

ظرفیت خمشی نهایی تیرورقهای فولادی تحت اثر بروز ترک در جوش بال به جان

فرهاد فرهودی محمدزاده

کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه

f_abi2004@yahoo.com

حسین شوکتی

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

h.showkati@urmia.ac.ir

نوروز سیفی

کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه

noroz_seifi@yahoo.com

چکیده:

تیرورقها، به عنوان اعضای مهم سازه ای برای پوشش دهانه های بزرگ خمشی ، مورد استفاده قرار گرفته و از جوشکاری دو ورق بال و یک ورق جان به همراه تعدادی سخت کننده قائم و یا طولی برای جلوگیری از کمانش ورق جان ساخته می شوند. به دلیل اهمیت زیاد جوش بال به جان در رفتار سازه ای تیرورقها و امکان بوجود آمدن ترک در حین جوشکاری و یا پس از آن در اثر عوامل فیزیکی یا محیطی ، در این مقاله به بررسی تاثیر ترک جوش بال به جان تیرورقها، در ظرفیت خمشی نهایی آنها پرداخته شده است. بدین منظور مدل‌های مختلف تحلیلی با استفاده از نرم افزار المان محدود LUSAS، ساخته شده و مورد تحلیل قرار گرفتند. در طراحی این مدلها تمامی ضوابط آیین نامه مدرن AISC-LRFD، رعایت شده و اتصال بالها با جوش پیوسته و سراسری به جان تیرورق انجام شده است. برای مدلسازی تیرورق، از المان پوسته چهار ضلعی هشت گرهی استفاده شده و تحلیل آنها به روش غیر خطی هندسی و فیزیکی صورت گرفته است. برای حصول نتایج واقع بینانه تر، در قسمت میانی جان تیرورق یک ناکاملی اولیه ۱۰ میلیمتری در نظر گرفته شد. رفتار فیزیکی مصالح نیز به صورت غیرالاستیک چهار خطی فرض شده و از فولاد St4۰، با تنش تسلیم ۲۷۵۰ کیلوگرم برسانتیمتر مربع استفاده شد. بار وارده به صورت گسترده یکنواخت بر روی بال فوقانی اعمال شده و تکیه گاههای دو طرف تیر نیز مفصلی ثابت و متحرک مدل شد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد، وجود ترک در پانلهای بحرانی در این نوع تیرورقها، حداکثر می تواند ۱۸ درصد ظرفیت خمشی نهایی را کاهش دهد.

کلید واژه ها :

تیرورق، جوش ، بال، جان، ترک، ظرفیت خمشی نهایی

۱- مقدمه:

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از سازه های بزرگ جهت افزایش بهره وری و خدمت رسانی، امری اجتناب ناپذیر می باشد. از آنجا که در این نوع سازه ها، اغلب دهانه ها بزرگ و بارهای وارده قابل توجه می باشند، یکی از راههای تامین مقطع مورد نیاز، استفاده از تیوروق است. تا سال ۱۹۸۱ میلادی، طراحی تیوروقها بر اساس کنترل کمانش ارتجاعی در قطعات تشکیل شده از ورق، انجام میشد. به طوری که روابط حاکم در طراحی ورقها، بر اساس تئوری ارتجاعی بر پایه تغییر شکلهای کوچک قرار می گیرد. با تحقیقات انجام شده، توسط آقای باسلر و سایر محققین مشخص شد، پس از این که تغییر شکلهای جانبی دائر کمانش برشی، در تیوروقها بوجود می آیند، در صفحه میانی ورق یکسری تنشهای کششی غشایی بوجود می آیند که تمایل به برگرداندن ورق به حالت پایدار را دارند. در واقع می توان گفت بدلیل تاثیر این تنشهای غشایی است که در ورقها کمانشهای ناگهانی مثل ستونها بوجود نمی آید و آنها حتی پس از کمانش، باز هم ظرفیت باربری زیادی را از خود نشان میدهند. بنابراین در آیین نامه های جدید ضوابطی در نظر گرفته شد که در آن ظرفیت فراکمانشی را نیز مورد بحث و بررسی قرار دادند. به این ترتیب که اگر تیوروقی به درستی طراحی شده باشد و دارای سخت کننده های قائم باشد، بعد از کمانش جان، تیر ورق همانند یک خرپا عمل می نماید که در این حالت جان کمانش یافته مانند قطره های کششی، و سخت کننده های قائم بعنوان اعضای فشاری خرپا عمل می کنند. [۲]

رفتار پیچیده تیوروقها و روشهای طراحی متفاوت آنها باعث گشته، تاکنون تحقیقات گسترده ای در ابعاد مختلف صورت گیرد. از جمله این موارد مهم و قابل تامل، مطالعه و بررسی تاثیر ترکهای بوجود آمده در نواحی مختلف تیوروق، در رفتار خمشی و کمانشی آنها میباشد. ترک خوردگی در تیوروقها معمولاً ناشی از پدیده خستگی، خوردگی فلزات، اثرات اعوجاجی، وجود تنشهای زیاد وعدم رعایت استانداردهای لازم در جوشکاری قطعات آن، می باشد. باید توجه کرد که رفتار ترک، اعم از سرعت و جهت گسترش آن و عمر خستگی، به کیفیت جوش و تنشهای پس ماند حاصل از عمل جوشکاری و نورد ورقهای فولادی، محیط اطراف سازه از نظر رطوبت و خوردنده بودن آن و نوع بارگذاری سازه بستگی دارد. در سالهای اخیر مطالعات زیادی در مورد دلایل پیدایش و نحوه گسترش ترک و تاثیر عوامل محیطی و همچنین ارزیابی عمر خستگی سازه های مهندسی، بویژه تیوروقهای پل صورت گرفته است.

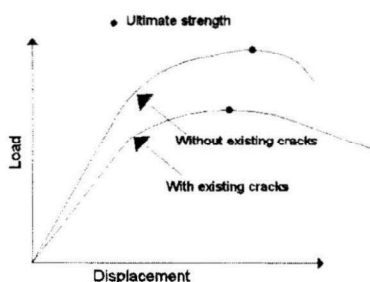
در سال ۱۹۶۰ میلادی، آزمایشات متعددی درباره تیوروقهای لاغر با سخت کننده های قائم و یا طولی در آمریکا و ژاپن صورت گرفت. در اغلب این مطالعات بانلهای تیوروق تحت اثر برش، خمش ویا ترکیبی از این دو قرار داشت. نتایج حاصل از این آزمایشات نشان می دهد که نوع و محل ترکهای خستگی با تغییر جهت کمانش ورق جان در پانل، در طول مدت سیکلهای بارگذاری که به پدیده تناوب کمانشی جان (Web breathing) معروف است، ارتباط دارد.

