



## بررسی تجربی و شبیه سازی عددی رفتار خستگی نمونه های دارای تداخل تحت نیروی فشاری پیچ و مهره

هادی تقی زاده<sup>1</sup>، تاج بخش نوید چاکرلو<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 51666-14766، tnavid@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 31 مرداد 1396

پذیرش: 17 مهر 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

تداخل

عمر خستگی

اتصالات پیچی

مدل المان محدود

پیش بار

### چکیده

فرآیند تداخل یک تکنیک مؤثر برای بهبود عمر خستگی اتصالات می باشد و بصورت گسترده در صنایع مختلف به ویژه هوا-فضا و صنایع خودروسازی برای افزایش عمر خستگی اتصالات مورد استفاده قرار می گیرد. بیشتر مطالعات انجام گرفته شده در زمینه تداخل بر روی ورق های سوراخ باز انجام شده اند. این در حالی است که تداخل در عمل برای اتصالات پیچی هم به کار می رود که رفتار متفاوتی در مقایسه با اتصالات با سوراخ باز دارند. اهمیت این پژوهش در گسترش دادن به معلومات موجود در زمینه اتصالات تحت تداخل به مرحله ی پس از بستن پیچ و مهره می باشد در این مقاله تحقیق جامعی بر روی تأثیر تداخل توأم با پیش بار اتصال پیچ و مهره بر عمر خستگی ورق سوراخ دار بصورت تجربی و عددی انجام شده است. آزمایش های خستگی بر روی آلیاژ آلومینیم 7075-T6 انجام شده است و نمودار تنش-عمر برای نمونه ها به دست آمده است. توزیع تنش و کرنش اطراف سوراخ نمونه های دارای تداخل و پیش بار حین اعمال بار دینامیکی طولی با استفاده از یک مدل المان محدود سه بعدی در نرم افزار انسیس تحلیل شده است. نتایج به دست آمده از مدل المان محدود برای توجیه مشاهدات تجربی استفاده شده است. توزیع پیش تنش ناشی از تداخل و باز توزیع آن پس از اعمال نیروی فشاری به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که اعمال نیروی فشاری پیچ و مهره بر روی نمونه های دارای تداخل باعث افزایش عمر خستگی نمونه ها شده است. بیشترین بهبود عمر در نمونه های تحت پیش بار 3409 و 6818 نیوتن بترتیب 2.5 و 7 برابر نمونه های تداخل می باشد.

## Experimental investigation and numerical simulation of the fatigue behavior of interference fitted specimens subjected to bolt clamping force

Hadi Taghizadeh, Tajbakhsh Navid Chakherlou\*

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

\* P.O.B. 51666-14766 Tabriz, Iran, tnavid@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 22 August 2017

Accepted 09 October 2017

Available Online 18 November 2017

### Keywords:

Interference Fit

Aerospace

Bolt clamping force

Finite Element

Fatigue Life

### ABSTRACT

Interference fit process, as a popular method, is used in aerospace and automotive industries. General investigation of interference fit has been conducted on plain hole extensively. Nevertheless, interference fitted holes are practically subjected to bolt clamping force which may have different fatigue behavior than the plain hole. The objective of the present study is to extend the present knowledge about the fatigue behavior of interference fitted holes by investigating the subsequent bolt clamping force effect based on the experimental and numerical results. In this paper, Al-alloy 7075-T6 is utilized for fatigue test specimens. In relation to fatigue tests, three dimensional finite element analyses were used to explain the experimental results. By using finite element method, the interference fit process; bolt clamping and subsequent remote cyclic loading were simulated. The fatigue critical stresses on bolt clamped interference fitted (BIF) samples were compared with the corresponding stresses for interference fitted samples. The pre-stress distribution due to interference fitted hole, and its redistribution after bolt clamping force and its interaction with remote loading were estimated. The fatigue test results demonstrate that bolt clamping force applied on the interference fit plays a positive role on fatigue behavior and prolongs the fatigue life. The biggest life improvement for bolt preloads of 3409 and 6818 N is 2.5 and 7 times compared to the only interference fitted specimens, respectively.

### 1- مقدمه

موجب تلفات جانی سنگینی نیز شده است. از آن جا که مکانیزم دقیق پدیده

خستگی هنوز به طور کامل مشخص نشده است همه روزه روش های جدیدی

برای جلوگیری از این پدیده توسط طراحان و مهندسان ارائه و ابداع می شود.

