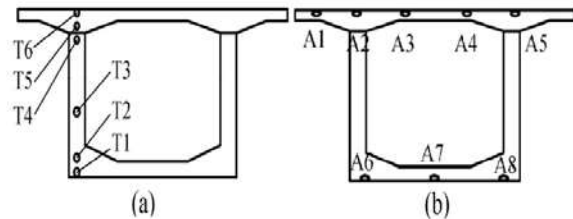


Fig. 1. Thermocouples locations, a) for vertical gradient, b) for lateral gradient

شکل ۲. گرادیان قائم در ساعات مختلف روز [10]

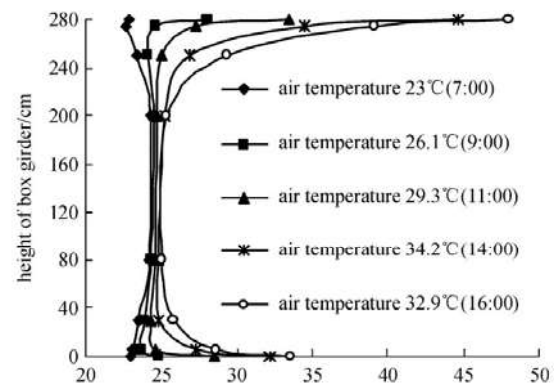


Fig. 2. Vertical temperature gradient [10]

سونگ و همکارانش [11]، تاثیر تنش‌های حرارتی روی پل ۳ دهانه واقع در چین را مطالعه نمودند. برای این منظور با نصب سنسورهای ترموکوپل در قسمت‌های مختلف صندوقه، به ترسیم گرادیان‌های حرارتی پرداخته و در نهایت با اعمال در مدل المان محدود ساخته شده در نرم‌افزار Ansys، به بررسی تنش‌های حرارتی در پل مورد مطالعه پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که ماکزیمم تنش طولی ۲/۳۱ مگاپاسکال در اثر گرادیان حرارتی ایجاد می‌شود. در سال ۲۰۱۹، لی و همکارانش [12]، به بررسی آثار تنش‌های حرارتی در پل بتنی صندوقه‌ای دارای انحنای در نانجینگ چین، پرداختند. مدل المان محدود ساخته شده از پل مورد نظر در نرم‌افزار انسیس مطابق شکل (۳) است.

با اعمال داده‌های ثبت شده از سنسورها و اعمال در مدل المان محدود، نشان دادند که ماکزیمم تنش حرارتی ۳/۵ مگاپاسکال در پل مذکور ایجاد می‌شود.

چناح مطابق شکل (۵-الف) انتخاب شد و با ایجاد حفره‌هایی متناسب با قطر ترموکوپل‌ها، سنسورها نصب شدند شکل (۵-ب). همچنین تزریق دوغاب گروت به تثبیت موقعیت سنسورها منجر شد. برای شبیه‌سازی شرایط موجود پل از لحاظ جریان باد در داخل صندوقه، از لایه پلاستیکی برای جلوگیری از ورود و خروج هوا به داخل صندوقه، استفاده شد. لازم بذکر است، سگمنت‌های تولید و استفاده شده در پل جناح توسط کارخانه شهید رجایی که محل آن در نزدیکی پل قرار دارد، ساخته شده بود، که در این پژوهش با هماهنگی و اخذ دستورات لازم یکی از سگمنت‌ها که دقیقاً مشابه سگمنت نصب شده در پل بود، برای آزمایش و در محل کارخانه مورد استفاده قرار گرفت.

شکل ۵. صندوقه بتنی مورد آزمایش، الف) پوشش دهانه صندوقه برای جلوگیری از ورود و خروج هوا، ب) ایجاد سوراخ با دریل و تزریق گروت

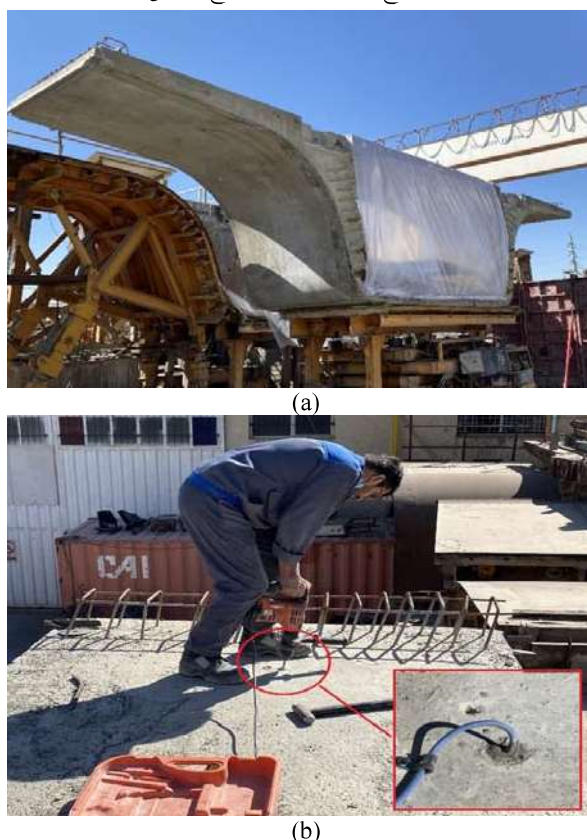


Fig. 5. The experimental concrete-box girder segment: (a) sealed with isolation plastics, (b) drilling and installing thermocouples

مورد نظر رسم، و با ضوابط نشریه ۱۳۹ ایران مقایسه شد. همچنین با مدلسازی در نرم‌افزار المان محدود و اعمال تغییرات دمایی حاصل از انجام آزمایش میدانی، تنش‌های حرارتی محاسبه شد. برای مقابله با تنش‌های حرارتی، استفاده از عایق پلی‌اورتان برای کاهش میزان جذب سطح فوقانی صندوقه پیشنهاد شد و آثار این عایق در میزان کاهش تنش‌های حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲-انجام آزمایش میدانی

در این پژوهش، تاثیر تنش‌های حاصل از گرادیان حرارتی بر روی پل جناح واقع در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. این پل دارای ۶ دهانه بوده که دهانه‌های کناری بطول ۲۸ متر و دهانه‌های میانی دارای طول ۴۸ متر است. در شکل (۴) تصویر هوایی و نمای کلی از پل جناح ارایه شده است.