تحقیقات مزبور نشان داد که وجود ناکاملی اولیه در ورق جان، نسبت ابعادی تیوروق (a/h) و نسبت لاغری آن (h/t_w) از عوامل موثر در بوجود آمدن چنین ترکهایی هستند. در واقع با استفاده از ورقهایی با ناکاملی اولیه بسیار ناچیز و همچنین دقت در ساخت، حمل و مونتاژ این ورقها در ساخت تیوروق و محدود کردن نسبتهای لاغری و ابعادی، به سهولت می توان از پیدایش ترکها، تحت اثر پدیده Web breathing جلوگیری نمود. [۸]

در سال ۱۹۹۳ میلادی، تحقیقات گسترده ای توسط آقایان Qkura Yen, Fisher برای بررسی محل ترکهای بوجودآمده تحت اثر برش، خمش و یا ترکیب آن دو صورت گرفت. در این تحقیقات مشخص شد که اکثر ترکهای بوجود آمده در جوش بال به جان تیوروقها از پنجه جوش گوشه روی جان، شروع میشوند و در تمام ضخامت جان گسترش می یابند و اگر محل ترک در ابتدا یا انتهای پانل جان باشد، سرعت رشد ترکها نسبت به حالتی که ترک جوش در وسط پانل جان بوجود آید، بیشتر میباشد

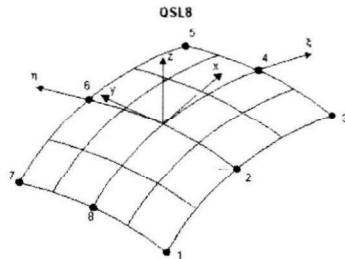
و در نهایت خرابی سازه با کمانش بال فشاری و جان آغاز میشود. [۶] همزمان با این تحقیقات Corcetti بررسیهایی را روی چهار تیوروق بزرگ مقیاس انجام داد. او نیز به این نتیجه رسید که ترکهای خستگی از پنجه جوش در روی جان تیوروق شروع میشوند. [۴] Joem kee paik, Y.V.Satish در سال ۲۰۰۵ میلادی Jae Myung Lee Kumar آزمایشاتی را برای تعیین ظرفیت نهایی ورقهای ترک خورده تحت بارگذاری محوری فشاری و کششی انجام دادند و متوجه شدند که وجود ترکهای خستگی موجب کاهش مقاومت نهایی ورقهای فلزی میشود. به طوریکه طول ترک و ضخامت ورق نیز در این کاهش مقاومت تاثیر بسزایی دارد. در شکل ۱ نمودار نتایج این تحقیقات نشان داده شده است [۵].

همچنین معلوم شد که اگر در یک پانلی که تحت اثر فشار قرار دارد ترکی بوجود بیاید، بسته شده و سپس کمانش میکند و در اثر تغییر شکلهای اولیه تغییر شکلهای مضاعفی بوجود آمده و بارگذاری خارج از صفحه بصورت موضعی ایجاد میگردد. در این تحقیق مشخص گردید با افزایش ضخامت ورقهایی که دارای ترک در لبه های پانلها هستند، مقدار ضریب کاهش مقاومت افزایش می یابد یعنی هر قدر ضخامت ورق بیشتر باشد این ترکها در کاهش ظرفیت مقاومتی، تاثیر قابل توجهی دارند.



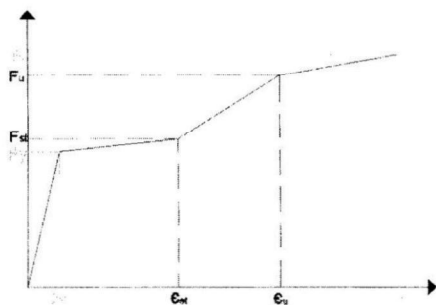
شکل ۱: نمودار بار-تغییر مکان در حالت ترک خورده و بدون ترک [۵]

موجود در نرم افزار، دو نوع المان *Thin shell* و *Thick shell* وجود دارند. با مطالعات انجام شده از طریق راهنمای برنامه و همچنین با توجه به تحقیقات پیشین [۴ و ۶]، برای مدلسازی تیورق از المانهای *Thin shell* استفاده گردید. این نوع المان خود در برگیرنده چهار نوع المان سه، چهار، شش و هشت گرهی است که در بین آنها فقط المان هشت گرهی با عنوان *QSL8*، قابلیت انجام آنالیز غیر خطی هندسی را دارا بوده و برای نشان دادن دقیق و واضحتر تغییر شکلهای کمانشی موضعی و گسترش اثرات پلاستیسیته بسیار مناسب می باشد. بنابراین برای مدلسازی از این نوع المان در اشکال مربعی به ضلع ۵ سانتیمتر استفاده شد. بطوریکه در این المان هشت گرهی، چهار گره در رئوس مربع و چهار گره نیز در وسط اضلاع آن واقع شده اند. درجات آزادی این نوع المان در شکل ۳، نشان داده شده است.



شکل ۳: درجات آزادی المان *QSL8* در نرم افزار *LUSAS*

المان *QSL8*، توانایی تحلیل پلاستیک را داشته و مناسب ترین المان برای مدلسازی تیورق می باشد. سرعت تحلیل آن به دلیل هشت گرهی بودن پایین بوده اما دقت محاسباتی آن بالا میباشد. به علت وجود تغییر شکلهای پلاستیک، از تحلیل غیر خطی مصالح در این تحقیق، استفاده شده است. برای تعریف فولاد ساختمانی از مصالح ایزوتروپ و فولاد نرمه (*Mild steel*) با نسبت پواسون ۰/۳ و مدول الاستیسیته $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ استفاده شد. رفتار مصالح به صورت الاستو پلاستیک چهار خطی فرض شده است. (شکل ۴)



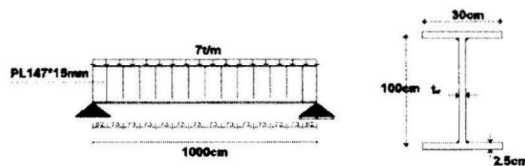
شکل ۴: نمودار تنش-کرنش مصالح

برای مصالح انتخابی مشخصات فولاد *St40kis*، در نظر گرفته شد. مقادیر تنشها و کرنشهای این نوع فولاد در حالات تسلیم و گسیختگی، مطابق جدول ۱ می باشند.

با توجه به تحقیقات پیشین، در این مقاله سعی شده است با مدل کردن ترک در جوش بال به جان تیورورها، تغییرات بوجود آمده در ظرفیت خمشی نهایی آنها مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مدلسازی و آنالیز نمونه ها

در این مقاله برای آنالیز نمونه ها از نرم افزار المان محدود *LUSAS* استفاده شد. نرم افزار *LUSAS* دارای قابلیت المان محدود بالایی می باشد و از حیطه آنالیز ساده خطی و استاتیکی تا آنالیز پیچیده دینامیکی با تاریخچه زمانی غیر خطی را شامل میشود. ابتدا، یک تیر ساده با بارها و شرایط تکیه گاهی نشان داده شده در شکل ۲، با استفاده از ضوابط آئین نامه *LRFD*، طراحی شده و مشخصات هندسی بدست آمده در نرم افزار *LUSAS*، مدلسازی گردید.



