

تنفس جان تیوروق‌های فولادی در پل‌ها تحت بار ترافیکی

مرگان یعقوب شاهي (دکتری)

محمد مهدی علی‌نیا* (استاد)

دانشکده‌ی هندی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (۷۹-۲)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۲/۲، ص. ۷۹-۷۱

در روش طراحی حدی، به جان تیوروق‌های فولادی اجازه‌ی کماتش برشی داده می‌شود تا از ظرفیت مقاومتی میدان کشش آن‌ها استفاده شود. تغییرشکل‌های خارج از صفحه‌ی تکرارشونده تحت بارهای تکرارشونده فرای بار کماتش، در جان تیوروق ایجاد می‌شود که به پدیده‌ی تنفس جان موسوم است و سبب ایجاد تغییرات بالای تنش‌های خمشی ثانویه در مرزهای جان می‌شود. تنش‌های مذکور در ترکیب با تنش‌های غشایی موجود، منجر به ترک‌های خستگی در نواحی ذکر شده می‌شوند. حالت تنش‌ها در محل‌های بحرانی ایجاد خستگی، بسیار مهم است. در نوشتار حاضر، تحلیلی عددی گسترده‌ی بر تیوروق‌های فولادی برای بررسی حالت تنش در جان تنفس‌کننده ضمن مدل‌سازی رفتار پس‌کمانش ورق صورت گرفته است. در بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های فولادی، طبقه‌بندی خاصی بر مبنای تنش اسمی برای تعیین عمر خستگی جان تنفس‌کننده معرفی نشده است، بنابراین در نوشتار حاضر از روش تنش‌های هندسی در نواحی بحرانی کنار جوش استفاده شده است.

واژگان کلیدی: تنفس جان، روش اجزاء محدود، خستگی، تیوروق فولادی.

۱. مقدمه

تحت بارهای تکرارشونده، نیازمند بررسی گسیختگی ناشی از تنفس آنهاست.^[۳]

در پژوهش‌های بسیاری به کمک مطالعات آزمایشگاهی، خستگی ناشی از تنفس جان بررسی شده است. برای مثال، برخی پژوهشگران،^[۴] سری جامعی از آزمایش‌های خستگی بر تیوروق‌های چند پانلی با نسبت‌های جانبی (طول به عمق) و لاغری‌های (عمق به ضخامت) مختلف پانل‌ها انجام داده‌اند. بارگذاری تیوروق‌ها منجر به ایجاد نیروی برش عمده در بعضی پانل‌ها و خمش عمده در برخی دیگر می‌شود. در آزمایش‌های مذکور، تنش‌های خمشی ثانویه در محل ترک‌های خستگی ناشی از تغییرشکل‌های خارج از صفحه‌ی پانل با استفاده از روش تفاوت محدود اندازه‌گیری شده است.

در سال ۱۹۷۱،^[۶] یک سری آزمایش‌های خستگی بر تیوروق‌های هیبریدی با مقیاس بزرگ و نیز نمونه‌های پانل مجزاء جان انجام و ۳ روش بارگذاری خستگی مختلف، یعنی: برش، خمش و ترکیب برش و خمش در مدل‌ها در نظر گرفته شد و نیز اثر نسبت‌های جانبی و لاغری‌های مختلف در مدل‌های مذکور مطالعه شد. در سال ۱۹۸۶،^[۷] نیز ۶ تیوروق نازک با مقیاس بزرگ تحت خمش خالص آزمایش شدند و فقط اثر دو نسبت جانبی و لاغری متفاوت در آزمایش‌ها بررسی شد. همچنین در مطالعات آزمایشگاهی دیگری،^[۸] عمر خستگی تیوروق‌ها با لحاظ کردن تنفس جان آن‌ها ارزیابی شد. از دیگر مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به آزمایش‌های انجام شده در مؤسسه‌ی مکانیک کاربردی و تئوری پراگ اشاره کرد که در آن‌ها با توجه

به منظور استفاده از ظرفیت بالای مقاومت پس‌کمانش ورق‌های نازک فولادی، برخی آیین‌نامه‌های طراحی در روش حدی نهایی، به ورق‌های فولادی اجازه‌ی بارگذاری فرای بار کماتش کسان را می‌دهند. بر این اساس در تیوروق‌های فولادی، ورق‌های جان برای استفاده از میدان کشش طراحی می‌شوند. زمانی که جان تیوروق‌ها تحت بارگذاری کماتش می‌کند، دستخوش تغییرشکل‌های کسان و غیرکشان خارج از صفحه‌ی نسبتاً بزرگ می‌شود. در اثر تغییرشکل‌های خارج از صفحه‌ی مذکور، تنش‌های خمشی ثانویه در مرزهای ورق جان، یعنی نزدیک بال‌ها و سخت‌کننده‌های عمودی، ایجاد می‌شوند.^[۱] تیوروق‌های I شکل فولادی استفاده شده در پل‌ها، عموماً تحت بارهای سرویس تکرارشونده‌ی وسائط نقلیه هستند. وقتی مقدار بارهای تکرارشونده‌ی ذکر شده بیشتر از حد کماتش جان تیر باشند، تنش‌های غشایی موجود در ورق به همراه دامنه‌ی تنش‌های خمشی ثانویه ناشی از تغییرشکل‌های خارج از صفحه منجر به ترک‌های خستگی می‌شوند که رشد متعاقب آن‌ها ممکن است منجر به گسیختگی زود هنگام در مرزهای جان، جایی که میدان کشش مهار می‌شود، شود. پدیده‌ی تغییرشکل‌های خارج از صفحه‌ی تکرارشونده‌ی ورق‌های لاغر که در اثر اعمال بارهای داخل صفحه‌ی تکرارشونده ایجاد می‌شود، به اثر تنفس موسوم است.^[۲] بنابراین استفاده از ظرفیت پس‌کمانش ورق‌ها در سازه‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۴/۱۳۹۵، اصلاحیه ۱۰/۵/۱۳۹۵، پذیرش ۲۲/۸/۱۳۹۵.

DOI:10.24200/J30.2018.1366

به یافته‌های آزمایشگاهی، یک سری منحنی‌های S-N برای تقریب عمر خستگی جان تنفس‌کننده پیشنهاد شده است.^[۱۱۰] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۰)،^[۱۱۲] نیز اثر شکل و مقدار نقص اولیه‌ی هندسی در مقاومت خستگی جان تیرورق‌ها تحت ترکیب تنش‌های برشی و خمشی انجام شد و مقدار و شکل نقص اولیه با استفاده از روش‌های آماری و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها تعیین و مدل‌های تیرورق‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود آنالیز و ظرفیت باربری آن‌ها برای حالت حدی خستگی تخمین زده شد.