مسئله خستگی به عنوان عامل اصلی در خرابی قطعات مکانیکی و صنایع هوا

و فضا شناخته شده است. این خرابی ها علاوه بر خسارت های اقتصادی فراوان

Please cite this article using:

H. Taghizadeh, T. Navid Chakherlou, Experimental investigation and numerical simulation of the fatigue behavior of interference fitted specimens subjected to bolt clamping force, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 247-258, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تجربی [11]، حل‌های تحلیلی [12] و روش المان محدود [13]. بیشتر مطالعاتی که تاکنون در زمینه تداخل منتشر شده‌اند بر روی ورق‌های سوراخ باز انجام شده‌اند. این در حالی است که تداخل در عمل برای اتصالات پیچی هم به کار می‌رود که رفتار متفاوتی در مقایسه با اتصالات با سوراخ باز دارند. تأثیر فرآیند تداخل و نیروی فشاری پیچ و مهره بر روی عمر خستگی نمونه‌ها به صورت جداگانه انجام پذیرفته است ولی در تحقیقات کمی تأثیر هم‌زمان تداخل و نیروی فشاری بررسی شده است [14] که بیشتر به صورت آزمایش تجربی می‌باشند، لذا لازم است به صورت جامع و کامل تحقیقی در این زمینه به صورت تجربی و عددی انجام گیرد. هدف پژوهش حاضر بررسی رفتار خستگی ورق سوراخ‌دار تحت تداخل پس از بستن پیچ و مهره می‌باشد. رفتار خستگی که مورد بررسی قرار گرفته شامل عمر خستگی، نحوه ایجاد و گسترش ترک و نیز نحوه واماندگی می‌باشد. همچنین تأثیر بستن پیچ و مهره بر روی توزیع تنش ناشی از تداخل و تنش‌های محلی اطراف سوراخ نیز بررسی شده است. اهمیت پژوهش حاضر گسترش دادن معلومات موجود در زمینه اتصالات تحت تداخل به مرحله‌ی پس از بستن پیچ و مهره می‌باشد. برای این منظور نمونه‌ای از ورق سوراخ‌دار با ابعاد مشخص و مورد نظر از جنس آلومینیم که در صنایع هوابی مورد استفاده قرار می‌گیرد تهیه گردیده است. تحقیق در دو بخش اساسی است انجام شده است. بخش اول انجام آزمایش‌های عملی و بخش دوم تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود می‌باشد. یک نسبت تداخل برای انجام عملیات تداخل در نظر گرفته شده است. بعد از انجام فرآیند تداخل یک دسته از نمونه‌ها برای انجام بارگذاری سیکلی کنار گذاشته شد و بقیه نمونه‌ها تحت دو نیروی فشاری (پیش بار) مختلف قرار گرفته‌اند. برای توجیه مشاهدات تجربی با استفاده از روش المان محدود تمامی مراحل مربوط به عملیات تداخل، بستن پیچ و مهره و بارگذاری سیکلی شبیه‌سازی شده است و به این ترتیب تأثیر بستن پیچ و مهره بر روی توزیع میدان پیش‌تنش و تنش اطراف سوراخ مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- روش تجربی

### 2-1- مواد مصرفی و نمونه‌های آزمایشی

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی از آلیاژ آلومینیم 7075-T6 که یکی از پرکاربردترین آلیاژها در صنایع هوافضا می‌باشد، استفاده شده است. این آلیاژ که اغلب در بال و بدنه هوابیما مورد استفاده قرار می‌گیرد همواره در معرض بارگذاری‌های سیکلی واقع است و با توجه به وجود سوراخ (برای اتصال قطعات، برای عبور سیم‌ها و لوله‌ها) بررسی این آلیاژ تحت بار سیکلی که هنگام پرواز پیش می‌آید، ضروری و پر اهمیت است. از مزیت‌های این آلیاژ می‌توان به مقاومت خوب در برابر خوردگی و همچنین نسبت استحکام به وزن بالا اشاره نمود. نمودار تنش - کرنش این آلیاژ در شکل 1 نشان داده شده است.

جهت ساخت نمونه‌ها از ورق آلومینیم 7075-T6 به ضخامت 6.35 میلی‌متر استفاده شده است. محور طولی نمونه‌ها در راستای نورد ورق در نظر گرفته شده است. شکل 2 ابعاد نمونه آزمایشی را نشان می‌دهد.