شکل ۲: مشخصات هندسی تیورق مورد تحقیق

از آنجا که در عمل دستیابی به سازه ای بدون ناکاملی اولیه بسیار دشوار است و در تیورورها معمولاً ناکاملی هایی در ورق جان دیده می شود، برای بررسی دقیق تر و عملی تر رفتار تیورورها، و نزدیک کردن نتایج حاصله به نتایج واقعی، در ورق جان یک ناکاملی اولیه به صورت نیم موج سینوسی در جهت طول و ارتفاع پانل در مدلها ایجاد شد. حداکثر مقدار این ناکاملی در حدود یک هزارم طول دهانه (یعنی ۱ سانتیمتر) در وسط پانل در نظر گرفته شد. برای ایجاد مدل جان با ناکاملی اولیه، از معادله (۱)، که یک مدل سینوسی است استفاده گردید.

$$X = \delta \times \sin\left(\frac{\pi y}{h}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{a}\right) \quad (1)$$

در این رابطه a طول یک پانل و h ارتفاع پانل و δ نشان دهنده خیز ماکزیمم در وسط پانل میباشد. در این معادله محور y محور قائم و محور z محور طولی تیر میباشد. شایان ذکر است ورقهای بال و سخت کننده ها در ساخت مدلها بدون ناکاملی اولیه فرض شدند.

برای مدلسازی ترک جوش بال به جان تیورورها با توجه به تحقیقات قبلی صورت گرفته [۱]، از ایده جداسازی المانهای بال و جان تیورق در طولهای مورد نظر استفاده شده و برای مدلسازی ناحیه جوش بال به جان به صورت ورقهایی به عرض ۱ سانتیمتر و به ضخامت ورق جان، در نظر گرفته شد.

از آنجا که در تیورورها، از صفحات فلزی استفاده می شود، با توجه به انواع المانهای موجود در نرم افزار، استفاده از گروه المان *Shell*، بسیار مناسب و صحیح می باشد. در گروه المان *Shell*



اساس معادلات مربوط به حالت تغییر شکل یافته حالت قبل استوار هستند.

در این تحقیق برای انجام محاسبات غیر خطی از سیستم مختصات کلی استفاده

گردید. همچنین برای تبدیل تحلیل بار ثابت به روش طول کمان از پارامتر سختی موجود (Current stiffness parameter value) با مقدار پیش فرض ۰/۴ استفاده شد. بعد از تنظیم این پارامترها برای انجام محاسبات غیر خطی، مدلها مورد آنالیز قرار گرفتند. از آنجا که در مدلها از المانهای ریز مربعی هشت گرهی استفاده شده بود، مدت زمان آنالیز هر کدام مدلها بسیار طولانی بوده و بین ۳۳ تا ۳۸ ساعت طول کشید.

۳- معرفی نمونه ها

در این مقاله برای بررسی اثر ترک جوش بال به جان تیرورقها در ظرفیت خمشی نهایی آنها و امکان استنتاجهای مناسب، متغیرهایی برای موضوع مورد بحث در نظر گرفته شد، که عبارتند از:

طول ترک

با فرض اینکه ترکهای بوجود آمده، تحت اثر عوامل مختلف ایجاد شده و رشد کرده اند و سپس رشد آنها کنترل شده است. ترکها در دو طول ۱۰ و ۳۰ سانتیمتری در محل جوش بال به جان تیرورقها ایجاد شدند.

موقعیت ترک:

ترکها در چهار موقعیت متفاوت در جوش بال فشاری به جان تیرورق، در پانلهای دوم (برتکیه گاه) و پانلهای سوم و پنجم و هشتم (وسط تیر) ایجاد شدند. لازم به ذکر است شماره گذاری پانلهای از تکیه گاه سمت چپ تیر مدلسازی شده در نرم افزار انجام شده است. همچنین برای مقایسه تاثیر ترک بوجود آمده در جوش بال کششی به جان با ترکهای بوجود آمده در جوش بال فشاری، ترکها در طولهای مختلف در جوش بال کششی به جان، در پانل سوم تیرورق ایجاد شده و مورد مطالعه قرار گرفتند.

نسبت لاغری تیرورق (h/t_w):

در این تحقیق تیرورقها با دو نسبت لاغری ۱۲۵ و ۲۵۰، مورد مطالعه قرار گرفته اند. برای تغییر نسبت لاغری تیرورقها، ضخامت جان آنها تغییر داده شد. به طوریکه در نمونه های با نسبت لاغری ۱۲۵، ضخامت جان ۸ میلیمتر و در نمونه های با نسبت لاغری ۲۵۰، ضخامت جان ۴ میلیمتر در نظر گرفته شدند.

برای نامگذاری نمونه های دارای ترک در جوش بال به جان آنها از فرم کلی $G_a(t \text{ or } b)n$ استفاده گردید. در این فرم کلی G نسبت لاغری، a طول ترک و n شماره پانلی است که ترک در آن بوجود آمده است. اگر ترک در جوش بال کششی به جان، ایجاد شده باشد از حرف b و اگر در جوش بال فشاری به جان ایجاد شود از حرف t استفاده می شود.

جدول ۱: مقادیر تنش و کرنش فولاد St ۴۰.kis [۳]

تنش (مگا پاسکال)	کرنش	
۲۷۵/۸	۰/۰۰۱۳۱۳	تنش تسلیم (F_y)
۲۸۵/۰۷۳	۰/۰۱۰۵۹	تنش سخت شوندگی کرنشی (F_{st})
۴۴۸/۱۷۵	۰/۰۵۷۸۶	تنش نهایی (F_u)
۴۸۲/۶۵	۰/۰۹۲۳۳	تنش گسیختگی (F_r)

از آنجا که استفاده از معیار فون میزس در آنالیز مدلهایی که دارای مصالح شکل پذیر، با کرنشهای حجمی کمتری هستند، بسیار مناسب می باشد و امکان استفاده از گامهای بزرگ افزایش بار به همراه همگرایی سریعتر را فراهم می آورد [۶]. در این تحقیق از این معیار استفاده گردید.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است برای مدلسازی نمونه ها از یک بار گسترده خطی یکنواخت که بر روی بال فوقانی اعمال میشود، استفاده شده و برای انجام آنالیز غیر خطی به طور یکنواخت بر مقدار این بار افزوده شد. در پانلهای انتهایی تیر نیز با استفاده از تعریف دو نوع تکیه گاه مفصلی ثابت و متحرک، تیرورقهای ساده با بار گسترده یکنواخت مدلسازی شدند.

شایان ذکر است در تمامی مدلهای مورد تحلیل، برای جلوگیری از کمانش پیشگی بالها، آنها در محل اثر سخت کننده ها، هم در ناحیه فشاری و هم در ناحیه کششی، با استفاده از تکیه گاههای جانبی در طول تیر مهار شدند.

آنالیز غیر خطی شامل دو مقوله غیر خطی مصالح و غیر خطی هندسی است. آنالیز غیر خطی هندسی زمانی مورد توجه قرار می گیرد که تشکیل معادلات بر حسب حالت تغییر شکل نیافته سازه، مناسب نباشد. برای انجام تحلیل غیر خطی باید در هر مرحله از بارگذاری مقدار افزایش بار را مشخص نمود، که این مقدار به صورت گام به گام به مقادیر قبلی بار افزوده میشود. این افزایش مرحله به مرحله با تعریف حدود اولیه و مقدار افزایش در هر مرحله، به صورت اتوماتیک توسط نرم افزار انجام می شود.

در آنالیز غیر خطی المان محدود، از آنجا که شکل سازه در حالت تغییر شکل یافته مشخص نمی باشد، یک دستگاه مختصات لاگرانژی برای تعیین معادلات غیر خطی المان محدود، که بر حالت معادلات پیشین استوار است انتخاب میشود.

