

مقاوم سازی عرشه های ارتوتروپیک فولادی بمنظور کنترل خستگی

اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه

مجتبی فتحی^{۱*}، محمد عباسی^۲

۱- عضو هیات علمی گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

fathim@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۳/۱۳]

چکیده- یکی از دلایل اصلی برای مشکلات خستگی در عرشه های ارتوتروپیک فولادی، سختی کم صفحه عرشه است. در این مقاله، با افزایش سختی صفحه عرشه توسط سه روش مقاوم سازی، کاهش تنش در نقاط مستعد آسیب خستگی اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه مطالعه شده است. برای این منظور، یک عرشه ارتوتروپیک فولادی توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی و مطابق آیین نامه طراحی پل آشتو شبیه سازی خستگی و سپس به سه روش مقاوم سازی استفاده از صفحات فولادی پیوندی، صفحات فولادی ساندویچی و لایه بتن مسلح با عملکرد بالا، این کاهش تنشها مطالعه شده است. نتایج این تحلیل ها نشان می دهد، در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، روشهای مقاوم سازی می توانند سطح تنشها برای نقاط مستعد آسیب خستگی در صفحه عرشه را حدود ۸۰ درصد و برای نقاط مستعد آسیب خستگی در جداره تیرچه طولی را حدود ۷۰ درصد کاهش دهند. همچنین بر اساس نتایج دامنه تنش و به کمک اصول پایه مکانیک شکست الاستیک خطی مشخص می شود که روشهای مقاوم سازی به میزان قابل توجهی عمر خستگی عرشه را افزایش می دهند. در نهایت مقایسه روشهای مقاوم سازی نشان می دهد که روش لایه بتن مسلح با عملکرد بالا در میان سه روش مقاوم سازی بهترین نتایج را خواهد داد.

واژگان کلیدی: عرشه ارتوتروپیک فولادی، اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، نقاط مستعد آسیب خستگی، روش مقاوم سازی.

۱- مقدمه

حجم بارهای ترافیک بر روی این عرشه ها افزایش می یابد، به خاطر ضخامت نسبتاً کم صفحه عرشه و تیرچه طولی، توزیع عرضی بارهای چرخ لنگرهای خمشی خارج از صفحه قابل توجهی در صفحه عرشه و جداره تیرچه طولی در محل اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه ایجاد می کند. بنابراین مناطق در معرض این لنگر خمشی مستعد پذیرش آسیب های خستگی هستند [2-3]. با توجه به هندسه جوش در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه، چهار نقطه مستعد آسیب خستگی در اطراف جوش اتصال وجود دارد. این آسیب ها در پنجه جوش یا ریشه جوش که نقاطی با تمرکز تنش بالاتر هستند آغاز شده و به صورت ترک خوردگی در

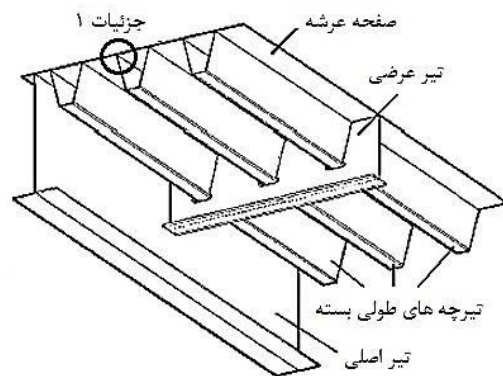
خستگی یکی از پدیده های شناخته شده در عرشه ارتوتروپیک فولادی است. جزئیات مختلف جوش شده در این عرشه ها نشان داده است که نسبت به بارگذاری خستگی بسیار حساس هستند و طول عمر خستگی مورد انتظار برای عرشه را شدیداً کاهش می دهند. جوش های طولی که برای اتصال تیرچه های طولی بسته به صفحه عرشه صورت می گیرند، از تهدید آمیزترین حالات آسیب خستگی در عرشه های ارتوتروپیک فولادی هستند. یکی از دلایل اصلی برای این مشکل سختی کم صفحه عرشه است که برای مقابله با بارهای چرخ در ترافیک های سنگین ناکافی است [1]. هنگامیکه

عرشه، بالا بردن سختی صفحه عرشه است [5]. افزایش ضخامت صفحه عرشه یکی از این گزینه ها است. با این حال، تعداد زیادی از عرشه های ارتوتروپیک فولادی در دهه های گذشته طراحی و ساخته شده اند و با توصیه های آیین نامه های امروزی همخوانی ندارند. علاوه بر این، در دهه های گذشته افزایش بارهای سنگین ترافیک بر روی عرشه این پل ها، باعث تشدید پدیده خستگی در اتصالات این عرشه ها که از سختی پایینی برخوردار هستند، شده است [1]. برای این پل ها، از آنجایی که نمی توان سیستم عرشه را از سیستم اصلی سازه جدا کرد، روش های نوسازی یا به اصطلاح مقاوم سازی قبل یا بعد از پیدایش آسیب های خستگی ضروری است. در سال های اخیر طرح های پژوهشی مختلفی برای مقاوم سازی پیشنهاد شده است. ایده مشترک در اکثر این طرح ها، جایگزین کردن یک لایه با پوشش سخت تر با روکاری معمول (آسفالت) بر روی صفحه عرشه به منظور بالا بردن سختی صفحه عرشه است [6]. در این مطالعه، سه روش مقاوم سازی که در سال های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته شده است، مطالعه می شوند. این سه روش عبارتند از:

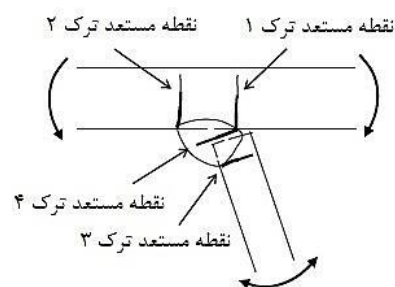
- روش صفحات فولادی پیوندی^۱ (BSP) (شکل ۲-الف)
 - روش صفحات فولادی ساندویچی^۲ (SSP) (شکل ۲-ب)
 - روش بتن مسلح با عملکرد بالا^۳ (RHPC) (شکل ۲-ج)
- دو روش مقاوم سازی BSP و SSP با اضافه کردن یک صفحه فولادی کم ضخامت بر روی صفحه عرشه انجام می شوند. در روش BSP، صفحه فولادی جدید با استفاده از یک لایه نازک رزین اپوکسی^۴ با ویسکوزیته کم به صفحه عرشه متصل می شود [6]. در روش SSP، صفحه فولادی جدید با استفاده از یک هسته ضخیم و نسبتاً سخت اما با چگالی کم همچون پلی اورتان^۵ (یا الاستومرهای قابل مقایسه دیگر) به صفحه عرشه متصل می شود [6-7]. هسته ضخیم استفاده شده در این روش، علاوه بر اتصال صفحات فولادی به یکدیگر، اجازه می دهد تا سختی خمشی روش مقاوم سازی افزایش یابد و تنش های بیشتری را در اتصالات کاهش دهد.

