

# بررسی مودهای خستگی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 در

## اتصالات پیچ و مهره‌ای

تاج بخش نوید چاخرلو<sup>i</sup>؛ رضا هاشمی اسکویی<sup>ii</sup>

### چکیده

در این مقاله، چرایی و چگونگی ایجاد و گسترش ترک‌های خستگی در ورق آلیاژ آلومینیوم 7075-T6، در یک اتصال دولبه پیچ و مهره شده بررسی و تحلیل عددی شده است. در اتصال مورد نظر، سه ورق یکسان آلومینیومی با یک پیچ و مهره فولادی، به هم محکم شده و تحت بارهای سیکلی قرار می‌گیرد. روش استفاده شده در تحقیق، شامل بکارگیری روش المان محدود (FEM) از طریق مدل سازی و حل با نرم افزار ANSYS و همچنین استفاده از نتایج عملی انجام گرفته قبلی برای مقایسه می‌باشد. تحلیل‌های عددی در مرحله اول به ازای اعمال نیروهای Clamping مختلف انجام شده و سپس در مرحله دوم برای هر حالت، ورق میانی به طور محوری تحت اعمال دو مقدار تنش ماکزیمم بار سیکلی قرار گرفته است تا تأثیر نیروی Clamping بر نحوه توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در اطراف سوراخ ورق میانی و به تبع آن بر رفتار خستگی قطعه تعیین و مشخص شود. بررسی نتایج حاصل در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که دو نوع مود خستگی در ورق وجود دارد؛ به طوری که در نیروهای Clamping کم، مود لهیدگی (Bearing) در سوراخ و در نیروهای بیشتر، مود ساییدگی (Fretting) بر روی سطح ورق، کنترل کننده آغاز و واماندگی خستگی می‌باشد.

### کلمات کلیدی

خستگی، اتصالات مکانیکی، نیروی Clamping، آلیاژها و فلزات غیر آهنی، اجزای محدود

## *An Investigation on Fatigue Failure Modes of Aluminum Alloy 7075-T6 Bolted Joints*

T.N. Chakherlou; R.H. Oskouei

### ABSTRACT

In this research, why and how of fatigue crack initiation and propagation of aluminum alloy 7075-T6 double lap bolted joint were investigated and analyzed numerically. The joint includes three Al-alloy plates with a single bolt fastener, which was subjected to cyclic loads. In this investigation, finite element methods were applied to model of the joint in order to determine the stress and strain distributions at the joint. The obtained results were validated by previous experimental fatigue test and fractography results. In the numerical analysis, the stress and strain distributions were calculated due to the bolt clamping force followed by an axial load applied to the joint. The Fractography of specimens shows two kinds of fatigue modes: a bearing mode at the joint hole at low clamping forces and a fretting mode on the plate surface at high ones. In the present paper, these two modes of fatigue were expounded by numerical (FE) results.

### KEYWORDS

Fatigue; Mechanical fastening; Clamping force; Non-ferrous metals and alloys; Finite elements

<sup>i</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز: tnavid@tabrizu.ac.ir

<sup>ii</sup> عضو هیأت علمی و مربی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان: rhoskouei@gmail.com

تنش و کرنش در قطعات اتصالی به وسیله پیچ و مهره باشد. در اکثر تحقیقات قبلی با انجام تست‌های عملی و در برخی موارد مدل سازی وحل عددی، استحکام خستگی اجزای اتصالی با پرچ‌ها و پین‌ها بررسی شده است [۱۲]، [۱۰]، [۹]؛ اما مقاومت به خستگی اجزای پیچ و مهره شده نسبت به اتصالات پرچ شده به مراتب بهتر است. نتایج تست‌های خستگی بر اتصالات پرچ شده پل‌های ریل راه آهن در مرجع [۱۱] حاکی از آن است که با جایگزین کردن پیچ و مهره به جای پرچ، عمر خستگی نمونه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در برخی دیگر از تحقیقات، استحکام خستگی اتصال پیچ و مهره‌ای از طریق تست‌های عملی بررسی شده است [۵]، [۳]. تست‌های عملی همواره شامل نتایج مفیدی است که به نوبه خود دانش محققان را در این زمینه افزایش داده است؛ اما کماکان به دلیل کمبود آگاهی کافی از چگونگی توزیع تنش‌های ناشی از محکم کردن اتصال و اعمال بارهای سیکی، خیلی از نکات و پدیده‌ها ناشناخته باقی مانده و پاسخ به برخی پرسش‌های ایجاد شده با تکیه بر استدلال ذهنی و یا حدس و گمان میسر بوده است.

در این مقاله، ابتدا اتصالی دو لبه از ورق‌های آلایز آلومینیوم 7075-T6 با یک پیچ و مهره، با نرم افزار ANSYS مدل سازی شده و به ازای نیروهای Clamping مختلف، تحلیل عددی تنش و کرنش انجام گرفته است. بعد از اتمام حل مرحله اول، ورق میانی تحت اعمال مقدار تنش ماکزیمم دو نوع بار سیکی قرار می‌گیرد. هندسه، جنس، وضعیت اتصال، نیروهای Clamping، بارهای سیکی و سایر پارامترها در مدل سازی، مطابق با نمونه تست‌هایی است که دو محقق طی مقاله‌ای در مرجع [۳] انجام داده‌اند. چراکه با این کار، اطلاعات جامعی مبنی بر توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها، مقایسه نتایج عددی با نتایج مربوط به شکست نگاری نمونه‌ها، توجیه چرایی و چگونگی آسیب خستگی در حالت‌های مختلف و همچنین چگونگی اثر Clamping بر عمر خستگی ورق به دست آمده است. در ابتدا علائم اختصاری به کار رفته در متن مقاله به همراه توضیحات مربوطه، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): علائم اختصاری استفاده شده در متن مقاله

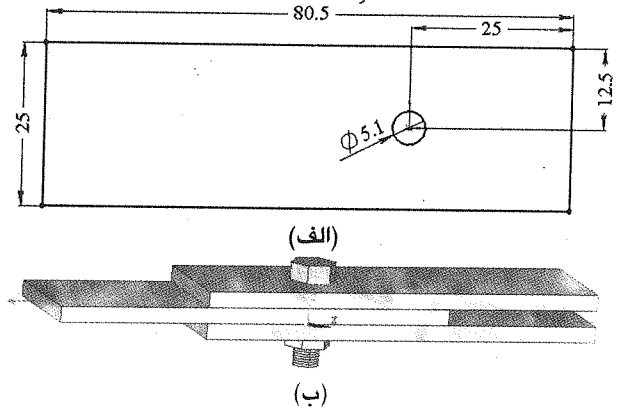
| نماد             | توضیحات  |
|------------------|--|
| $F_{cl}$         | نیروی Clamping   |
| $S_{max}$        | تنش ناشی از اعمال نیروی ماکزیمم بار سیکی به انتهای ورق (مقطع دور از سوراخ) |
| $\sigma_x$       | تنش نرمال موضعی در جهت X   |
| $\epsilon_{plx}$ | کرنش پلاستیک نرمال موضعی در جهت X  |
| $\tau$           | برآیند تنش‌های برشی ناشی از نیروی اصطکاک بر روی سطح بالایی ورق میانی       |