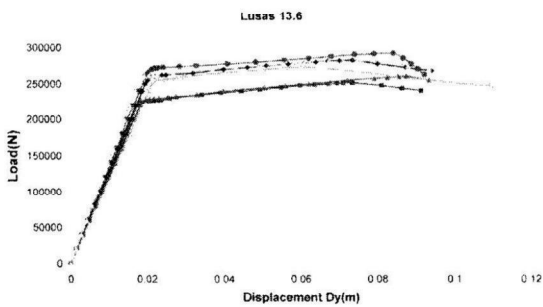
اغلب دو نوع مختصات مقایسه ای لاگرانژی وجود دارد:

- ۱- سیستم مختصات کلی (Total Lagrangian)
- ۲- سیستم مختصات بهنگام (Update Lagrangian)

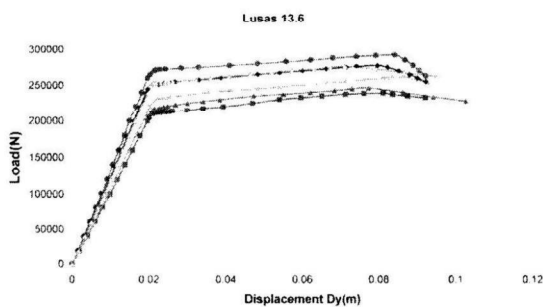
در سیستم مختصات کلی، تمامی معادلات در حالت تغییر شکل یافته موجود، براساس معادلات شکل اولیه سازه تعیین میشوند. اما در سیستم مختصات بهنگام معادلات در حالت تغییر شکل یافته موجود بر

۱۲۵ در پانل دوم آن، حداکثر ۱۳/۸ درصد ظرفیت خمشی نهایی آنرا کاهش می دهد، حال آنکه وجود ترک ۳۰ سانتیمتری در همین تیورق و در همان موقعیت باعث افت ۱۸ درصدی ظرفیت خمشی نهایی میشود. با توجه به نمودارهای بار- تغییر مکان قائم (اشکال ۷ و ۸) ملاحظه میشود که قسمت ابتدایی این نمودارها، به صورت خطی بوده و دارای شیب نسبتاً زیادی می باشد. با رسیدن به مرحله غیر خطی، با افزایش اندکی در مقدار نیرو، مقدار خیز به طور چشم گیری افزایش می یابد.

با توجه به این نمودارها مشخص میشود، چنانچه ترک در جوش بال کششی به جان تیورقها ایجاد شود، تأثیر بسیار کمی در افت ظرفیت خمشی تیورق دارد. به طوریکه وجود ترک ۱۰ سانتیمتری در جوش بال کششی به جان تیورق، زمانی که ترک در پانل سوم ایجاد شده است، باعث افت ۳/۷۴ درصدی مقاومت خمشی نهایی میشود. حال آنکه اگر همین طول ترک در همان پانل و در جوش بال فشاری به جان رخ دهد، ۱۰/۷ درصد ظرفیت خمشی نهایی تیورق را کاهش میدهد.



شکل ۵: نمودار بار- تغییر مکان قائم برای تیورقهای دارای ترک ۱۰cm



شکل ۶: نمودار بار- تغییر مکان قائم برای تیورقهای دارای ترک ۳۰cm

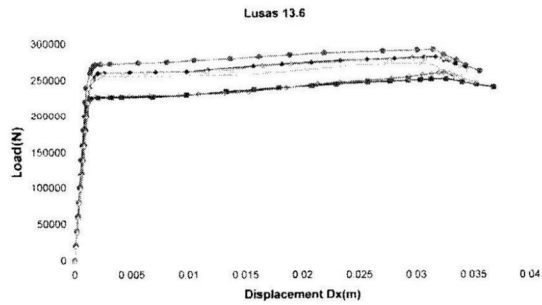
در شکل ۹ نمودار لنگر خمشی نهایی نمونه ها، در برابر موقعیت ترک بوجود آمده (برحسب شماره پانل دارای ترک از لبه سمت چپ تیر) رسم شده است. خط نقطه چین افقی، مربوط به نمونه های بدون ترک میباشد که محل تلاقی این خط و محور قائم، نشاندهنده لنگر خمشی نهایی قابل تحمل برای این مدلها است. برای ترکهای بوجود

برای نامگذاری نمونه بدون ترک از فرم G_Without crack استفاده شد. برای مثال نمونه با عنوان ۱۲۵_۳۰t۵، معرف تیورقی است با نسبت لاغری ۱۲۵، که ترک ۳۰ سانتیمتری در جوش بال فشاری به جان آن در پانل پنجم بوجود آمده است.

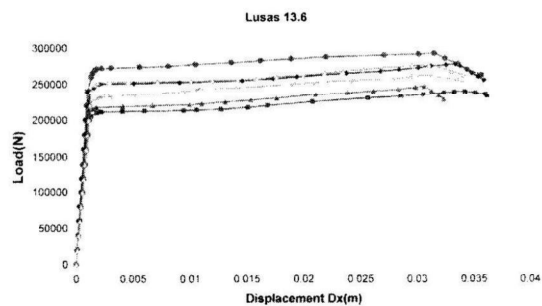
۴- اثر ترک در رفتار خمشی تیورقها

بعد از انجام مدلسازی و تحلیل نمونه ها، نتایج حاصل را با رسم نمودارهای بار- تغییر مکان جانبی و بار- تغییر مکان قائم بررسی می کنیم.

در شکلهای ۵ و ۶، نمودار بار- تغییر مکان جانبی برای تیورقهای با نسبت لاغری ۱۲۵، و دارای ترکهای ۱۰ و ۳۰ سانتی متری در جوش بال به جانشان رسم شده است.



شکل ۵: نمودار بار- تغییر مکان جانبی برای تیورقهای دارای ترک ۱۰cm

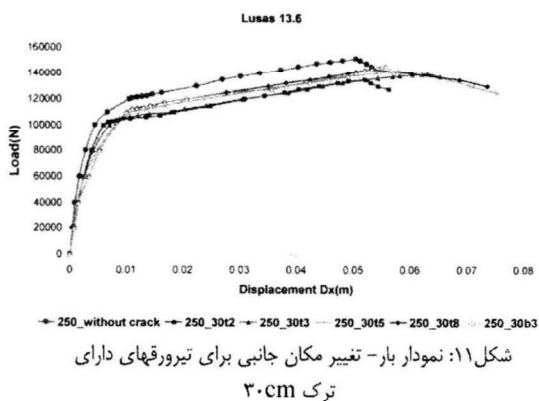
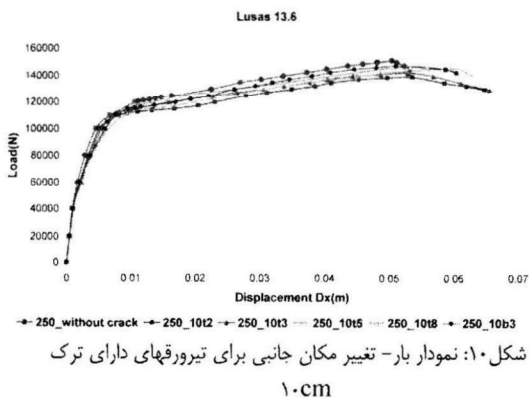


شکل ۶: نمودار بار- تغییر مکان جانبی برای تیورقهای دارای ترک ۳۰cm

در اشکال ۷ و ۸ نیز نمودار بار- تغییر مکان قائم برای همین مدلها، با در نظر گرفتن قدر مطلق تغییر مکان قائم (با توجه به جهت منفی خیزهای قائم در مختصات مورد استفاده در مدلسازی) رسم گردیده است. با استفاده از این نمودارها، از طریق به دست آوردن حداکثر بار نهایی نمونه ها، ماکزیمم لنگر خمشی قابل تحمل برای آنها محاسبه می شود.