سطح صفحه عرشه یا جداره تیرچه طولی نمایان می شوند [4]. بنابراین مطابق شکل ۱:

- ترک ۱ از ریشه جوش شروع شده و از طریق صفحه عرشه گسترش یافته است.
- ترک ۲ از پنجه جوش در صفحه عرشه شروع شده و از طریق صفحه عرشه گسترش یافته است.
- ترک ۳ از پنجه جوش در جداره تیرچه طولی شروع شده و از طریق جداره تیرچه طولی گسترش یافته است.
- ترک ۴ از ریشه جوش شروع شده و از طریق گلوی جوش در داخل فلز جوش گسترش یافته است.



(الف) المان های تشکیل دهنده

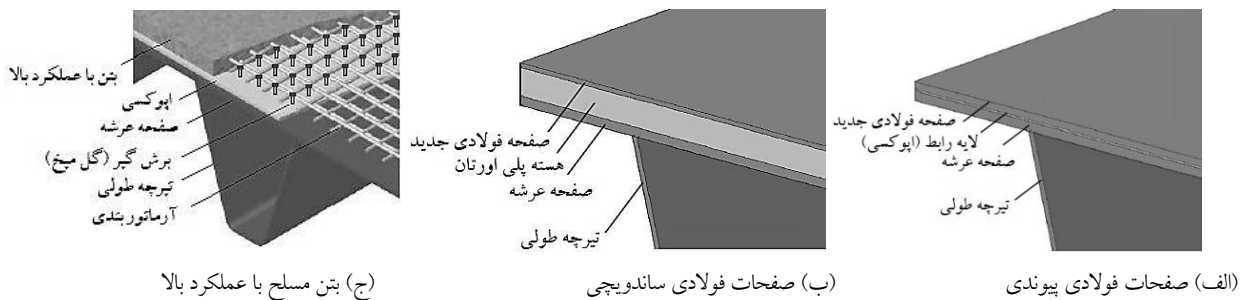


(ب) جزئیات ۱ و نقاط مستعد ترک خستگی در آن

شکل ۱- عرشه های ارتوتروپیک فولادی

اساساً دو راه حل به منظور جلوگیری یا حداقل کاهش میزان آسیب های خستگی در عرشه های ارتوتروپیک فولادی وجود دارد. راه حل اول، کاهش بارهای محور با تدوین و تصویب قانون بر روی عرشه پل است. راه حل دوم، کاهش چرخه های تنش است. کاهش دادن بارهای محور در واقعیت امکان پذیر نیست، بنابراین باید چرخه های تنش کاهش داده شود. یکی از راه حل های مناسب برای کاهش چرخه های تنش در اتصالات تیرچه طولی به صفحه

1- Bonded Steel Plate
2- Sandwich Steel Plate
3- Reinforced High Performance Concrete
4- Epoxy resin
5- Polyurethane



شکل ۲- روش های مقاوم سازی برای عرشه های ارتوتروپیک فولادی

است. همچنین این سه محقق در سال ۲۰۱۲ [10] با انجام آزمایشهای خمشی سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای بر روی یک نمونه تیر به نمایندگی از یک عرشه مقاوم سازی شده با روش SSP نتیجه گرفتند که مقادیر تنشها بر روی صفحه عرشه را می‌توان با این روش ۶۰ الی ۹۵ درصد کاهش داد. همچنین این سه محقق در ادامه تحقیقات خود در سال ۲۰۱۳ [6] با مقایسه مزایا و معایب روشهای مقاوم سازی SSP و BSP نتیجه گرفتند، رفتار خستگی اتصالات در روش SSP بهتر است.

در این مطالعه یک عرشه ارتوتروپیک فولادی سه بعدی توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS [11] مدل سازی و با فرض روکاری آسفالت بر روی آن، مطابق آیین نامه طراحی پل آشتو [12] شبیه سازی خستگی می‌شود و تنشها برای نقاط مستعد آسیب خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه بررسی می‌شوند. سپس با حذف روکاری آسفالت و جایگزینی آن با سه روش مقاوم سازی RHPC، SSP و BSP، مجدداً تنشها در نقاط مستعد آسیب خستگی بررسی شده و تاثیر روشهای مقاوم سازی بر روی کاهش تنشها مطالعه می‌شود. در نهایت با مقایسه روشهای مقاوم سازی بهترین روش برای مقاوم سازی عرشه معرفی می‌شود.

۲- تعداد دوره های بارگذاری منجر به شکست

خستگی

فرایند آسیب خستگی در مصالح شامل مراحل شروع ترک، گسترش پایدار ترک و گسترش ناپایدار ترک، می‌شود. در اتصالات جوش شده فولادی به خاطر وجود معایب ترک گونه، مراحل شروع ترک و گسترش ناپایدار ترک در مقایسه با مرحله گسترش پایدار ترک کوتاه است. بنابراین، عمر خستگی اتصالات جوش شده را می‌توان با مرحله گسترش پایدار ترک تخمین زد [3]. به کمک روش

همچنین سختی بالای پلی اورتان این امکان را فراهم می‌کند که عمل مرکب کامل بین دو صفحه فولادی امکان پذیر شود [1]. بر اساس پژوهش های انجام شده توسط جانگ، تکنولوژی سازه ای هر دو روش نامبرده، عمل مرکب کامل است [7].

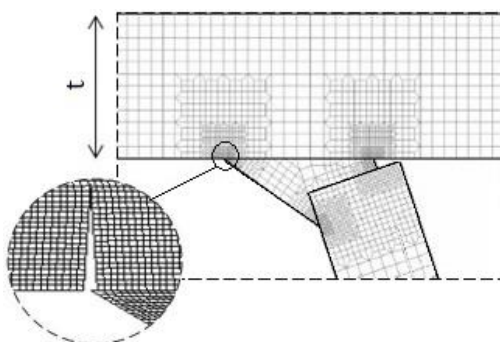
در روش RHPC، روکاری آسفالت که ماده ای با سختی کم است جای خود را به روکاری بتن مسلح با عملکرد بالا که ماده ای با سختی بالاتر است می‌دهد. در صورتیکه لایه واسطه بین فولاد و بتن از کیفیت خوبی برخوردار باشد و بتواند مقاومت برشی و سختی کافی برای جلوگیری از لغزش بین این دو لایه را تامین کند، عمل مرکب (کامپوزیت) بین فولاد و بتن امکان پذیر خواهد شد [5-7]. در این مورد سختی کامل ساختار مرکب صفحه عرشه می‌تواند توسط عوامل مختلفی افزایش یابد. در صورت ایجاد عمل مرکب کامل با تراکم خوب بتن و استفاده از اتصالات برشی همچون گل میخ های نصب شده در فواصل مناسب، چرخه های تنش در صفحه فولادی عرشه به شدت کاهش می‌یابند و متعاقباً عمر خستگی اتصالات بسیار بهتر می‌شود [7].

کورتیه در سال ۲۰۱۱ [8] یک صفحه فولادی جدید را با چسب اپوکسی (PC5800/BL Epoxy) به صفحه عرشه متصل و تحت شرایط بارگذاری خستگی طی پنج میلیون دوره قرار داد. نتایج این آزمایش نشان داد، ضمن کاهش قابل ملاحظه تنش در سطح صفحه عرشه و تیرچه طولی، هیچ نشانه ای از آسیب خستگی در لایه چسب مشاهده نمی‌شود و این روش به عنوان یک روش مقاوم سازی مورد تایید است.