در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی و از جمله آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۱۳ (۲۰۰۵)،^[۱۳] و حتی دستورالعمل‌های طراحی پل، جزئیات طبقه‌بندی‌شده‌ی مشخصی بر مبنای تنش اسمی برای برآورد عمر خستگی ورق‌های تنفس‌کننده موجود نیست. در آیین‌نامه‌ی اروپا برای ارزیابی عمر خستگی جزئیات طبقه‌بندی‌نشده، روش دامنه‌ی تنش‌های هندسی توصیه شده است. دامنه‌ی تنش‌های هندسی به دامنه‌ی بیشینه‌ی تنش‌های اصلی سطحی در مجاورت پنجه‌ی جوش اطلاق می‌شود. برای محاسبه‌ی کمیت مذکور، آثار تمرکز تنش به سبب هندسه‌ی کلی، جزئیات سازه‌ی مدنظر لحاظ و از آثار تمرکز تنش به دلیل پروفایل جوش صرف‌نظر می‌شود. در جان تنفس‌کننده، تنش‌های غشایی و تنش‌های خمشی ثانویه در مرزهای جان، تنش‌های سطحی در نواحی مذکور تشکیل می‌شود. برخی پژوهشگران،^[۱۵،۱۴] با استفاده از روش معادلات دیفرانسیل ورق و روش گالرکین توانستند تنش‌های ذکرشده‌ی ثانویه مرتبط با خستگی ورق را محاسبه کنند. در سال ۱۹۹۶،^[۱۶] نیز یک روش تحلیلی تقریبی برای تخمین دامنه‌ی تنش‌های سطحی در ورق‌های جان در معرض بارگذاری برشی ارائه شد. همچنین در سال ۲۰۰۴،^[۱۷] خستگی یک پانل با و بدون سخت‌کننده‌های طولی به‌طور عددی بررسی شد. همه‌ی مطالعات عددی مذکور، دامنه‌ی تنش‌های هندسی را در مرزهای یک پانل مجزا تحت تنش‌های برشی و تنش‌های خمشی داخل صفحه محاسبه کرده‌اند، اما هیچ‌یک تنفس جان در کل تیرورق را با در نظر گرفتن آثار احتمالی اجزاء مرزی مطالعه نکرده‌اند. لذا در نوشتار حاضر، اثر تنفس جان در تیرورق‌های فولادی مطالعه و با استفاده از روش اجزاء محدود غیرخطی، تیرورق‌های مذکور مدل‌سازی عددی شده‌اند.

همچنین برای مطالعه‌ی تنفس ورق جان تیرورق‌های فولادی، آنالیز پس‌کمانش جان آن‌ها در مدل‌سازی اجزاء محدود صورت گرفته و محل شروع ترک خستگی ناشی از اثر تنفس براساس حالت تنش‌ها در ورق جان بحث شده است. اثر پارامترهای هندسی مختلف نیز در حالت تنش‌ها، شامل: نسبت جانبی جان، نسبت لاغری، مقدار و شکل نقص هندسی اولیه و سختی اعضا مرزی در حالت تنش‌ها در ورق جان بررسی شده است. در انتها از آنجا که جزئیات طبقه‌بندی‌شده‌ی برای تنفس ورق‌ها در آیین‌نامه‌ی اروپا ارائه نشده است، عمر خستگی تیرورق‌های مذکور با استفاده از روش تنش‌های هندسی موجود در آیین‌نامه‌ی اروپا محاسبه شده است.

۲. روش اجزاء محدود

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، برای بررسی حالت تنش‌ها در جان تیرورق‌ها، در مرحله‌ی پس‌کمانش در نوشتار حاضر از روش اجزاء محدود استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، شبیه‌سازی‌های عددی مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود تجاری MSC MARC v۲۰۱۳/۱ که نرم‌افزاری بسیار توانمند در مدل‌سازی رفتارهای غیرخطی هندسی و مصالح است و مدل‌های متنوعی برای بررسی و اماندگی سازه‌ها دارد، انجام شده است. تیرورق‌ها با استفاده از المان ۱۴۰

کتابخانه‌ی نرم‌افزار مارک شبیه‌سازی شده است. المان مذکور، یک المان پوسته‌ی ضخیم ۴ گره‌بی با ۶ درجه آزادی شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی چرخشی در هر گره است. المان پوسته‌ی مذکور از الگوی انتگرال کاهش یافته که فقط یک نقطه را برای تشکیل ماتریس سختی استفاده می‌کند. همچنین المان مذکور، روش کرنش طبیعی فرض شده (ANS) را برای جلوگیری از قفل شدن برش به‌کار می‌گیرد. میدان کرنش از تانسور کرنش لاگرانژی بر مبنای سیستم مختصات همرفتی به دست می‌آید. در المان پوسته‌ی ذکرشده از پارامترهایی نیز برای ارتقاء کرنش‌های برشی و غشایی استفاده شده است که علاوه بر اصلاح رفتار برش عرضی، در برآورد دقیق رفتار پس‌کمانش ورق‌ها نیز بسیار مؤثر است. المان به‌طور هندسی با مختصات (X، Y، Z) هر ۴ نقطه تعریف می‌شود و به سبب درون‌یابی دوخطی، رویه‌ی هذلولی را می‌تواند تشکیل دهد و به حالت یک صفحه‌ی صاف نیز کاهش یابد. انتگرال‌گیری در امتداد ضخامت پوسته به روش عددی سیمپسون با در نظر گرفتن تعداد فرد نقاط انتگرال‌گیری انجام می‌شود.

آنالیز حساسیت و راستی‌آزمایی نرم‌افزار MSC MARC با اندازه‌گیری تنش بحرانی کمانش برشی یک پانل مربع‌شکل با ابعاد $300 \times 300 \text{ mm}$ و ضخامت 1 mm با در نظر گرفتن دو شرط مرزی ۴ لبه‌ی ساده و ۴ لبه‌ی گیردار با مقایسه با روابط تئوری تنش برشی بحرانی ورق‌های تخت انجام شده است. معادله‌ی ۱، برای محاسبه‌ی تنش برشی بحرانی برای صفحات تخت مستطیلی ارائه شده است که به‌طور فراگیر در همه جا پذیرفته شده است:

$$\tau_{cr} = \frac{k_s \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

که در آن، τ_{cr} تنش برشی بحرانی، E مدول کشسانی، ν نسبت پواسون، b عرض ورق و t ضخامت ورق است. برای ورق‌های با ۴ لبه‌ی ساده، از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود:

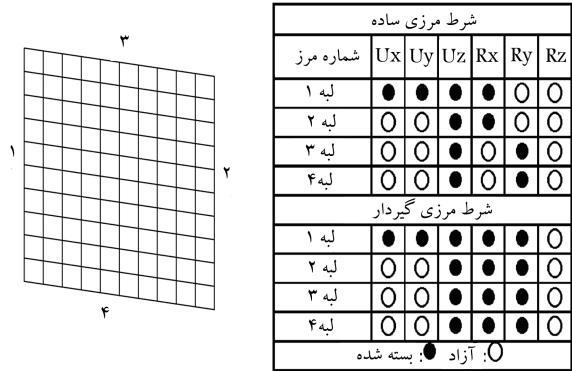
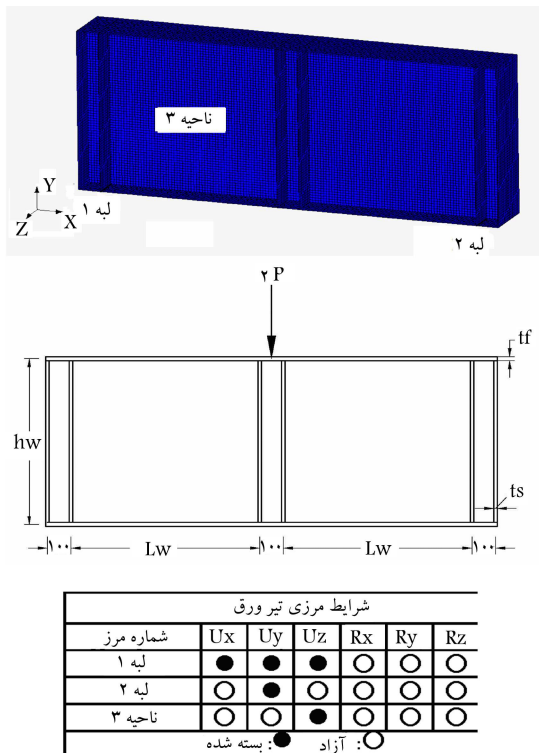
$$k_s = 5/34 \frac{\varphi}{\varphi^2} \text{ for } \varphi \geq 1 \quad (2)$$

و برای ورق‌های با ۴ لبه‌ی گیردار، از رابطه‌ی ۳ استفاده می‌شود:

