

ارائه‌ی راهکاری برای بالا بردن عمر آویزهای پل معلق در برابر خرابی تحت بارهای جانبی

حسین عباسی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مجید برقیان* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۵-۲۳، (پژوهشی)

آویزها اجزاء انتقال نیرو در پل‌های معلق هستند که نیروهای وارده بر عرشه را به کابل‌های اصلی پل انتقال می‌دهند و سلامت آن‌ها نقش مهمی در امنیت پل ایفا می‌کند. اما آویزها تحت بارهای اعمالی و متعاقباً جابه‌جایی‌های وارده به آن‌ها، مستعد خرابی هستند و در نتیجه، بیشتر آن‌ها طول عمر کوتاهی دارند و باید تعویض شوند. نوشتار حاضر، به دنبال راهکاری برای بالا بردن عمر آویزها بوده و با تمهیداتی که پیشنهاد کرده است، عملکرد آویز بهبود می‌یابد. برای اصلاح رفتار آویزها، افزودن عضوی از جنس پلی‌اتیلن بین قسمت سوکت و کابل آویز پیشنهاد شده است. مدل‌سازی مربوط به آویز واقعی روی پل موردی و مدل پیشنهادی انجام شده و نتایج نشان داده است که در مدل پیشنهادی، تنش وارده بر اعضاء مدل تا حدود ۳۹٪ نسبت به حالت اولیه کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داده است که برخلاف مدل اولیه، کرنش خمیری در سوکت و کابل صفر بوده است. بعد از اثبات کارایی مدل پیشنهادی، مصالح دیگری (پلی‌اتیلن، تفالون و پلی‌پروپیلن) در مدل پیشنهادی جایگزین شدند و نتایج هر ۴ مدل مقایسه شدند. از بین مصالح جایگزین، تفالون جواب بهتری داده است.

واژگان کلیدی: آویز، پل معلق، خرابی آویز، جابه‌جایی وارد شده، اصلاح آویز.

hosseinabbasi107@gmail.com
barghian@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

آویزها از اجزاء انتقال نیرو در پل‌های معلق هستند که بارهای اعمالی بر عرشه را به کابل‌های اصلی پل منتقل می‌کنند و دوام و سلامت آن‌ها نقش مهمی در امنیت و قابلیت سرویس‌دهی بی‌عیب پل ایفا می‌کند. با وجود این، مشکل عمده‌ی بیشتر پل‌های معلق این است که از بین اجزاء پل، آویزها از آسیب‌پذیرترین اجزای تحت بارهای اعمالی و متعاقباً جابه‌جایی‌های وارده به آن‌ها هستند و این موضوع در محیط‌های خورنده، خطرناک‌تر هم می‌شود. آویزها در اثر عوامل محیطی و بارهای ترافیکی معمولاً دچار خرابی و حتی شکست می‌شوند و در نتیجه اکثراً طول عمر کوتاهی دارند و باید تعویض شوند، که امری هزینه‌بر خواهد بود. خرابی آویز می‌تواند شامل: خوردگی، خستگی، ترک‌خوردگی، شکست و بسیاری از عوامل دیگر در قسمت‌های مختلف آویز باشد (شکل ۱).

در چند سال اخیر، تلاش‌های قابل‌توجهی درباره‌ی علل خرابی آویزها و نحوه‌ی کمینه‌سازی آسیب‌های وارده به آن انجام شده است. کلونی^۱ و همکارانش (۲۰۰۷)،^[۱] درباره‌ی خستگی کابل‌های داخل آویزهای پل معلق که در معرض بارهای باد قرار داشتند، مطالعه‌ی انجام دادند و دریافتند که کابل‌ها برخلاف تمام مزیت‌هایی که دارند، میرایی ساختاری بسیار کمی از خود نشان می‌دهند که این امر در کنار

انعطاف‌پذیری زیاد، آن‌ها را در معرض ارتعاش‌های ناشی از عوامل بیرونی مثل بار باد قرار می‌دهد، به طوری که گاهی اوقات منجر به پارگی‌های ناشی از خستگی می‌شود. از نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که هر چه سرعت باد و آشفتگی باد بیشتر بوده است، خرابی خستگی کابل‌های آویزها بیشتر شده است. پترینی و بنتمی^۲ (۲۰۱۱)،^[۲] در بررسی مراحل مختلف خرابی خستگی در آویزهای پل معلق تحت بار باد و بارهای اعمالی از طرف عبور قطار دریافتند که علت عمده‌ی خستگی آویزهای پل‌های معلق، تجربه‌ی تعداد زیادی از چرخه‌های تنش با دامنه‌ی قابل توجه آویزهای پل به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد و وزن کم آن‌ها (در مقابل حجم کلی سازه) در طول بهره‌برداری اعلام شده است. همچنین از نتایج به‌دست آمده از تحلیل مدل عددی مشاهده شد که تأثیر بارهای اعمالی از طرف قطار در خرابی خستگی آویزهای پل بیشتر از بار باد بوده است. ژانگ، خیانگ لیو^۳ و همکارانش (۲۰۱۷)،^[۳] در بررسی تأثیر استفاده از گیره‌های مرکزی صلب در رویکرد خستگی آویزهای کوتاه، دو مدل اجزاء محدود مربوط به پل معلق تک‌دهانه با و بدون گیره‌های مرکزی را مدل‌سازی کردند و دریافتند که گیره‌های مرکزی از طریق کاهش جابه‌جایی نسبی میان کابل‌ها و عرشه می‌توانند تنش‌های خمشی آویزهای کوتاه را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهند. در انتها نتیجه‌گیری و پیشنهاد کردند هنگامی که گیره‌های مرکزی وجود ندارند، آویزها ممکن است زودتر از بازه‌ی که در طراحی در نظر گرفته شده است، دچار خستگی بشوند. سان^۴ و همکارانش (۲۰۱۷)،^[۴]

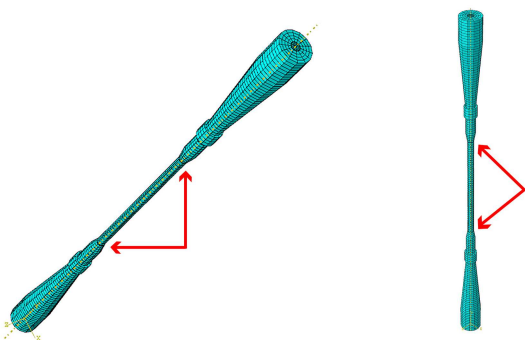
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۹/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۰/۶/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۷/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2021.56235.2863



شکل ۲. مدل اجزاء محدود یکی از آویزهای پل جیانگین.