طراحی اجزا و انتخاب مواد در صنعت هوافضا به دلیل وجود انواع بارهای دینامیکی درحین پرواز و حساسیت بالا در تأمین ایمنی پرواز، همواره حائز اهمیت است و در این راستا تلاش‌های زیادی برای توسعه و بهینه سازی طراحی‌ها و خصوصیات مواد مصرفی به انجام می‌رسد. برای انتخاب مواد در این صنعت باید مسائلی را از قبیل وزن کم، دوام و استحکام بالا، ضرایب اطمینان، هزینه، در دسترس بودن، قابلیت تولید شدن، قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری آنها در نظر گرفت. از این رو، آلایزهای آلومینیوم به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا (استحکام ویژه) و قابلیت شکل پذیری مناسب به سرعت در صنایع هوافضا استفاده شد و تا حدود زیادی اهداف طراحان را برآورده ساخت. در حین جنگ جهانی دوم آلایز استحکام بالای 7075-T6 در هواپیماهای جنگی بکار برده شد که به دلیل استحکام ویژه بالای خود بعد از جنگ نیز بخوبی در هواپیماهای تجاری استفاده شد [۴]. امروزه این آلایز جزء یکی از پرمصرف ترین آلایزها در ساخت سازه‌های هواپیمایی، چرخنده‌ها و محورها، اجزای موشک‌ها و سایر تجهیزات پرتنش در صنایع هوافضا و پدافندی است [۱۳].

از طرفی برای اتصال قسمت‌های مختلف سازه‌های یک هواپیما از اتصالات مکانیکی جداشدنی درسطح وسیعی استفاده می‌شود. پیچ و مهره یکی از انواع این اتصالات است که برای اتصال قسمت‌های اصلی سازه‌های هوایی بکار می‌رود؛ اما به دلیل ایجاد سوراخ در قطعات اتصالی، تمرکز تنش موضعی در اطراف سوراخ هر اتصال به وجود آمده و این نقاط تحت بارهای دینامیکی پرواز، مستعد ایجاد و گسترش ترک‌های خستگی می‌باشند. در این موارد گسیختگی در یک اتصال می‌تواند به جدایی قسمت‌های مختلف سازه و در برخی موارد وقوع حوادث فاجعه انگیز منجر شود؛ بنابراین اهمیت و ضرورت بررسی دقیق تر استحکام خستگی در اتصالات پیچ و مهره‌ای، روشن و پرواضح می‌شود تا جایی که پیشگویی در نحوه ایجاد آسیب‌های خستگی می‌تواند از وقوع حوادث تلخ تا حد امکان جلوگیری کند. در این گونه موارد تحلیل ریاضی تنش و کرنش به دلیل وجود برخی پارامترهای پیچیده نظیر مسأله غیرخطی تماسی، اصطکاک سطوح تماس یابنده، نیروی Clamping، هندسه و سختی عضوهای متصل شده، رفتار الاستیک پلاستیک مواد و وضعیت اتصال عملاً غیر ممکن است [۲]. به نظر می‌رسد که شبیه سازی و حل عددی با استفاده از روش المان محدود، راهی مناسب برای اطلاع از نحوه توزیع

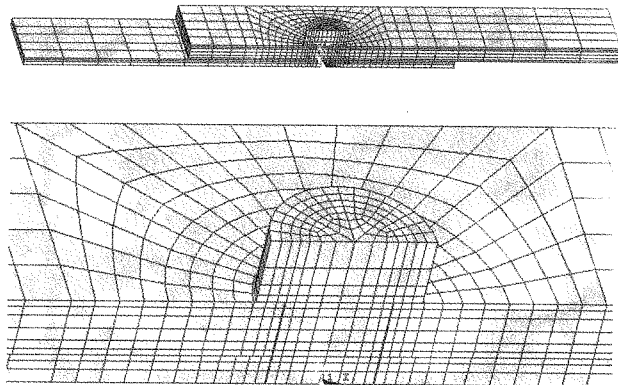
## ۲- جزئیات مدل المان محدود

اجزای اتصال دوبله شامل سه ورق از جنس آلایاژ آلومینیوم 7075-T6 با ضخامت‌های یکسان 3.2 mm و یک عدد پیچ و مهره فولادی (M5) به قطر 5 mm با لقی شعاعی برابر  $50 \mu\text{m}$  بین ساق پیچ و سوراخ، به وسیله نرم افزار ANSYS به طور سه بعدی مدل سازی شده است [۶]. شکل (۱) ابعاد ورق‌های اتصالی و مدل هندسی کامل اتصال دوبله را نشان می‌دهد.



شکل (۱): (الف) ابعاد ورق‌های اتصال برحسب mm (ب) مدل هندسی کامل اتصال دوبله

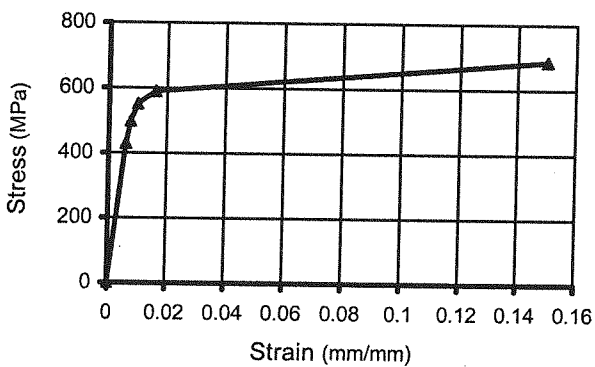
با توجه به هم جنس بودن واشر و پیچ، ضخامت واشر به ارتفاع سر پیچ اضافه شده تا با صرف نظر کردن از مدل سازی واشر و المان‌های تماس مربوطه، زمان لازم برای تحلیل بهینه شود. با توجه به شکل (۱، ب) کل مدل چه از لحاظ هندسه و چه از لحاظ بارگذاری نسبت به دو صفحه X-Y, X-Z در مرکز اتصال، تقارن دارد؛ لذا با اعمال شرایط مرزی قرینه جابجایی بر سطوح برش خورده، از ۱/۴ کل مدل برای انجام تحلیل استفاده شده است (شکل ۲).



شکل (۲): نمایی از شبکه بندی ۱/۴ کل مدل اتصال

برای شبکه بندی ورق‌ها و پیچ، از المان سه بعدی SOLID45 با ۸ گره و  $2 \times 2 \times 2$  نقطه انتگرالی استفاده شده است. هر گره سه درجه آزادی (جابجایی در راستاهای X, Y, Z) دارد. این المان قابلیت تحلیل را در حوزه پلاستیک دارد و همچنین