شکل ۴. عکس هوایی و نمای کلی از پل بتنی جناح در تهران

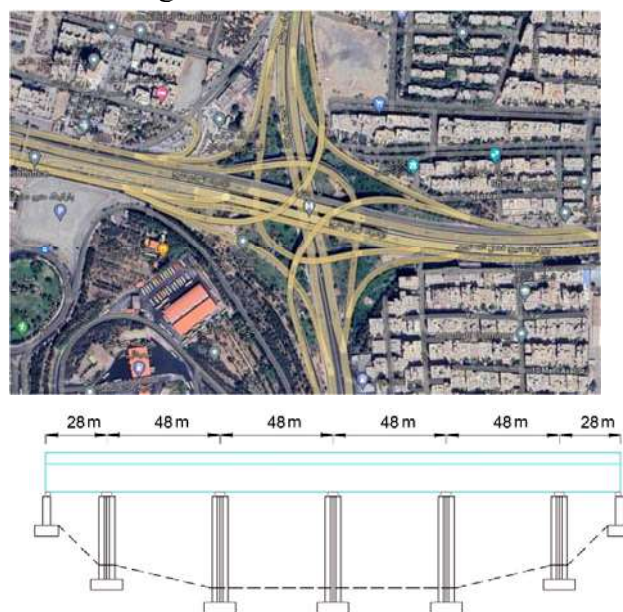


Fig. 4. Aerial image and Layout of the Jenah concrete-box girder bridge in Tehran

با توجه به اینکه پل مذکور از سال ۲۰۱۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است و به دلیل عدم دسترسی به تمام قسمت‌های پل مذکور، برای نصب سنسورها، یکی از صندوقه‌های پل

مشخصات مصالح تعریف شده در این نرم افزار برای پل مورد بررسی مطابق جدول (۲) می باشد.

جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده

Parameters	Values
Mechanical Parameters	
Elastic Modulus	28.20 GPa
Poisson's Ratio	0.15
Compressive Strength of Concrete	35 MPa
Unit Weight	2500 kg/m ³
Thermal Parameters	
Thermal conductivity	1.36 W/(m.K)
Specific Heat Capacity	913 J/(kg.K)
Expansion Coefficient	1.20E-5

Table 2. Material Parameters

یکی از موارد مهم و تاثیرگذار در تحلیل المان محدود، انتخاب صحیح نوع و اندازه مش بندی است. در این پژوهش از المان های کوپل جابه جایی-دما با مش های سه بعدی هرمی ۱۰ گرهی (C3D8RT) استفاده شد.

اندازه مش ها با آنالیز حساسیت بر بیشترین میزان جابه جایی دهانه ۴۸ متری تحت بار مرده، انتخاب شد. شکل (۸) تاثیر اندازه مش بندی در بیشترین پاسخ جابه جایی را نشان می دهد. همانطور که از شکل قابل مشاهده است، با کاهش اندازه مش بندی تا ۱۵ سانتی متر، میزان جابه جایی افزایش می یابد ولی کمتر از ۱۵ سانتی متر تاثیر چندانی در میزان جابه جایی نداشته و فقط زمان محاسبات را افزایش می دهد. پس در این پژوهش اندازه مش بندی ۱۵ سانتی متر انتخاب شد.

شکل ۷. مدل المان محدود ساخته شده در نرم افزار ABAQUS

الگوی چیدمان برای سنسورهای ترموکوپل، مطابق شکل (۶) است. در این آزمایش، از ۱۱ ترموکوپل PT100 به منظور ثبت دما استفاده شد و ترموکوپل های T1 تا T5 به منظور استخراج گرادیان عرضی و ترموکوپل های W1 تا W5 نیز به منظور استخراج گرادیان قائم مورد استفاده قرار گرفتند. لازم بذکر است، ترموکوپل T6 نیز برای ثبت تغییرات دمای داخل صندوقه مورد استفاده قرار گرفت.

شکل ۶. مقطع عرضی صندوقه پل جناح و موقعیت نصب ترموکوپل ها (واحد ها به میلی متر می باشد)

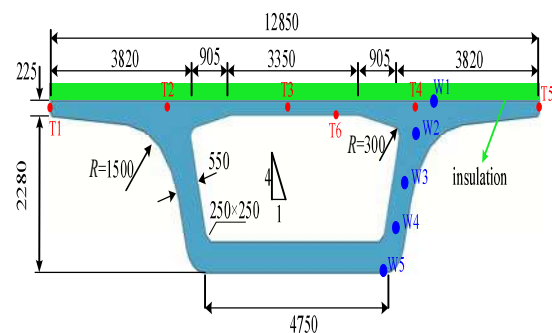


Fig. 6. Cross-section layout of the box-girder and thermocouples position; (Unit: mm)

۳- مدل المان محدود

برای بررسی و مطالعه نقش گرادیان های حرارتی در ایجاد تنش در پل ها لازم است تا مدل نرم افزاری از پل مورد نظر ساخته شده و پروفیل های دمایی ثبت شده توسط سنسورها در آن اعمال شود. در این تحقیق، برای تحلیل اجزای محدود از نرم افزار سه بعدی آباکوس [21]، استفاده شده است. شکل کلی مدلسازی شده در نرم افزار مذکور، به صورت شکل (۷) است.