با توجه به این نمودارها می توان دریافت، افت ظرفیت خمشی تیر با طول ترک نسبت مستقیم دارد. بطوریکه برای مثال وجود ترک ۱۰ سانتیمتری در جوش بال فشاری به جان تیورق با نسبت لاغری

ضوابط موجود در آیین نامه LRFD، جزو تیورقهای با جان لاغر محسوب می شوند.



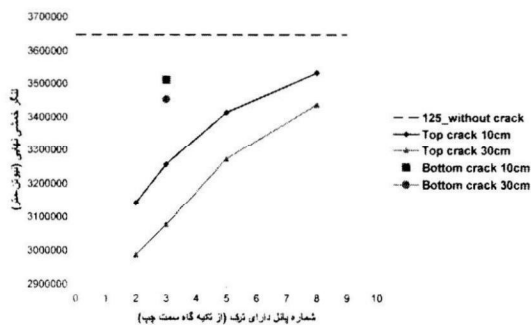
با توجه به شکلهای ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود که در تیورقهای با نسبت لاغری ۲۵۰ نیز با افزایش طول ترک، افت ظرفیت نهایی خمشی افزایش می یابد. همچنین ملاحظه می گردد که با فاصله گرفتن موقعیت ترک از تکیه گاه، ضریب کاهش مقاومت نیز کاهش می یابد.

با مقایسه اشکال ۱۰ و ۱۱ با ۶۰ مشاهده می شود که در تیورقهای غیر لاغر (با نسبت لاغری ۱۲۵)، بار کمانشی و فراکمانشی، تفاوت بسیار اندکی با هم دارند. بطوری که ظرفیت فراکمانشی نقش کمی در تامین مقاومت تیورق دارد. حال آنکه در تیورقهای لاغر (با نسبت لاغری ۲۵۰) بارکمانشی قسمت اعظمی از مقاومت تیورق را به خود اختصاص می دهد.

به عبارتی دیگر در تیورقهای با نسبت لاغری ۱۲۵ (غیر لاغر) به دلیل اینکه نسبت سطح مقطع جان به سطح مقطع بال افزایش یافته است، نمی توان از همه ظرفیت فراکمانشی تیورق بهره برد. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که با کاهش نسبت سطح مقطع جان به سطح مقطع بال، مقطع تیورق اقتصادی تر خواهد بود.

با توجه به اشکال ۱۰ و ۱۱ مشاهده میشود که نمودار بار- تغییر مکان جانبی تا رسیدن به بار کمانشی خطی بوده و بعد از افزایش

آمده در جوش بال فشاری به جان، از کلمه top crack و برای ترکهای بوجودآمده در جوش بال کششی به جان نیز از کلمه bottom crack، استفاده شده است.



با توجه به شکل ۹ ملاحظه میگردد که بحرانی ترین حالت برای هر سه گروه ترکهای ۱۰ و ۳۰ سانتیمتری، زمانی است که این ترکها در پانل دوم (بر تکیه گاه) ایجاد شوند. هر قدر که موقعیت ترک به سمت وسط تیر متمایل شود، تغییرات بوجود آمده در لنگر خمشی نهایی، نسبت به نمونه بدون ترک کاهش می یابد. همچنین این نمودار به وضوح نشان می دهد که برای تیورقهای با نسبت لاغری ۱۲۵، طول ترک در کاهش ظرفیت خمشی نهایی تیورق اهمیت بسزایی دارد و با افزایش طول ترک، تاثیر آن در کاهش مقاومت نهایی افزایش می یابد.

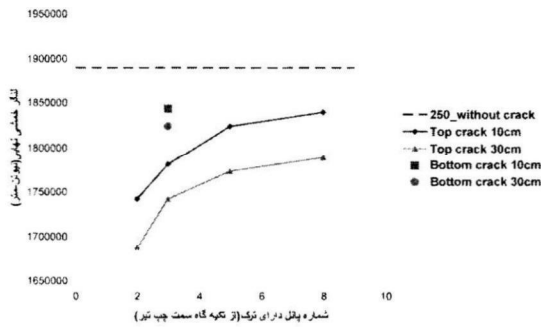
با توجه به این شکل مشخص می شود، ترک ۱۰ سانتی متری ایجاد شده در جوش بال به جان تیورقها در بر تکیه گاه، میتواند لنگر خمشی نهایی تیورق را ۵۰۳۸۴۹ نیوتن - متر، کاهش دهد. حال آنکه ترک ۳۰ سانتی متری بوجود آمده در پانل پنجم همین نوع تیورق باعث افت ۳۷۴۶۹۵ نیوتن - متری لنگر خمشی نهایی تیورق می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که متغیر موقعیت ترک نسبت به، متغیر طول ترک بوجود آمده در جوش بال به جان تیورقها، در کاهش ظرفیت خمشی نهایی آنها موثرتر می باشد.

از آنجا که در هر طول ترک، فقط یک مدل برای ترک بوجود آمده در جوش بال کششی به جان تیورق مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته است، بنابراین نتایج حاصل از این نمودارها در شکل ۹ به صورت یک نقطه نشان داده شده است. نکته دیگری که با توجه به این شکل، مشخص میشود، تاثیر کمتر ترکهای بوجود آمده در جوش بال کششی به جان تیورق، نسبت به ترکهای ایجاد شده در جوش بال فشاری به جان آنها می باشد. به طوری که مشخص است اگر ترک در جوش بال کششی به جان تیورق با نسبت لاغری ۱۲۵ بوجود آید، تیر لنگر خمشی بیشتری را می تواند تحمل نماید.

در شکل ۱۰ و ۱۱ نمودار بار - تغییر مکان جانبی برای تیورقهای با نسبت لاغری ۲۵۰ رسم شده است. این نوع تیورقها با توجه به

در شکل ۱۴ نمودار ظرفیت خمشی نهایی تیرورق با نسبت لاغری ۲۵۰ در مقابل موقعیت ترک بوجود آمده در جوش بال به جان آن رسم شده است. با توجه به این شکل میتوان نتیجه گرفت که هر قدر ترک بوجود آمده به تکیه گاه نزدیکتر باشد، کاهش مقاومت خمشی بیشتر خواهد بود.

همچنین مشاهده می شود، با افزایش طول ترک، تاثیر آن در کاهش مقاومت خمشی نهایی تیرورق افزایش می یابد. به طوری که نمودار مربوط به ترک ۳۰ سانتیمتری در قسمت تحتانی نمودار مربوط به ترک ۱۰ سانتی متری قرار گرفته است. در این نمودار نیز مانند نمودار مربوط به شکل ۹ مشاهده می شود که افت ظرفیت خمشی نهایی زمانی که ترک در جوش بال کششی به جان تیرورق ایجاد شده است، نسبت به حالتی که ترک در جوش بال فشاری به جان آن بوجود آمده است، کمتر است.