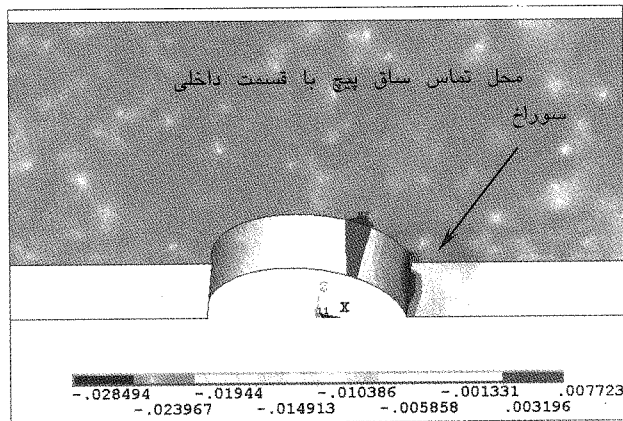
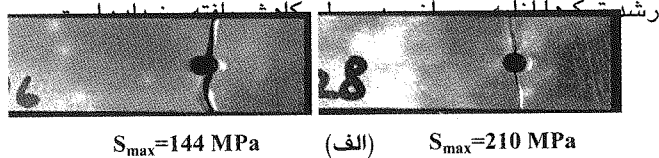
مناسب تحلیل مسائل غیرخطی پیشرفته مانند تماس است. قسمت‌های تحت تماس با استفاده از المان سه بعدی CONTACT49 (تماس گره با سطح) شبکه بندی شده است. این المان با بکارگیری تکنیک المان کاذب، تماس سطح با سطح را نیز مدل کرده و مناسب مدل سازی برای کاربردهای مهندسی نظیر بست ها (پیچ و مهره، پرچ و پین) است [۸]. المان های پایه (SOLID45) به اندازه‌ای ریز شده‌اند تا جواب همگرا به دست آید. ضمن آنکه در این شرایط مقادیر سختی نرمال و چسبندگی مربوط به المان‌های تماسی تا حد امکان بزرگ منظور شده‌اند تا از نفوذ سطوح تماس در همدیگر جلوگیری شود؛ همچنین برای تعیین نیروهای تماسی از روش تابع Penalty استفاده شده است [۷]. تماس بین سطوح درگیر از نوع تماس انعطاف پذیر با انعطاف پذیر است و برای مدل سازی اصطکاک بین آنها از مدل اصطکاکی الاستیک کولمب استفاده شده است. ضریب اصطکاک استاتیکی منظور شده بین سطوح ورق‌های آلایاژ آلومینیوم 7075-T6، با ۰.۳۲ برابر است [۳]. رفتار ماده برای ورق‌های آلومینیومی، به صورت الاستیک پلاستیک با سخت شوندگی سینماتیکی در نظر گرفته شده است تا تحلیل‌ها هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک تر باشند. بدین منظور از شش نقطه نمودار تنش کرنش حقیقی آلایاژ آلومینیوم 7075-T6 که با آزمایش‌های کشش ساده در مرجع [۱] به دست آمده، استفاده شده است. شکل (۳) نمودار تنش کرنش مربوطه و داده‌های متناظر را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مربوط به آن به ترتیب  $E=71.5 \text{ GPa}$  و  $\nu=0.33$  است [۱].



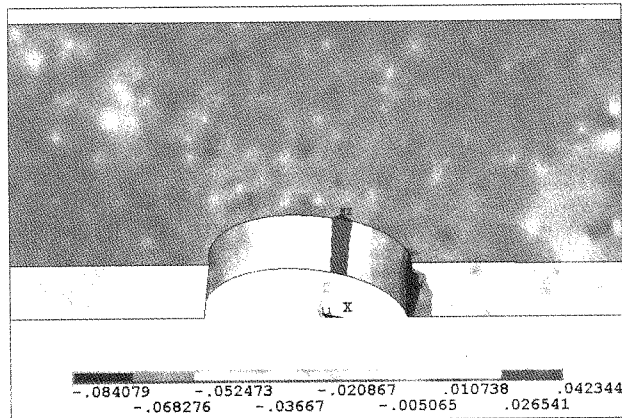
شکل (۳): نمودار تنش کرنش آلایاژ آلومینیوم 7075-T6، با استفاده از شش داده متناظر از آزمایش های کشش ساده ((۱))

برای ماده پیچ رفتار الاستیک خطی فولاد با مدول یانگ  $E=207 \text{ GPa}$  و ضریب پواسون  $\nu=0.30$  منظور شده است. انتهای سمت راست دو ورق بالایی و پایینی از هر جهت ثابت است (All DOF0) و ورق میانی تحت کشش قرار می‌گیرد. برای هر تحلیل ابتدا بارگذاری مرحله اول؛ یعنی اعمال نیروی

در جهت بارگذاری ( $\sigma_x$ ) و نحوه توزیع آن در شکل‌های (د،ه) و (ه،ه)، ایجاد و گسترش ترک‌های خستگی از لبه سوراخ تأیید می‌شود؛ چراکه تمرکز تنش قابل توجهی در لبه سوراخ وجود دارد و مقادیر حداکثر تنش کششی  $\sigma_x$  در لبه داخلی سوراخ ایجاد شده است. درحقیقت، بعد از ایجاد ترک‌های اولیه در ناحیه مذکور، با ادامه بارگذاری سیکلی و به وسیله تنش کششی  $\sigma_x$



شکل (ب،ه): کانتور کرنش پلاستیک در جهت بارگذاری ( $\epsilon_{plx}$ ) تحت  $S_{max}=144 \text{ MPa}$



شکل (ج،ه): کانتور کرنش پلاستیک در جهت بارگذاری ( $\epsilon_{plx}$ ) تحت  $S_{max}=210 \text{ MPa}$

Clamping از طریق اعمال جابجایی بر ساق پیچ در راستای محور پیچ (Z)، در چند زیرمرحله انجام و پس از اتمام حل، نتایج مربوط به آن ذخیره شده است. سپس در بارگذاری مرحله دوم، مقدار تنش ماکزیمم بار سیکلی به صورت استاتیکی در چند زیرمرحله بر ورق میانی اعمال می‌گردد. با توجه به تست‌های مرجع [۳]، پنج مقدار مختلف برای نیروهای Clamping در بازه (1150-11800) N و دو نوع بار سیکلی با دامنه تنش ثابت و تنش‌های ماکزیمم  $S_{max}=144, 210 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است.

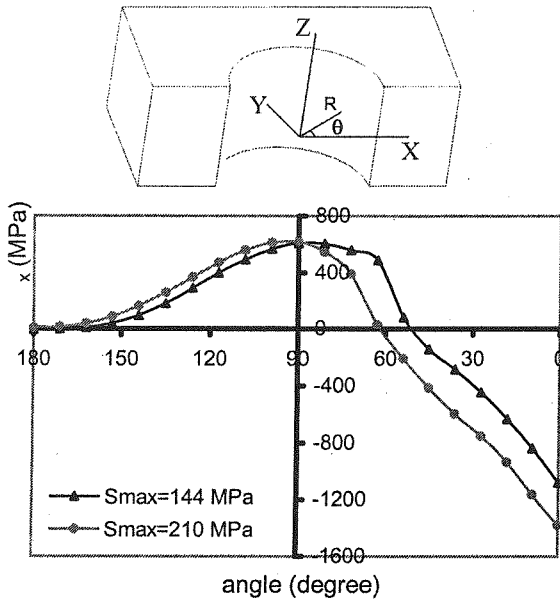
در انتهای این بخش، خاطر نشان می‌سازد که روش بکار گرفته شده در تحلیل المان محدود برای حل عددی مسأله غیرخطی مدل شده، روش نیوتن - رافسون است.

### ۳- مدهای واماندگی خستگی

بنا به نتایج تست‌های عملی از مرجع [۳]، در تمامی حالت‌ها شکست نهایی در ورق میانی (در سوراخ و یا در نزدیکی آن) رخ می‌دهد و با توجه به میزان نیروی Clamping دو مود مختلف برای واماندگی خستگی در ورق معرفی شده است (مود لهیدگی و مود ساییدگی).