شکل ۳. مدل اجزاء محدود پیشنهادی برای مدل قبلی آویز (مدل با عضو لایه‌ی میانی).

تغییر داده شد. در انتها، نتایج هر چهار مدل آویز با هم مقایسه شدند، تا مناسب‌ترین مدل برای آویز پل مشخص شود. چون در بررسی صورت گرفته^[۵] مشخص شده است که از بین آویزهای پل، آویزهای کوتاه پل در اثر جابه‌جایی نسبی طولی بزرگی، که میان کابل اصلی و عرشه اتفاق می‌افتد، دچار آسیب می‌شوند؛ بر همین اساس، در پژوهش حاضر نیز برای بررسی بهتر و نزدیک شدن به واقعیت موضوع، از ابعاد یکی از آویزهای واقعی کوتاه پل استفاده شده است.

۲. مدل‌سازی و روش تحلیل

به‌منظور بررسی خرابی آویز پل در اثر نیروهای اعمالی و ارائه‌ی راهکاری برای بهبود رفتار آویز، در آباکوس دو نوع آویز پل مدل شدند که مدل اجزاء محدود اولی، مربوط به آویز واقعی موجود روی پل جیانگین و مدل دومی، هم مربوط به مدل اجزاء محدود پیشنهادی برای آویز پل بوده است. سالانه در نقاط مختلف دنیا، هزینه‌ی زیادی صرف نگهداری، تعمیر، و یا تعویض آویزها می‌شود (مثل پل‌های گلدن گیت^[۸]، کلیفتون^[۹]، شانتویی^[۱۲]، جیانگین^[۱۰]، و غیره). در نوشتار حاضر چون اطلاعات مربوط به آویزهای پل معلق جیانگین در دست بوده است، به همین خاطر در راستای بررسی خرابی آویزها و ارائه‌ی راهکاری برای بهبود رفتار آن‌ها، مدل مربوط به آویز پل جیانگین از بین پل‌ها انتخاب شده است که در شکل ۲ نیز مدل اجزاء محدود آن مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۳، مدل اجزاء محدود پیشنهادی برای آویز به جای مدل اولیه مشاهده می‌شود، که شکل کلی آن شبیه مدل اولیه‌ی آویز است، با این تفاوت که یک عضو به نام لایه‌ی میانی و از جنس پلی‌اتیلن میان اعضاء قبلی افزوده شده است.

برای طراحی مدل موردنظر در پژوهش حاضر، سه بخش جداگانه به نام‌های لایه ۱^۳، سوکت^{۱۴} و کابل^{۱۵} در نظر گرفته و ترسیم شده‌اند. در بخش کابل، یک استوانه‌ی



شکل ۱. نمونه‌ی از خرابی آویز پل.^[۱]

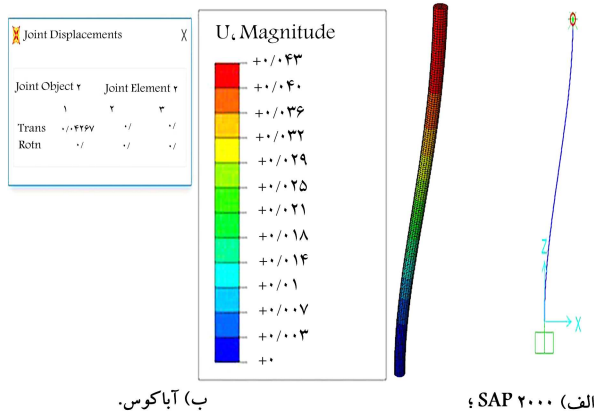
در بررسی علل خرابی آویزهای پل معلق جیانگین دریافتند که آویزهای کوتاه پل در اثر جابه‌جایی نسبی طولی بزرگی که میان کابل اصلی و عرشه اتفاق می‌افتد، دچار آسیب می‌شوند. ژنگ^۵ و همکارانش (۲۰۱۸)،^[۶] ارزیابی خستگی یکی از آویزهای کوتاه پل نانجینگ دانشگاه^۶ را براساس اطلاعات کرنش دینامیکی انجام دادند و تأثیر رفتار خمشی، خطوط قطار، تعداد واگن‌ها و سرعت قطار در عملکرد خستگی آویز کوتاه را بررسی کردند و دریافتند که رفتار خمشی تأثیر قابل توجهی در آثار خستگی آویزهای کوتاه دارد. ژانگ خیانگ لیو و همکارانش (۲۰۱۸)،^[۱] روشی برای ارزیابی قابلیت اطمینان آویزهای کوتاه پل‌های معلق و قوسی ارائه و برای سنجش ایمنی آویزها، از روشی به نام ارزیابی رویکرد تصادفی استفاده کردند. با استفاده از روش ارزیابی ارائه شده مشخص شد که شاخص اطمینان آویز روی پل، بعد از ۲۴ سال به صفر می‌رسد که این مدت از $\frac{1}{3}$ عمر طراحی در نظر گرفته شده است.

با وجود تلاش‌های زیادی که درباره‌ی علل خرابی آویزها و نحوه‌ی کمینه‌سازی آسیب‌های وارده به آن‌ها انجام شده است، ولی به‌علت اینکه هنوز گزارشی از خرابی آویزها در پل‌های معلق از نقاط مختلف دنیا داده می‌شود (مثل فرو ریختن ناگهانی پل معلق کوتای- کارتانگارا (کوکا)^۷ در سال ۲۰۱۱ در کشور اندونزی که بیش از ۲۰ نفر تلفات در برداشت،^[۷] و یا اخیراً یک پل معلق در ونزوئلا که در اثر خرابی چند آویز آن (بارگی آویز)، کل پل عملاً غیرقابل بهره‌برداری شده بود)، بیانگر این واقعیت هستند که هنوز هم در زمینه‌ی مذکور به روش‌های پیشنهادی جدید و کارآمدی نیاز است.