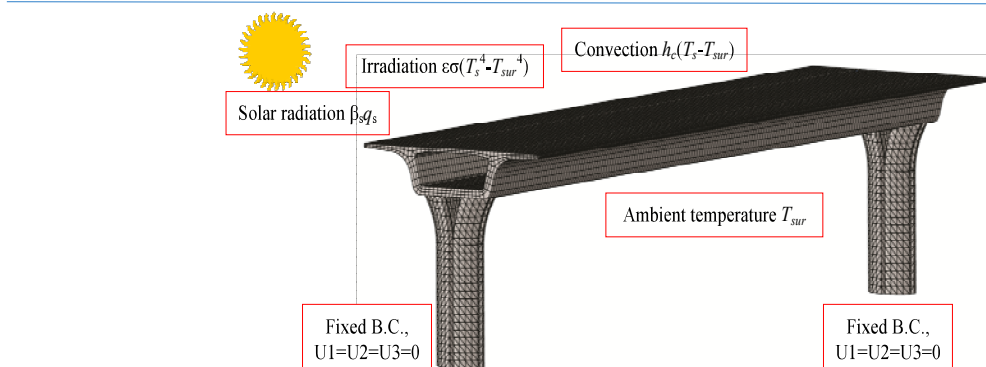


Fig. 7. Finite element model of the bridge constructed with ABAQUS Software

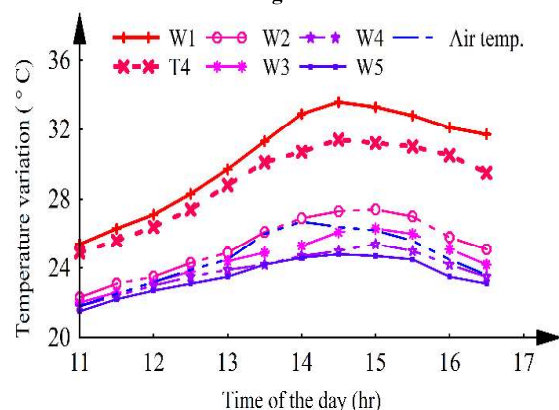


Fig. 9. Temperature variation from 1100 hrs to 1630 hrs for the thermocouples W1, W2, W3, W4, W5, T4 and air temperature

شکل ۸. جابه‌جایی دهانه ۴۸ متری پل جناح تحت بار مرده با تغییر در اندازه مش‌بندی

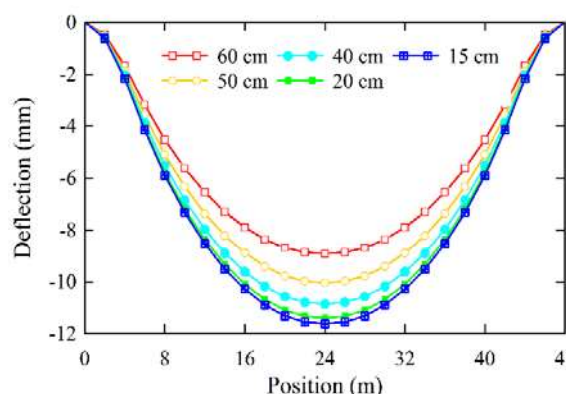


Fig. 8. Deflection of the 48 m span of the Jenah bridge at dead load stage via changing mesh size

همچنین پروفیل دمایی گرادیان‌های قائم ترسیم شده در ساعات مختلف، مطابق شکل (۱۰) است. همانطور که از شکل نیز قابل مشاهده می‌باشد، بیشترین دما در سطح فوقانی صندوقه و به دلیل تابش مستقیم نور خورشید و جذب آن توسط سطح فوقانی صندوقه می‌باشد. به دلیل ضریب انتقال کم بتن، نرخ کاهش دما از سطح فوقانی تا ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری زیاد بوده و پایین‌تر از آن، دما با نرخ کمتری کاهش می‌یابد و در سطح تحتانی صندوقه، به دلیل سایه بودن آن، کمترین مقدار دما ثبت شد.

۴- نتایج مدل‌سازی

۴-۱- گرادیان‌های قائم و عرضی

تغییرات دما در قسمت‌های مختلف صندوقه وابسته به زمان است. در این پژوهش، دمای قسمت‌های مختلف صندوقه در تاریخ ۲۸ مهر ماه ۱۳۹۹ (۱۹ اکتبر ۲۰۲۰) ثبت شد و برای نمونه شکل (۹) تغییرات دمایی ترموکوپل‌های W1 تا W5 و T4 را از ساعت ۱۱ تا ۱۶/۳۰ را نمایش می‌دهد. بیشترین دما در ساعت ۱۴/۳۰ با دمای ۳۳/۶ درجه سانتی‌گراد در سطح فوقانی صندوقه اتفاق افتاده و بیشترین دمای محیط در ساعت ۱۴ با دمای ۲۶/۷ درجه سانتیگراد ثبت شده است.