#### ۳-۱- مود لهیدگی (Bearing Mode)

به ازای نیروهای Clamping کم و برای هر دو مقدار تنش ماکزیمم (144, 210 MPa)، خط شکست از میان خط مرکزی سوراخ اتصال گذشته است (شکل ۴، الف). در این حالت‌ها درصد بیشتر بار اعمالی به وسیله تماس ساق پیچ با قسمت داخلی سوراخ، منتقل می‌شود و مشاهده سطح شکست نشان می‌دهد که ترک‌ها از لبه داخلی سوراخ آغاز و در سطح کاهش یافته گسترش می‌یابند. این حالت مود لهیدگی نامیده شده است [۳]. با مدل سازی و تحلیل عددی برای نیروهای Clamping کم و هر دو مقدار تنش ماکزیمم، به دلیل کم بودن این نیرو و در نتیجه کم شدن نیروی اصطکاک بین ورق‌ها، آزادی بین آنها بیشتر شده و با کشیدن ورق میانی، محل تماس ساق پیچ با قسمت داخلی سوراخ به طور قابل توجه به لهیدگی و تغییر شکل پلاستیک دچار می‌شود. شکل‌های (ه،ب) و (ه،ج) کانتورهای کرنش پلاستیک و شکل‌های (د،ه) و (ه،ه) کانتورهای تنش را در جهت بارگذاری (X) در اطراف سوراخ ورق میانی برای حالت  $F_{ci}=1.15 \text{ kN}$ ، تحت دو تنش ماکزیمم 144, 210 MPa نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که تنش‌های فشاری بالایی در محل تماس ساق پیچ با قسمت داخلی سوراخ ایجاد شده و با اعمال تنش ماکزیمم بزرگ تر، مقادیر کرنش پلاستیک و تنش فشاری در این محل افزایش یافته است. با دقت در کانتورهای تنش

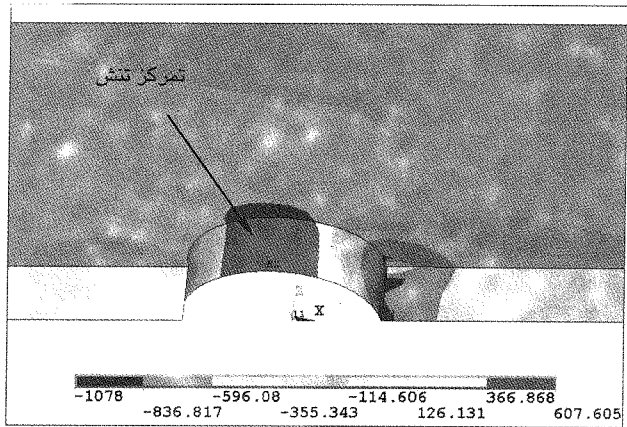


شکل (۵): منحنی توزیع تنش  $\sigma_x$  (MPa) در لبه میانی سوراخ  
 $S_{max}=144, 210 \text{ MPa}$ ,  $F_{cl}=1.15 \text{ kN}$  با اعمال ( $Z=0$ )

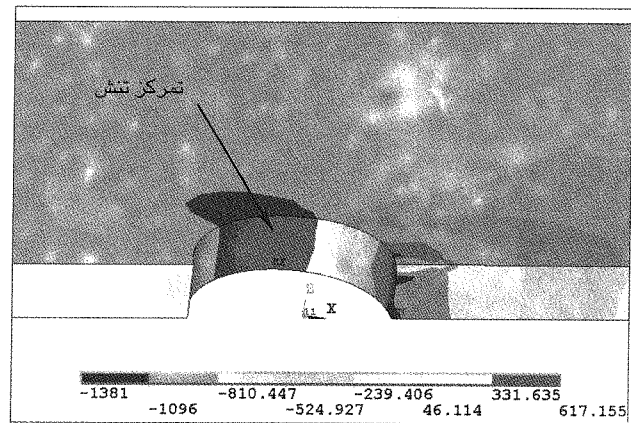
با دقت در منحنی‌های شکل (۵) و کانتورهای شکل‌های (۴، ۵) و (۴، ۵) می‌توان علت اختلاف نامحسوس بین حداکثر تنش ایجاد شده در لبه سوراخ در دو حالت بارگذاری را ایجاد ناحیه پلاستیک متمرکز در لبه بحرانی سوراخ معرفی کرد. به طوری که با اندکی فاصله گرفتن از لبه سوراخ و دورتر شدن از ناحیه متمرکز پلاستیک، اختلاف بین تنش‌های ایجاد شده مشهودتر می‌شود.

### ۳-۲- مود ساییدگی (Fretting Mode)

با افزایش مقادیر نیروی Clamping، خط شکست از خط مرکزی سوراخ اتصال به سمت چپ؛ یعنی انتهای لبه بارگذاری شده در ورق میانی انتقال می‌یابد (شکل ۶، الف). به طوری که شکست نگاری، آسیب‌ها و ترک‌های ناشی از ساییدگی بر روی سطح ورق میانی را به عنوان آغاز واماندگی خستگی آشکار می‌سازد. این نوع واماندگی خستگی، مود ساییدگی نامگذاری شده است [۳]. نتایج عددی حاصل از روش المان محدود برای مدل‌هایی که با اعمال نیروی Clamping بیشتر، تحت اعمال تنش ماکزیم بارهای سیکی قرار گرفته‌اند نیز مؤید نتایج عملی مربوطه است. در این حالت‌ها مقدار بیشتر بار اعمالی از طریق نیروی اصطکاک بین ورق‌ها انتقال می‌یابد؛ لذا لهیدگی کمتری در اثر تماس ساق پیچ با قسمت داخلی سوراخ رخ می‌دهد. بدین منظور کانتورهای کرنش پلاستیک  $\epsilon_{pl}$  و تنش  $\sigma_x$  برای مدل با  $F_{cl}=11.8 \text{ kN}$ ، تحت دو تنش ماکزیم 144, 210 MPa در شکل‌های (۶، ب، ج، د، ه) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش پلاستیک و تنش‌های فشاری ایجاد شده در



شکل (۴): کانتور تنش در جهت بارگذاری  $(\sigma_x)$  بر حسب MPa  
 تحت  $S_{max}=144 \text{ MPa}$

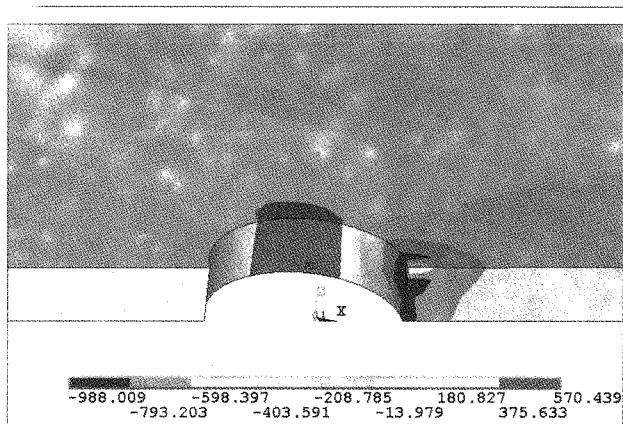


شکل (۵): کانتور تنش در جهت بارگذاری  $(\sigma_x)$  بر حسب MPa  
 تحت  $S_{max}=210 \text{ MPa}$