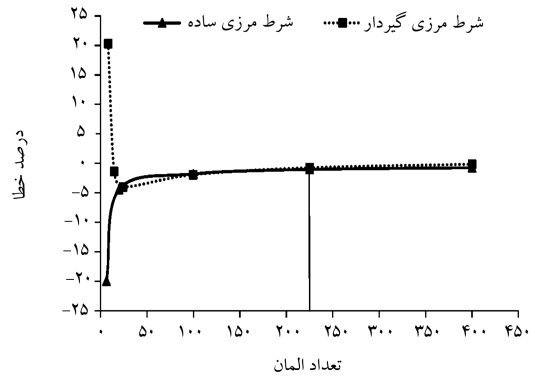
$$k_s = 8/98 \frac{5/6}{\varphi^2} \text{ for } \varphi \geq 1 \quad (3)$$

برای ورق مذکور با فرض مدول کشسانی 210 GPa و نسبت پواسون 0.3 در حالت ۴ لبه‌ی ساده $k_s = 9/34$ ، $\tau_{cr}^{ss} = 196/97 \text{ kg/cm}^2$ ، τ_{cr}^{ss} ۴ لبه‌ی گیردار $k_s = 14/58$ و $\tau_{cr}^{cl} = 307/48 \text{ kg/cm}^2$ محاسبه شدند. همچنین برای هندسه و شرایط مرزی مطابق شکل ۱، آنالیز حساسیت با تعداد المان‌های مختلف انجام و تغییرات درصد خطای به دست آمده از مقایسه‌ی نتایج اجزاء محدود با مقادیر تئوری در مقابل تعداد المان‌های مختلف در شکل ۲ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۲، المان نتایج با یک مش بندی 15×15 ، دقت کافی کمتر از 1% خطا دارند. با این حال برای آنالیز پس‌کمانش، مش 24×24 المان استفاده شده است که در ورق مذکور معادل المان‌هایی به ابعاد $12/5 \times 12/5$ میلی‌متر است. در مطالعه‌ی حاضر، ابعاد مش مذکور برای المان‌بندی تیرورق‌های فلزی استفاده شده است.

در مدل‌سازی اجزاء محدود تیرورق‌های مطالعه‌ی حاضر، آثار غیرخطی مصالح و هندسی در آنالیز پس‌کمانش آن‌ها در نظر گرفته شده است. یک روش مرسوم در مدل‌سازی اجزاء محدود پس‌کمانش ورق‌های فولادی، اعمال جابه‌جایی اولیه‌ی بسیار کوچک بر مبنای شکل مود اول کمانش است. بنابراین ابتدا آنالیز کمانش تیرورق‌ها



شکل ۱. المان‌های پانل برشی و شرایط مرزی.



شکل ۲. آنالیز حساسیت و راستی آزمایشی نتایج پانل برشی.

شکل ۳. مدل اجزاء محدود، شرایط هندسی و خصوصیات هندسی تیرورق دو پانلی تحت بار متمرکز میان‌دهانه.

و همچنین $t_s = 7 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. آنالیز اجزاء محدود با فرض $Im = 2$ تحت بار نقطه‌یی وسط دهانه $P = 400 \text{ kN}$ انجام شده است. در مطالعات آزمایشگاهی موجود در زمینه‌ی تنفس جان، فقط یکی از پانل‌های جان با گیج‌های اندازه‌گیری کرنش مجهز و پانل مجاور توسط یک سخت‌کننده‌ی چوبی در جهت قطری مهار شده است تا از تغییرشکل‌های خارج از صفحه‌ی آن ممانعت شود.^[۳] برای شبیه‌سازی شرایط ذکر شده در مدل اجزاء محدود، درجه آزادی همه‌ی گره‌های المان‌های موجود در یک پانل (پانل سمت چپ) در جهت محور Z بسته شده‌اند (شکل ۳).

۲.۳. خواص مکانیکی مصالح

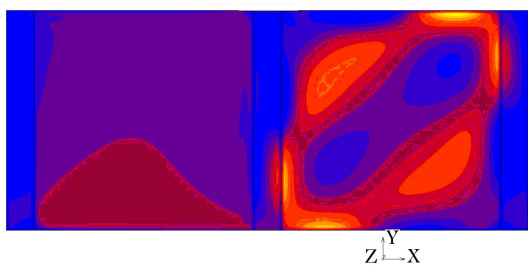
مصالح مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر، فولاد نرمه با مدول کشسانی 210 GPa ، نسبت پواسون 0.3 است. به‌طور کلی، در محدوده‌ی تخمین عمر خستگی سیکل بالای قطعات سازه‌یی، محدوده‌ی بارگذاری در حد بارهای سرویس است. بنابراین، تنش‌هایی که در حالت پس‌کمانش ورق‌های جان رخ می‌دهد، در محدوده‌ی تنش‌های کشسان مصالح باقی می‌ماند و کرنش‌های خمیری یا به‌طور کلی وجود ندارند، یا آن‌قدر کوچکند که قابل صرف‌نظر هستند. با وجود این در مطالعه‌ی حاضر، به منظور انجام یک مدل شبیه‌سازی کامل و در نظر گرفتن احتمال رخ دادن حالت خمیری در ورق بال و یا جان، هر دو خاصیت کشسان و خمیری مصالح در آنالیز اجزاء محدود لحاظ شده است. بنابراین از یک مدل کشسان - خمیری کامل بدون سخت‌شدگی کرنش برای مدل مصالح استفاده و تنش تسلیم برای ورق‌های بال 320 MPa و ورق جان 258 MPa برای مصالح مورد نظر فرض شده است. همچنین از معیار تسلیم فون - مایسز برای مدل‌سازی رفتار حالت خمیری مصالح استفاده شده است.

۳. نواحی بحرانی تنش در جان

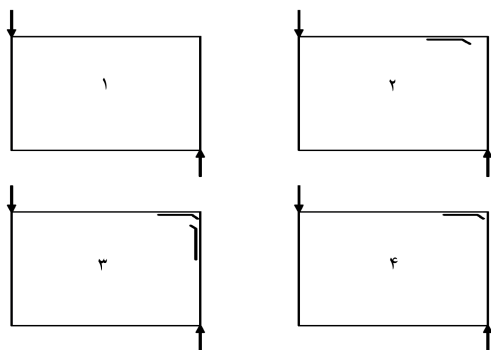
در بخش کنونی، یک تیرورق I شکل مطابق با شکل ۳ استفاده از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی شبیه‌سازی شده است. برای مطالعه‌ی مشخصات ذاتی و جزئیات مرتبط با حالات تنش در ورق جان، تیرورق در معرض یک بار مونوتونیک افزایشی قرار گرفته و شکل‌هایی مرتبط با حالات تنش بحرانی و نواحی محتمل ترک خستگی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود در پژوهشی در سال ۱۹۹۵، ارائه شده است.^[۱۸] مشخصات هندسی و مصالح مدل‌ها، روش بارگذاری و شرایط مرزی و روند تحلیل عددی متناظر در ادامه توضیح داده شده است.

۱.۳. مشخصات هندسی و شرایط بارگذاری

تیرورق دو پانلی مورد مطالعه با شرایط تکیه‌گاهی ساده، تحت بار نقطه‌یی عمودی در وسط دهانه‌ی تیر مطابق شکل ۳ بوده است. برای ایجاد شرایط تنش برشی عمده در پانل جان، نسبت طول به عمق پانل جان نسبتاً پایین در نظر گرفته شده است. بال و سخت‌کننده‌های تیرها طوری طراحی شده‌اند که از مودهای گسیختگی ناخواسته جلوگیری به عمل آید. بنابراین پارامترهای هندسی تیرورق مذکور برابر $t_f = 12 \text{ mm}$ ، $b_f = 250 \text{ mm}$ ، $t_w = 3 \text{ mm}$ ، $h_w = l_w = 80 \text{ mm}$



شکل ۶. کانتور توزیع تنش اصلی بیشینه بر وجه بالایی ورق جان.