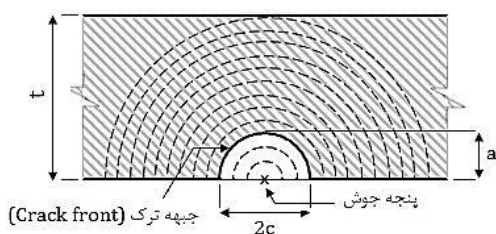
فریتاس، کولستن و بیجلارد در سال ۲۰۰۹ [9] بعد از مقاوم سازی عرشه پل Scharsterijn در هلند به روش BSP، با انجام آزمایشهای استاتیکی در قبل و بعد از مقاوم سازی بر روی عرشه نتیجه گرفتند که مقادیر تنشها در سطح صفحه عرشه حدود ۶۰ درصد کاهش یافته

سه بعدی با مش بندی بسیار متراکم مدل سازی می شود (شکل ۳-الف). سپس یک ترک با عمق اولیه مشخص در یکی از نقاط مستعد ترک خوردگی فرض شده و به منظور گسترش رشد ترک اولیه در نقطه مورد نظر، عمقهای دیگر ترک تا رسیدن به عمق نهایی به صورت قوسهای هم مرکز شبیه سازی شده (شکل ۳-ب) و دامنه ضریب شدت تنش در نوک ترک و اطراف آن برای هر عمق ترک شبیه سازی به کمک انتگرال I ارائه شده در نرم افزار ABAQUS محاسبه می شوند. در نهایت به کمک رابطه (۲) ضریب تصحیح محاسبه می شود.

در این تحقیق ضریب تصحیح مطابق روابط تجربی ارائه شده از بایک و همکاران [15]، برای ترکهایی که به صورت عمود ($\theta = 90^\circ$) در داخل ضخامت صفحات فولادی نفوذ کرده (ترکهای عمود بر سطح با شکل نیمه بیضوی) و عمق اولیه نفوذ آنها کمتر یا برابر 0.1 میلیمتر است، برابر $1/12$ در نظر گرفته شده است.



(الف) یک ریز مدل دوبعدی از سطح مقطع اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه با فرض اینکه ترک از پنجه جوش شروع شده و به داخل ضخامت صفحه عرشه نفوذ می کند (نقطه مستعد ترک ۲)



(ب) شبیه سازی ترکهای هم مرکز قوسی شکل (ترکهای عمود بر سطح با شکل نیمه بیضوی) در نقطه مستعد ترک (a عمق ترک، 2c طول ترک و t ضخامت صفحه فولادی ترک خورده)

شکل ۳- محاسبه دامنه ضریب شدت تنش به روش عددی

مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ می توان عمر گسترش پایدار ترک (تعداد دوره های بارگذاری منجر به شکست خستگی) را توسط فرمول پاریس^۲ محاسبه کرد. فرمول پاریس بیانگر رابطه بین نرخ گسترش پایدار ترک و دامنه ضریب شدت تنش^۳ در نوک ترک^۴ است [13] و به صورت رابطه (۱) نوشته می شود.

$$\frac{da}{dN} = C. \Delta K^m \quad (1)$$

که در آن، $\frac{da}{dN}$ نرخ رشد ترک، a عمق ترک، N تعداد دوره بارگذاری و C و m ثابت های مربوط به مصالح هستند که برای فولادهای پرمقاومت در عرشه های ارتوتروپیک فولادی، برابر با $m = 2.75$ و $C = 5.01 \times 10^{-12}$ است [14].

دامنه ضریب شدت تنش (ΔK) بیانگر شدت میدان تنش در مجاورت نوک ترک است [3] و با رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$\Delta K = F. \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

که در آن، F ضریب اصلاح دامنه ضریب شدت تنش (ضریب تصحیح) و $\Delta \sigma$ دامنه اسمی تنش در نقطه مستعد ترک است. با جایگزین کردن رابطه (۲) در رابطه (۱) و انتگرال گیری از آن در محدوده بین عمق اولیه و نهایی ترک، رابطه (۳) را خواهیم داشت:

$$\int_0^N dN = \frac{1}{C \pi^{m/2}} \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{F^m (\Delta \sigma)^m a^{m/2}} da \quad (3)$$

در نهایت تعداد دوره های بارگذاری منجر به شکست خستگی را می توان مطابق رابطه (۴) محاسبه کرد.

$$N = \frac{2}{C(m-2).F^m.(\Delta \sigma)^m.\pi^{m/2}} \left[\frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right] \quad (4)$$

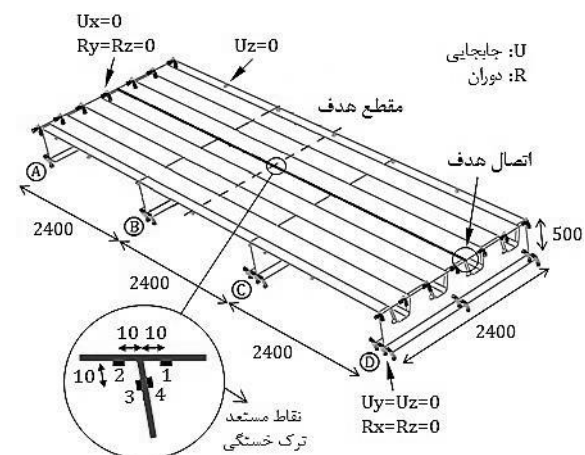
که در آن، a_i عمق اولیه ترک و a_f عمق نهایی ترک در ضخامت صفحه فولادی است. شایان توجه است، ضریب تصحیح در برگزیده عواملی همچون تمرکز تنش در محل ترک، عمق، شکل و هندسه ترک و ضخامت، عرض و سطح آزاد صفحه ترک خورده است [15] و می توان مقدار آن را با استفاده از روابط تجربی ارائه شده یا از نرم افزارهای امان محدود و به صورت روش عددی تعیین کرد. در روش عددی برای محاسبه دامنه ضریب شدت تنش در نقاط مستعد ترک خستگی اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، سطح مقطع اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه توسط یک ریز مدل دو بعدی یا

- 1- Linear elastic fracture mechanics
- 2- Paris formula
- 3- Stress intensity factor
- 4- Crack Tip

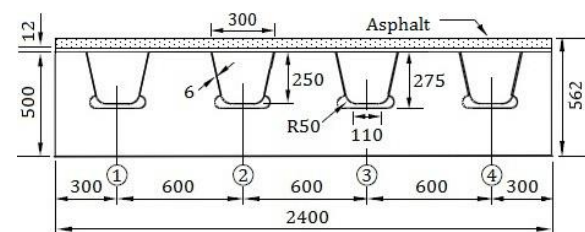
۳- مدل های مورد مطالعه

۱-۳- جزئیات

به منظور بررسی تنش و تاثیر روش های مقاوم سازی در کاهش تنش اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، یک مدل سه بعدی از بخشی از یک عرشه ارتوتروپیک فولادی با ابعادی مطابق شکل ۴ ایجاد شده است. از اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، اتصال سمت چپ از تیرچه طولی شماره ۳ به عنوان اتصال هدف در نظر گرفته شده و در تحلیل های المان محدود، تنش ها در فاصله ۱۰ میلیمتری از محل تقاطع این اتصال به نمایندگی از نقاط مستعد آسیب خستگی، بر روی مقطعی در وسط دهانه میانی مدل با عنوان مقطع هدف بررسی خواهند شد. شایان توجه است، در شکل ۴ شرایط مرزی مدل نیز نشان داده شده است.



