

رفتار لرزه ای پلهای خاکی – فولادی

حدیث محمدمرادی

دانشجوی دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
h.mohammadmoradi@iiees.ac.ir

اکبر وائقی

استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
vasseghi@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: پلهای خاکی – فولادی، مدل اجزاء محدود، آنالیز استاتیکی پوش اوور، اندرکنش خاک و سازه

چکیده

پل خاکی – فولادی سازه ای است که از ورق فولادی موجدار و خاک تحکیم یافته تشکیل می شود تا از اندرکنش این دو جزء (خاک و ورق فولادی) استفاده بهینه نمود. ورق های فولادی موجدار در سایت به شکل دایره ای، بیضی، قوسی و ... مونتاژ می شوند و خاک بکار گرفته شده در خاکریز این پل ها خاک دانه ای می باشد. سرعت اجرا و هزینه اجرای پایین در این سازه ها باعث شده است از این پلها به عنوان یک گزینه مناسب در پلهای متعارف استفاده شود. پلهای با دهانه نسبتاً بزرگ، تا ۲۰ متر، در سالهای اخیر ساخته شده است. با وجود هزینه پایین و اجرای آسان این پلها، آنالیز عددی این پلها نسبتاً دشوار است. اگرچه عمر پیدایش این پل ها به چند دهه می رسد طراحی آنها اغلب با تکیه بر دانش تجربی به همراه آنالیز اولیه با ساده سازی های نسبتاً زیاد صورت می پذیرد. طراحی سازه ای این پلها مرتبط با طراحی خاک، ورق فولادی و همچنین در نظر گرفتن اندرکنش آنها است. مطالعات عددی و تجربی متعددی برای ارزیابی رفتار پلهای خاکی – فولادی تحت بارهای بهره برداری انجام شده است. اما هیچ گونه مطالعه جامعی در خصوص رفتار لرزه ای این پلها صورت نگرفته است. Abdel Sayed اذعان دارد که: "به نظر می رسد در نظر گرفتن پاسخ لرزه ای خاکریز معادل به جای سازه خاکی فولادی فرض صحیحی باشد". بنابراین توصیه می شود ملاحظاتی مشابه طراحی لرزه ای خاکریزها، برای پل های خاکی – فولادی در نظر گرفته شود. در این مقاله رفتار لرزه ای پل خاکی – فولادی قوسی شکل به روش اجزاء محدود بررسی شده است. برای این کار پل خاکی – فولادی مورد مطالعه در نرم افزار ABAQUS، بصورت دو بعدی مدل شده و سازه تحت بار استاتیکی پوش اوور آنالیز شده است.

مقدمه

سازه های خاکی – فولادی، سازه هایی هستند که شامل دو جزء اصلی فولاد و خاک می باشند. جزء فولادی به صورت صفحات موجدار می باشد که معمولاً به شکل حلقه و به عنوان اسکلت سازه عمل می نماید. اندرکنش خاک و فولاد باعث پایداری و توزیع مناسب بارها در اطراف حلقه فولادی می گردد. در این سازه ها، جزء خاکی نقش عمده ای در باربری داشته و حلقه های فولادی باعث توزیع مناسب بارهای وارده به صورت شعاعی می گردد. تحت بارگذاری، حلقه فولادی تمایل به تغییر شکل در جهت عرضی دارد لذا نیروهای جانبی خاک فعال شده و باعث جلوگیری از تغییر شکل حلقه فولادی می گردد. در نتیجه مجموعه در برابر بارهای قائم مقاومت می نماید. سازه های خاکی – فولادی به دلیل تنوع شکل و ابعاد دارای کاربردهای زیادی در پروژه های عمرانی هستند. اغلب شکل نعل اسبی این سازه ها برای زیرگذرهای راه آهن و شکل قوسی خوابیده و جعبه ای آن برای تقاطعات غیر همسطح راه و راه آهن (زیرگذر راه آهن) به کار می روند. در شکل ۱ نمونه ای از این پلها ملاحظه می شود. علت شکل گیری صفحات فولادی موجدار به دلیل افزایش سطح مقطع صفحات و افزایش ممان اینرسی به دلیل فاصله تا تار خنثی در یک طول محدود و کاهش تنش ها می باشد.