شکل ۷. محل ترک خستگی در جان تنفس کننده تیورق فولادی تحت دامنه‌های مختلف بارگذاری با استفاده از مرجع [۱۸].

جدول ۱. مشخصات هندسی تیورق‌های فولادی.

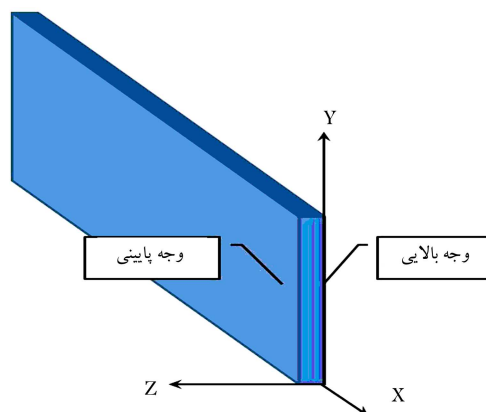
تیورق	$L_w(mm)$	$h_w(mm)$	$t_w(mm)$	L_w/h_w
A	۴۰۰	۸۰۰	۲-۴	۰٫۵
B	۸۰۰	۸۰۰	۲-۴	۱
C	۱۲۰۰	۸۰۰	۲-۴	۱٫۵
D	۱۲۰۰	۶۰۰	۲-۴	۲

۴. مطالعه‌ی عددی

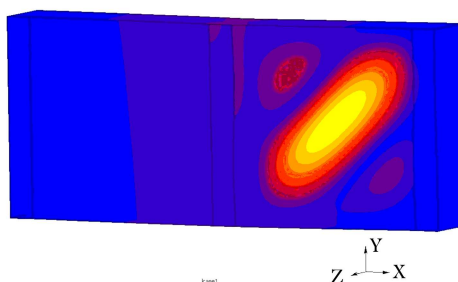
در بخش حاضر، تعدادی تیورق I شکل، تحلیل عددی شده و مطالعه‌ی پارامتری گسترده‌ی بر حالت تنش‌ها در جان تنفس‌کننده‌ی آن‌ها صورت گرفته است. آنالیز تنش در تیورق‌های فولادی دو پانلی با شرایط هندسی، مرزی و بارگذاری مطابق شکل ۱ با پارامترهای هندسی مطابق جدول ۱ انجام شده است. در همه‌ی تیورق‌های مذکور، $b_f = 250\text{ mm}$ ، $t_f = 12\text{ mm}$ ، $t_s = 7\text{ mm}$ در نظر گرفته شده

است. خصوصیات مصالح نیز همچون بخش ۲.۳ لحاظ شده است.

در ادامه، اثر پارامترهای مختلفی از جمله: نسبت لاغری، عامل مقیاس نقص اولیه‌ی هندسی، نسبت جانبی و سختی اعضاء مرزی در تغییرات تنش اصلی بیشینه در مقابل بار اعمال شده بحث شده است. ابتدا لازم است محل تنش‌های بحرانی در جان تیورق‌های مذکور شناسایی شود. لذا ابتدا یک آنالیز تنش بر ۴ تیورق A تا D با مشخصات مذکور با فرض $t_w = 2\text{ mm}$ تحت بار نقطه‌ی $2P = 200\text{ kN}$ و $Im = 1$ انجام و پروفایل تغییرشکل تیورق‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است که مطابق آن پانل‌هایی که در جهت خارج از صفحه‌ی آزاد هستند، دست‌خوش نیم‌موج‌های قطری شده‌اند که دلالت بر غالب بودن مود کمانش برشی در پانل‌های مذکور دارد. در شکل ۹، نیز توزیع تنش‌های اصلی بیشینه‌ی پانل‌های سمت راست



شکل ۴. وجه بالایی ورق جان متناظر با $Z = 0$ و وجه پایینی متناظر با $Z = t_w$.



شکل ۵. پروفایل تغییرشکل تیورق دو دهانه تحت بار متمرکز میان دهانه؛ تغییرشکل خارج از صفحه‌ی پانل چپ محدود شده.

۳.۳. حالت تنش بحرانی

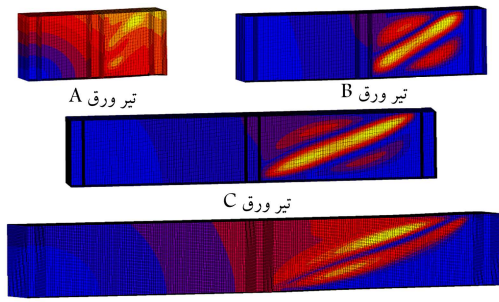
تجربه‌های موجود عددی [۲۰، ۱۹] در زمینه‌ی آنالیز غیرخطی پانل‌های برشی نشان داده است که به دلیل تغییرشکل‌های خمشی خارج از صفحه در مرحله‌ی پس‌کمانش پانل‌ها، تفاوت عمده‌ی بین الگوی تنش‌ها در دو وجه ورق‌های جان ظاهر می‌شود. بنابراین به منظور متمایز ساختن حالت تنش‌ها در دو وجه داخلی و خارجی، هر دو وجه (وجه جان بر $Z = 0$ و $Z = t_w$ به ترتیب متناظر با وجه پایین و وجه بالا هستند) به طور جداگانه بررسی شده‌اند (شکل ۴). البته حالت تنش‌ها بر دو وجه تا قبل از شروع کمانش یکسان است. به محض اینکه پانل کمانش می‌کند، حالت تنش‌ها بر دو وجه تغییر می‌کند. آنالیز پس‌کمانش بر تیورق انجام و پروفایل تغییرشکل آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

مطابق با شکل ۵، برآمدگی تغییرشکل پانل جان کمانش‌کرده، در جهت مثبت Z است. بنابراین تنش‌های خمشی ثانویه در مرزهای گوشه‌ی ورق جان به تنش‌های غشایی موجود در وجه بالایی افزوده و از تنش‌های غشایی موجود در وجه پایین مرزهای گوشه‌ی جان در نواحی بحرانی کاسته شده است. کانتور توزیع تنش اصلی بیشینه بر وجه بالایی در شکل ۶ نشان داده شده است که در آن بیشینه‌ی تنش‌های اصلی از 0 تا یک مقدار مثبت بیشینه تغییر می‌کند. بیشینه‌ی تنش‌های اصلی در مرزها در میان کادرهای بسته بیشترین مقدار را دارد. بنابراین نواحی مرزی در معرض شروع ترک خستگی هستند. نتیجه‌ی مذکور با شواهد آزمایشگاهی که محل شروع ترک خستگی را برای تیورق‌ی با ابعاد مشابه در مرزهای گوشه‌ی پانل تنفس‌کننده گزارش می‌کند، مطابقت دارد (شکل ۷). [۱۸]

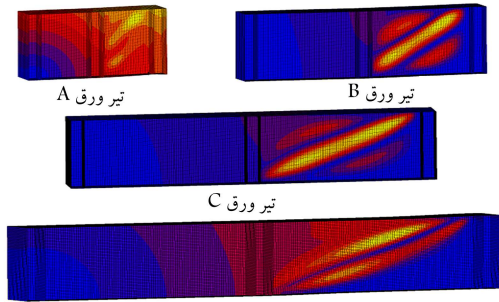
ذکر شده در مقابل تغییرات بار نقطه‌ی میان - دهانه بحث می‌کند. یکی از عوامل بسیار مهم در مقدار تنش‌های بیشینه در جان تیورق‌ها، ضخامت ورق جان است. برای بررسی پارامتر مذکور، آنالیز تنش تیورق‌های A تا D با ضخامت‌های مختلف انجام شده است. در شکل ۱۰، تنش‌های بیشینه‌ی اصلی در نواحی بحرانی جان تیورق‌ها بر حسب بار اعمال شده برای ضخامت‌های مختلف جان ارائه شده است. در آنالیز پس‌کمانش ورق‌های مذکور، عامل مقیاس نقص اولیه برابر $Im = 1$ در نظر گرفته شده است. بر طبق دیاگرام‌های مشاهده شده در شکل ۱۰، اگرچه افزایش در بار اعمال شده، افزایش بیشینه‌ی تنش اصلی را در پی خواهد داشت (همان‌طور که انتظار می‌رود)، ولی نرخ افزایش برای پانل جان با ضخامت $t_w = 2 \text{ mm}$ به طور قابل ملاحظه‌ی از پانل‌های با ضخامت ۳ و ۴ (mm) در هر تیورق بیشتر است.