شکل ۹. تغییرات دمایی ثبت شده برای ترموکوپل‌های W1 تا W5 و T4 دمای محیط

شکل ۱۱. گرادیان دمایی عرضی برای بال بالای صندوقه، الف) در ساعت ۱۴/۳۰ (ب) ۱۱/۳۰

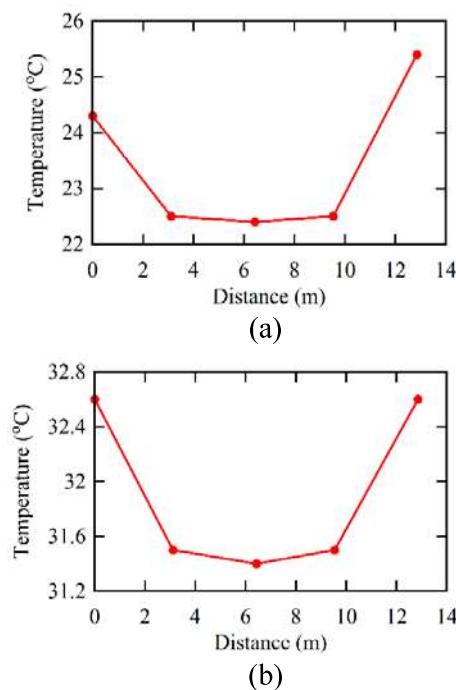


Fig. 11. Lateral temperature gradient for top flange of the segment; a) at 1130 hrs, b) at 1430 hrs

۴-۲- محاسبه تنش‌های حرارتی

برای محاسبه تنش‌های حرارتی حاصل از گرادیان‌های حرارتی ضروری است ابتدا پروفیل‌های دمایی را در مدل المان محدود ساخته‌شده از پل اعمال نمود. با توجه به اینکه اختلاف دمایی ۲/۹ درجه گرادیان عرضی در مقایسه با اختلاف دمایی ۸/۸ درجه‌ای در گرادیان قائم، کمتر می‌باشد، پس تاثیر تنش‌های حرارتی قائم نسبت به عرضی بیشتر بوده و در این پژوهش فقط تنش‌های حرارتی ناشی از گرادیان قائم مورد بررسی قرار گرفت.

برای اعمال گرادیان قائم در نرم افزار ABAQUS، ابتدا باید معادله منحنی حاکم بر گرادیان حرارتی استخراج شود که برای اینکار از توابع *curve fitting* در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. شکل (۱۲) نمودار برازش شده برای گرادیان حرارتی را نمایش می‌دهد و معادله حاکم بر این منحنی نیز به صورت معادله (۱) می‌باشد.

شکل ۱۰. گرادیان‌های قائم در ساعات مختلف روز ۲۷ مهرماه ۱۴۰۰

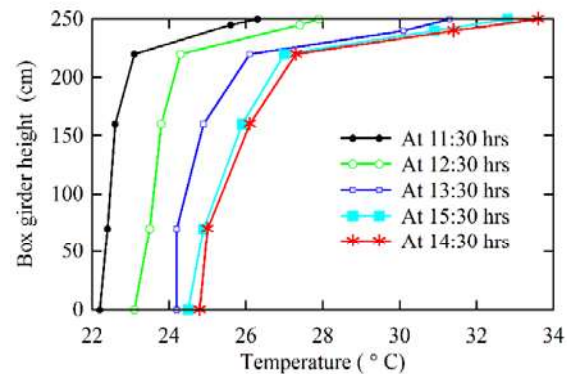


Fig. 10. Vertical temperature gradient at different hours of the October 19, 2021

شایان ذکر است بیشترین گرادیان قائم با اختلاف دمایی ۸/۸ درجه بین سطح فوقانی و تحتانی صندوقه در ساعت ۱۴/۳۰ رخ داده است.

گرادیان عرضی که از ثبت دمایی ترموکوپل‌های نصب شده در جان صندوقه ترسیم می‌شود، مشابه گرادیان‌های قائم، وابسته به زمان است. این نوع گرادیان در ساعاتی از روز که نور آفتاب از کناره‌ها به صندوقه می‌تابد بیشترین تاثیر را دارد. شکل (۱۱-الف) گرادیان عرضی در ساعت ۱۱/۳۰ (شکل ۱۱-ب) گرادیان عرضی در ساعت ۱۴/۳۰ را نمایش می‌دهد. همانگونه که از شکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود به دلیل تابش خورشید به کناره صندوقه دمایی بیشتری داشته و در مرکز صندوقه، به دلیل زاویه مایل تابش خورشید، دمایی کمتری را دارد. با گذشت زمان که زاویه تابش خورشید به صورت مستقیم می‌باشد، اختلاف دمایی بین لبه‌های کناری و وسط صندوقه کمترین مقدار را خواهد داشت.

نور خورشید است، در حالی که جان‌های صندوقه، مانع از حرکت بال بالا به سمت بالا شده و این امر باعث ایجاد تنش در نقاط اتصال بال و جان می‌باشد. برای بررسی تاثیر گرادیان حرارتی در میزان جابه‌جایی دهانه ۴۸ متری، شکل (۱۵) نمایش داده شده است که بیشترین میزان جابه‌جایی در وسط دهانه، مقدار ۴/۳۶ میلی‌متر و به سمت بالا می‌باشد.

شکل ۱۴. کانتور تنش قطعه وسط دهانه‌ی ۴۸ متری تحت گرادیان حرارتی قائم

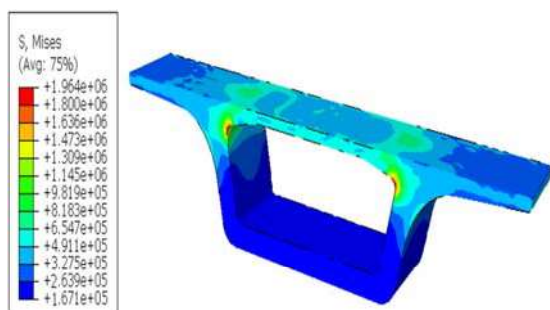


Fig. 14. Stress nephogram of midspan segment of 48m span under vertical temperature gradient

۵-تاثیر عایق در کاهش تنش‌های حرارتی

تنش‌های حرارتی ناشی از گرادیان‌های حرارتی یکی از بارهای تاثیرگذار در پل‌ها بوده و این بارها به همراه سایر بارهای وارد بر پل اعم از بارهای مرده و بهره‌برداری می‌تواند باعث ایجاد ترک و کاهش طول عمر مفید پل‌ها شود. همانطور که پیشتر نیز بدان اشاره شد، دلیل اصلی ایجاد تنش‌های حرارتی غیر یکنواخت، اختلاف دمای سطوح بالا و پایین صندوقه و ضریب انتقال حرارتی کم بتن است. پس یکی از راهکارهای مناسب برای کاهش میزان جذب انرژی خورشید توسط سطح فوقانی صندوقه، استفاده از عایق‌های پلی‌اورتان می‌باشد.