شکل ۱: نمونه ای از یک پل خاکی - فولادی

مطالعات نشان می دهند پارامترهای زیادی بر اندرکنش خاک و سازه اثر می گذرد اما ویژگی های غیرالاستیک خاک به راحتی قابل مطالعه نیستند. مدل الاستیک خطی افزایشی با مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون μ در آنالیز عددی مهندسی خاک بسیار مشهور است. Wang و همکاران در سال ۲۰۰۵ در مطالعات خود برای تحقیق در خصوص تاثیرات E و μ دو نوع حالت تنش از جمله عضو تحت فشار محوری و جسم نیمه بی نهایت تحت بار متمرکز روی سطح، پذیرفته اند. به دلیل پیچیدگی یک سازه خاکی - فولادی استفاده از یک مدل ریاضی بدون استفاده از کامپیوتر دشوار می باشد. به همین دلیل در آنالیز عددی سازه های پیچیده معمولاً از مدل اجزاء محدود استفاده می شود.

تحقیقات انجام شده در رابطه با بار لرزه ای در پل های خاکی - فولادی

George Abdel-Sayed et al., 1993) در کتاب (Soil-Steel Bridges) مسائل مختلفی در رابطه با طراحی و ساخت این پلها بیان کرده است. این نویسنده در کتاب خود بیان می کند: به نظر می رسد تا کنون مطالعات جامعی در رابطه با تاثیرات بارهای زلزله بر این پلها صورت نگرفته است. و در نظر گرفتن پاسخ این نوع پل در برابر زلزله مشابه پاسخ یک خاکریز معادل بدون عبور کانال در آن، قابل قبول به نظر می رسد. بنابراین توصیه می گردد ملاحظات برای در نظر گرفتن بار زلزله، مشابه آنچه در طراحی لرزه ای خاکریزها اعمال می شود، در نظر گرفته شود. یک نیاز اساسی برای طراحی خاکریزها در نواحی لرزه خیز، این است که برای مصالح خاکریز از مصالح مهندسی جهت بسترسازی استفاده گردد و به گونه ای جانمایی شود که در زلزله دچار روانگرایی نشود زیرا روانگرایی باعث می شود خاک غیر چسبنده مقاومت خود را در زلزله از دست دهد. لازم به ذکر است که یک پل خاکی - فولادی که با خاکی که مستعد روانگرایی نیست، ساخته می شود و در حین زلزله ثابت می ماند بصورت ایده آل قابلیت جذب انرژی را دارد.

استاندارد CHBDC توصیه می کند که سازه های خاکی - فولادی باید برای زلزله ای که احتمال رخ دادن آن در ۵۰ سال ۱۰٪ است، طراحی می شود. نیروی بار زلزله با ضرب کردن بار مرده بدون ضریب در نسبتی از مولفه قائم شتاب زلزله بدست می آید. این ضریب برابر ۲/۳ شتاب افقی زمین در نظر گرفته می شود که برابر ضریب شتاب منطقه ای تعریف شده در این آیین نامه است. برای محاسبه نیروی ضریب برابر ۱ است. تاثیرات بارهای زنده و بار زلزله با هم در نظر گرفته نمی شود. نتیجه مقایسه دو استاندارد CHBDC و AISI برای دهانه ها و ارتفاع خاکریز مختلف نشان می دهد که در شرایطی که ارتفاع خاکریز زیاد بوده یا بار زنده بزرگی بر سازه با ارتفاع خاکریز کم اعمال می شود، نتایج روش CHBDC به حقیقت نزدیک تر است. همچنین استاندارد CHBDC تنها استانداردی است که در آن به اثر بار زلزله در طراحی سازه های خاکی - فولادی توجه شده است. در این مرجع، بار زنده ناشی از زلزله، به روش استاتیکی معادل مطابق روابط زیر قابل تعیین است:

$$T_E = \begin{cases} \left[\frac{2}{3} \times (T_D + T_L) \right] A_V & 0.5T_D < T_L \\ T_D \cdot A_V & 0.5T_D > T_L \end{cases} \quad (1)$$