بر اساس شکل مذکور، در تیورق‌های B، C و D در ضخامت $t_w = 2 \text{ mm}$ کاهش قابل ملاحظه در شیب منحنی‌ها در مراحل انتهایی بارگذاری رخ می‌دهد که به سبب تسلیم موضعی پانل‌ها در نواحی بحرانی است. همچنین مشاهده می‌شود که در یک تراز بارگذاری مشخص، تنش‌های اصلی بیشینه با کاهش ضخامت جان افزایش می‌یابد. به علاوه در یک ضخامت جان و تراز بار مشابه، تنش‌های اصلی بیشینه، یک روند افزایشی از تیورق A تا D دارند. به عبارت دیگر، احتمال شروع ترک وقتی نسبت جانبی کاهش می‌یابد، کمتر می‌شود.

یکی دیگر از عوامل مهم تأثیرگذار در توزیع تنش‌های ورق جان و مقدار آن‌ها و در نتیجه پاسخ خستگی آن‌ها ناشی از پدیده‌ی تنفس، بحث شکل و دامنه‌ی نقص‌های هندسی ورق جان آن‌هاست که به دلیل عوامل اجرایی و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری وجود آنها غیرقابل صرف نظر است. شکل ۱۱، تغییرات تنش اصلی بیشینه را در پانل جان در مقابل بار وارده برای عوامل مختلف نقص اولیه در تیورق‌های A تا D نشان می‌دهد. تنش‌های اصلی بیشینه‌ی گزارش شده در شکل ۱۱، مربوط به نواحی بحرانی پانل جان با ضخامت ۳ mm است. مشاهده

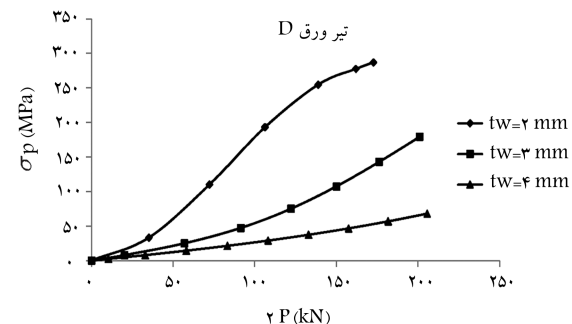
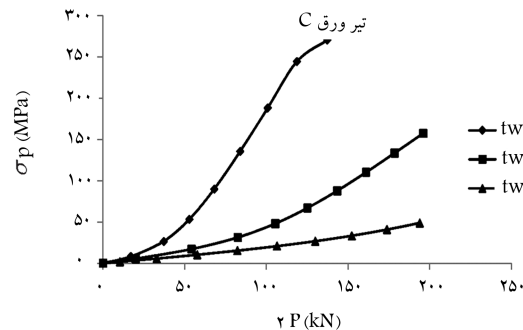
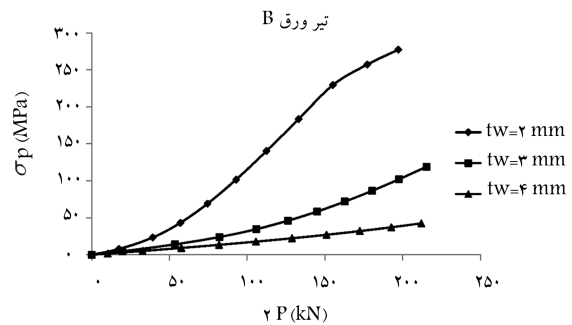
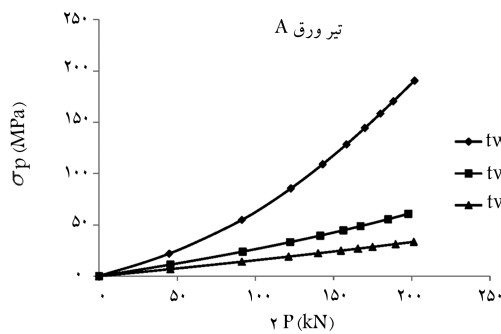


شکل ۸. تغییر شکل تیورق‌های فولادی تحت بار متمرکز میان دهانه (از تغییر شکل خارج از صفحه‌ی پانل سمت چپ ممانعت شده است).

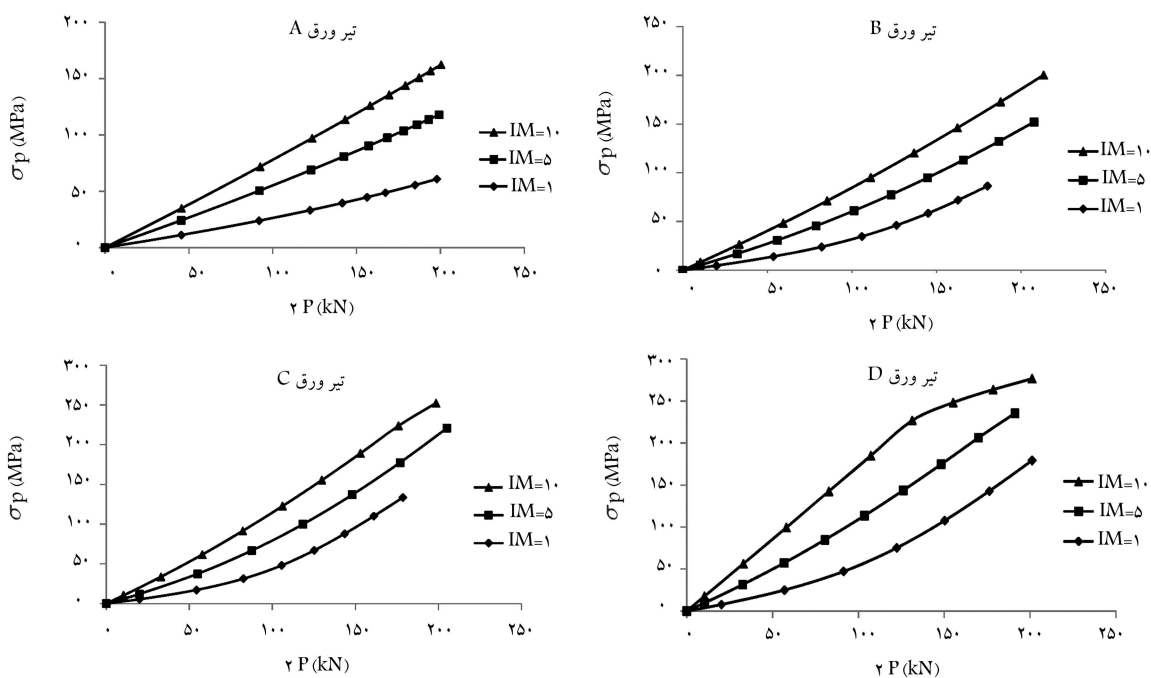


شکل ۹. توزیع تنش اصلی بیشینه در پس‌کمانش پانل جان تیورق‌های فولادی A، B، C و D با ضخامت $t_w = 2 \text{ mm}$.