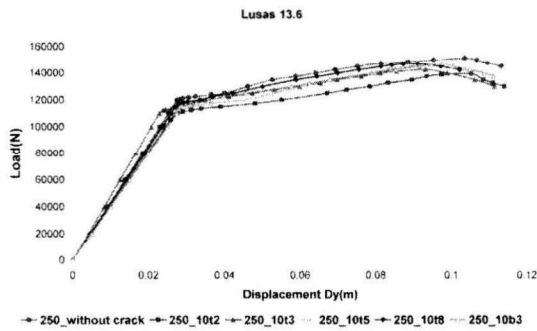
شکل ۱۴: نمودار لنگر خمشی نهایی در برابر موقعیت ترک برای تیرورقها با نسبت لاغری ۲۵۰

با مقایسه شکلهای ۹ و ۱۴ ملاحظه می گردد با افزایش نسبت لاغری، شیب خطوط واصل نقاط برای طولهای مختلف ترک کاهش می یابد. این امر نشاندهنده آن است که در تیرورقها با نسبت لاغری بیشتر، تفاوت میزان کاهش لنگر خمشی نهایی در اثر وجود ترک در پانلهای مختلف کاهش می یابد.

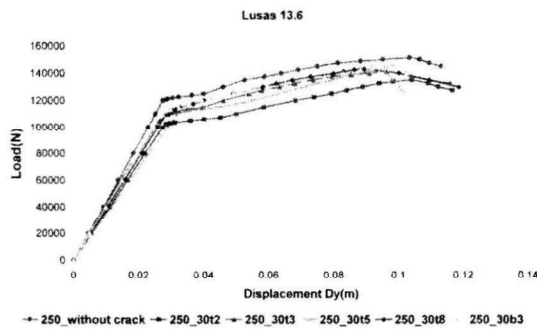
در شکل ۱۵ کانتور خیز جانبی مربوط به اولین مرحله بارگذاری که بار وارده برابر ۲۰۰۰ نیوتن برمتر است، نشان داده شده است. طبق این شکل در مراحل اولیه بارگذاری، تمامی پانلهای دارای تغییرشکلهای مشابهی هستند. شایان ذکر است که برای بزرگنمایی بهتر در تمام شکلهای این بخش به علت وجود تقارن نسبت به وسط دهانه تیر، فقط نصف دهانه مورد بررسی قرار گرفته است.

بار (ظرفیت فراکمانشی) به صورت چند خطی در می آید. تا اینکه تقریباً بعد از بار فراکمانشی، با افزایش اندکی که در بار بوجود می آید، جابجایی قابل توجهی رخ می دهد.

در شکلهای ۱۲ و ۱۳، نمودار بار- تغییر مکان قائم، تیرورقهای با نسبت لاغری ۲۵۰ رسم شده است. این نمودارها در ابتدا به صورت خطی بوده و با افزایش مقدار بار، تفاوت تغییر مکان با شیب ثابتی روی می دهد و محدود است.



شکل ۱۲: نمودار بار- تغییر مکان قائم برای تیرورقهای دارای ترک ۱۰ cm



شکل ۱۳: نمودار بار- تغییر مکان قائم برای تیرورقهای دارای ترک ۳۰ cm

در این نمودارها نیز مانند نمودارهای مربوط به نمونه های با نسبت لاغری ۱۲۵، بعد از رسیدن بار به حد تسلیم، با افزایش اندکی که در بار وارده ایجاد میشود، تغییر مکان قائم نمونه ها افزایش قابل توجهی را دارد.

با توجه به این نمودارها و بارهای نهایی قابل تحمل برای نمونه ها، حداکثر افت ظرفیت خمشی نهایی در نمونه دارای ترک ۳۰ سانتیمتری در جوش بال فشاری به جان تیرورق در پانل دوم اتفاق می افتد و ترک بوجود آمده در این مدل باعث افت ۱۰/۷۴ درصدی مقاومت خمشی نهایی تیرورق می شود. با توجه به این نمودارها، معلوم میشود که وجود ترک در جوش بال کششی به جان تیرورق تاثیر کمتری نسبت به بروز ترک در جوش بال فشاری به جان آنرا دارد.

مختلف، مورد بررسی قرار میدهم. ابتدا ظرفیت کمانشی و فراکمانشی تیرورقهای با نسبت لاغری ۲۵۰ را از طریق روابط تئوری آیین نامه LRFD، محاسبه می نمایم.

$$k = \delta + \frac{\delta}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 14 / 21$$

$$155 \cdot \sqrt{\frac{k}{F_y}} = 155 \cdot \sqrt{\frac{14 / 21}{275}} = 113$$

$$194 \cdot \sqrt{\frac{h}{F_y}} = 194 \cdot \sqrt{\frac{14 / 21}{275}} = 14 \Rightarrow 250 > 14$$

$$C_v = \frac{3 \cdot 21 \cdot 0 \cdot k}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 \times F_{yw}} = \frac{3 \cdot 21 \cdot 0 \cdot 14 / 21}{(250)^2 \times 275} = 0 / 2521$$

اگر $\frac{h}{t_w} > 155 \cdot \sqrt{\frac{K}{F_{yw}}}$ باشد، رابطه (۲) برقرار خواهد بود.

$$V_n = 0 / 6 \times A_w \times F_{yw} \times \left[C_v + \frac{1 - C_v}{1 / 15 \times \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}} \right]$$

در رابطه (۲) جمله اول نشاندهنده مقاومت برشی کمانشی و عبارت دوم نشاندهنده مقاومت برشی فراکمانشی است. بنابراین ظرفیت کمانشی برابر:

$$V_n = 0 / 6 \times 100 \times 0 / 4 \times 275 \times 0 / 2521 = 16750 / \text{kg}$$

$$q = \frac{V_n \times 2}{L} = \frac{16750 \times 2}{10} = 3350 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \Rightarrow q = 33863 / \delta \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

و ظرفیت فراکمانشی نیز از رابطه:

$$V_n = 0 / 6 \times 100 \times 0 / 4 \times 275 \times \left[\frac{1 - 0 / 2521}{1 / 15 \times \sqrt{1 + (0 / 21)^2}} \right]$$

$$V_n = 34519 / \delta \text{kg}$$

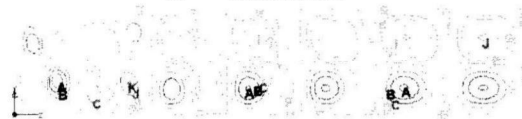
به دست می آید.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای ظرفیتهای کمانشی و فراکمانشی محاسبه شده، بارفراکمانشی نهانی حاصله از روابط تئوری به صورت زیر خواهد بود:

$$67864 / 6 + 33863 / 6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل مدلها و همچنین نتایج به دست آمده برای بارهای کمانشی و فراکمانشی حاصله از طریق روابط تئوری موجود در آیین نامه برای تیرورقها، با نسبت لاغری ۲۵۰ ملاحظه میگردد که وجود ترک در طولها و موقعیتهای مختلف، تاثیر