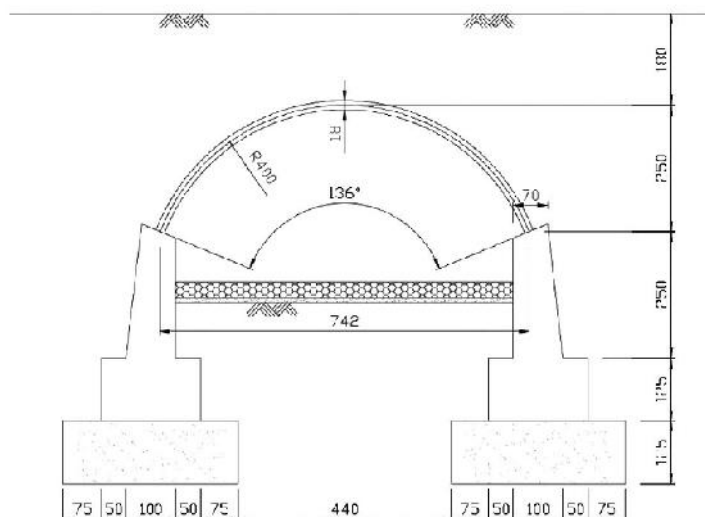
در روابط فوق T_L بار زنده ناشی از ترافیک، T_D بار مرده و A_V شتاب قائم زلزله می باشد که برابر ۲/۳ شتاب منطقه ای است.

آنالیز اجزاء محدود پل خاکی - فولادی

بر مبنای یک پل قوسی ساخته شده از ورق فولادی موجدار، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و با استفاده از نرم افزار اجزا محدود ABAQUS، یک مدل دو بعدی برای آنالیز استاتیکی غیر خطی push-over ساخته شد. پل قوسی بزرگراه ملی NO.27 در چین کیس مورد مطالعه است. (Baodong Liu et al., 2011) بر روی همین پل تحقیقاتی انجام داد و تاثیر پارامترهای مختلف مانند ضریب پواسون، مدول الاستیسیته، مقطع ورق فولادی موجدار و ... بر فشار خاک و تغییر شکل را بررسی نمود.

دهانه این پل ۷/۴۲ متر، ارتفاع آن ۲/۵ متر و عرض پیاده رو ۲۶ متر بوده و جاده با ۶ خط عبور طراحی شده است. عمق حداقل پوشش خاکی ۱/۸ متر است. سطح مقطع پل قوسی در شکل ۲ نشان داده شده است. مصالح مصرفی ورق فولادی فولاد گالوانیزه Q235A با تنش تسلیم ۲۳۵ و تنش مجاز ۱۴۰ مگاپاسکال است. پروفیل ورق فولادی موجدار برای بخش قوسی، همانطور که در شکل زیر ملاحظه می شود ۴۰۰×۱۸۰ میلیمتر است. ضخامت ورق ۷ میلیمتر بوده و خاک بکار گرفته شده در خاکریز ماسه لای دار است. چگالی خاک ۱۹ کیلونیوتن بر متر مکعب، زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه و مدول الاستیسیته آن ۳۰ مگاپاسکال است.