به دلیل اینکه وجود هر گونه خراش سطحی بر روی نمونه‌های آزمایشی ممکن است نتایج آزمایش خستگی را تحت تأثیر قرار دهد، پس از اتمام ماشین‌کاری سطوح بالایی و پایینی نمونه‌ها در چندین مرحله به وسیله سمباده‌های ضد آب با درجه‌های مختلف (400 - 800 - 1000) سمباده‌زنی شده‌اند. نمونه‌های آزمایشی به چهار گروه تقسیم شده است. یک گروه بدون

بسیاری از قطعات مورد استفاده در بدنه هوابیما با ایجاد سوراخ‌هایی در اجزاء، توسط پرچ، پین و یا پیچ به هم بسته می‌شود. از مزیت‌های این اتصالات می‌توان به مقاومت بسیار بالا در برابر خستگی نسبت به سایر اتصالات مانند جوش و همچنین قابل تعویض بودن این اتصالات اشاره نمود. از طرفی وجود سوراخ که در بستن پیچ و یا پرچ لازم است به عنوان محل تمرکز تنش و کرنش بوده و عموماً محل شروع و اشعه ترک‌های خستگی می‌باشد. لذا در این سازه‌ها یکی از نقاط ضعف وجود همین سوراخ‌ها می‌باشد. برای رفع این ضعف و یا حداقل کاهش اثرات منفی آن تکنیک‌های مختلفی مانند انبساط سرد [2,1]، تداخل [3] و نیروی فشاری پیچ و مهره [4] به کار گرفته شده است.

فرآیند تداخل یک روش مکانیکی ایجاد پیش‌تنش محسوب می‌شود. این روش یک تکنیک ثابت شده برای افزایش عمر بوده و چند دهه‌ای است که در صنایع مختلف به ویژه هوا-فضا برای افزایش عمر خستگی اتصالات به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [5]. این فرآیند عبارت است از عبور دادن پیچ (پین) از داخل سوراخ به طوری که قطر سوراخ از قطر پیچ کوچک‌تر باشد و پیچ (پین) در داخل سوراخ باقی بماند. در نتیجه این عمل ماده پیرامون سوراخ به عقب فشار داده می‌شود و پیش‌تنش محیطی که عموماً به صورت کششی می‌باشد، در لبه سوراخ ایجاد می‌شود. این عمل موجب کاهش دامنه تنش سیکلی موضعی می‌گردد. کاهش دامنه تنش سیکلی موضعی در لبه سوراخ باعث تأخیر در شروع و گسترش ترک‌های خستگی و در نتیجه افزایش عمر خستگی قطعه می‌شود [6].

در کنار روش تداخل، روش نیروی فشاری پیچ و مهره (نیروی پیش بار) هم به صورت قابل توجهی جهت بهبود عمر خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. میدان تنش ناشی از بستن پیچ و مهره به صورت میدان تنش فشاری می‌باشد و سبب بهبود رفتار خستگی و شکست اتصالات پیچی می‌شود. هنگام اعمال گشتاور به سر پیچ، مهره به سمت آن کشیده می‌شود. در نتیجه ساق پیچ تحت کشش قرار گرفته و عضو اتصالی تحت فشار قرار می‌گیرد. این مسئله سبب انقباض عضو در جهت ضخامت می‌شود. به خاطر اثر ضریب پواسون، انقباض در جهت ضخامت منجر به انبساط در جهت شعاعی می‌شود. ناحیه‌ی دورتر از سوراخ در مقابل انبساط شعاعی ناحیه‌ی اطراف سوراخ مقاومت کرده و در نتیجه یک میدان تنش فشاری در ناحیه‌ی اطراف سوراخ تشکیل می‌شود [7]. همچنین تماس اصطکاکی ما بین واشر و ورق مانند یک گیره عمل کرده و از اثرات بارگذاری دوردست می‌کاهد. علاوه بر این تماس اصطکاکی مانع باز شدن ترک‌هایی شده که در منطقه تماس ایجاد می‌شوند. این مسئله منجر به کاهش ضریب شدت تنش نوک ترک می‌شود و در نتیجه سرعت رشد ترک را کند می‌کند [8].