نوشتار حاضر، به دنبال راهکاری برای بالا بردن عمر آویزها بوده و با تمهیداتی که پیشنهاد کرده است، حتی باعث بهبود عملکرد آویز هم شده است؛ تا از این طریق امنیت کل سازه‌ی پل ارتقاء یابد و از بروز هزینه‌های اضافی برای تعمیر یا تعویض آویزهای آسیب‌دیده جلوگیری شود. بررسی انجام شده در نوشتار حاضر، شامل دو بخش است: در بخش اول، برای اصلاح رفتار آویزها، افزودن عضوی بین قسمت سوکت و کابل آویز پیشنهاد شده است. به این صورت که ابتدا مدل‌سازی مربوط به آویز واقعی روی پل جیانگین^۸ در نرم‌افزار آباکوس^۹ انجام شده است. بعد، مدل پیشنهادی با افزودن عضوی به نام لایه‌ی میانی میان اعضاء قبلی برای آویز پل مدل‌سازی و تحلیل شد. سپس نتایج هر دو مدل آویز برای نتیجه‌گیری با یکدیگر مقایسه شدند. در بخش دوم، نیز بعد از اثبات کارایی مدل پیشنهادی، دو مدل پیشنهادی دیگر برای آویز پل شبیه مدل پیشنهادی، اول مدل‌سازی شدند. با این تفاوت که در هر کدام از آن‌ها، نوع مصالح به‌کار رفته در عضو لایه‌ی میانی مرتبط

جدول ۱. مشخصات مصالح استفاده شده در مدل سازی.

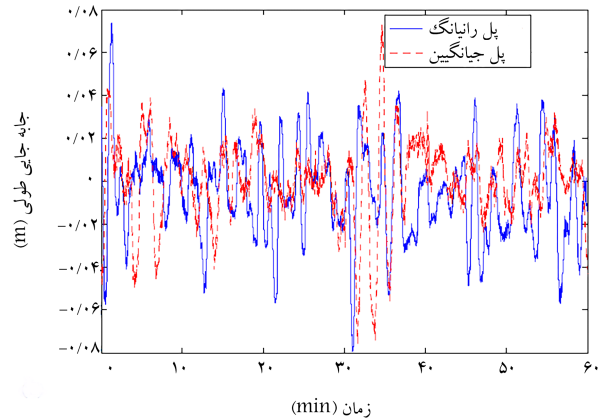
مصلح	وزن مخصوص (Kgf/m^3)	مدول کشسانی (Pa) $\times 10^7$	ضریب پواسون	تنش تسلیم (Pa) $\times 10^6$
Cable Steel	۷۸۶۶/۶۲	۱۹۰۰۰	۰/۳	۱۱۸۰
St۳۷	۷۸۵۰	۲۰۴۰۰	۰/۳	۲۷۵/۰۹
HDPE	۹۶۰	۸۰	۰/۴۵	۳۰



ب) آباکوس.

الف) SAP ۲۰۰۰؛

شکل ۳. جابه‌جایی انتهای میله.



شکل ۴. جابه‌جایی طولی آویز پل. [۵]

مصلح و شرایط مرزی یکسان، تحت بار متمرکز تحلیل شد. همان طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از دو نرم‌افزار شباهت زیادی به هم دارند به طوری که جابه‌جایی انتهای میله تحت بار اعمالی یکسان، در آباکوس برابر ۴۳۶/۰ متر و در SAP۲۰۰۰ برابر ۴۲۶/۰ متر است که این اختلاف ناچیز بین نتایج دو مدل قابل قبول است و می‌تواند ناشی از پیش‌فرض‌های نرم‌افزارها باشد.

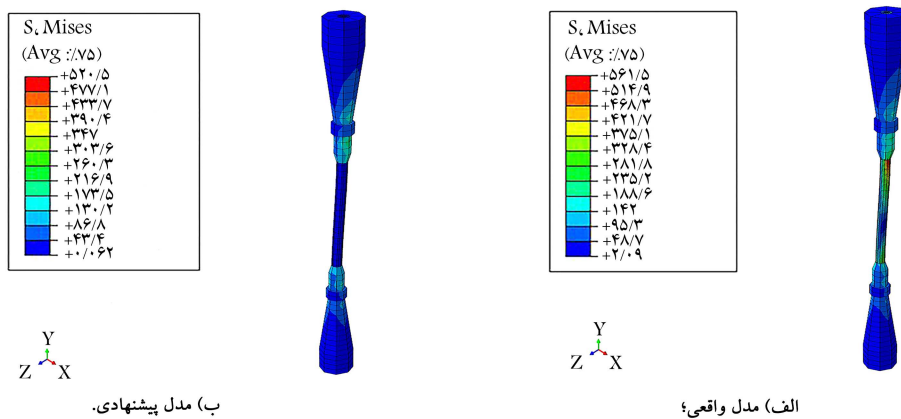
نتایج حاصل از تحلیل مدل اولیه آویز (بدون لایه) بررسی شدند، تا بتوان با نتایج به دست آمده از تحلیل مدل پیشنهادی - که اشاره شده است - مقایسه شوند تا کارایی و مزیت مدل پیشنهادی مشخص شود. منظور از مدل اولیه، همان مدل در نظر گرفته شده برای آویز واقعی موجود روی پل جیانگین است. از جمله موارد بررسی پژوهش حاضر، خرابی آویز با توجه به نتایج مربوط به توزیع معیار تنش فون میسز^{۱۸} و مقدار آن در محل مشخص شده در آویز و نتایج کرنش خمیری^{۱۹} اعضاء آویز است. در همین راستا، مطابق شکل ۶، به توزیع تنش در مدل اولیه و مدل پیشنهادی برای آویز پل پرداخته و مشاهده شد که توزیع تنش در آن منطقه از عضو مرتبط آویز که در واقعیت اکثراً دچار ترک‌خوردگی می‌شود، در هر دو مدل نیز بیشتر از دیگر ناحیه‌هاست.