شکل (۴): مود لهیدگی در ورق میانی اتصال با اعمال  $F_{cl}=1.15 \text{ kN}$   
 $S_{max}=144, 210 \text{ MPa}$ ,

همچنین با توجه به شکل (۴، الف) با اعمال بارگذاری با  $S_{max}=210 \text{ MPa}$ ، آغاز خط شکست در داخل سوراخ، نسبت به حالت بارگذاری با  $S_{max}=144 \text{ MPa}$  کمی به سمت چپ انتقال یافته است. این موضوع نیز با دقت در محل وقوع ماکزیم تنش کششی  $\sigma_x$  در شکل‌های (۴، د)، (۴، ه) و نمودار شکل (۵) برای هر دو حالت قابل توجیه است. نمودار شکل (۵) منحنی تنش  $\sigma_x$  را در لبه میانی سوراخ ورق ( $R=2.55 \text{ mm}$ ,  $Z=0$ ,  $0 \leq \theta \leq 180$ ) برای هر دو حالت اعمال تنش ماکزیم، به همراه سیستم مختصات مربوطه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که محل وقوع ماکزیم تنش کششی  $\sigma_x$  در حالت  $S_{max}=210 \text{ MPa}$  نسبت به حالت  $S_{max}=144 \text{ MPa}$  در حدود ۱۰ درجه به سمت چپ جابجا شده است.

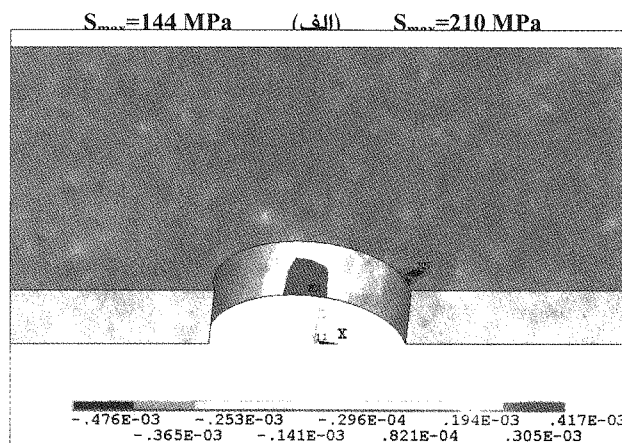
داخل سوراخ، در مقایسه با مقادیر متناظر در مود لهیدگی (شکل ۴) به مراتب کمتر است.



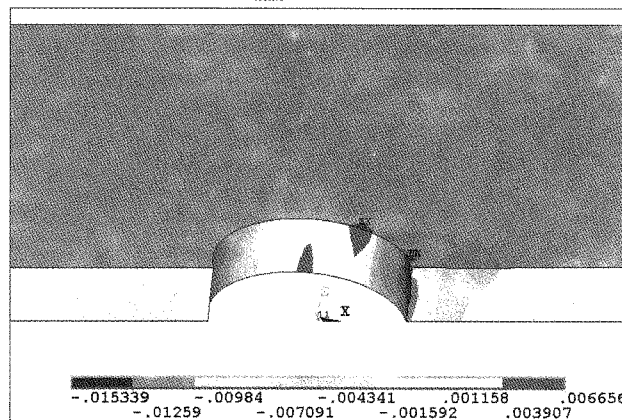
شکل (۵): کانتور تنش در جهت بارگذاری ( $\sigma_x$ ) برحسب MPa تحت  $S_{max}=210$  MPa

شکل (۶): مود ساییدگی در ورق میانی اتصال با اعمال  $S_{max}=144, 210$  MPa,  $F_{cl}=11.8$  kN

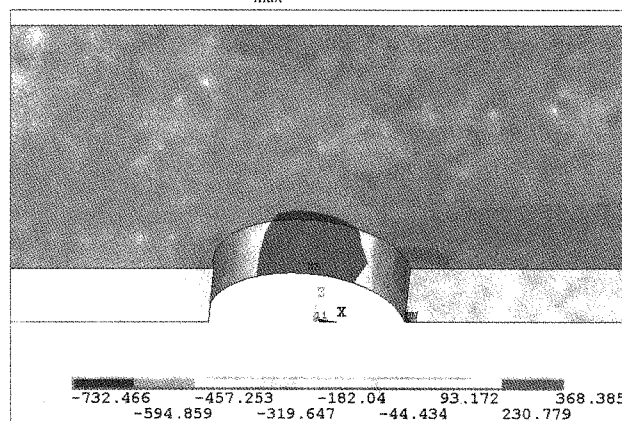
با بررسی نتایج مدل‌های مربوط به مود ساییدگی و دقت در نحوه توزیع تنش‌های برشی بر روی ورق میانی، علت ایجاد آسیب‌های خستگی بر روی سطح ورق روشن می‌شود. به دلیل محکم‌تر بستن پیچ و مهره و اعمال نیروی Clamping زیاد، ورق‌های اتصالی بیشتر به هم فشرده شده و در نتیجه نیروی اصطکاک بیشتری بین سطوح درگیر، بخصوص نواحی نزدیک به سوراخ به وجود می‌آید؛ لذا این ناحیه محدوده‌ای بحرانی از لحاظ ایجاد ترک‌های ساییدگی محسوب می‌شود. به کمک نتایج عددی حاصل و نحوه توزیع تنش‌های برشی ناشی از اصطکاک، می‌توان محدوده ایجاد ترک‌ها را بر روی سطح ورق مشخص کرد. با رسم نمودارهای تنش برشی  $\tau = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2}$  (برآیند تنش‌های برشی ناشی از نیروی اصطکاک بر روی سطح بالایی ورق) در شعاع‌های مختلف از مرکز سوراخ، برای حالت‌های مختلف مود ساییدگی و مقایسه آنها با یکدیگر، مشاهده می‌شود که با محکم‌تر بستن پیچ و مهره مقادیر تنش برشی افزایش یافته است. شکل (۷) افزایش مقدار تنش برشی  $\tau$  را بر روی سطح ورق و در دو شعاع مختلف، به ازای افزایش نیروهای Clamping در مود ساییدگی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، هر چند مقادیر ماکزیمم این تنش در زوایای کمتر از ۴۵ درجه رخ داده است؛ اما به دلیل فشاری بودن تنش  $\sigma_x$  در آن ناحیه، امکان گسترش ترک از آنجا میسر نخواهد بود. در ادامه با رسم نمودارهای تنش برشی  $\tau$  و تنش  $\sigma_x$  در شعاع‌های مختلف، برای هر حالت مود ساییدگی می‌توان محدوده آغاز و گسترش ترک‌های خستگی را مشخص کرد.