(الف) نمای سه بعدی مدل به همراه شرایط مرزی و نمایش اتصال و مقطع هدف و نقاط مستعد ترک خستگی در آن (واحد به میلیمتر)

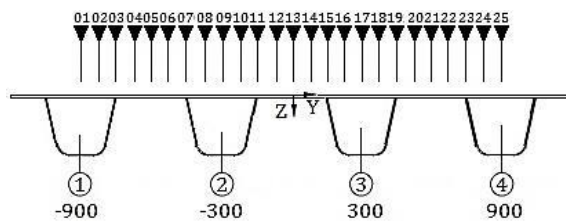


(ب) نمای عرضی

شکل ۴- جزئیات و ابعاد مدل مورد مطالعه قبل از مقاوم سازی (واحد mm)

مطابق آیین نامه طراحی پل آشتو، برای محاسبه بیشینه دامنه تنش در اتصالات، بار طراحی خستگی ۱۲۵ کیلونیوتن و بر روی ناحیه ای به ابعاد ۵۱۰×۲۵۰ میلیمتر توزیع می شود. برای شبیه سازی خستگی، مطابق شکل ۵، بار طراحی خستگی به صورت عرضی و در طی ۲۵

مرحله به فاصله ۷۵ میلیمتر از یکدیگر در امتداد مقطع هدف بر روی عرشه پل حرکت داده شده و بر روی همین مقطع تنش ها برای نقاط مستعد آسیب خستگی در اتصال هدف بررسی می شوند.



شکل ۵- آرایش بارگذاری بار چرخ بر روی عرشه در مقطع هدف

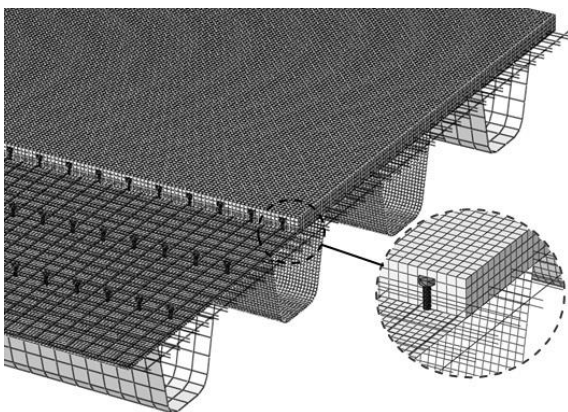
برای دو روش مقاوم سازی BSP و SSP، یک صفحه نازک فولادی جدید به ضخامت ۶ میلیمتر بر روی صفحه عرشه استفاده می شود. لایه اپوکسی و هسته پلی اورتان که به ترتیب برای روش BSP و SSP به عنوان لایه رابط استفاده می شوند به ترتیب ۲ و ۱۵ میلیمتر ضخامت داشته و مشخصات مکانیکی آنها مطابق جدول ۱ است. در روش RHPC، لایه بتن ۵۰ میلیمتر ضخامت داشته و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. در این روش، قطر آرماتورهای استفاده شده ۸ میلیمتر و در سه لایه با فاصله مرکز به مرکز ۵۰ میلیمتر انجام می شود. جهت آرماتورها در لایه تحتانی و فوقانی به صورت عرضی و در لایه میانی به صورت طولی است. همچنین به منظور مطالعه تنش در اطراف برشگیرها از گلمیخهایی با قطر ساق ۱۰ میلیمتر و طول ۴۰ میلیمتر بر روی سطح صفحه فولادی عرشه استفاده شده است. مطابق آیین نامه آشتو، فاصله مرکز به مرکز گلمیخها در جهت عرضی و طولی به ترتیب ۳۰۰ و ۱۰۰ میلیمتر انتخاب شده است [16].

جدول ۱- مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح در مقاوم سازی

مشخصات	اپوکسی	پلی اورتان	بتن
مدول الاستیسیته	2.9 GPa	721 MPa	50 GPa
مقاومت تسلیم	42 MPa	15.1 MPa	-
مقاومت نهایی	74 MPa	25 MPa	80 MPa
کرنش تسلیم	1.4%	2.2%	-
کرنش نهایی	4.9%	26.6%	3%
ضریب پواسون	0.4	0.36	0.3

۲-۳- مدل سازی المان محدود

برای مدل سازی مدل مورد مطالعه از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. قبل از مقاوم سازی، المان های فولادی عرشه به خاطر کوچک بودن بعد ضخامتشان نسبت به دو بعد دیگر به صورت المانهای پوسته ای (Shell) مدلسازی شده و با المان S4R نوع چهار وجهی (Quad) مشبندی شده است. المان های نزدیک به اتصال هدف از تراکم مش بندی بیشتری برخوردار هستند. دو تیرچه طولی داخلی (تیرچه طولی ۲ و ۳) و صفحه عرشه در دهانه میانی مدل با ابعاد ۱۰ در ۱۰ میلیمتر مش بندی شده است. از نوع فولاد ST52 با رفتار الاستیک پلاستیک کامل برای مدلسازی استفاده شده است. قید تمام اتصالات فولادی به یکدیگر از نوع Tie است. قبل از مقاوم سازی، لایه ۵۰ میلیمتری آسفالت بر روی عرشه به صورت المانهای سه بعدی توپر (Solid) مدلسازی و از المان C3D8R نوع Hex جهت مش بندی با ابعاد ۵۰ میلیمتر استفاده شده است. ضریب پواسون آسفالت ۰/۳۵ و مدول الاستیسیته آن مطابق با رابطه (۵) و تحت دمای ۳۰ درجه سانتیگراد برابر ۱۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- مدل المان محدود روش RHPC در مقطع هدف (به خاطر وضوح بیشتر در شکل المان بتن برش داده شده است)

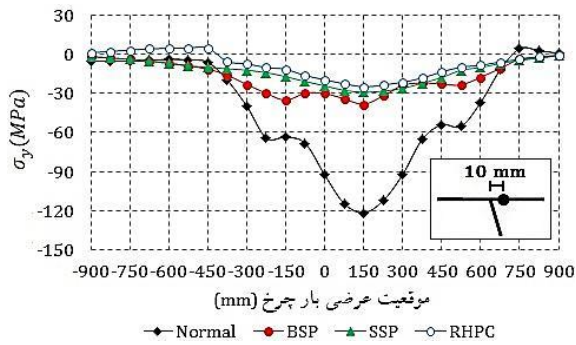
$$E = 10^4 e^{-0.07 T} \quad (5)$$

که در آن E مدول الاستیسیته و T دمای هوا (°C) است.