در شکل ۷، مقدار تنش ایجاد شده در محل موردنظر از آویز مدل اولیه و مدل پیشنهادی (ناحیه‌یی که در واقعیت اکثراً دچار خرابی و ترک‌خوردگی می‌شود)، برای مقایسه‌ی رفتار دو مدل مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۸، که مقایسه‌ی نتایج (شکل ۷) را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که در یک محل از دو مدل (در گره‌ی ۹)، تنش موجود در آن نقطه از مدل پیشنهادی کوچک‌تر از تنش ایجاد شده در همان نقطه از مدل اولیه یا واقعی است.

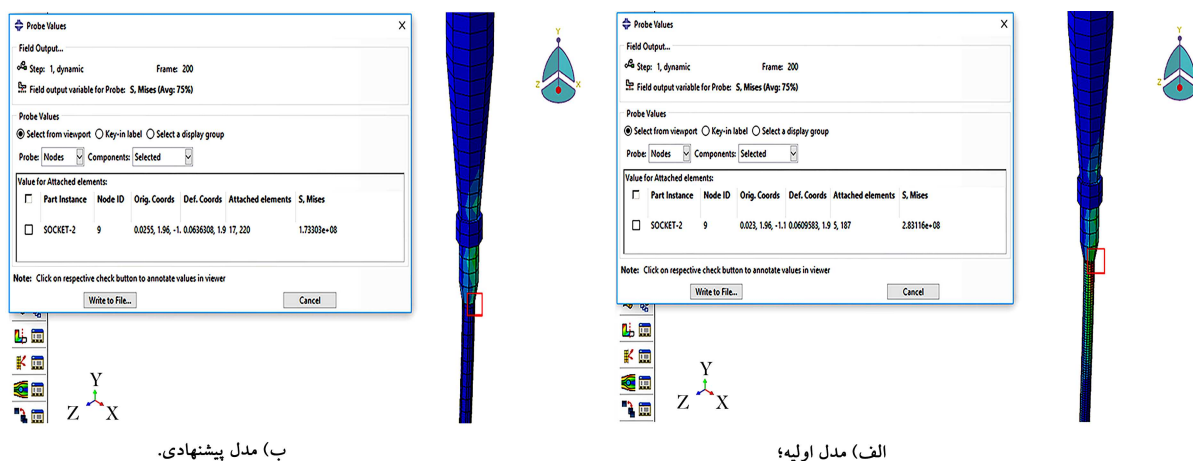
توپر به شعاع ۲۲۵/۰ متر و به طول ۳ متر رسم شد. در بخش سوکت، قسمت‌های بالا و پایین آویز پل رسم شدند و سپس در هر کدام یک سوراخ استوانه‌یی شکل و به قطر ۵/۰ متر ایجاد شد. در بخش لایه، لایه‌ی میانی موردنظر (مانند لوله) به شعاع ۲۵/۰ متر و به ضخامت ۲۵/۰ متر ترسیم شد. شرایط مرزی را باید به نحوی اعمال کرد تا رفتار مدل ساخته شده شبیه رفتار آویز پل در واقعیت باشد. بنابراین در اعمال شرایط مرزی برای قسمت بالای آویز، درجه‌های URx و URy و برای قسمت پایین آویز فقط URx آزاد قرار داده شدند. در مش‌بندی نیز بعد از سعی و خطا کردن و بررسی‌های انجام گرفته از بابت تعداد و اندازه‌ی مش که حالت بهینه داشته باشد تا هم حجم محاسبات معقول باشد و هم از نظر بررسی رفتار سازه نیاز به مش‌بندی کوچک‌تر نباشد، در نهایت تصمیم بر آن شد که بخش کابل با اندازه‌ی ۱/۰ متر و بخش‌های سوکت و لایه با اندازه‌ی ۲/۰ متر مش‌بندی شوند. جزئیات مشخصات مصالح مختلف استفاده شده در مدل اولیه و مدل پیشنهادی برای آویز در جدول ۱ ارائه شده است.

۱.۲. روش تحلیل و نتایج

در سال ۲۰۱۷، در بررسی که سان و همکاران،^[۵] درباره‌ی علل خرابی آویزهای پل معلق جیانگین انجام دادند، دریافتند که آویزهای کوتاه پل در اثر جابه‌جایی نسبی طولی بزرگی که میان کابل اصلی و عرشه اتفاق می‌افتد، دچار آسیب می‌شوند.^[۵] در پژوهش حاضر نیز چون جابه‌جایی‌های نسبی طولی آویزها به صورت دقیق و در واقعیت از طریق سیستم پایش سلامت سازه‌یی^{۱۶} (نصب آنتن‌های GPS^{۱۷} مشخص و در دسترس بوده است) شکل ۴. به همین دلیل در تحلیل مدل‌های ساخته شده، جابه‌جایی‌های واقعی آویز اعمال شدند. به منظور صحت‌سنجی، میله‌ی در دو نرم‌افزار آباکوس و SAP۲۰۰۰ با لحاظ



شکل ۶. توزیع تنش در مدل مرتبط با آویز در اثر جابه‌جایی‌های اعمالی (بر حسب MPa).



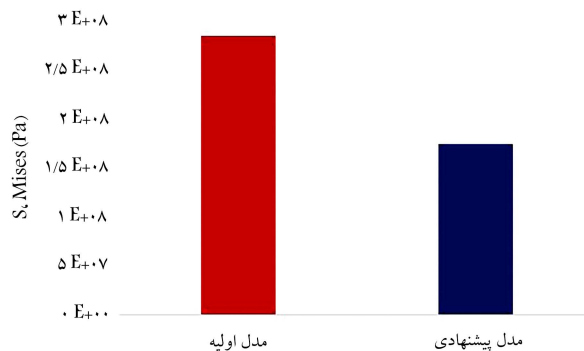
شکل ۷. تنش موجود در محل مشخص از آویز.