در این پژوهش، تاثیر ضخامت‌های مختلف لایه پلی‌اورتان در کاهش گرادیان‌های حرارتی قائم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ضخامت‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته و گرادیان قائم در حضور و عدم حضور عایق مطابق شکل (۱۶) ترسیم شد.

شکل ۱۲. معادله برازش شده گرادیان قائم برای استخراج معادله حاکم

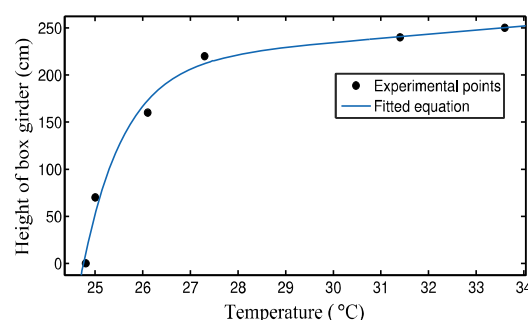


Fig. 12. Simplified thermal gradient formulation for applying in the FE model

$$f(y) = 24.76e^{(0.000229 \times y)} - 4.503 \times 10^{-5} \times e^{(0.04815 \times y)} \quad (1)$$

با اعمال معادله فوق در مدل المان محدود، کانتور تغییرات دما در کل دهانه ۴۸ متری و مقطع صندوقه به صورت شکل (۱۳) است.

شکل ۱۳. کانتور توزیع دما در ساعت ۱۴/۳۰ در الف) کل پل، ب) مقطع پل

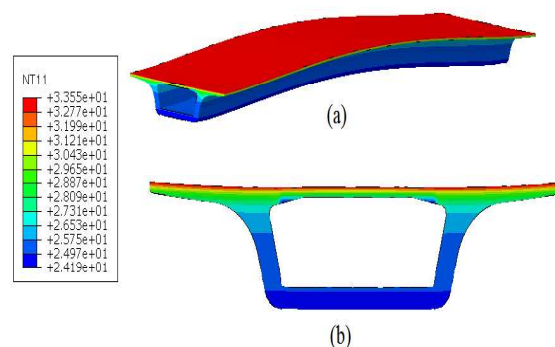


Fig. 13. Temperature nephogram yielding the maximum temperature difference at 1430 hrs a) 48 m span and b) section the Jenah bridge

تنش‌های حرارتی ناشی از گرادیان حرارتی قائم، برای قطعات بحرانی در وسط دهانه ۴۸ متری، مطابق شکل (۱۴) است. همانطور که از شکل (۱۴) قابل مشاهده است، بیشترین تنش حرارتی ناشی از گرادیان حرارتی قائم ۱/۹۶ مگاپاسکال و در محل اتصال بال بالایی به جان است. دلیل این امر نیز تمایل به افزایش طول بال بالایی و حرکت به سمت بالا در اثر جذب

کاهش می‌یابد. نقطه قابل توجه این است که سازوکار توزیع تنش در حالت اعمال گرادیان حرارتی تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. برای درک بهتر تاثیرات عایق‌های حرارتی در کاهش ماکزیمم تنش و بیشترین جابه‌جایی وسط دهانه، شکل (۱۹) رسم شده است. مطابق شکل (۱۹-الف)، با افزایش ضخامت عایق، بیشترین تنش حرارتی نیز کاهش یافته و مطابق شکل (۱۹-ب)، بیشترین جابه‌جایی وسط دهانه تحت گرادیان حرارتی، با افزایش ضخامت عایق، کاهش می‌یابد.

استفاده از عایق به ضخامت‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ میلیمتر باعث کاهش ۳/۱، ۴/۴۴، ۶/۱ و ۷/۲ درجه سانتیگرادی دمای سطح فوقانی صندوقه می‌گردد. به عبارت دیگر، دمای ۳۳/۶ درجه به ۳۰/۵، ۲۹/۱۶، ۲۷/۵ و ۲۶/۴ درجه تقلیل پیدا می‌کند. شکل (۱۷)، کانتور توزیع دما در مدل المان محدود، برای عایق با ضخامت‌هایی ۲، ۳، ۵ و ۶ میلی‌متر را نمایش می‌دهد. با اعمال دماهای مربوطه، تنش‌های حرارتی ناشی از گرادیان حرارتی محاسبه شده و در شکل (۱۸) نشان داده شده است. در صورت استفاده از عایق، تنش‌های حرارتی ایجاد شده

شکل ۱۵. کانتور جابه‌جایی دهانه‌ی ۴۸ متری، تحت اثر گرادیان قائم (واحدها به متر)