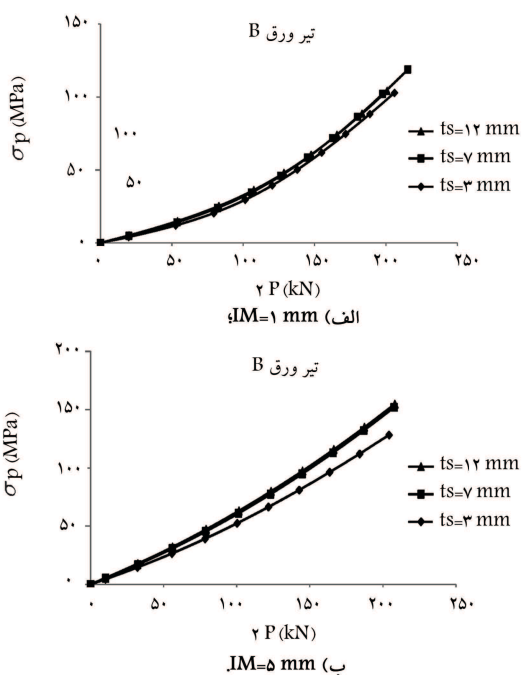
تیورق‌ها که دست‌خوش تغییر شکل‌های خارج از صفحه شده‌اند، نشان داده شده است؛ که در آن‌ها مناطق میان کادرهای بسته‌ی نقطه‌چین، نواحی بحرانی است و احتمال شروع ترک خستگی در آن‌ها وجود دارد. مطالعات پارامتریک عددی که در ادامه مطرح شده است، تغییرات بیشینه‌ی تنش‌های اصلی را در نواحی بحرانی



شکل ۱۰. تنش اصلی بیشینه بر حسب بار اعمال شده در نواحی بحرانی پانل‌های جان تنفس‌کننده برای ضخامت‌های مختلف ورق جان و $Im = 1$ برای تیورق‌های A، B، C و D.



شکل ۱۱. تنش اصلی بیشینه بر حسب بار اعمال شده در نواحی بحرانی پانل‌های جان تنفس‌کننده برای نقص اولیه‌ی مختلف و $t_{wb} = 3 \text{ mm}$ برای تیرورق‌های A الی D.



شکل ۱۲. بیشینه‌ی تنش اصلی بر حسب بار وارده در مناطق بحرانی پانل جان تنفس‌کننده برای ضخامت‌های مختلف سخت‌کننده‌های عمودی و نقص اولیه.

فولادهای محافظت‌نشده در برابر هوازدگی (مگر مواردی که مشخصات آن‌ها در جدول مخصوصی داده شود) است. بخش مذکور فقط مورد استفاده‌ی فولادهایی است که مشخصات طاقت آن‌ها مطابق EN 1۹۹۳-۱-۱ باشد. روش‌های ارزیابی خستگی به غیر از روش $\Delta\sigma_R - N$ مانند روش کرنش شکاف یا مکانیک شکست، توسط بخش مذکور پوشش داده نمی‌شود. واژه‌های تنش اسمی، تنش اسمی اصلاح شده

می‌شود که در همه‌ی تیرورق‌ها در یک تراز بار مشخص با افزایش عامل نقص اولیه، تنش‌های اصلی بیشینه نیز افزایش می‌یابد. به علاوه در مقادیر کوچک عامل نقص اولیه، منحنی‌ها غیرخطی هستند؛ در حالی که در عوامل نقص اولیه‌ی بزرگ، یعنی $Im = 10$ ، منحنی‌ها تقریباً خطی می‌شوند. در تیرورق D با $Im = 10$ ، شیب منحنی در مراحل نهایی بارگذاری به سبب تسلیم موضعی ورق جان در نواحی بحرانی کاهش می‌یابد.

اثر سختی اعضاء مرزی در ترکیب با عامل مقیاس نقص اولیه در پاسخ تنفس جان تیرها در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. شکل مذکور مرتبط با تیرورق B با انتخاب ضخامت جان ۳ mm و ضخامت‌های مختلف سخت‌کننده‌ی عمودی است. مطابق شکل ۱۲، افزایش ضخامت سخت‌کننده در یک تراز بار ثابت تنش‌های اصلی بیشینه را در نواحی بحرانی افزایش می‌دهد. این نتیجه مخصوصاً در پانل‌هایی با عامل مقیاس نقص اولیه‌ی بزرگ‌تر، محسوس‌تر است. به عبارت دیگر، پانل‌هایی با نقص‌های اولیه‌ی هندسی کوچک‌تر، حساسیت کمتری به تغییرات ضخامت اعضاء مرزی دارند. به علاوه پانل‌هایی با ضخامت سخت‌کننده‌های ۷ mm و ۱۲ mm در هر دو مورد ۵ و ۱ پاسخ یکسانی نشان می‌دهند و اختلاف پاسخ از سخت‌کننده به ضخامت ۳ mm تا ضخامت ۷ mm در $Im = 5$ نسبت به $Im = 1$ خیلی بیشتر است.

۵. ارزیابی عمر خستگی

بخشی از آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳ با عنوان EN 1۹۹۳-۱-۹^[۱۳] به ارزیابی عمر خستگی قطعات سازه‌ی و اتصالات تحت بارهای سرویس اختصاص دارد. در بخش مذکور، روش‌هایی برای ارزیابی مقاومت خستگی اعضاء و اتصالات ارائه شده است که قابل استفاده برای انواع فولادهای سازه‌ی، فولادهای ضد زنگ و

-- حد خستگی بارگذاری دامنه‌ی ثابت^۲: حد دامنه‌ی تنش برشی یا مستقیم است که زیر آن هیچ خرابی خستگی در آزمایش‌های تحت شرایط تنش دامنه‌ی ثابت رخ نمی‌دهد. تحت شرایط دامنه‌ی متغیر، همه‌ی دامنه‌های تنش باید زیر این حد باشد، تا هیچ‌گونه خرابی خستگی ایجاد نشود.

-- حد بریدن^۳: حد تنشی است که دامنه‌های تنش طیف طراحی اگر زیر آن باشد، هیچ خرابی به خرابی تجمعی اضافه نمی‌کند.

مقاومت خستگی برای دامنه‌ی تنش اسمی توسط یک سری منحنی‌های لگاریتمی $\log \Delta \sigma_r - \log N$ (منحنی‌های $S - N$) که متناظر با شماره‌ی یکی از جزئیات خاص است، بیان می‌شود. هر یک از جزئیات با عددی مشخص می‌شود که بیانگر مقاومت خستگی مرجع آن جزئیات ($\Delta \sigma_c$) در $10^6 \times 2$ سیکل است.