بهبود عمر خستگی عموماً به خاطر کاهش نرخ رشد ترک می‌باشد [9]. بررسی نرخ رشد ترک در اتصالات پیچی به خاطر عدم امکان مشاهده ترک مشکل می‌باشد. در این حالت از مقطع شکست و یا از مدل‌های المان محدود [8] استفاده می‌کنند. ترک خستگی در اتصالات پیچی عموماً از صفحه‌ی میانی ورق شروع می‌شود که کمترین تنش فشاری را دارد و هنگام بارگذاری سیکلی بیشترین تنش‌ها را متحمل می‌شود [10].

بطور کلی بر اساس تحقیقاتی که در زمینه روش‌های بهبود عمر خستگی اتصالات انجام گرفته است، عمر خستگی سازه‌های مهندسی وابستگی شدیدی به سطح (مقدار) پیش‌تنش و تنش پسماند دارد. از این رو به دست آوردن دقیق توزیع و اندازه تنش از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تعیین تنش وجود دارد که عبارت‌اند از: روش‌های

رابطه 1 به دست می آید:

$$I = \frac{D-d}{d} \times 100 \quad (1)$$

که  $D$  قطر پین و  $d$  قطر سوراخ می باشد. با توجه به رابطه 1 مقدار تداخل 3.5 درصد می باشد. برای وارد کردن پیچ به داخل سوراخ نمونه ها از دستگاه کشش و فشار اسلر<sup>1</sup> استفاده شده است (شکل 3). در هنگام وارد کردن پیچ به داخل سوراخ باید دقت کافی منظور گردد تا پیچ و سوراخ نمونه هم مرکز باشند. برای انجام عملیات تداخل در زیر نمونه های آزمایشی یک بوش فولادی با قطر داخلی 10 و قطر خارجی 35 میلی متر به صورت هم مرکز با سوراخ نمونه به عنوان تکیه گاه هنگام وارد کردن پیچ داخل سوراخ استفاده شده است. پیچ مورد استفاده طوری انتخاب شده است که طول قسمت ساق بدون رزوه پیچ اندکی بیشتر از ضخامت ورق باشد تا هنگام انجام فرآیند تداخل (که قطر پیچ بزرگتر از قطر سوراخ می باشد) فقط قسمت بدون رزوه دار پیچ با سطح داخلی سوراخ در تماس باشد. برای جلوگیری از آسیب سطح داخلی سوراخ، می بایست قسمت رزوه دار پیچ با سطح سوراخ تماس نداشته باشد. برای این منظور، قسمتی از سطح رزوه های پیچ، ماشین کاری شده است. لازم به توضیح است که ماشین کاری رزوه ها با در نظر گرفتن ارتفاع باقیمانده رزوه و تسلیم نشدن اتصال پیچ و مهره در برابر گشتاور اعمالی انجام شده است. در واقع می توان گفت که با توجه به عدم تماس رزوه پیچ با ورق، قسمت رزوه دار پیچ تأثیری بر روی فرآیندهای انجام گرفته ندارد. در طول عملیات تداخل نیروی فشاری لازم جهت عبور دادن پیچ از درون سوراخ هر یک از نمونه ها ثبت شده است. از این نیرو برای یافتن ضریب اصطکاک مابین سطح پیچ و دیواره سوراخ در شبیه سازی عددی استفاده شده است.

بعد از اتمام عملیات تداخل یک گروه از نمونه های آزمایشی جهت انجام آزمایش های خستگی کنار گذاشته شد و دو گروه دیگر تحت نیروی فشاری پیچ و مهره قرار گرفتند. برای تعیین مقدار گشتاور اعمالی بر نمونه های دارای تداخل، از یک گشتاورسنج با دامنه کوچک در حدود 0-20 Nm استفاده شده است. این گشتاورسنج، برای انجام پروژه ها با دامنه اندازه گیری 0-18 Nm مناسب می باشد و کوچک ترین مقدار قابل اندازه گیری آن 0.5 Nm است. گشتاورسنج در شکل 4 نشان داده شده است.