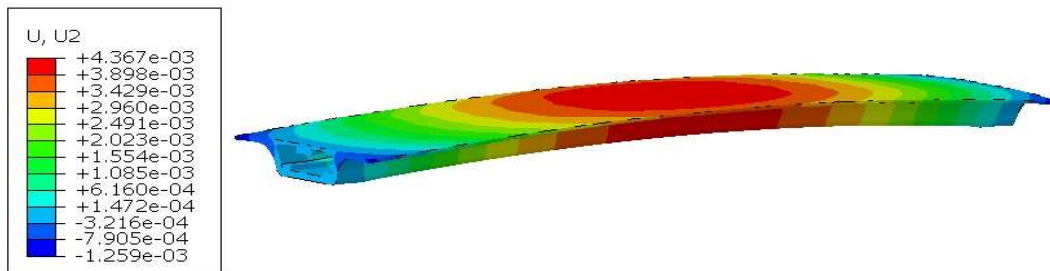


Fig. 15. Deflection of the 48m span under thermal load (units in m)

شکل ۱۶. گرادیان دمایی قائم در صورت استفاده و عدم استفاده از عایق با ضخامت‌های مختلف

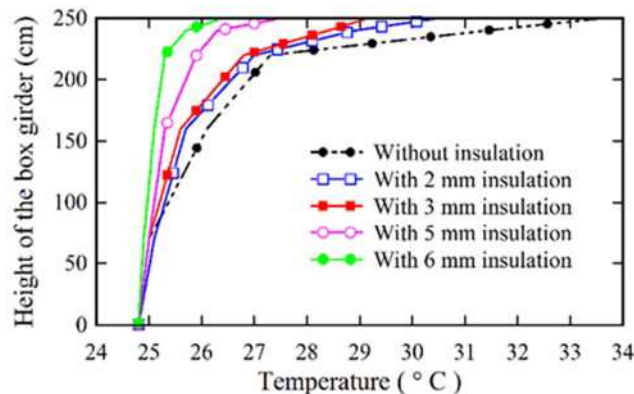


Fig. 16. Vertical temperature gradient with and without insulations at 1430 hrs

شکل ۱۷. کانتور توزیع دما در مدل المان محدود، در حضور عایق به ضخامت الف) ۲ میلی‌متر، ب) ۳ میلی‌متر، ج) ۵ میلی‌متر و د) ۶ میلی‌متر

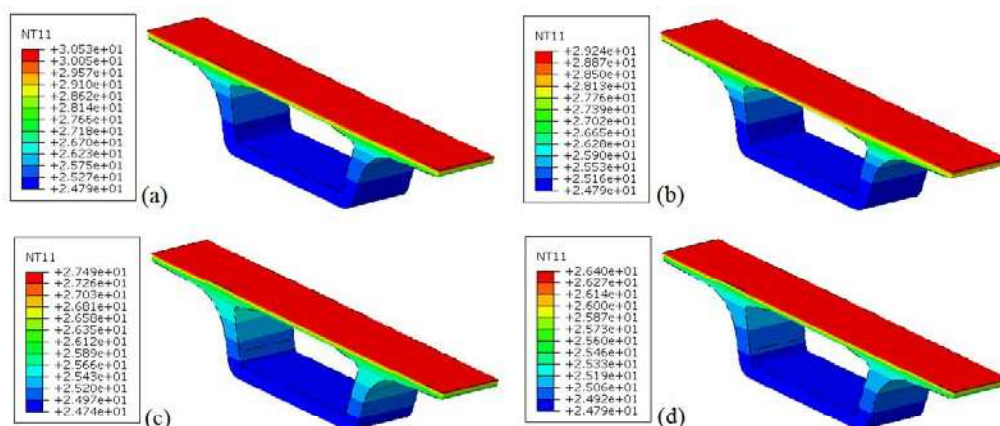


Fig. 17. Temperature nephogram for the segment covered by insulations at 1430 hrs (unit: °C); a) with 2 mm polyurethane, b) with 3 mm polyurethane, c) with 5 mm polyurethane and d) with 6 mm polyurethane

شکل ۱۸. کانتور توزیع تنش سگمت وسط دهانه ۴۸ متری در مدل المان محدود، در حضور عایق به ضخامت الف) ۲ میلی‌متر، ب) ۳ میلی‌متر، ج) ۵ میلی‌متر و د) ۶ میلی‌متر

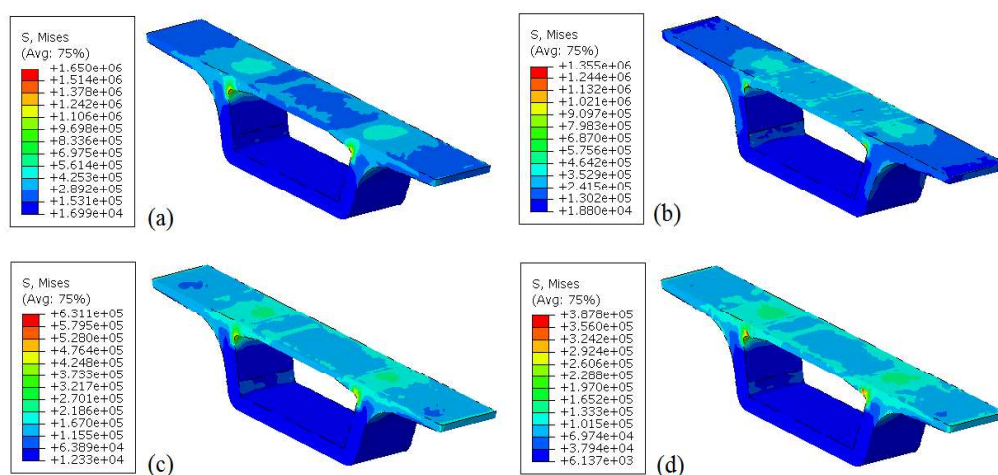


Fig. 18. Stress nephograms of midspan segment of 48m span under vertical temperature gradient using: a) 2 mm, b) 3 mm, c) 5 mm and d) 6 mm polyurethane insulations

شکل ۱۹. تاثیر ضخامت عایق در الف) ماکزیمم تنش حرارتی، ب) ماکزیمم جابه‌جایی وسط دهانه

۲- داده‌های ثبت شده نشان دادند که گرادیان قائم تاثیر بیشتری نسبت به گرادیان عرضی دارد.