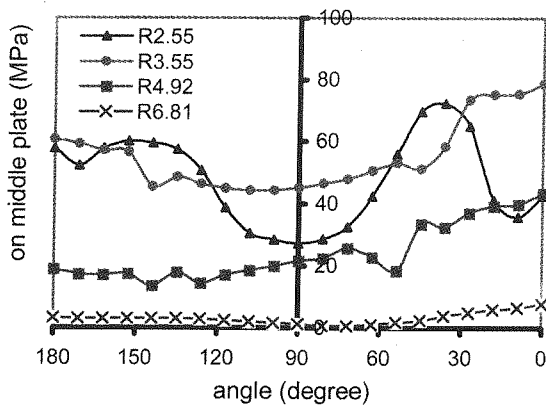
شکل (۶): کانتور کرنش پلاستیک در جهت بارگذاری ( $\epsilon_{plx}$ ) تحت  $S_{max}=144$  MPa



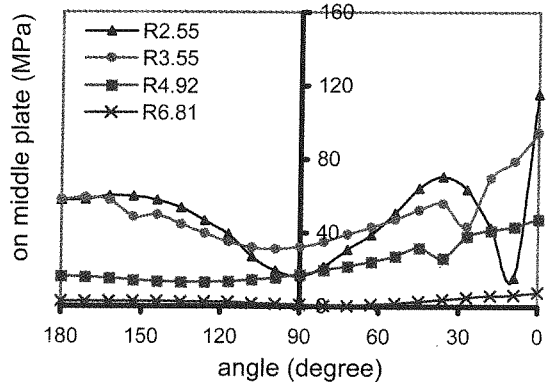
شکل (۶): کانتور کرنش پلاستیک در جهت بارگذاری ( $\epsilon_{plx}$ ) تحت  $S_{max}=210$  MPa



شکل (۶): کانتور تنش در جهت بارگذاری ( $\sigma_x$ ) برحسب MPa تحت  $S_{max}=144$  MPa



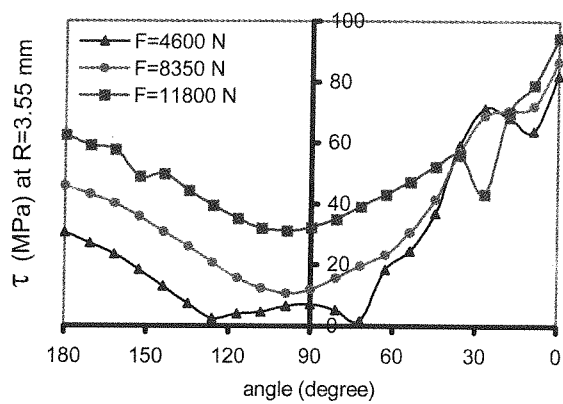
$S_{max}=144 \text{ MPa}$



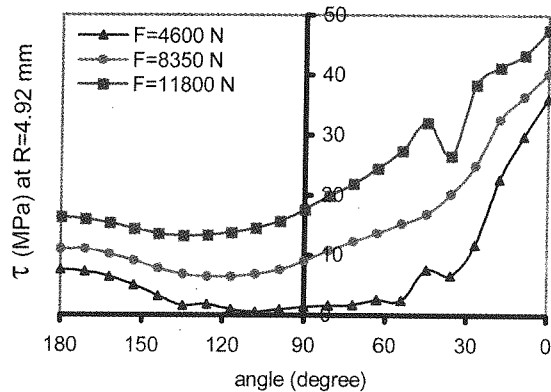
$S_{max}=210 \text{ MPa}$

شکل (۸): نمودار تنش برشی  $\tau$  (MPa) بر روی سطح ورق میانی و در شعاع های مختلف با اعمال  $F_{cl}=11.8 \text{ kN}$  و  $S_{max}=144, 210 \text{ MPa}$

از طرفی با دقت در نحوه توزیع تنش  $\sigma_x$  در هر دو نمودار شکل (۹)، مشاهده می شود که در محدوده زوایای  $120-180$  درجه، با افزایش شعاع تا  $R=4.92 \text{ mm}$  مقدار این تنش افزایش یافته و در شعاع  $R=6.81 \text{ mm}$  افت کرده است؛ لذا گسترش ترک در محدوده یاد شده و در شعاع تقریبی  $R=3.55-4.92 \text{ mm}$  امکان پذیر خواهد بود (شکل ۱۰)؛ چراکه در این ناحیه، هر دو عامل ایجاد ترک (تنش برشی  $\tau$ ) و گسترش آن (تنش کششی  $\sigma_x$ ) وجود دارند. باید به این نکته نیز توجه داشت که هر چند مقادیر تنش برشی در لبه سوراخ ( $R=2.55 \text{ mm}$ ) و در محدوده  $120-180$  درجه بیشینه است؛ اما چون تنش  $\sigma_x$  در آن ناحیه کمینه است، امکان گسترش ترک از آنجا میسر نخواهد بود.



$R=3.55 \text{ mm}$



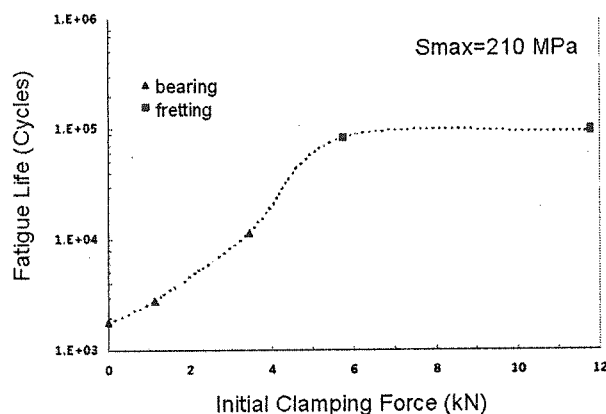
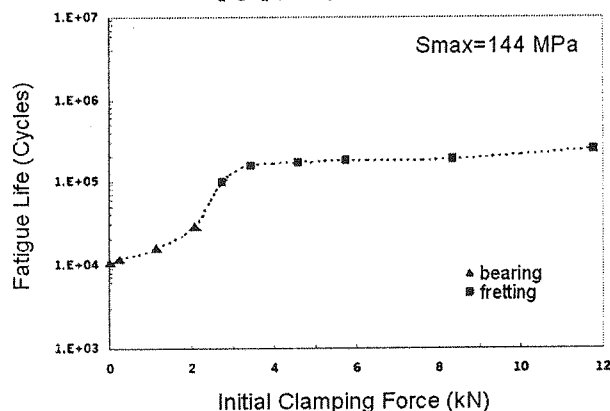
$R=4.92 \text{ mm}$

شکل (۷): منحنی تنش برشی  $\tau$  (MPa) بر روی سطح ورق میانی در دو شعاع مختلف از سوراخ ( $R=3.55, 4.92 \text{ mm}$ ) برای مود ساییدگی و تحت اعمال  $S_{max}=210 \text{ MPa}$

نمودار تنش های  $\tau$  و  $\sigma_x$  در شعاع های مختلف برای حالت رسم شده است. در هر دو نمودار شکل (۸) مشاهده می شود که فواصل نزدیک به سوراخ تنش های برشی بیشینه دارد و هر چه از لبه سوراخ دورتر می شویم مقدار این تنش بسیار کم می شود. همچنین تنش های برشی در شعاع های مختلف، در زوایای منفرد دارای مقادیر بیشتری هستند؛ لذا زوایای بزرگ تر از  $90$  درجه از نظر ایجاد ترک های ساییدگی بحرانی محسوب می شوند.