با فرض اینکه قوس فولادی موجدار، در جهت طولی به اندازه کافی طویل است، ساده سازی ورق فولادی به اندازه طول واحد، مشابه مسئله کرنش مسطح، و استفاده از مدل دو بعدی امکان پذیر است. وقتی مدل ساخته می شود، ورق فولادی موجدار می تواند به عنوان ورق مسطح بر اساس اصل تساوی سختی ها ساده سازی گردد. ممان اینرسی و سطح مقطع ورق فولادی در طول واحد برابر $34280 \text{ mm}^4/\text{mm}$ و $9733 \text{ mm}^2/\text{mm}$ بوده و همچنین مدول الاستیسیته و دانسیته آن به ترتیب برابر 2.06×10^5 مگاپاسکال و 78.5 kN/m^3 است. در بالای خاکریز یک لایه روسازی به ضخامت ۰/۴ متر وجود دارد. سایر پارامترهای دو نوع لایه در جدول ۱ آورده شده است. المان Beam21 برای ورق فولادی موجدار استفاده می شود. المان CPE4 برای خاکریز و لایه روسازی لحاظ می شود. معیار تسلیم Drucker-Pager در لایه خاکریز استفاده می شود. عرض خاک در برگرفته پل در هر طرف پل قوسی ۱/۵ برابر دهانه است. (۱۱/۳ متر). مدل آنالیز اجزا محدود در شکل ۳ آورده شده است.



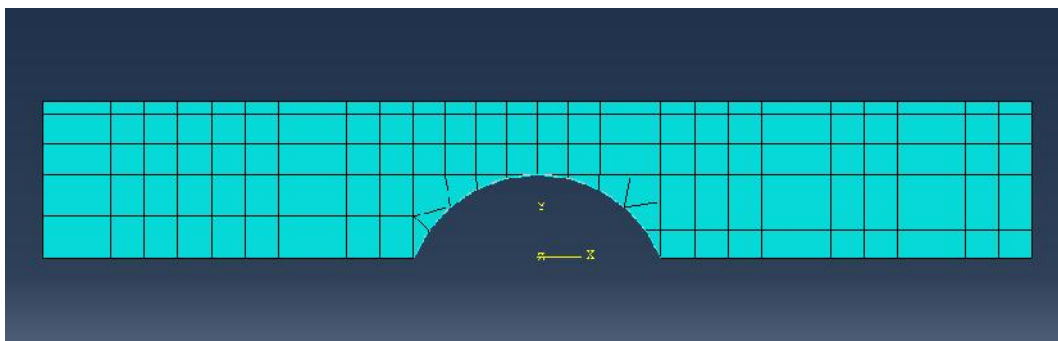
شکل ۲: سطح مقطع پل قوسی بزرگراه ملی NO.27 در چین

جدول ۱: مشخصات خاکریز

ضریب پواسون	چگالی (kN/m^3)	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	لایه
۰/۲	۱۹	۱۵	خاکریز
۰/۳	۲۵	۳۰۰	روسازی

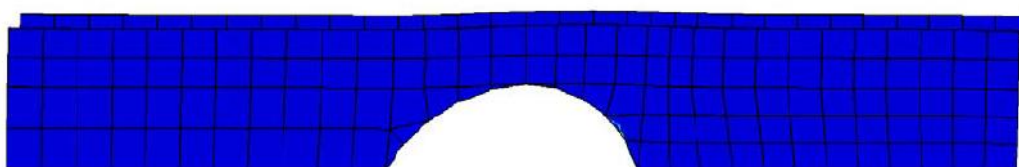
پل خاکی - فولادی مدل شده در نرم افزار آباکوس در دو حالت تحت بار پوش اوور آنالیز شده است. حالت اول تنها بارهای وارد بر سازه بار مرده ناشی از وزن خاکریز و ورق فولادی موجدار است و در حالت دوم علاوه بر بار مرده بار زنده وارد بر سازه مطابق با بار نوع دوم نشریه ۱۳۹، آیین نامه بارگذاری پل ها، کامیون ۴۰۰ کیلونیوتن در نظر گرفته شده است. در ادامه تغییر شکل سازه تحت آنالیز استاتیکی پوش اوور و همچنین منحنی نیرو - تغییر مکان برای دو حالت بارگذاری آورده شده است.