۳- ماکزیمم تنش حرارتی به مقدار ۱/۹۶ مگاپاسکال و در نقاط اتصال جان به بال بالایی اتفاق می‌افتد.

۴- بیشترین جابه‌جایی وسط دهانه ۴۸ متری تحت گرادیان حرارتی قائم به مقدار ۴/۳۶ میلی‌متر و به سمت بالا است.

۵- راهکار مناسب برای کاهش آثار نامطلوب تنش‌های حرارتی، استفاده از لایه عایق پلی‌اورتان برای کاهش میزان جذب انرژی خورشید توسط سطح فوقانی صندوقه است.

۶- نتایج تحلیل عددی برای ماکزیمم تنش حرارتی ایجاد شده در صندوقه نشان داد که لایه عایق پلی‌اورتان به ضخامت‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ میلی‌متر به ترتیب باعث ایجاد تنش‌های حرارتی ۱/۶۵، ۱/۳۵، ۰/۶۳ و ۰/۳۸ مگاپاسکال می‌شوند.

۷- نتایج تحلیل عددی برای ماکزیمم جابه‌جایی وسط دهانه ۴۸ متری تحت تنش حرارتی ایجاد شده در صندوقه نشان داد که لایه عایق پلی‌اورتان به ضخامت‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ میلی‌متر به ترتیب باعث جابه‌جایی ۳/۵۷، ۲/۸۶، ۱/۶۳ و ۱/۰۷ میلی‌متر و به سمت بالا، می‌شوند.

۷- اعلام تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

۸- منابع

[1] Hossain T., Segura S., & Okeil A. M. 2020 Structural effects of temperature gradient on a continuous prestressed concrete girder bridge: analysis and field measurements. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(11), 1539-1550.

[2] Abid S. R., Abbass A. A., & Alhatmey I. A. 2019 Seasonal temperature gradient distributions in concrete bridge girders: A finite element study. In *2019 12th*

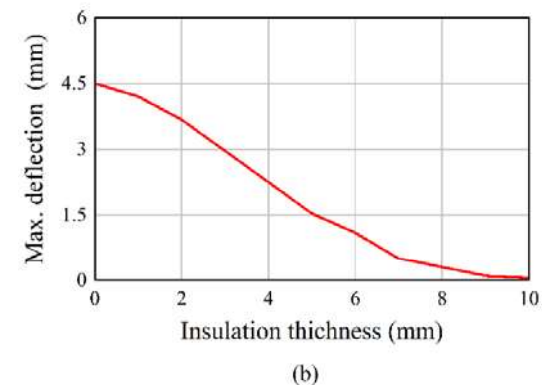
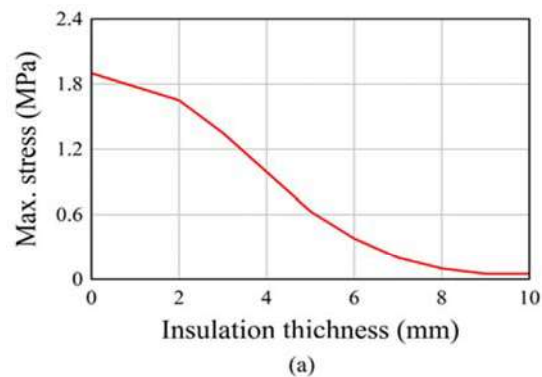


Fig. 19. Effect of insulation thickness in, a) maximum thermal stress, b) maximum deflection

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آثار تنش‌های حرارتی غیریکنواخت (گرادیان حرارتی)، در پل صندوقه‌ای بتنی جناح واقع در تهران مورد بررسی قرار گرفت. برای بدست آوردن گرادیان حرارتی در پل مذکور، با انجام آزمایش میدانی روی صندوقه بتنی، و با نصب سنسورهای ترموکوپل، داده‌های دمایی در ساعات مختلف ثبت و ذخیره شد. همچنین با مدلسازی پل مذکور در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، و اعمال داده‌های حاصل از گرادیان حرارتی، نتایج زیر استخراج شد

۱- نتایج آزمایش میدانی نشان داد که اختلاف دمای سطوح فوقانی و تحتانی صندوقه ۸/۸ درجه سانتیگراد می‌باشد، در حالی که نشریه ۱۳۹ ایران، برای صندوقه مورد آزمایش، عدد ۷ را ارائه داده‌است.

bridges with single-column piers. *Journal of Aerospace Engineering*, 32(3), 04019008.

[13] Laosiriphong K., GangaRao H. V., Prachasaree W., & Shekar V. 2006 Theoretical and experimental analysis of GFRP bridge deck under temperature gradient. *Journal of Bridge Engineering*, 11(4), 507-512.

[14] Peng Y. S. 2007 Studies on theory of solar radiation thermal effects on concrete bridges with application. *Southwest Jiaotong Univ., Sichuan, China*.

[15] Tayşi N., & Abid S. 2015 Temperature distributions and variations in concrete box-girder bridges: experimental and finite element parametric studies. *Advances in structural engineering*, 18(4), 469-486.

[16] He J., Xin, H., Wang Y., & Correia J. A. 2021 Effect of temperature loading on the performance of a prestressed concrete bridge in Oklahoma: Probabilistic modelling. *Structures* 34, 1429-1442.

[17] Xia Y., Chen B., Zhou X. Q., & Xu Y. L. 2013 Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(4), 560-575.