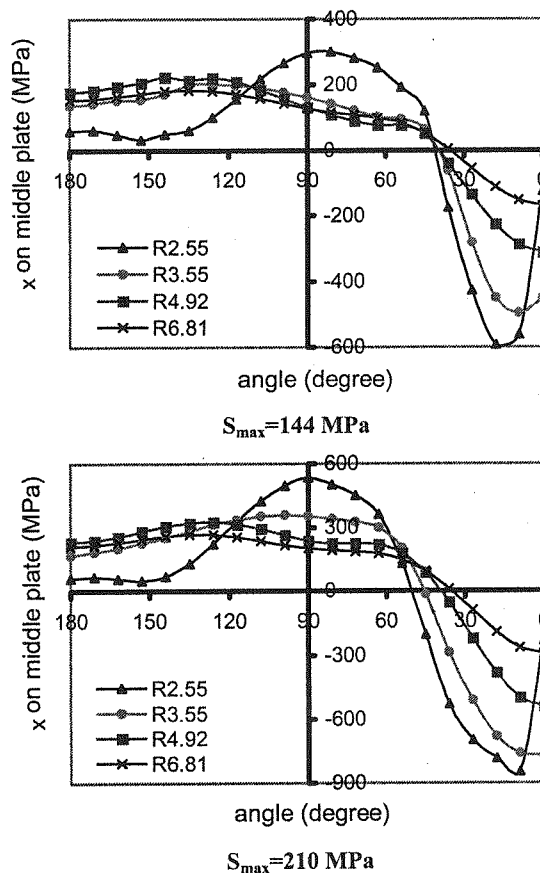


Clamping. میزان عمر قطعه مطابق شکل (۱۱) افزایش می‌یابد. چرایی این پدیده نیز با روش المان محدود و دقت در نحوه توزیع تنش‌ها در حالت‌های مختلف قابل توجیه است. همان طور که ذکر شد در محدوده مود لهیدگی (نیروهای Clamping کم) سرآغاز رشد ترک‌های خستگی، از لبه سوراخ است و عامل مؤثر در گسترش آن تنش کششی  $\sigma_x$  می‌باشد. با رسم نمودارهای تنش  $\sigma_x$  برای حالت‌های مختلف مود لهیدگی و مقایسه آنها با یکدیگر معلوم می‌شود که با اعمال نیروی Clamping بیشتر، تمرکز و مقادیر این تنش در لبه سوراخ کاهش و در نتیجه تعداد دورهای لازم برای گسترش ترک افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۲، الف) با افزایش مقدار این نیرو از 1.15 kN به 2.7 kN مقادیر تنش  $\sigma_x$  در لبه سوراخ در حدود 30-40 MPa کاهش و متعاقب آن عمر خستگی قطعه از ۱۲,۰۰۰ دور به ۱۰۰,۰۰۰ دور افزایش یافته است.

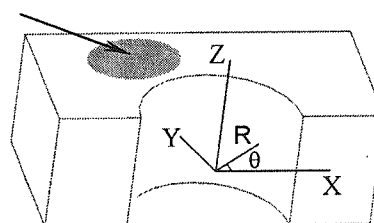


شکل (۱۱): منحنی تغییرات عمر خستگی بر حسب نیروی Clamping در دو حالت  $S_{max}=144, 210$  MPa ([۳])

با توجه به هر دو منحنی شکل (۱۱)، میزان عمر نمونه‌هایی که در مود ساییدگی شکسته شده اند از عمر نمونه‌هایی که در مود لهیدگی قرار گرفته اند، بیشتر است. همچنین در محدوده مود ساییدگی با محکم تر بستن پیچ و مهره تغییر چشمگیری در عمر ورق دیده نمی‌شود؛ زیرا با توجه به توزیع تنش‌های  $\sigma_x$  برای محدوده مود ساییدگی در شکل (۱۲، ب) با افزایش مقدار



شکل (۹): نمودار تنش  $\sigma_x$  (MPa) بر روی سطح ورق میانی و در شعاع‌های مختلف با اعمال  $F_{cl}=11.8$  kN اعمال  $S_{max}=144, 210$  MPa



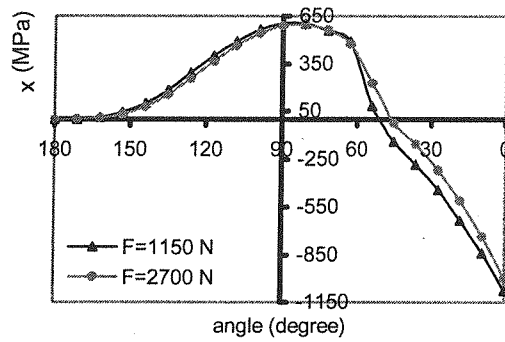
شکل (۱۰): محدوده بحرانی ایجاد و گسترش ترک در اثر خستگی ساییدگی در ورق میانی اتصال با نیروی Clamping زیاد

## ۸- اثر نیروی Clamping بر عمر خستگی

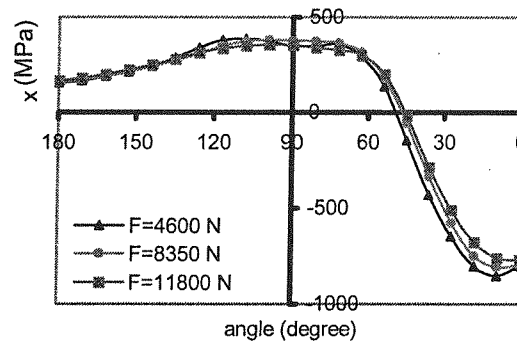
با توجه به نمونه‌هایی که تحت بارگذاری سیکلی با تنش ماکزیمم 144 MPa شکسته شده‌اند، محدوده مود لهیدگی تقریباً تا اعمال نیروی  $F_{cl}=2.7$  kN برقرار است؛ در حالی که تحت تنش ماکزیمم 210 MPa این محدوده تا  $F_{cl}=4.6$  kN افزایش یافته است؛ یعنی با اعمال کشش بیشتر بر ورق میانی و به دلیل کاهش بیشتر ضخامت آن، نیروی Clamping بالاتری برای کاستن آزادی بین ورق‌ها نیاز است؛ لذا محدوده این نیرو در مود لهیدگی برای تنش ماکزیمم بزرگ‌تر بار سیکلی افزایش یافته است. در محدوده مود لهیدگی با افزایش مقدار نیروی



نیروی Clamping، میزان کاهش تنش  $\sigma_x$  در محدوده بحرانی ایجاد ترک به اندازه کافی محسوس نیست.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): (الف) منحنی تنش  $\sigma_x$  در لبه میانی سوراخ برحسب  $S_{max}=144$  (MPa) برای دو مقدار  $F_{cl}$  در محدوده مود لهیدگی و  $S_{max}=144$  MPa.

(ب) منحنی تنش  $\sigma_x$  در سطح بالایی ورق میانی و  $R=3.55$  mm برای سه مقدار  $F_{cl}$  در محدوده مود ساییدگی و  $S_{max}=210$  MPa.