جابه‌جایی‌های یکسان صفر است و فقط عضو لایه میانی افزوده شده دچار کرنش خمیری می‌شود که یک امر طبیعی است، چون عضو مرتبط از جنس پلیمر است.

۳. نتیجه‌گیری از مقایسه‌ی نتایج مدل‌های اولیه و پیشنهادی

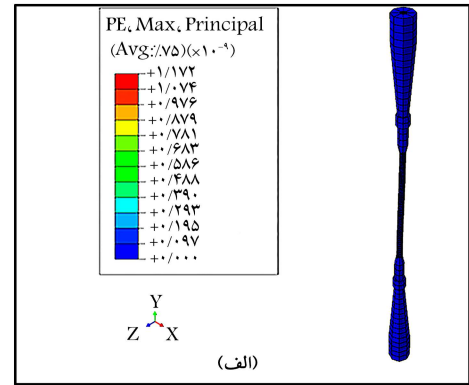
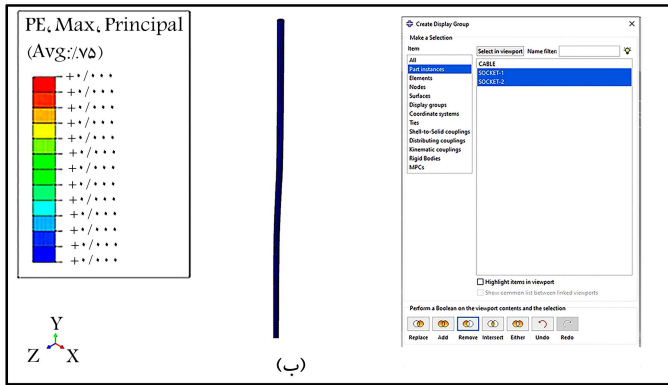
از مقایسه‌ی نتایج مدل پیشنهادی با مدل اولیه و بنا به دلایل گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن عضو لایه میانی - که از جنس پلی‌اتیلن است - به عنوان لایه میانی بین سه عضو دیگر مدل اولیه، هم باعث کاهش تنش ایجاد شده می‌شود و هم از کرنش خمیری دیگر اعضاء مدل جلوگیری می‌کند و به همین خاطر تا حد زیادی سبب بالا بردن عمر آویز و بهبود عملکرد آن می‌شود. همچنین در مدل اولیه‌ی اعضاء آویز نسبت به مدل پیشنهادی، به علت تنش ایجاد شده‌ی بزرگ‌تر و کرنش خمیری، زودتر ترک بر می‌داشت که همین امر سبب زنگ‌زدگی سریع‌تر کابل آویز در مدل اولیه نسبت به مدل پیشنهادی می‌شد، لذا باید کل آویز تعویض می‌شد.

بعد از اثبات کارایی مدل پیشنهادی برای آویز پل، دو مدل دیگر شبیه مدل پیشنهادی اول ارائه شدند. با این تفاوت که جنس مصالح به‌کاررفته در عضو لایه میانی هر کدام از آن‌ها با یکدیگر متفاوت بود. سپس هر کدام به صورت جداگانه و با شرایط یکسان

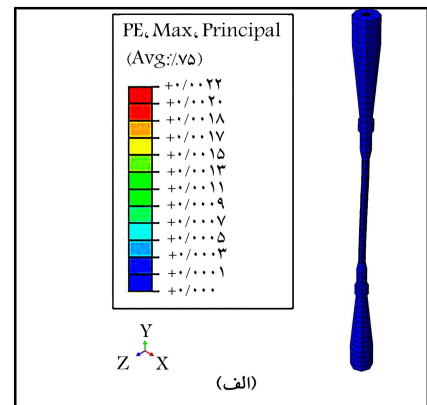
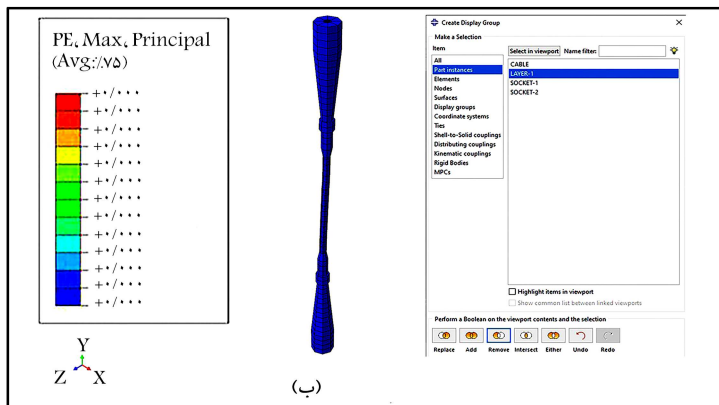


شکل ۸. مقایسه‌ی تنش ایجاد شده در محل مشخص بین دو مدل.