[18] Zhou L., Xia Y., Brownjohn J. M., & Koo K. Y. 2016 Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation. *Journal of Bridge Engineering*, 21(1), 04015027.

[19] Lee J. H., & Kalkan I. 2012 Analysis of thermal environmental effects on precast, prestressed concrete bridge girders: temperature differentials and thermal deformations. *Advances in Structural Engineering*, 15(3), 447-459.

[20] Zhou G. D., & Yi T. H. 2013 Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(12), 217983.

[21] SIMULIA, Abaqus Analysis User's Manual, version 6.11. SIMULIA, The Dassault Systemes, Realistic Simulation, USA, 2011.

International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE) (pp. 374-379). IEEE.

[3] Guo T., Liu J., Zhang Y., & Pan S. 2015 Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers. *Journal of Bridge Engineering*, 20(9), 04014099.

[4] Saetta A., Scotta, R., & Vitaliani R. 1995 Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads. *Journal of Structural Engineering*, 121(3), 446-457.

[5] Roberts-Wollman C. L., Breen J. E., & Cawrse J. 2002 Measurements of thermal gradients and their effects on segmental concrete bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 7(3), 166-174.

[6] Xia Y., Xu Y. L., Wei Z. L., Zhu H. P., & Zhou X. Q. 2011 Variation of structural vibration characteristics versus non-uniform temperature distribution. *Engineering Structures*, 33(1), 146-153.

[7] Standard Loads for Bridges (Number 139), Islamic Republic of Iran, Management and Planning Organization (In Persian).

[8] Cao Y., Yim J., Zhao Y., & Wang M. L. 2011 Temperature effects on cable stayed bridge using health monitoring system: a case study. *Structural Health Monitoring*, 10(5), 523-537.

[9] Westgate R., Koo K. Y., & Brownjohn J. 2015 Effect of solar radiation on suspension bridge performance. *Journal of Bridge Engineering*, 20(5), 04014077.

[10] Chen B., Ding R., Zheng J., & Zhang S. 2009 Field test on temperature field and thermal stress for prestressed concrete box-girder bridge. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 3(2), 158-164.

[11] Song X., Melhem H., Li J., Xu Q., & Cheng L. 2016 Effects of solar temperature gradient on long-span concrete box girder during cantilever construction. *Journal of Bridge Engineering*, 21(3), 04015061.

[12] Lei X., Jiang H., & Wang J. 2019 Temperature effects on horizontally curved concrete box-girder

Experimental and Numerical Investigation of Temperature Gradient in "Jenah "Concrete Box-Girder Bridge

H. Veladi¹, A. Abbasnejad², F. Raeesi³

1, Associated Professor of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran. (correspond)

2 Assistant Professor of civil engineering, University of Tabriz, Iran.

3. Ph.D. of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

Abstract:

Air temperature variations due to daily, seasonal, and annual changes can affect the bridges. The deformation and stress caused under solar radiation should not neglected in bridge design and their effects can be compared with dead and live loads. Thus, the components of bridges such as bearings, dampers and so on, are seriously affected by the combination of external loads and thermal stress. Different countries have provided temperature gradients in their codes. Almost in all of the codes, the vertical temperature gradient is specified, but unfortunately in none of them, the lateral temperature gradient is presented. Furthermore, in the vertical gradient, there are numerous lacks exist in different codes. For an example, most of the codes do not involve either temperature variations due to annual changes, or not considered the longitude or latitude of the location of the designed bridges. These problems lead the engineers to do the precise study beside the codes provided by each country, for temperature effects on the bridge structures. This paper investigates the effect of vertical and lateral thermal gradient loads for concrete box girder designed based on Iranian Standard Loads for Bridge (ISLB) code, using experimental test and three-dimensional finite element analysis. The ISLB code has two main problems in the field of thermal gradients. Firstly, the vertical temperature gradient provided in ISLB code, cannot used for all bridges in Iran, because each bridge has its unique geographical environment, latitude, longitude, and axis of orientation. Secondly, it does not contain any models for the lateral temperature gradient. To handle these problems, the experimental test is done and thermocouples are installed in different parts of the segment to get the thermal gradients and investigate their effects. In the case of predicting vertical gradient, the recorded data show that, the maximum temperature difference occurs in 1430 hrs with the value of 8.8 °C, while by considering the lateral gradient, the maximum temperature difference occurs at 1130 hrs with the value of 2.9 °C. In this paper, comparison between vertical and lateral gradients leads to consider only vertical gradients in further investigations. Moreover, by applying vertical gradient in the finite element model of the Jenah bridge, maximum thermal stress is occurred in the intersection of the web and top flange with the value of 1.96 MPa and maximum deflection of 4.36 mm in the midspan of the bridge. As a solution for mitigating the negative effects of the thermal gradients, using polyurethane insulation is proposed and modeled in the FE model. Results of simulation reveal that utilizing insulation can reduce the top slab temperatures to 30.5 °C, 29.16 °C, 27.5 °C and 26.4 °C from 33.6 °C in the case of using 2, 3, 5 and 6mm polyurethane insulations, respectively, which results in stress reduction from 1.96 MPa to 1.65, 1.35, 0.63 and 0.38 MPa in the case of using 2, 3, 5 and 6 mm polyurethane insulations, respectively. Furthermore, using insulation can reduce the deflection of the bridge, which in this study, the maximum deflection of the 48 m span is reduced from 4.36mm to 3.57, 2.86, 1.63 and 1.07 mm, by utilizing 2, 3, 5 and 6 mm polyurethane insulations, respectively.

Keywords: Concrete box girder, Thermal gradient, Experimental test, Polyurethane insulations, Finite element analysis.