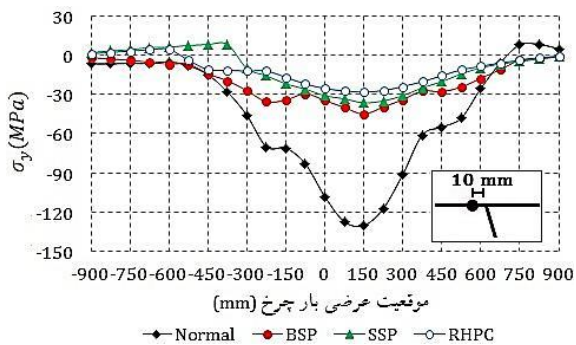
برای دو روش مقاوم سازی BSP و SSP، به خاطر کوچکتر بودن بعد ضخامت صفحه فولادی جدید و مرکب کامل بودن تکنولوژی سازه ای این روشها، صفحه عرشه به صورت یک Section از نوع پوسته ای - کامپوزیت (Shell-Composite) مدلسازی شده است. در روش RHPC، لایه بتن استفاده شده به صورت المانهای Solid مدلسازی و از المان C3D8R نوع Hex جهت مش بندی با ابعاد ۱۲/۵ میلیمتر استفاده شده است. برای مدل کردن رفتار واقعی بتن از مدل پلاستیسیته تخریب (Smeared Crack) استفاده شد. آرماتورها با استفاده از المانهای خطی (Wire) از نوع خربایی (Truss) که با عنوان T3D2 در ABAQUS شناخته می شود مدل شده و برای اندرکنش آنها با بتن قید Embedded region انتخاب شده است. همچنین گلمیخها با المانهای Solid مدل سازی و با المان C3D10 نوع Tet با ابعاد ۵ میلیمتر مش بندی و با قید Tie به

۳-۳- رآستی آزمای

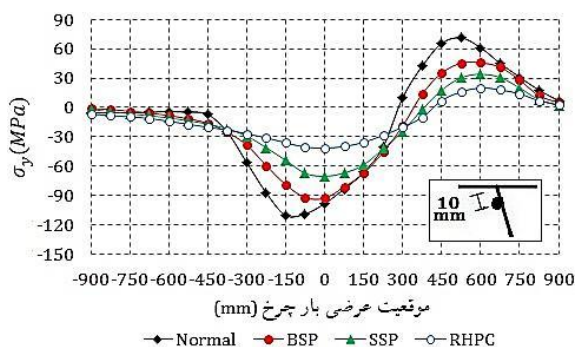
رآستی آزمای مدل مورد مطالعه با مدل آزمایشگاهی [1] که در شکل ۷ نشان داده شده، انجام پذیرفته است. در این پژوهش آزمایشگاهی، از دو روش مقاوم سازی BSP و SSP با مکانیکی مشابه مدل مورد مطالعه استفاده شده است. قبل از مقاوم سازی بار چرخ منفردی به وزن ۵۰ کیلونیوتن و بعد از مقاوم سازی بار چرخ منفردی به وزن ۱۰۰ کیلونیوتن در مقطع وسط دهانه و بر روی مرکز تیرچه طولی میانی اعمال و با استفاده از کرنش سنج، کرنش های عرضی (ϵ_{yy}) در این مقطع اندازه گیری شدند. مقایسه نتایج کرنش های حاصل از مدل سازی المان محدود با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد (شکل ۸)، توزیع کرنش ها بسیار نزدیک و تطابق آن در حدود 0.94 ± 0.01 است، بنابراین نتایج مدل سازی های انجام شده در این مطالعه قابل اعتماد است.



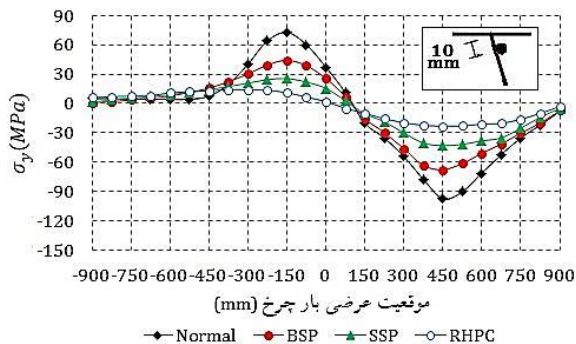
(الف) نقطه مستعد ترک ۱



(ب) نقطه مستعد ترک ۲



(ج) نقطه مستعد ترک ۳

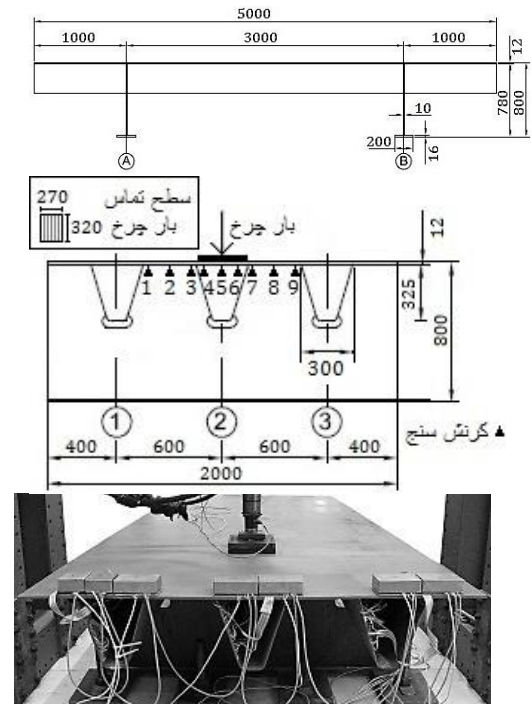


(د) نقطه مستعد ترک ۴

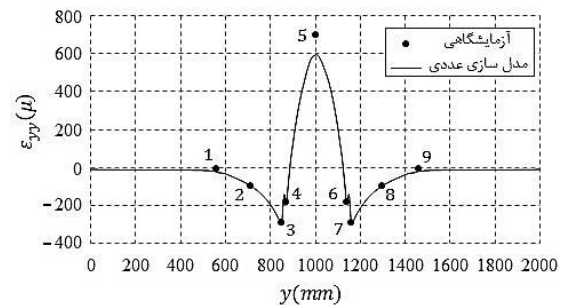
شکل ۹- خطوط تاثیر عرضی تنش برای نقاط مستعد آسیب خستگی

۴- نتایج المان محدود

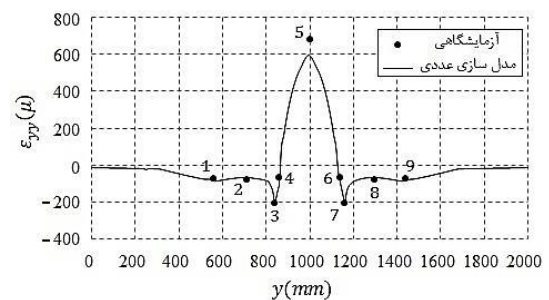
برای بررسی تاثیر روش های مقاوم سازی بر روی کاهش تنش در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، با توجه به آرایش بار چرخ،



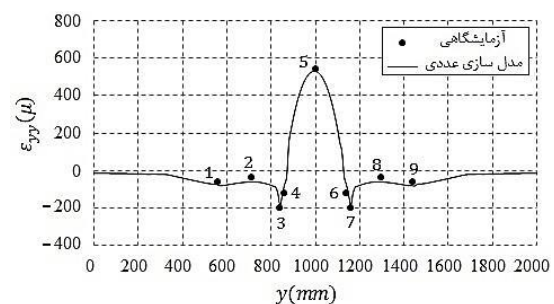
شکل ۷- مشخصات و نمای از مدل آزمایشگاهی (ابعاد به میلیمتر) [1]



(الف) قبل از مقاوم سازی



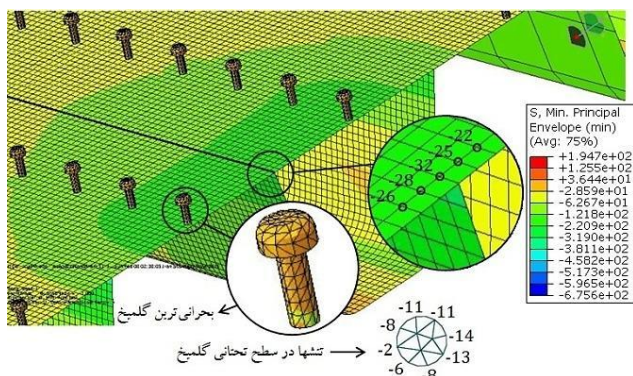
(ب) مقاوم سازی به روش BSP



(ج) مقاوم سازی به روش SSP

شکل ۸- مقایسه کرنش های حاصل از مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی

صفحه عرشه دیرتر از آسیبهای خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه رخ دهند.