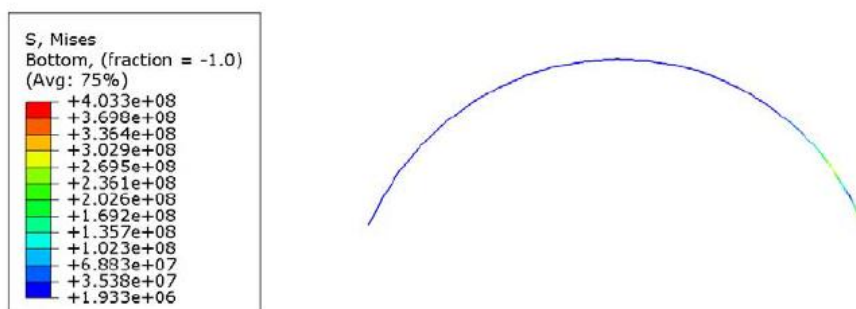


شکل ۳: مدل آنالیز اجزا محدود در نرم افزار ABAQUS

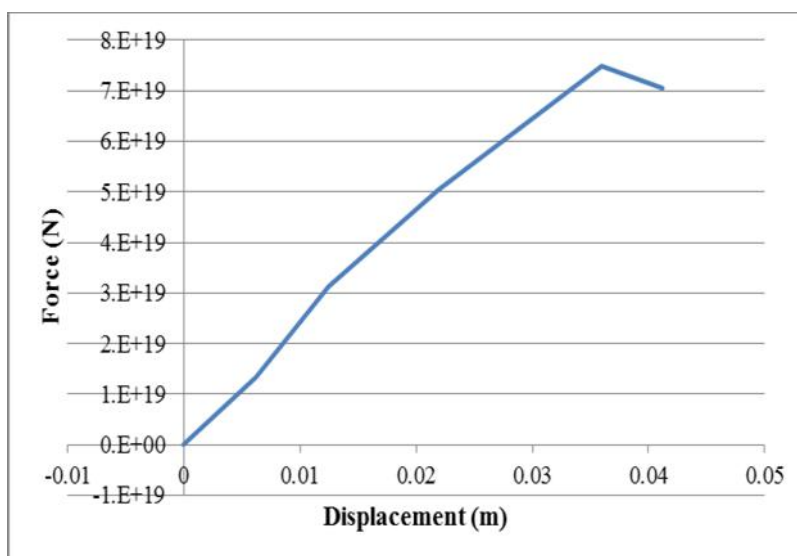
منحنی های نیرو - تغییر مکان از ثبت برآیند عکس العمل های تکیه گاهی در پایین خاکریز و همچنین تغییر مکان پل در بالاترین قسمت تاج بخش فولادی پل بدست آمده است.



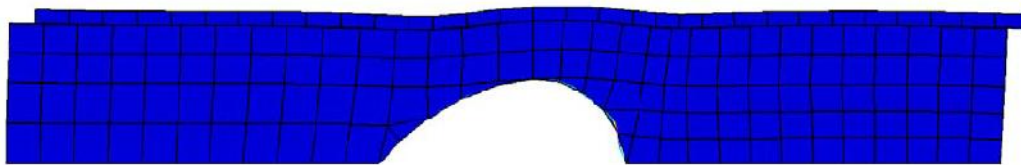
شکل ۴: تغییر شکل پل تحت بار مرده و آنالیز پوش اور