• برای تنش‌های اسمی با دامنه‌ی ثابت، مقاومت خستگی از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$\Delta \sigma_R^m N_R = \Delta \sigma_C^m 2 \times 10^6 \text{ with } m = 3 \text{ for } N \leq 5 \times 10^6 \quad (4)$$

حد خستگی دامنه‌ی ثابت نرمال از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$\Delta \sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/2} \Delta \sigma_C = 0.707 \Delta \sigma_C \quad (5)$$

• برای طیف تنش‌ها با دامنه‌ی تنش بالا و پایین حد خستگی دامنه‌ی ثابت، مقاومت خستگی ($\Delta \sigma_D$) باید براساس منحنی مقاومت خستگی امتداد یابد و مطابق روابط ۶ و ۷ محاسبه شود:

$$\Delta \sigma_R^m N_R = \Delta \sigma_C^m 2 \times 10^6 \text{ with } m = 3 \text{ for } N \leq 5 \times 10^6 \quad (6)$$

$$\Delta \sigma_R^m N_R = \Delta \sigma_D^m 5 \times 10^6 \text{ with } m = 5 \text{ for } 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8 \quad (7)$$

حد بریدن تنش نیز از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\Delta \sigma_L = \left(\frac{5}{10^8}\right)^{1/5} \Delta \sigma_D = 0.549 \Delta \sigma_D \quad (8)$$

۲.۵. خستگی تنفس جان

در بخش حاضر، تنش‌های هندسی در نواحی بحرانی تیرورق‌های بخش قبل برای دامنه‌های مختلف بارگذاری محاسبه شده است. با توجه به اینکه اتصال جان تیرورق به بال از طریق جوش گوشه فراهم می‌شود که در آن جوش در تحمل بار سهیم است، بنابراین از نمونه‌ی جوش شماره‌ی ۷ در جدول B.۱ آیین‌نامه‌ی اروپا فصل ۹-۱۹۹۳-EN که مقاومت خستگی آن متناظر با جزئیات طبقه‌بندی شده‌ی ۹۰ است، محاسبه و نتایج مذکور در جدول ۲ ارائه شده است. لذا شماره‌ی جزئیات حد خستگی دامنه‌ی ثابت تنش نرمال برابر 66.33 N/mm^2 محاسبه شده است. یعنی اگر تنش‌های هندسی نقاط بحرانی تیر زیر این حد باشند، دچار خستگی نمی‌شوند. در تیرورق‌های مذکور بخش حاضر، $t_w = 2 \text{ mm}$ ، $t_s = 7 \text{ mm}$ و $IM = 1$ لحاظ شده است.

و تنش هندسی که در دستورالعمل مذکور استفاده می‌شوند، در بخش حاضر تعریف شده‌اند. توجه شود که تنش اسمی و تنش اسمی اصلاح شده مربوط به جزئیات سازه‌های جدول‌های ۸.۱ الی ۸.۱۰ در همان دستورالعمل هستند و تنش هندسی مورد استفاده در جزئیات جدول B-۱ دستورالعمل مذکور ارائه شده است. از آنجا که جزئیات سازه‌یی مربوط به تنفس در جدول‌های ۸.۱ الی ۸.۱۰ در دستورالعمل مذکور نمی‌گنجد، برای همین از جزئیات موجود در جدول B-۱ همان دستورالعمل برای تعیین عمر خستگی استفاده می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا باید تنش هندسی در محل‌های بحرانی نزدیک جوش محاسبه و سپس با توجه به نوع جوش مقاومت خستگی در محل اتصال ورق جان به بال محاسبه شود.

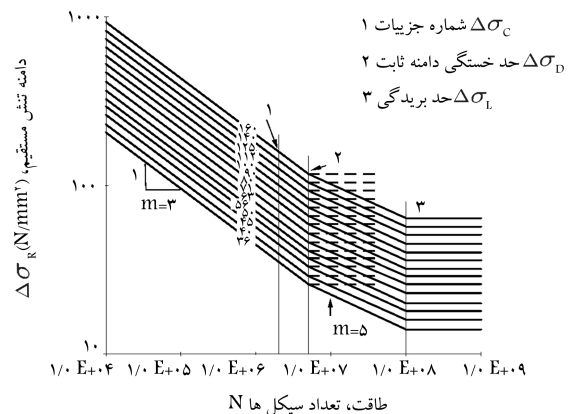
-- تنش اسمی: تنش در مصالح مادر یا در جوش نزدیک به محل احتمالی ترک، که از طریق تئوری حالت کشسانی بدون در نظر گرفتن هیچ‌یک از آثار تمرکز تنش محاسبه می‌شود (تنش اسمی در دستورالعمل مذکور می‌تواند یک تنش مستقیم، یک تنش برشی، یک تنش اصلی یا یک تنش معادل باشد).

-- تنش اسمی اصلاح شده: یک تنش اسمی است که در ضریب تمرکز تنش مناسب (k_f) ضرب می‌شود و می‌تواند اثر ناپیوستگی خاصی را که در جزئیات سازه‌یی لحاظ نشده است، در نظر گیرد.

-- تنش هندسی: بیشینه‌ی تنش سطحی اصلی است که در مصالح مادر نزدیک پنجه‌ی جوش اتفاق می‌افتد و در محاسبه‌ی آن، آثار تمرکز تنش به دلیل هندسه‌ی کلی جزئیات سازه‌یی خاص‌اش، لحاظ می‌شود. باید توجه شود که در محاسبه‌ی تنش هندسی، اثر موضعی تمرکز تنش به دلیل شکل پروفایل جوش در نظر گرفته نمی‌شود. اثر تنش هندسی به طور ضمنی در منحنی‌های گروه B لحاظ شده است.

۱.۵. مقاومت خستگی

در جدول‌های جزئیات بخش مذکور در قسمت شماره‌ی جزئیات، عددی وجود دارد که اتفافی نیستند و علاوه بر اینکه شماره‌ی جزئیات موردنظر و شماره‌ی منحنی ارزیابی خستگی مرتبط را نشان می‌دهند، مقاومت خستگی مرجع ($\Delta \sigma_c$) را بر حسب N/mm^2 نیز نشان می‌دهند. مقاومت خستگی مرجع در واقع مقاومت خستگی جزئیات مرتبط در $N_c = 2 \text{ million}$ سیکل است. دو اصطلاح مورد استفاده در تعیین مقاومت خستگی با استفاده از نمودار شکل ۱۳ به این صورت تعریف می‌شود:



شکل ۱۳. منحنی‌های مقاومت خستگی برای دامنه‌های تنش مستقیم از آیین‌نامه‌ی اروپا ۹-۱۹۹۳-EN [۱۳]

جدول ۲. عمر خستگی جان تنفس‌کننده‌ی تیرورق‌های فولادی.

تیرورق	ΔP (kN)	$\Delta \sigma_p$ (MPa)	N_R
A1	۷۹,۱۱	۱۲۸,۴۶	$۶,۸۸ \times ۱۰^۵$
A2	۱۰۲,۶۵	۱۹۶,۰۵	$۱,۹۳ \times ۱۰^۵$
B1	۶۶,۵۷	۱۸۳,۳۸	$۲,۳۶ \times ۱۰^۵$
B2	۹۸,۶۴	۲۷۷,۳۹	$۶,۸۳ \times ۱۰^۴$
C1	۴۴,۷۱	۱۵۲,۲۸	$۴,۱۳ \times ۱۰^۵$
C2	۷۱,۷۷	۲۷۷,۹۷	$۶,۷۹ \times ۱۰^۴$
D1	۴۶,۳۶	۱۶۰,۸۴	$۳,۵۰ \times ۱۰^۵$
D2	۷۲,۳۵	۲۶۰,۱۳	$۸,۲۸ \times ۱۰^۴$

• افزایش عامل مقیاس نقص اولیه، اثر افزایشی در بیشینه‌ی تنش‌های اصلی پانل جان دارد. در مقادیر نقص‌های کم، منحنی‌های پاسخ بیشینه‌ی تنش اصلی بر حسب بار وارده غیرخطی است، حال آنکه منحنی‌های مذکور برای مقادیر نقص اولیه‌ی بزرگ، تقریباً خطی هستند.

• اثر سختی اعضاء مرزی در پاسخ تنش تنفس پانل جان در مقادیر بالای عامل نقص اولیه چشم‌گیرتر است.