شکل ۱۱- تنشهای اصلی بر حسب مگاپاسکال در اطراف اتصالات عرشه تحت حالت بارگذاری مرکز بار چرخ بر روی اتصال هدف

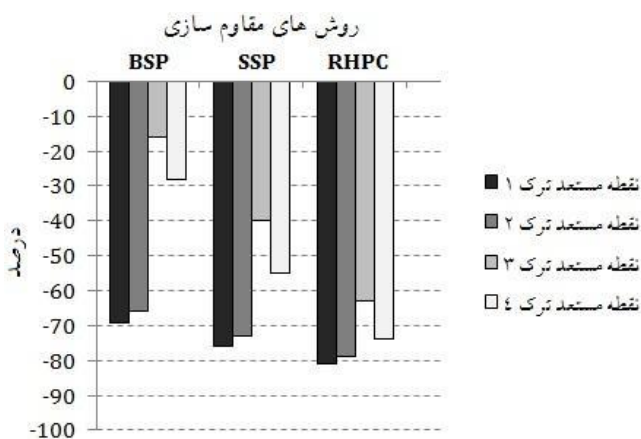
۵- مقایسه روش های مقاوم سازی

با بررسی خطوط تاثیر عرضی تنش قبل از مقاوم سازیها نتیجه گرفته می شود، سطح تنشها برای نقاط مستعد آسیب خستگی در صفحه عرشه بزرگتر از نقاط مستعد آسیب خستگی در جداره تیرچه طولی است، بنابراین حالت بارگذاری مرکز بار چرخ بر روی اتصال هدف (بارگذاری شماره ۱۵ در شکل ۵) به عنوان بحرانی ترین حالت بارگذاری شناخته می شود. لذا این بارگذاری به عنوان بارگذاری پیشینه معرفی شده و مقایسه روشهای مقاوم سازی با این بارگذاری انجام می شود. همچنین نقطه مستعد ترک ۲ به خاطر بزرگتر بودن سطح تنشها در آن نسبت به دیگر نقاط به عنوان مستعدترین نقطه ترک خستگی در اتصال شناخته می شود.

۵-۱- حداکثر انرژی اعوجاجی در عرشه

یکی از مهمترین معیارهای تسلیم در اتصالات فلزی معیار حداکثر انرژی اعوجاجی (معیار تنش فون میزس) است. بنابراین برای مقایسه روشهای مقاوم سازی، حداکثر انرژی اعوجاجی برای المانهای نزدیک به اتصال هدف تحت بارگذاری پیشینه، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است (برای حالت RHPC گلمیخها حذف شده است). همچنین در نمودار شکل ۱۳ سهم المانهای عرشه در کاهش حداکثر انرژی اعوجاجی ناشی از بارگذاری پیشینه نشان داده شده است.

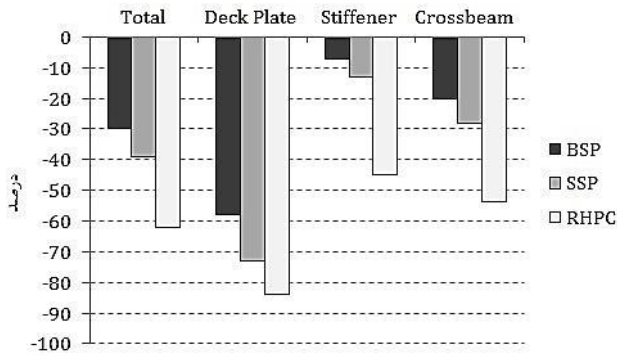
از خطوط تاثیر عرضی تنش برای نقاط مستعد آسیب خستگی در اتصال هدف استفاده می شود. نتایج بدست آمده از این تحلیل ها در نمودارهای شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. شایان توجه است، تنشهای عرضی رسم شده برای صفحه عرشه و تیرچه طولی تنشهای اصلی اسمی (σ_y) هستند.



شکل ۱۰- نمودار درصد تغییرات بیشینه ترین مقدار تنش برای نقاط مستعد آسیب خستگی نسبت به عرشه مقاوم سازی نشده

از شکلهای فوق نتیجه گرفته می شود، سخت تر کردن صفحه عرشه با استفاده از روشهای مقاوم سازی، سطح تنشها را برای نقاط مستعد آسیب خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه به میزان قابل توجهی کاهش داده است، بطوریکه با استفاده از روش مقاوم سازی RHPC که نسبت به دو روش دیگر بهترین تاثیر را در کاهش تنشها داشته است، می توان انتظار داشت که بیشینه مقدار تنش برای نقاط مستعد آسیب خستگی در صفحه عرشه (نقطه مستعد ترک ۱ و ۲) را حدود ۸۰ درصد و برای نقاط مستعد آسیب خستگی در جداره تیرچه طولی (نقطه مستعد ترک ۳ و ۴) را حدود ۷۰ درصد کاهش دهد. در ادامه نتایج مشخص است، مقاوم سازی به روش SSP به خاطر افزایش سختی عمل مرکب سازه بواسطه استفاده از هسته پلی اورتان نتایج بهتری نسبت به روش BSP داده است

شایان توجه است، مطابق شکل ۱۱ برای حالت مقاوم سازی RHPC سطح تنشها در اطراف گلمیخها به صفحه عرشه (سطح تحتانی گلمیخ) کمتر از سطح تنشها برای نقاط مستعد آسیب خستگی در اطراف اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه است، بنابراین انتظار می رود که آسیبهای خستگی در اتصال گلمیخها به

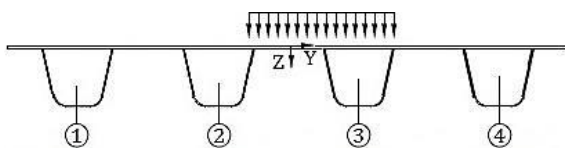


شکل ۱۳- نمودار کاهش حداکثر انحراف اعوجاجی المان های عرشه بعد از مقاوم سازی نسبت به بارگذاری بیشینه

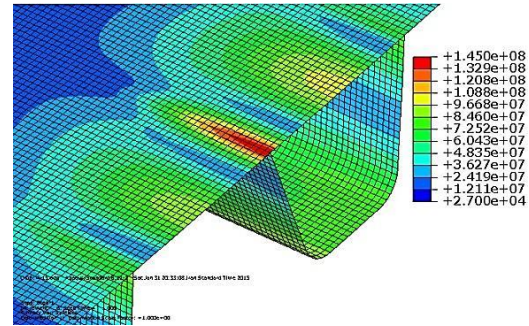
با مشاهده شکل ۱۲ و ۱۳ نتیجه گرفته می شود، سهم کاهش کل حداکثر انحراف اعوجاجی در عرشه مقاوم سازی شده به روش RHPC بیشتر از دو روش دیگر مقاوم سازی است و حداکثر انحراف اعوجاجی را حدود ۶۵ درصد کاهش می دهد. بعد از این روش، مقاوم سازی به روش SSP نسبت به روش BSP نتایج بهتری خواهد داد. شایان توجه است بعد از مقاوم سازیها، سهم کاهش حداکثر انحراف اعوجاجی در المان صفحه عرشه بسیار بیشتر از دیگر المانهای عرشه است. بطوریکه، با روش RHPC، حداکثر انحراف اعوجاجی برای نقاط مستعد آسیب خستگی در صفحه عرشه حدود ۸۵ درصد و برای نقاط مستعد آسیب خستگی در جداره تیرچه طولی حدود ۴۵ درصد کاهش یافته است.