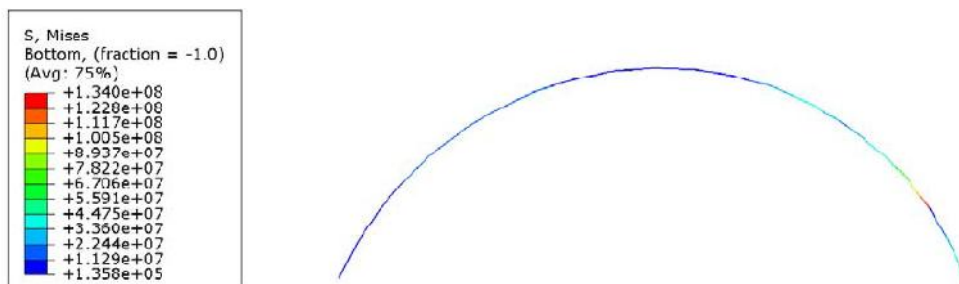
شکل ۵: تنش های فون میزس در بخش فولادی پل تحت بار مرده و آنالیز پوش اور



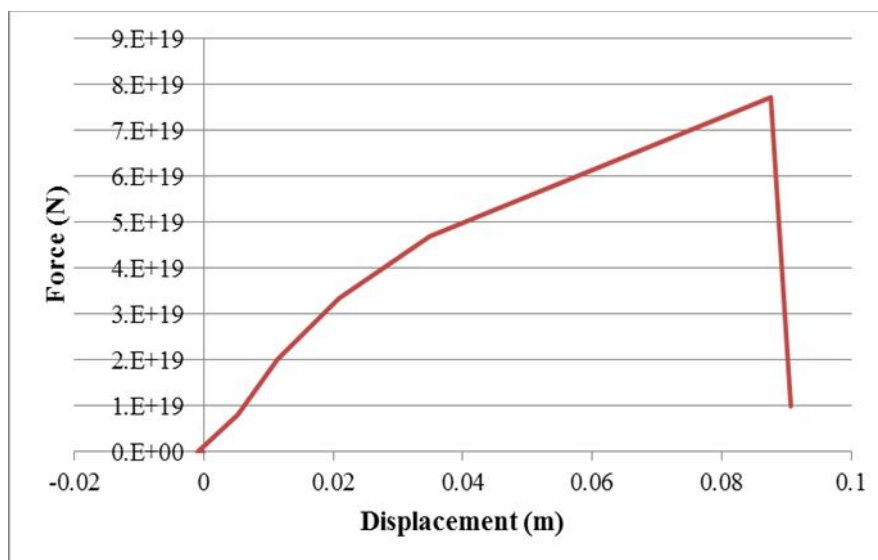
شکل ۶: منحنی نیرو- تغییر مکان پل خاکی فولادی تحت بار مرده و آنالیز پوش اور



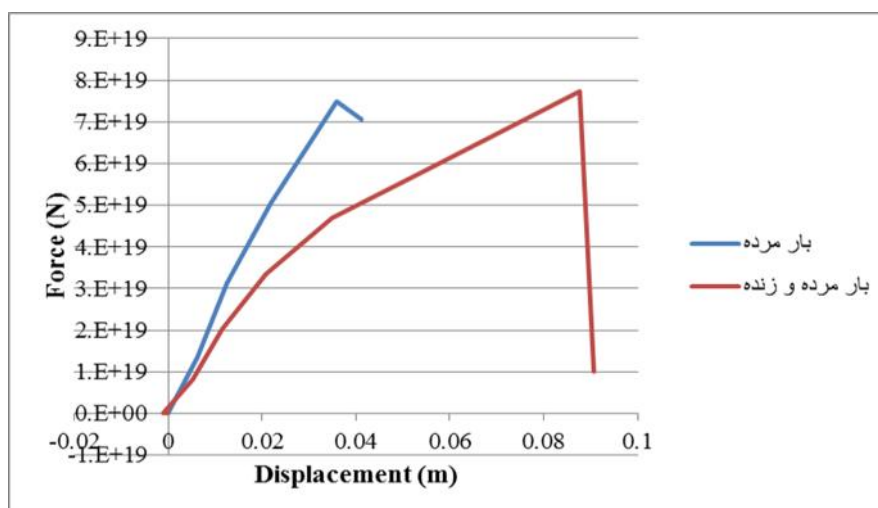
شکل ۷: تغییر شکل پل تحت بار مرده، زنده و آنالیز پوش اور