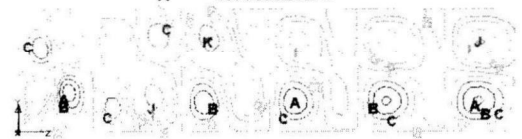
A	-0.3281408E-3
B	-0.2426721E-3
C	-0.1578219E-3
D	0.0000000E+0
E	0.0000000E+0
F	0.0000000E+0
G	0.0000000E+0
H	0.0000000E+0
I	0.2175610E-3
J	0.3580516E-3
K	0.4270650E-3



شکل ۱۵: کانتور خیز جانبی تیرورق با نسبت لاغری ۲۵۰، در حالت بدون ترک تحت اثر بار ۲۰۰۰۰ نیوتن بر متر

در شکل ۱۶ کانتور خیز جانبی برای مدل ۲۵۰_۳۰۱۳ تحت اثر بار ۲۰۰۰۰ نیوتن بر متر آورده شده است. از مقایسه این شکل با شکل ۱۶ مشاهده می شود که در مراحل ابتدایی بارگذاری در مدل دارای ترک، محل وقوع خیز جانبی ماکزیمم، در محل بروز ترک ایجاد میشود. حال آنکه در مدل بدون ترک خیز جانبی ماکزیمم در ناحیه تحتانی پانل دوم (کنار تکیه گاه) ایجاد می شود.

A	-0.5124758E-3
B	-0.3602147E-3
C	-0.2235601E-3
D	-0.0000000E+0
E	0
F	0.5582143E-3
G	0.9036664E-3
H	0.3526474E-3
J	0.5023562E-3
K	0.8340021E-3

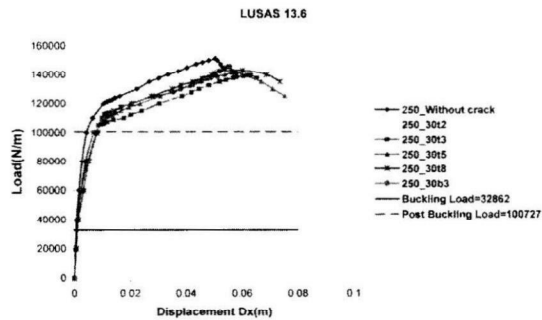


شکل ۱۶: کانتور خیز جانبی تیرورق با نسبت لاغری ۲۵۰، در مدل ۲۵۰_۳۰۱۳ تحت اثر بار ۲۰۰۰۰ نیوتن بر متر

۵- ارزیابی نتایج با آیین نامه AISC-LRFD

در این قسمت، با توجه به مشخصات هندسی مدلها که در شکل ۲ نشان داده شده است، بار کمانشی و فراکمانشی تیرورقهای بدون ترک را از طریق روابط ارائه شده در آیین نامه LRFD، محاسبه نموده و با نتایج بدست آمده از تحلیل و آنالیز مدلهای مورد بررسی، با استفاده از نرم افزار امان محدود LUSAS مقایسه می نمایم. برای مقایسه تاثیر ترک در حاکمیت روابط تئوری برای تیرورقها، نتایج حاصل از روابط تئوری را با نتایج حاصل از تحلیل مدلهای با ترک ۳۰ سانتیمتری (بحرانی ترین طول ترک در این تحقیق) در موقعیتهای

زیادتی در بارهای کماتشی و فراکمانشی آنها ندارد و فقط موجب کاهش بار نهایی قابل تحمل برای تیورق میشود.



شکل ۱۷: نمودار- بار تغییر مکان جانبی، ظرفیت کماتشی و فراکمانشی، برای مدلها با نسبت لاغری ۲۵۰

همچنین مشاهده میشود که نتایج حاصله از تحلیل مدلها تطبیق مناسبی با نتایج بدست آمده از روابط تئوری موجود در آیین نامه دارد (شکل ۱۷). بار کماتشی در قسمت خطی و بار فراکمانشی در قسمت چند خطی نمودارهای بار- تغییر مکان جانبی مدلها قرار دارند. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می شود که برای تیورق با نسبت لاغری ۲۵۰، بار کماتشی ۲۱/۷۳٪ بار نهایی و بار فراکمانشی ۶۶/۵۹٪ درصد بار نهایی را شامل می شوند. حال به بررسی ظرفیت کماتشی و فراکمانشی تیورقهای با نسبت لاغری ۱۲۵ می پردازیم.

$$k = \delta + \frac{\delta}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 14 / 28$$

$$155 \cdot \sqrt{\frac{k}{F_y}} = 155 \cdot \sqrt{\frac{14 / 28}{2750}} = 112$$

$$194 \cdot \sqrt{\frac{h}{F_y}} = 194 \cdot \sqrt{\frac{14 / 28}{2750}} = 140 \Rightarrow 112 < 125 < 140$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{155 \cdot \sqrt{\left(\frac{14 / 28}{2750}\right)}}{h} = \frac{155 \cdot 0.0723}{125} = 0.896$$

چون رابطه (۲) در مورد این نوع تیورق نیز برقرار است بنابراین ظرفیت کماتشی برابر است با:

$$V_n = 0.6 \times 100 \times 0.896 = 537.6 \text{ kg}$$

$$q = \frac{V_n \times r}{L} = \frac{537.6 \times r}{10} = 232.04 / r \text{ kg/m} \Rightarrow q = 232.04 \frac{N}{m}$$

و ظرفیت فراکمانشی برابر است با:

$$V_n = 0.6 \times A_w \times F_y \times \left[\frac{1 - C_V}{1 / 15 \times \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}} \right]$$

$$V_n = 0.6 \times 100 \times 0.896 \times 2750 \times \left[\frac{1 - 0.896}{1 / 15 \times \sqrt{1 + (0.73)^2}} \right]$$

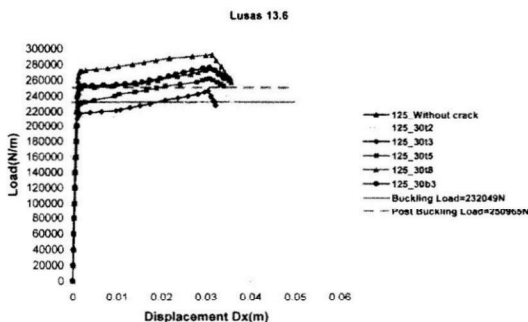
$$V_n = 9641 / 6 \text{ kg}$$

$$q = \frac{r \times V_n}{L} = \frac{1928r}{10} = 192.8 / r \text{ kg/m} = 18916 / 6 \frac{N}{m}$$

بار نهایی فراکمانشی نیز برابر است با:

$$232.04 + 18916 = 25.065 \frac{N}{m}$$

با توجه به شکل ۱۸، مشاهده میشود که در اثر بروز ترک ۳۰ سانتی متری در پانلهای بحرانی (دوم و سوم) در جوش بال فشاری به جان تیورق، ظرفیت کماتشی و فراکمانشی مدلها کاهش یافته و حتی بار نهایی قابل تحمل برای آنها، کمتر از ظرفیت فراکمانشی به دست آمده از روابط تئوری برای تیورق بدون ترک می باشد. همچنین بروز ترک ۳۰ سانتیمتری در پانل پنجم در جوش بال فشاری به جان تیورق، باعث کاهش ظرفیت فراکمانشی آن نسبت به ظرفیت به دست آمده از روابط تئوری برای مدل بدون ترک میشود. در این نوع تیورق بار کماتشی ۷۹/۵٪ بار نهایی و بار فراکمانشی ۸۶٪ بار نهایی را شامل می شوند.