۲-۵- تغییر مکان قائم عرشه

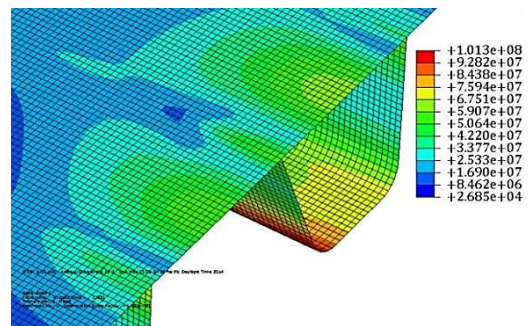
خیز یک ضابطه ی کنترل کننده در حالت بهره برداری است. برای نمایش این معیار، از حالت بارگذاری بیشینه واقع بر روی مقطع هدف استفاده شده و تغییر شکل عرشه به صورت دو بعدی در قبل و بعد از مقاوم سازیها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۵، اندازه تغییر مکان های قائم صفحه عرشه در مقطع هدف تحت بارگذاری بیشینه در قبل و بعد از مقاوم سازیها نشان داده شده است.



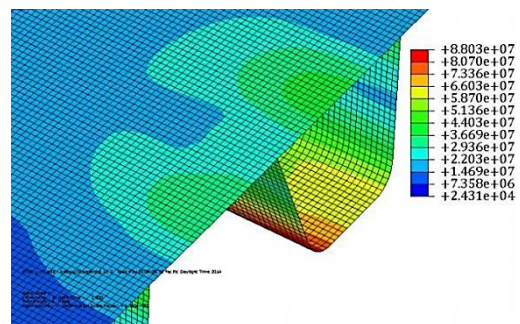
(الف) بارگذاری بیشینه بر روی صفحه عرشه



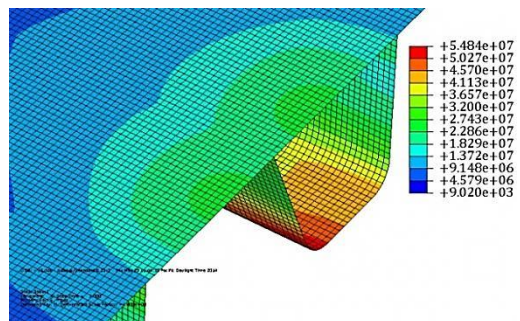
(الف) عرشه مقاوم سازی نشده



(ب) عرشه مقاوم سازی شده به روش BSP



(ج) عرشه مقاوم سازی شده به روش SSP



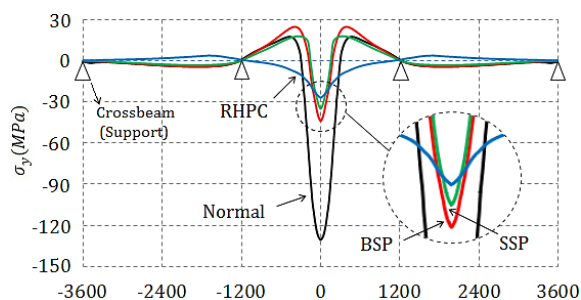
(د) عرشه مقاوم سازی شده به روش RHPC

شکل ۱۲- حداکثر انحراف اعوجاجی برای المانهای نزدیک به اتصال هدف تحت بارگذاری بیشینه در مقطع هدف

۳-۵- پیشینه دامنه تنش در اتصال تیرچه طولی به صفحه

عرشه

خطوط تاثیر طولی تنش در ارتباط با عمر خستگی است و با آن می توان دامنه تنش در اتصالات را تعیین کرد. در این بخش به خاطر بزرگتر بودن سطح تنشها در نقطه مستعد ترک ۲ نسبت به نقاط دیگر، این نقطه را به عنوان مستعدترین محل ترک در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه در نظر گرفته و خطوط تاثیر طولی تنش در این نقطه تحت بارگذاری پیشینه در مقطع هدف در قبل و بعد از مقاوم سازیها محاسبه می شوند. نتایج این تحلیلها در شکل ۱۶ جدول ۲ نشان داده شده است. شایان توجه است، دامنه تنش از مجموع تنش پیشینه فشاری و کششی اصلی (σ_y) بدست آمده است.



شکل ۱۶- خطوط تاثیر طولی تنش برای نقطه مستعد ترک ۲ تحت بارگذاری پیشینه در قبل و بعد از روش های مقاوم سازی

جدول ۲- دامنه تنش برای نقطه مستعد ترک ۲ در اتصال و مقطع هدف تحت بارگذاری پیشینه

روش های مقاوم سازی	دامنه تنش	میزان کاهش
قبل از مقاوم سازی	145 MPa	-
مقاوم سازی به روش BSP	69 MPa	52%
مقاوم سازی به روش SSP	54 MPa	63%
مقاوم سازی به روش RHPC	35 MPa	76%

با مشاهده شکل ۱۶ و جدول ۲ نتیجه گرفته می شود، بعد از تقویت عرشه به یکی از روش های مقاوم سازی به شدت دامنه تنش برای مستعدترین نقطه ترک خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه کاهش یافته است. این کاهش قابل توجه دامنه تنش باعث افزایش عمر خستگی عرشه خواهد شد.