شکل ۸: تنش های فون میزس در بخش فولادی پل تحت بار مرده، زنده و آنالیز پوش اور



شکل ۹: منحنی نیرو- تغییر مکان پل خاکی فولادی تحت بار مرده، زنده و آنالیز پوش اور

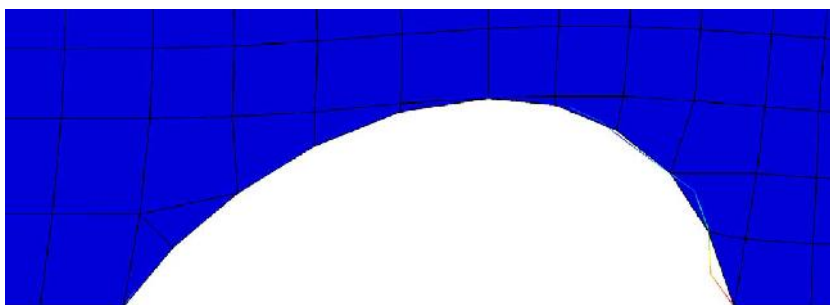


شکل ۱۰: مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان پل خاکی فولادی تحت دو حالت بارگذاری

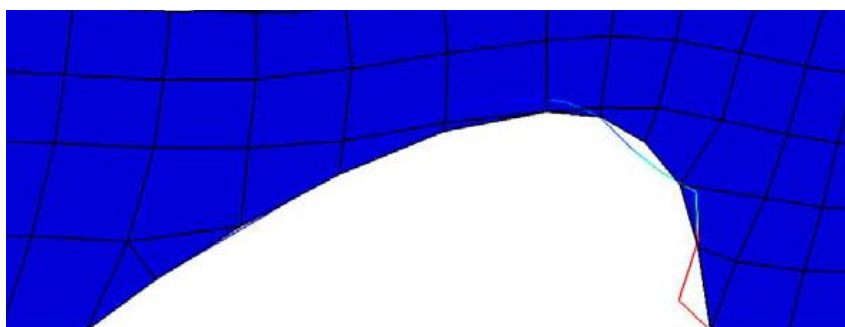


شکل های ۴ و ۷ تغییر شکل اغراق شده سازه تحت بار پوش اور ملاحظه می شود. همچنین در شکل های ۵ و ۸ تنش های فون میزس در بخش فولادی پل ملاحظه می شود. در شکل ۱۰ منحنی نیرو - تغییر شکل در دو حالت بارگذاری با یکدیگر مقایسه شده است. حداکثر تغییر مکان پل تحت بار مرده ۳/۶ سانتی متر و تحت بار مرده و زنده ۸/۸ سانتی متر می باشد. به عبارت دیگر حداکثر تغییر مکان جانبی تحت بار مرده و زنده حدود دو برابر حداکثر تغییر مکان جانبی تحت بار مرده می باشد.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، زمانی که با وارد کردن بار جانبی میزان تنش فون میزس در پای ورق فولادی در سمت راست پل به مقدار ۲۰۰ مگاپاسکال می رسد، منحنی نیرو - تغییر مکان افت می کند. با توجه به اینکه بار جانبی از سمت چپ وارد میشود، بخش پایینی سمت راست پل تحت فشار قرار می گیرد و از سوی دیگر به دلیل وجود خاکریز در اطراف پل، امکان حرکت وجود ندارد در حالیکه در سمت چپ پل ورق فولادی امکان حرکت وجود دارد. بنابراین تنش فون میزس حداکثر در سمت راست ورق فولادی رخ می دهد.