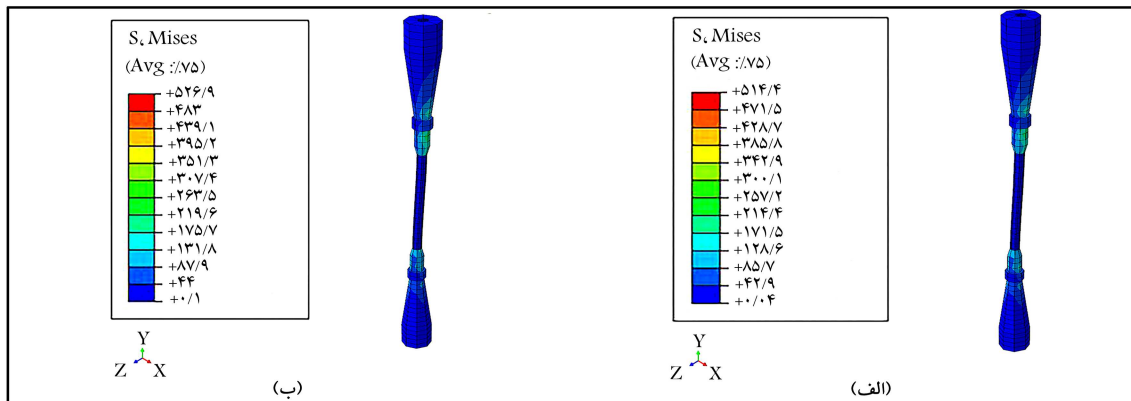
همچنین مطابق نتایج شکل ۶ مشخص می‌شود که تحت جابه‌جایی‌های یکسان، محدوده‌ی توزیع تنش در مدل پیشنهادی کمتر از مدل اولیه است. موضوع دیگری که حائز اهمیت است، نتایج مربوط به کرنش خمیری اعضاء آویز است. از مقایسه‌ی نتایج دو شکل ۹ و ۱۰ که نتایج مربوط به کرنش خمیری اعضاء مدل اولیه و مدل پیشنهادی هستند، مشاهده می‌شود که در پی اعمال جابه‌جایی‌های یکسان و مشخصی به هر دو مدل اولیه و پیشنهادی، عضو یا اعضایی از آویز مدل اولیه دچار کرنش خمیری می‌شوند. در صورتی که در مدل پیشنهادی برخلاف مدل اولیه، کرنش خمیری اعضاء قبلی آویز تحت



شکل ۹. کرنش خمیری ایجاد شده در اعضاء مدل اولیه.



شکل ۱۰. الف) کرنش خمیری ایجاد شده در مدل پیشنهادی، ب) بررسی کرنش خمیری اعضاء مدل پیشنهادی.



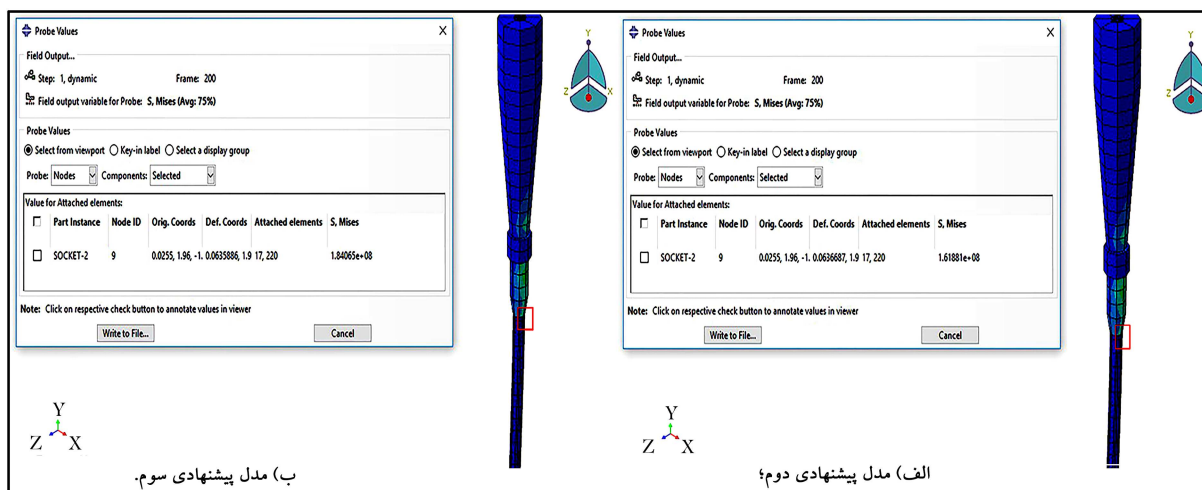
شکل ۱۱. توزیع تنش در مدل مرتبط با آویز در اثر جابه‌جایی‌های اعمالی (بر حسب MPa).

مدل‌سازی و تحلیل شدند و دوباره مقایسه‌ی بین نتایج سه مدل پیشنهادی انجام شد، تا از بین سه مدل، کارآمدترین و مناسب‌ترین مدل مشخص شود. جنس عضو لایه‌ی میانی در مدل پیشنهادی اول از جنس پلی‌اتیلن، در عضو لایه‌ی میانی مدل پیشنهادی دوم از جنس تقلون و مدل پیشنهادی سوم نیز از جنس پلی‌پروپیلن بوده است.

که در بخش‌های قبل ارائه شده است، مقایسه شدند و از بین سه مدل پیشنهادی، مناسب‌ترین انتخاب شده است. فرق بین سه مدل پیشنهادی، متفاوت بودن جنس عضو لایه‌ی میانی هر کدام از سه مدل با یکدیگر بوده است. شبیه مدل پیشنهادی اول، در مدل‌های پیشنهادی دوم و سوم نیز نتایج مربوط به توزیع تنش و کرنش خمیری اعضا بررسی شدند، تا بتوان نتایج هر سه مدل پیشنهادی برای آویز پل را مقایسه کرد. در شکل ۱۱، توزیع تنش در دو مدل پیشنهادی دوم و سوم برای آویز پل مشاهده می‌شود که شکل کلی (یا پراکندگی) توزیع تنش تحت جابه‌جایی‌های اعمالی در هر دو مدل، شبیه مدل پیشنهادی اول است، با این تفاوت که محدوده‌ی تنش در هر مدل متفاوت است.

۴. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های پیشنهادی دوم و سوم

نتایج تحلیل هر دو مدل پیشنهادی دوم و سوم نیز با نتایج مدل پیشنهادی اول،

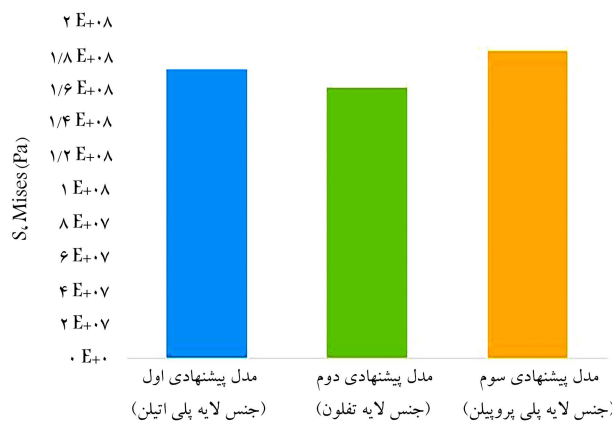


شکل ۱۲. تنش موجود در یک محل مشخص از آویز (گره ۹ که در محل بحرانی آویز قرار دارد).