## ۵- بحث

بسته به میزان محکم کردن پیچ و مهره در یک اتصال دولبه، دو نوع واماندگی خستگی در ورق میانی رخ می‌دهد (مودهای خستگی لهیدگی و ساییدگی). محدوده اعمال نیروی Clamping در هر یک از این دو مود، به عوامل متعددی مانند ابعاد، جنس، وضعیت اتصال، سطح تنش بارهای سیکلی و ضرایب اصطکاک بستگی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده در بخش ۴، با افزایش مقدار تنش ماکزیمم بار سیکلی و به دلیل کاهش بیشتر ضخامت ورق‌ها (اثر پواسون)، آزادی بین آنها افزایش و در نتیجه نیروی اصطکاک بین آنها کمتر می‌شود؛ لذا نیروهای Clamping بالاتری برای محکم نگه داشتن ورق‌ها نیاز است؛ به عبارت دیگر محدوده مود لهیدگی افزایش می‌یابد. کاهش تنش های ناشی از اصطکاک بین ورق‌ها در وضعیت اعمال تنش ماکزیمم بزرگ‌تر، در شکل (۸) قابل رویت است. مشاهده

می‌شود که از زاویه تقریبی ۴۵ درجه به بعد، مقادیر تنش‌های برشی ناشی از اصطکاک در وضعیت  $S_{max}=210$  MPa در مقایسه با وضعیت  $S_{max}=144$  MPa کمتر است.

بررسی نتایج مربوط به تنش‌های برشی ناشی از اصطکاک بر روی سطح ورق میانی در مدل‌های با نیروی Clamping کم (مود لهیدگی)، نشان می‌دهد که مقادیر این تنش در مقایسه با مقادیر متناظر در مدل‌های مود ساییدگی بسیار ناچیز است؛ یعنی به دلیل شل بودن اتصال، نیروی اصطکاک ناچیزی بین ورق‌های اتصالی برقرار است؛ لذا در این حالت‌ها پدیده ساییدگی بر روی سطح ورق رخ نمی‌دهد و درصد بیشتر بار اعمالی به وسیله تماس ساق پیچ با قسمت داخلی سوراخ منتقل می‌شود (بخش ۳-۱)؛ حال آنکه در اتصالات محکم (مود ساییدگی)، تنش‌های برشی اصطکاکی باعث ساییدگی سطح ورق و ایجاد ترک‌های ساییدگی می‌شوند.

## ۶- نتیجه

- ❖ نتایج عددی حاصل از روش المان محدود بخوبی توانسته است چرایی و چگونگی ایجاد و گسترش ترک‌های خستگی را در حالت‌های مختلف تست‌های انجام شده توجیه کند؛ به طوری که همخوانی نتایج این دو روش علاوه بر تأیید نحوه مدل سازی و تحلیل‌های عددی، بر صحت و درستی آنها نیز اعتبار می‌بخشد.
- ❖ در اتصال‌هایی که به میزان کافی محکم نشده اند (اتصال شل)، به دلیل انتقال بار به وسیله تماس ساق پیچ با قسمت داخلی سوراخ، لهیدگی قابل توجهی در داخل سوراخ رخ می‌دهد و تمرکز تنش ایجاد شده در لبه سوراخ (در محدوده زاویه ۹۰ درجه) به ایجاد و گسترش ترک‌ها از داخل سوراخ منجر می‌شود؛ اما چنانچه اتصال کمی محکم‌تر شود به دلیل کاهش تمرکز تنش در لبه سوراخ، عمر خستگی قطعه به مراتب افزایش می‌یابد (مود لهیدگی).
- ❖ در اتصال‌های بسیار محکم به دلیل ایجاد تنش‌های اصطکاکی زیاد بین ورق‌ها و ساییدگی آنها بر روی یکدیگر، ترک‌های خستگی بر روی سطح ورق و در نزدیکی سوراخ ایجاد می‌شوند. در این موارد محدوده بحرانی برای ایجاد گسترش ترک در شعاع‌های دورتر از لبه سوراخ و زوایای منفرجه به وجود می‌آید (مود ساییدگی). نتایج مربوط به مدل‌های مود ساییدگی

اصطکاک بین اجزا و سطح بارهای سیکی اعمالی، با انتخاب میزان محکم کردن پیچ و مهره به محدوده گذار بین مودهای لهیدگی و ساییدگی رسید. به عنوان مثال اگر ضریب اصطکاک بین ورق ها کم باشد می توان با محکم کردن پیچ و مهره تا حد اکثر مقدار مجاز آن، به ناحیه مود ساییدگی نزدیک تر شد و بالاترین عمر خستگی را برای اتصال به دست آورد.

نشان می دهد که افزایش زیاد در مقدار نیروی Clamping، به افزایش محسوس در عمر خستگی ورق منجر نمی شود؛ چراکه با توجه به شکل (۱۲، ب) مقادیر تنش مؤثر در گسترش ترک ( $\sigma_x$ ) در محدوده بحرانی ایجاد ترک، کاهش چشمگیری را از خود نشان نمی دهند.

❖ با توجه به نتایج تحقیق می توان محدوده ایده آلی را از نظر عمر اتصال برای طراحی اتصالات پیچ و مهره ای در نظر گرفت. به طوری که اکیداً از اتصالات شل پرهیز کرده و با توجه به ضرایب

## ۲- مراجع

- Swanson Analysis Systems Inc. ANSYS, User's Guide for Revision 7.0, ANSYS 7.0 Documentation> Structural Analysis Guide> Chapter 10 Contact> 10.6. Performing a Node-to-Surface Contact Analysis. [۸]
- Terada, H.; "Structural fatigue and joint degradation", International Journal of Fatigue, vol. 23, p.p. S24S 30, 2001 [۹]
- Urban, M. R.; "Analysis of the fatigue life of riveted sheet metal helicopter airframe joints", International Journal of Fatigue, vol. 25, p.p. 1013-1026, 2003 [۱۰]
- Valtinat, G.; Hadrych, I.; Huhn, H.; "Strengthening of riveted and bolted steel constructions under fatigue loading by preloaded fasteners-experimental and theoretical investigations", Published on Conference: Connections in steel structures IV, AISC and ECCS, Roanoke/USA 2000. [۱۱]
- Wang, G. S.; "Computational method for evaluating the fatigue life of mechanical joints", Proceedings of the 21st Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF) 27-29 June 2001 Toulouse, France. [۱۲]
- [www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6](http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6) [۱۳]
- Chakherlou, T. N.; Vogwell, J.; "The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes", Engineering Failure Analysis, vol. 10, p.p. 13-24 2003 [۱]
- Ireman, T.; "Design of composite structures containing bolt holes and open holes", Department of Aeronautics, Royal Institute of Technology, Report No. 9903 ISSN 0280-4646, 1999. [۲]
- Shankar, K.; Dhamari, R.; "Fatigue behaviour of aluminium alloy 7075 bolted joints treated with oily film corrosion compounds", Materials and Design, vol. 23 p.p. 209-216, 2002. [۳]
- Staley, J. T.; Hunt, W. H.; Jr. "Needs of the aircraft industry for aluminum products", Aluminum Consultants Group, ICAA- 7, APRIL 9-14 2000. [۴]
- Starikov, R.; Schön, J.; "Local fatigue behaviour of CFRP bolted joints", Composites Science and Technology, vol. 62, p.p. 243-253, 2002 [۵]
- Swanson Analysis Systems Inc. ANSYS, Release 7.1. [۶]
- Swanson Analysis Systems Inc. ANSYS, User's Guide for Revision 7.0, ANSYS 7.0 Documentation> ANSYS Element Reference> Element Library> CONTAC49. [۷]