شکل ۱۸: نمودار- بار تغییر مکان جانبی، ظرفیت کماتشی و فراکمانشی، برای مدلها با نسبت لاغری ۱۲۵

۶- خلاصه و نتیجه گیری

از آنجا که امکان بوجود آمدن ترک در اتصالات جوشی به دلایل مختلف فیزیکی و محیطی وجود دارد، برای بررسی تاثیر ترکهای احتمالی بوجود آمده در جوش بال به جان تیورقها در ظرفیت خمشی نهائی آنها، تعدادی مدل بدون ترک و دارای ترک در نرم افزار المان محدود LUSAS مدلسازی شده و مورد تحلیل غیر خطی هندسی و

۷- مراجع :

- [۱] هادی اکبری، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران- سازه، تاثیر ترک جوش سخت کننده به جان تیورورها در ظرفیت کماتشی و فراکمانشی آنها، دانشگاه آزاد اسلامی مراغه، ۱۳۸۵.
- [۲] شاپور طاحونی، طراحی سازه های فولادی، انتشارات علم و ادب، چاپ چهارم، ۱۳۸۰.
- [۳] فرهاد فرهودی محمدزاده، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران- سازه، بررسی تاثیر ترک جوش بال به جان تیورورها در ظرفیت خمشی نهایی آنها، دانشگاه آزاد اسلامی مراغه، ۱۳۸۶.
- [4] Corcetti.R., Web breathing of full-scale slender I-girders subjected to combine action of bending and shear, Journal of constructional steel reserch, 59(2003)271-290.
- [5] Joem kee Paik, Y.V.Satish Kumar, Jae Myung Lee, Ultimate strength of cracked plate elements under axial compression or tension, Thin-walled structures, 43(2005)237-272.
- [6] Nicola, Greco, Cross-sectional compactness and bracing requirements for hybrid HPS girders, University of Pittsburgh, 2000.
- [7] Okura, I., Yen, B.T. & Fisher, J.E., Fatigue of thin walled plategirders, Structural Engineering, 1993, 1:39-44.
- [8] Roberts, T.M. & Davies A.W., Fatigue induced by plate breathing, Journal of constructional steel research, 58 (2002) 1495-1508.

مصالح قرار گرفتند. در این تحلیلهای، اثر ناکاملی هندسی ورق جان تیورورق نیز لحاظ گردیده و نتایج زیر به دست آمد:

۱- در این تحقیق، بیشترین افت ظرفیت خمشی تیورورق در مدل 125_30t2 برابر ۱۸٪ مشاهده شد. در این مدل ترک در پانل دوم (برتکیه گاه) بوجود آمده بود و این امر نشاندهنده آن است که اگر ترک جوش بال به جان تیورورها در ناحیه ای نزدیک به تکیه گاه بوجود آید، اثر تخریبی زیادتری دارد. هر قدر که موقعیت ترک به وسط تیر متمایل شود، ضریب کاهش مقاومت خمشی نهایی، کاهش می یابد.

۲- کاهش ظرفیت خمشی نهایی تیورورق تحت اثر ترک در جوش بال به جان آن، با طول ترک نسبت مستقیم دارد.

۳- با افزایش نسبت لاغری تیورورق (نسبت مساحت جان به مساحت بال)، تاثیر ترک در کاهش ظرفیت خمشی نهایی آن، افزایش می یابد.

۴- با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد، متغیر موقعیت ترک نسبت به متغیر طول آن موثرتر و مهمتر می باشد. بطوری که ترک ۱۰ سانتیمتری بوجود آمده در پانل دوم (برتکیه گاه) تیورورق با نسبت لاغری ۲۵۰، موجب کاهش ۷/۸۵ درصدی ظرفیت خمشی نهایی آن میشود. حال آنکه ترک ۳۰ سانتیمتری ایجاد شده در پانل پنجم همین تیورورق باعث افت ۶/۱۹ درصدی ظرفیت خمشی نهایی آن میشود.

۵- وجود ترک در جوش بال فشاری به جان تیورورق، بسیار مهمتر و بحرانی تر از بروز ترک در جوش بال کششی به جان آن می باشد.

۶- با مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل مدل‌های مختلف بدون ترک و ترک خورده با استفاده از نرم افزار LUSAS با نتایج حاصل از روابط تئوری مربوط به آیین نامه LRFD، مشخص شد که در تیورورق‌های بانسبت لاغری کمتری، بروز ترک در پانلهای بحرانی و نزدیک تکیه گاه، باعث کاهش ظرفیت کماتشی و بعضاً فراکمانشی تیورورق نسبت به حالت بدون ترک میشود. حال آنکه در تیورورق‌های لاغر که نسبت لاغری آنها بیشتر است، وجود ترک تغییری در ظرفیت کماتشی و فراکمانشی تیورورق ایجاد نمیکند و فقط باعث افت بار نهایی قابل تحمل برای آن میشود.

۷- با توجه به نمودارهای بار - تغییر مکان قائم، ملاحظه میگردد که شیب قسمت خطی در این نمودارها برای مدل‌های ترک خورده و بدون ترک متفاوت می باشد. اما در نمودارهای بار - خیز جانبی در قسمت خطی تفاوت فاحشی در اکثر نمونه ها دیده نمی شود و این تفاوت اغلب در قسمتهای چند خطی که مربوط به ظرفیت فراکمانشی تیورورقها هستند، مشاهده میشود. این امر نشان می دهد که برای تشخیص وجود ترک، کنترل و مقایسه نمودارهای بار - خیز قائم، موثرتر میباشد.



Ultimate Flexural Strength of Plate Girders Under the Effect of Weld Crack in Flange Toe

Farhad Farhoodi Mohammadzade

Postgraduate Student
f_abi2004@yahoo.com

Hossein Showkati

Associate Professor, Urmia University
h.showkati@urmia.ac.ir

Norooz Seifi

Postgraduate Student
n_seifi2003@yahoo.com

Abstract:

The plate girders are used in important structural systems. The earlier design of plate girders was restricted to their critical buckling capacity. Experimental and theoretical studies show the plate girders with vertical stiffeners can carry load over than their critical buckling loads and then in modern design codes is permitted to use post-buckling capacity of them. In this case the out-of-plane bending stresses is associated in web panel and then some fatigue cracks may appear under the effect of cyclic loading. In this paper the influence of cracks in weld toe of flange is investigated using nonlinear finite element analysis of the models of vertically stiffened plate girders. The ultimate bending capacity of beams is estimated using the well known finite element code of LUSAS. The effect of crack length, ratio of web slenderness and crack location are investigated in this study. The ultimate capacity of such plate girders is calculated under initial geometric imperfections. The obtained results in this study show that cracks with length of 30cm can reduce maximum 18% in ultimate bending capacity. Also the results are compared with the recommendations of the the modern design code of AISC-LRFD.

Keywords:

Plate girder, Crack, Weld, Web, Flange, Flexural strength