۵. نتیجه گیری

آویزها اجزایی در پل های معلق و قوسی هستند که تحت بارهای زنده، مستعد خرابی هستند و بیشتر آن ها، طول عمر کوتاهی دارند، که این امر باعث اختلال در عملکرد آویز و کل پل می شود. در همین راستا، در نوشتار حاضر با بررسی رفتار آویز پل حین جابه جایی های اعمالی در اثر بارهای وارده و با استفاده از نرم افزار آباکوس، راهکاری (روش جایگزینی) برای بالا بردن عمر آویزهای پل معلق در برابر خرابی تحت بارهای جانبی و جلوگیری از اعمال هزینه های مازاد برای تعمیر یا تعویض آویزهای آسیب دیده ارائه شده است. پس از مدل سازی و تحلیل هر ۴ مدل آویز (مدل اولیه و سه مدل پیشنهادی)، با بررسی و مقایسه نتایج تحلیل هر یک از آن ها، این نتایج برای مدل سازی صورت گرفته به دست آمده است:

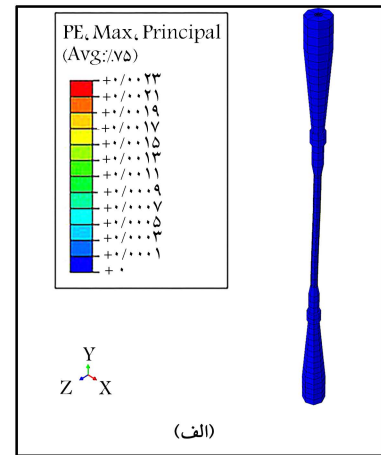
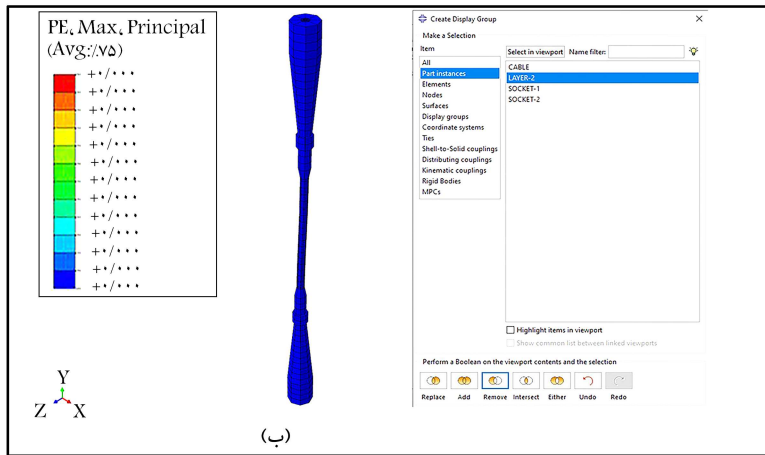
۱. اضافه کردن عضوی به نام لایه میانی و از جنس پلی اتیلن، به عنوان لایه بی بین سه عضو دیگر مدل اولیه، باعث کاهش تنش وارده بر اعضاء مدل تا میزان ۳۹٪ نسبت به حالت اولیه (بدون عضو لایه میانی) شده است.
۲. افزودن عضو لایه میانی بین اعضاء مدل اولیه از کرنش خمیری دیگر اعضاء مدل جلوگیری می کند. به این ترتیب که در مدل های پیشنهادی - که شامل عضو لایه میانی بودند - برخلاف مدل اولیه، دو عضو سوکت که در ابتدا و انتهای مدل قرار داشتند، وارد ناحیه خمیری نشده و نیازی به تعویض آن اعضا نبوده است.
۳. به علت کاهش تنش وارده بر اعضاء مدل و جلوگیری از کرنش خمیری دیگر اعضاء مدل، افزودن یک عضو به مدل اولیه (یعنی مدل پیشنهادی)، تا حد زیادی از ایجاد ترک در اعضاء آویز (یا خستگی اعضا) و زنگ زدگی کابل آویز جلوگیری می کند (یا دست کم به تأخیر می اندازد). به همین خاطر سبب بالا بردن عمر آویز و بهبود عملکرد آن می شود و این امر، کارایی و کارآمد بودن مدل پیشنهادی و به صرفه بودن آن را نشان می دهد.
۴. مدلی که عضو لایه میانی آن از جنس نفلون بوده است، رفتار بهتری نسبت به دو مدل دیگر از خود نشان داد. یعنی در سه مدل پیشنهادی، برای عضو لایه میانی در آویز، نفلون بهتر از پلی اتیلن و پلی اتیلن بهتر از پلی پروپیلن جواب داده است. به این ترتیب که تنش وارده در یک



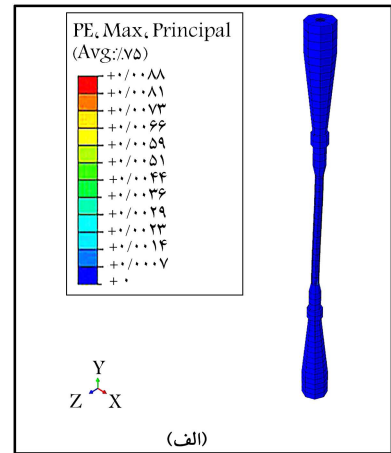
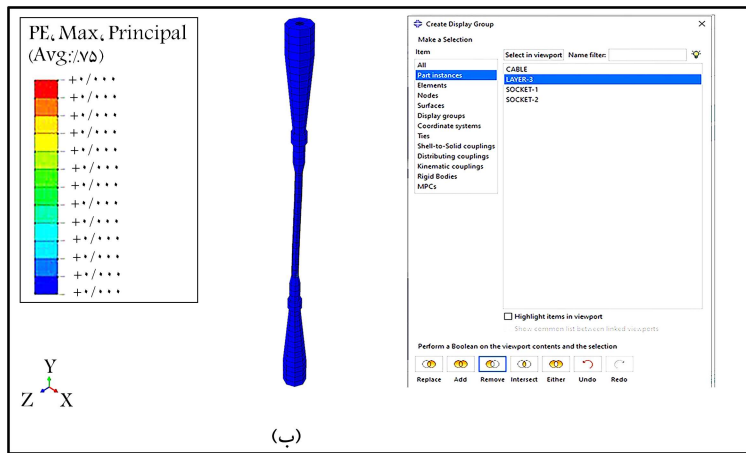
شکل ۱۳. مقایسه تنش ایجاد شده در محل مشخص بین سه مدل پیشنهادی.