جزئیات خاصی مختص تنفس جان تیرورق و تعیین عمرخستگی آن‌ها در آیین‌نامه‌های طراحی وجود ندارد، ولی عمر خستگی سازه‌ی مذکور می‌تواند با استفاده از جزئیات شماره‌ی ۹۰ آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳ فصل ۹-۱-۹۳-EN، محاسبه‌ی تنش اصلی بیشینه در مجاورت جوش گوشه تخمین زده شود.

فهرست علائم

b : عرض ورق (mm)؛

b_f : عرض بال تیرورق (mm)؛

E : مدول یانگ (N/mm^2)؛

h_w : عمق پانل جان تیرورق (mm)؛

I_m : عامل مقیاس نقص اولیه؛

k_f : ضریب تمرکز تنش؛

k_s : ضریب کماتش برشی؛

L_w : طول پانل جان تیرورق (mm)؛

N : تعداد سیکل‌های گسیختگی؛

P : بار نقطه‌یی میان دهانه (kN)؛

t : ضخامت ورق (mm)؛

t_f : ضخامت بال تیرورق (mm)؛

t_s : ضخامت سخت‌کننده (mm)؛

t_w : ضخامت جان تیرورق (mm)؛

$\Delta \sigma_C$: مقاومت خستگی مرجع (N/mm^2)؛

$\Delta \sigma_D$: حد خستگی دامنه ثابت تنش نرمال (N/mm^2)؛

$\Delta \sigma_L$: حد بریدن تنش (N/mm^2)؛

$\Delta \sigma_R$: مقاومت خستگی (N/mm^2)؛

φ : نسبت جانبی؛

τ_{cr} : تنش برشی بحرانی؛

ν : نسبت پواسون.

۶. نتیجه‌گیری

تحلیل عددی تعدادی تیرورق برای بررسی اثر تنفس جان در مقاومت خستگی آن‌ها انجام شد. پس‌کمانش ورق جان با لحاظ کردن اثر تغییرشکل‌های بزرگ در مدل اجزاء محدود انجام شد. نواحی تشکیل ترک‌های خستگی با توجه به حالت تنش‌ها در ورق جان مطالعه شدند که منطبق بر نواحی بحرانی تشکیل ترک به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی بودند. همچنین در نوشتار حاضر، اثر پارامترهای هندسی مختلفی در مقدار تنش‌های اصلی بیشینه در جان تیرورق که مهم‌ترین عامل تشکیل ترک خستگی است، بررسی شد. رابطه‌ی تنش‌های هندسی با پارامترهای هندسی تیرورق به شدت غیرخطی است و یافتن یک رابطه‌ی صریح تقریباً ناممکن است. بنابراین انجام یک آنالیز اجزاء محدود برای به‌دست‌آوردن تنش‌های مذکور اجتناب‌ناپذیر است. در نوشتار حاضر، نکات حاصل از انجام آنالیز اجزاء محدود برای یافتن تنش‌های بیشینه‌ی سطحی به این شکل خلاصه شده است:

• بیشینه‌ی تنش‌های اصلی در مرزهای گوشه‌ی پانل جان محل تقاطع بال تیرورق و سخت‌کننده‌های عمودی اتفاق می‌افتد که نواحی بحرانی مذکور، محل شروع ترک‌های خستگی است.

• با افزایش بار اعمال‌شده، مقدار تنش‌های اصلی بیشینه افزایش می‌یابد. ولی نرخ افزایش در ورق‌های خیلی نازک از ورق‌های ضخیم‌تر خیلی بیشتر است.

• کاهش چشم‌گیری در روند تنش اصلی بیشینه بر حسب بار در مراحل انتهایی بارگذاری در ورق‌های خیلی نازک مشاهده می‌شود که به دلیل تسلیم موضعی نواحی بحرانی پانل‌هاست.

پانوشته‌ها

1. Eurocode3
2. constant amplitude fatigue limit
3. cut-off limit

منابع (References)

1. Davies, A.W. and Roberts, T.M. "Numerical studies of fatigue induced by breathing of slender web plates", *Journal of Thin Walled Structures*, **25**(4), pp. 319-333 (1996).
2. Davies, A.W., Roberts, T.M., Evans, H.R. and Bennet,

- J.H. "Fatigue of slender web plates subjected to combined membrane and secondary bending stresses", *Journal of Constructional Steel Research*, **30**(1), pp. 85-101 (1994).
3. Osman, M.H. and Roberts, T.M. "Prediction of the fatigue life of slender web plates using fracture mechanics concepts", *Journal of Thin Walled Structures*, **35**(2), pp. 81-100 (1999).
 4. Yen, B.T. and Mueller, J.A. "Fatigue tests of large sized welded plate girders", *Welding Research Council Bulletin*, **118**(118), pp. 1-25 (1966).
 5. Mueller, J.A. and Yen, B.T. "Girder web boundary stresses and fatigue", *Welding Research Council Bulletin*, **127**, pp. 1-22 (1968).
 6. Toprac, A.A. and Natarajan, M. "Fatigue strength of hybrid plate girders", *Journal of the Structural Division*, **97**(4), pp. 1203-1225 (1971).
 7. Maeda, Y. "Ultimate static strength and fatigue behavior of longitudinally stiffened girders in bending", In: IABSE-Colloquium, London, UK. Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength (1986).
 8. Duchene, Y. and Maquoi, R. "Fatigue resistance to web breathing of slender plate girders subjected to shear", *Journal of Constructional Steel Res.*, **46**(1-3), pp. 416 (1998).
 9. Crocetti, R. "Web breathing of full-scale slender I-girders subjected to combined action of bending and shear", *Journal of Constructional Steel Research*, **59**(3), pp. 271-290 (2003).
 10. Skaloud, M. and Zornerova, M. "The fatigue behavior of the breathing webs of steel bridge girders", *Journal of Civil Engineering and Management*, **XI**(4), pp. 323-336 (2005).
 11. Skaloud, M., Zornerova, M. and Urushadze, S. "The breathing of webs under repeated partial edge loading", *Procedia Engineering*, **40**, pp. 463-468 (2012).
 12. Kala, Z. and Kala, J. "Resistance of thin-walled plate girders under combined bending and shear", *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, **5**(4), pp. 242-251 (2010).
 13. "Eurocode 3: Design of steel structures: BS EN 1993-1-9: Part 1-9: Fatigue", European Committee for Standardisation (CEN), Brussels (2005).
 14. Maeda, Y. and Okura, I. "Fatigue strength of plate girders in bending considering out of plane deformation of the web", *Proc. JSCE Struct. Engng./Earthquake Engng.*, **1**(2), pp. 1495-1595 (1984).
 15. Okura, I. and Maeda, Y. "Analysis of deformation induced fatigue of thin walled plate girder in shear", *Proc. JSCE Struct. Engng. Earthquake Engng.*, **1**(2), pp. 377-384 (1985).
 16. Davies, A.W. and Roberts, T.M. "Numerical studies of fatigue induced by breathing of slender web plates", *Thin Walled Structures*, **25**(4), pp. 319-333 (1996).
 17. Gunther, H.P. and Kuhlmann, U. "Numerical studies on web breathing of unstiffened and stiffened plate girders", *Journal of Constructional Steel Research*, **60**(3-5), pp. 549-559 (2004).
 18. Roberts, T.M., Davies A.W. and Bennett J.H. "Fatigue shear strength of slender web plates", *J. Struct. Eng.*, **121**(10), pp. 1396-1401 (1995).
 19. Alinia, M.M., Habashi, H.R. and Khorram, A. "Nonlinearity in the postbuckling behavior of thin steel shear panels", *Thin-Walled Struct.*, **47**(4), pp. 412-420 (2009).
 20. Alinia, M.M., Gheitasi, A. and Erfani, S. "Plastic shear buckling of unstiffened stocky plates", *Constr. Steel Res.*, **65**(8-9), pp. 1631-1643 (2009).