شکل ۱۱: تغییر شکل ورق فولادی با بزرگنمایی ۲۰ برابر، در نقطه ماکزیمم نمودار نیرو- تغییر مکان تحت بار مرده و پوش اوور



شکل ۱۲: تغییر شکل ورق فولادی با بزرگنمایی ۲۰ برابر، در نقطه ماکزیمم نمودار نیرو- تغییر مکان تحت بار مرده، زنده و پوش اوور

شکل های ۱۱ و ۱۲ تغییر شکل ورق فولادی پل را با اغراق نشان می دهد. این تغییر شکل ها در حالتی که تغییر مکان جانبی به میزان حداکثر خود رسیده، رخ داده است. مشاهده می شود که در این مرحله ورق فولادی دچار کمانش موضعی و اعوجاج شده است و بلافاصله پس از این مرحله منحنی نیرو - تغییر مکان جانبی افت پیدا می کند. از آنجایی که در قسمت پایین و سمت راست ورق فولادی به دلیل وجود خاکریز امکان جابجایی وجود ندارد، بدیهی است که تنش در این قسمت بیشتر از سایر نواحی است.

نتیجه گیری

همانطور که ملاحظه می شود نقش عمده باربری و تحمل تنش ها بر عهده بخش فولادی پل بوده و همچنین در حالتی که بار مرده بعلاوه بار کامیون ۴۰۰ کیلونیوتنی بر پل وارد می شود نسبت به حالتی که تنها بار مرده بر سازه وارد می شود، تغییر شکل نهایی سازه کمتر می باشد. همچنین در شکل ۱۰ ملاحظه می شود که مقاومت نهایی در هر دو حالت بارگذاری تقریباً یکسان است اما در حالتی که بار مرده به همراه بار زنده بر سازه وارد می شود تغییر شکل پل بیشتر بوده و ناحیه خطی نمودار کمتر است.

در اشکال ۱۱ و ۱۲ ملاحظه می شود که به محض کمانش موضعی ورق فولادی و اعوجاج آن منحنی نیرو - تغییر مکان جانبی افت پیدا می کند و این کمانش در حالتی که بار مرده و زنده به سازه وارد می شود دیرتر اتفاق می افتد. به عبارتی دیگر با افزایش وزن روی سازه فلزی، ورق فولادی رفتار شکل پذیر تری از خود نشان می دهد. این افزایش وزن می تواند از طریق افزایش ارتفاع خاکریز نیز روی دهد. البته باید توجه داشت که با افزایش ارتفاع خاکریز تنش در ورق فولادی نیز افزایش می یابد و این افزایش وزن باید به حدی باشد که ورق بتواند تنش های ناشی از بار ثقلی را تحمل کند.

مراجع

جودی ع (۱۳۸۵) نگاهی به شیوه بازسازی در مناطق مختلف استان لرستان، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی درسهایی از زلزله لرستان، بروجرد، ایران

Abdel-Sayed G (1993) Soil-Steel Bridges, Design and Construction, University of Windsor, B. Bakht, University of Toronto, L.G. Jaeger, Technical University of Nova Scotia

American Association of State Highway Transportation Officials (1996) Standard Specifications for Highway Bridges, Division I-Design, Section 12- Soil-Corrugated Metal Structure Interaction Systems, AASHTO

CAN/CSA-S6-00 (2000) Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC), National Standard of Canada, CSA International

Chen CW (2000) Corrugated Steel Structure and Its Application in Highway Engineering, Highway, No.7, pp. 48-54

Feng L (2010) Mechanics Behavior about Buried Corrugated Steel Culverts considering Soil-structure Interaction, M.E. thesis, Beijing Jiaotong University, Beijing

Feng ZM, Liu BD and Wang QL (2009) Structural Analysis and Design of Buried Corrugated Steel Bridge and Culvert, J China Foreign Highway, 29(6): 141-145

Liu B and Zhang M (2011) Effect of Parameters on Soil-Structure Interavtion of a Buried Corrugated Steel Arch Bridge, The Open Civil Engineering Journal 5, 154-162

Wang Z and Lu SQ (2005) Effects of variation of strength and deformation parameters on calculation results of FEM for soil engineering, Rock Soil Mechanics, 26(12): 1892-1894