در شکل ۱۲، نیز مقدار تنش ایجاد شده در محل مشخص شده از آویز (گره ۹)، در هر دو مدل پیشنهادی دوم و سوم بررسی شدند. از مقایسه نتایج در شکل های ۶ و ۱۱ مشخص می شود که در پی اعمال جابه جایی های یکسان و مشخصی به هر سه مدل پیشنهادی، محدوده توزیع معیار تنش فون میسز در مدل پیشنهادی دوم کمتر از مدل پیشنهادی اول و محدوده توزیع تنش در مدل پیشنهادی اول کمتر از مدل پیشنهادی سوم بوده است. از مقایسه نتایج در شکل های ۷ و ۱۲ و نیز مشاهده شکل ۱۳، مشخص می شود که در یک محل از سه مدل پیشنهادی برای آویز پل (گره ۹ از سه مدل)، معیار تنش موجود در یک نقطه از مدل پیشنهادی دوم کوچک تر از تنش ایجاد شده در همان نقطه از مدل پیشنهادی اول است؛ و همچنین معیار تنش موجود در آن نقطه از مدل پیشنهادی اول نیز کوچک تر از تنش ایجاد شده در همان نقطه از مدل پیشنهادی سوم است.

در شکل های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب نتایج مربوط به کرنش خمیری اعضاء مدل های پیشنهادی دوم و سوم مشاهده می شوند. در مدل های پیشنهادی دوم و سوم نیز همانند مدل پیشنهادی اول، با اعمال جابه جایی های مشخص شده، هیچ یک از اعضاء آویز وارد فاز خمیری نشده و سالم (قابل بهره برداری) مانده و فقط عضو لایه میانی اضافه شده، دچار کرنش خمیری شده است.



شکل ۱۴. الف) کرنش خمیری ایجاد شده در مدل پیشنهادی دوم ب) بررسی کرنش خمیری اعضاء مدل پیشنهادی دوم.



شکل ۱۵. الف) کرنش خمیری ایجاد شده در مدل پیشنهادی سوم ب) بررسی کرنش خمیری اعضاء مدل پیشنهادی سوم.

در مدلی که جنس عضو لایه میانی آن از پلی پروپیلن بوده است، به میزان ۳۶٪ نسبت به مدل اولیه فاقد عضو لایه میانی کاهش یافته است.

محل مشخص شده در تمام مدل‌ها، در مدل پیشنهادی دوم، که جنس عضو لایه میانی آن از تفلون بوده است، به میزان ۴۳٪ و در مدلی که جنس عضو لایه میانی آن از پلی اتیلن بوده است، به میزان ۳۹٪ و

پانویسها

1. Cluni
2. Petrini & Bontempi
3. Liu
4. Sun
5. Zhong
6. Nanjing Dashengguan bridge
7. Kutai-Kartanegara suspension Bridge
8. Jiangyin
9. Abaqus
10. Golden Gate
11. Clifton
12. Shantou Bay
13. Layer
14. Socket
15. Cable
16. structural health monitoring

17. global position system antennas
18. von mises stress
19. plastic strain components

منابع (References)

1. Liu, Z., Guo, T., Hebdon, M.H. and et al. "Corrosion fatigue analysis and reliability assessment of short suspenders in suspension and arch bridges", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **32**(5), pp.04018060:1-11 (2018).
2. Cluni, F., Gusella, V. and Ubertini, F. "A parametric investigation of wind-induced cable fatigue", *Engineering Structures*, **29**(11), pp. 3094-3105 (2007).

3. Petrini, F. and Bontempi, F. "Estimation of fatigue life for long span suspension bridge hangers under wind action and train transit", *Structure and Infrastructure Engineering*, **7**(7-8), pp. 491-507 (2011).
4. Liu, Z., Guo, T., Huang, L. and et al. "Fatigue life evaluation on short suspenders of long-span suspension bridge with central clamps", *Journal of Bridge Engineering*, **22**(10), pp.04017074:1-11 (2017).
5. Sun, Z., Ning, S. and Shen, Y. "Failure investigation and replacement implementation of short suspenders in a suspension bridge", *Journal of Bridge Engineering*, **22**(8), pp. 05017007:1-9 (2017).
6. Zhong, W., Ding, Y.L., Song, Y.S. and et al. "Fatigue behavior evaluation of full-field hangers in a rigid tied arch high-speed railway bridge: Case study", *Journal of Bridge Engineering*, **23**(5), pp.05018003:1-13 (2018).
7. Kawai, Y., Siringoringo, D. and Fujino, Y. "Failure analysis of the hanger clamps of the Kutai-Kartanegara Bridge from the fracture mechanics viewpoint", *Journal of JSCE*, **2**(1), pp. 1-6 (2014).
8. Golden Gate Bridge Highway and Transportation District, "Bridge design and construction statistics", <http://goldengatebridge.org/research/factsGGBDesign.php>, (Oct. 25, 2016).
9. Shapland, M. (2011). "BIAS news archive Clifton Suspension Bridge", http://www.b-i-a-s.org.uk/bias_suspension_bridge.html, (Oct. 25, 2016).
10. Xu, G. "Shantou bay suspension bridge: In inspection, evaluation and maintenance of suspension bridges case studies", CRC Press, pp. 262-291 (2015).