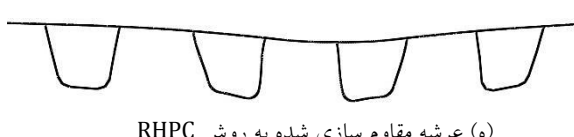
(ب) عرشه مقاوم سازی نشده



(ج) مقاوم سازی به روش BSP

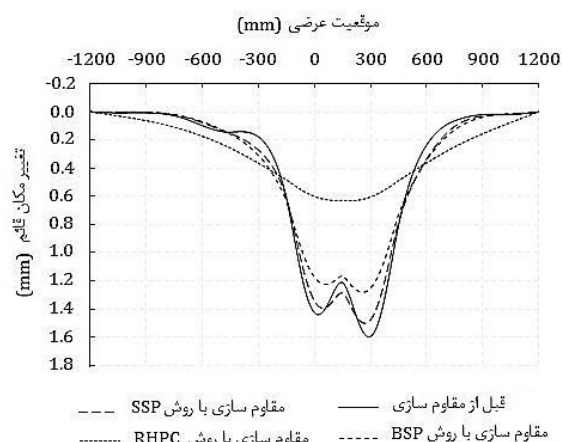


(د) عرشه مقاوم سازی شده به روش SSP



(ه) عرشه مقاوم سازی شده به روش RHPC

شکل ۱۴- تغییر شکل های دو بعدی عرشه تحت بارگذاری پیشینه در قبل و بعد از مقاوم سازی (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)



شکل ۱۵- اندازه تغییر مکان های قائم صفحه عرشه در مقطع هدف تحت بارگذاری پیشینه در قبل و بعد از مقاوم سازی

از شکل های فوق نتیجه گیری می شود، مجدداً مقاوم سازی به روش RHPC نسبت به دو روش دیگر مقاوم سازی، به طور قابل توجهی تغییر مکان های قائم در صفحه عرشه را کاهش داده است بطوریکه، با این روش پیشینه تغییر مکان قائم در حدود ۶۰ درصد کاهش یافته است. بعد از این روش مشاهده می شود که روش BSP نسبت به روش SSP عملکرد بهتری داشته و به ترتیب پیشینه تغییر مکان قائم را در حدود ۲۰ و ۱۰ درصد کاهش داده است.

برای نقاط مستعد آسیب خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه است، بطوریکه با استفاده از این روش می‌توان سطح تنش‌ها برای نقاط مستعد آسیب خستگی در صفحه عرشه را حدود ۸۰ درصد و برای نقاط مستعد آسیب خستگی در جداره تیرچه طولی را حدود ۷۰ درصد کاهش داد. بعد از این روش، مقاوم سازی به روش صفحات فولادی ساندویچی عملکرد بهتری نسبت به روش صفحات فولادی پیوندی دارد. در نهایت با کاهش تنش‌ها در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه، عمر خستگی در این اتصالات به میزان زیادی افزایش و رفتار خستگی اتصالات عرشه ارتوتروپیک بهتر می‌شود.

۲- مراجع

- [1] Sofia Teixeira de Freitas, "Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks", PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands, (2012)
- [2] Zhi-Gang Xiao, Kentaro Yamada, Samol Ya, Xiao-Ling Zhao, "Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks", International Journal of Fatigue 30, (2008), 1387-1397
- [3] Yanling Zhang, Yunsheng Li, Deying Zhang, "Fatigue Life Estimation of Rib-to-Deck Joints in Orthotropic Steel Deck", Advanced Materials Research, (2011), Vol 163-167, 410-416
- [4] Jingyi Liao, "Fatigue damage in the orthotropic steel deck with respect to the trough-to-deck plate joint in between the crossbeams", Master's Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, (2011)
- [5] F.P.D.de Jong, M. H. Kolstein, "Strengthening A Bridge Deck with High Performance Concrete", Conference Proceedings of 1st Orthotropic Bridge Conference, Sacramento, C.A. U.S.A., (2004)
- [6] Sofia Teixeira de Freitas, Henk Kolstein, Frans Bijlaard, "Fatigue behavior of bonded and sandwich systems for strengthening orthotropic bridge decks", Composite Structures 97 (2013), 117-128
- [7] Jong, F. B. P, "Renovation techniques for fatigue cracked orthotropic steel bridge decks", PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands, (2006)
- [8] Wouter De Corte, "Renovation techniques for rib to deckplate fatigue cracking in orthotropic bridge decks", Scientific Research and Essays Vol. 6(9), (2011), 1977-1986
- [9] Sofia Teixeira de Freitas, Henk Kolstein, Frans Bijlaard and Willem Souren, "Orthotropic deck renovation of the movable bridge Scharsterrijn", In Nordic Steel Construction Conference, Malmo, Sweden, (2009), 105-111
- [10] Sofia Teixeira de Freitas, Henk Kolstein, Frans Bijlaard and Willem Souren, "Structural monitoring of a strengthened orthotropic steel bridge deck using strain data", Structural Health Monitoring 11(5), 2012, 558-576
- [11] Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, "ABAQUS/standard user's manual, Version 6.11.3 Providence (RI)": Inc., (2012)
- [12] AASHTO. LRFD bridge design specifications, 5th Ed., AASHTO, Washington, DC, (2010)

۵-۴- تعداد دوره های بارگذاری منجر به شکست خستگی

در این بخش بر اساس نتایج دامنه تنش برای مستعدترین نقطه ترک خستگی در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه (نقطه مستعد ترک ۲) و به کمک اصول پایه مکانیک شکست الاستیک خطی، تعداد دوره های بارگذاری منجر به شکست خستگی در این نقطه در قبل و بعد از روشهای مقاوم سازی با انتگرال گیری عددی از رابطه پاریس محاسبه می‌شود. شایان توجه است، به دنبال تکنیک استفاده از عیوب کوچک به عنوان ترک اولیه، عمق اولیه ترک عمود در داخل ضخامت صفحه عرشه برابر با ۰/۱ میلیمتر فرض شده و رشد آن عیب اولیه با توجه به رابطه (۴) محاسبه می‌شود. همچنین، با توجه به گسترش ترک فرضی در داخل ضخامت صفحه عرشه، عمق نهایی رشد ترک ۱۲ میلیمتر که همان ضخامت صفحه عرشه است، در نظر گرفته شده است.

در نهایت تعداد دوره‌های بارگذاری منجر به شکست خستگی برای مستعدترین نقطه ترک خستگی مطابق جدول ۳ است.

جدول ۳- تعداد دوره های بارگذاری منجر به شکست خستگی برای نقطه

مستعد ترک ۲ در قبل و بعد از مقاوم سازی

تعداد دوره بارگذاری (میلیون دوره)	روش های مقاوم سازی
2.4	قبل از مقاوم سازی
18	روش BSP
36	روش SSP
120	روش RHPC

از جدول ۳ نتیجه گرفته می‌شود، که بعد از روش‌های مقاوم سازی تعداد دوره های بارگذاری منجر به شکست خستگی برای مستعدترین نقطه ترک خستگی در اتصال تیرچه طولی به صفحه عرشه بشدت افزایش یافته است. بنابراین استفاده از روش‌های مقاوم سازی یک راه حل بسیار موثر نسبت به رفتار خستگی عرشه های ارتوتروپیک فولادی است.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از سه روش مقاوم سازی، کاهش تنش در اتصالات تیرچه طولی به صفحه عرشه مطالعه شدند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد، در بین روش‌های موجود استفاده از لایه بتن مسلح با عملکرد بالا بهترین گزینه برای مقاوم سازی و کاهش تنش

- [15] Biehn Baik, Kentaro Yamada, Toshiyuki Ishikawa, "Fatigue crack propagation analysis for welded joint subjected to bending", International Journal of Fatigue 33, (2011), 746–758
- [16] J. A. Yura, E.R. Methvin, and M. D. Engelhardt, "Design of Composite Steel Beams for Bridges", Report No.FHWA/TX-08/0-4811-1, (2008)

- [13] Zhi-Gang Xiao, Tao Chen, Xiao-Ling Zhao, "Fatigue strength evaluation of transverse fillet welded joints subjected to bending loads", International Journal of Fatigue 38, (2012), 57–64
- [14] Japanese Society of Steel Construction (JSSC), "Fatigue design recommendations for steel structures and commentary", Gihodo Publishing, (1993)