بر این اساس دو مقدار گشتاور 3.5 و 7 نیوتن متر به عنوان گشتاورهای اعمالی انتخاب شدند. گشتاورهای اعمالی بر مبنای استحکام رزوه پیچ و مهره انتخاب شده است. برای تعیین رابطه ی بین گشتاور اعمالی و نیروی فشاری وارد شده به ورق از یک روش تجربی استفاده شده است. برای این منظور از

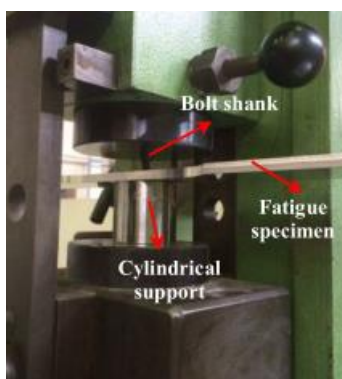


Fig. 3 Interference fit set up

شکل 3 نحوه انجام فرآیند تداخل

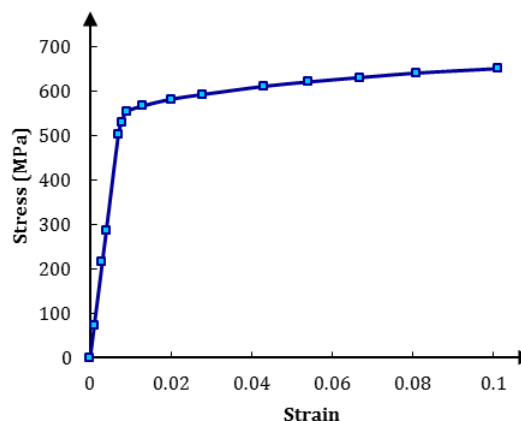


Fig. 1 Stress- strain curve of Al- alloy 7075-T6

شکل 1 منحنی تنش- کرنش آلیاژ آلومینیم 7075-T6

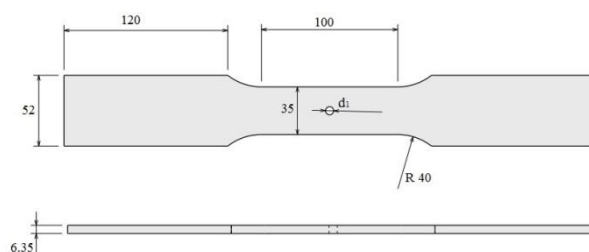


Fig. 2 Fatigue test specimen (mm)

شکل 2 ابعاد نمونه های آزمایشی (میلی متر)

اینکه تحت عملیاتی قرار بگیرد، برای انجام آزمایش خستگی کنار گذاشته شد؛ اما 3 گروه دیگر تحت عملیات تداخل قرار گرفته اند. از سه گروه از نمونه هایی که تحت تداخل قرار گرفته اند، یک گروه کنار گذاشته شده و دو گروه تحت گشتاور متفاوت قرار گرفته اند. پارامتر متغیر در این پژوهش مقدار پیش بار (گشتاور اعمالی) و نیروی تناوبی اعمالی می باشد. دو گشتاور 3.5 و 7 نیوتن متر بر نمونه ها اعمال شده است. نام گذاری این چهار دسته شامل نمونه های بدون تداخل (سوراخ باز)، نمونه های دارای تداخل، نمونه های دارای تداخل تحت نیروی فشاری 3409 نیوتن و نمونه های دارای تداخل تحت نیروی فشاری 6818 نیوتن می باشد. این نام گذاری در جدول 1 بر مبنای عملیاتی که بر روی آن ها اعمال شده، نشان داده شده است.

## 2-2- عملیات تداخل و اعمال نیروی فشاری پیچ و مهره

فرآیند تداخل به صورت وارد کردن پیچ با قطر بزرگتر از قطر سوراخ در نمونه خستگی می باشد. برای انجام عملیات تداخل پیچ کلاس 12.9 با قطر اسمی 6 میلی متر و ساق بدون رزوه 20 میلی متر بکار گرفته شده است. در نمونه های بدون عملیات قطر سوراخ 5.70 میلی متر بوده و در نمونه های با تداخل قطر سوراخ نمونه ها 5.92 میلی متر می باشد. مقدار درصد تداخل با استفاده از

جدول 1 نام گذاری نمونه ها

Table 1 Specimens' nomination

نام گذاری	توصیف
OH	نمونه های سوراخ باز
IF	نمونه های دارای تداخل
BIF3409	نمونه های دارای تداخل تحت نیروی فشاری 3409 N
BIF6818	نمونه های دارای تداخل تحت نیروی فشاری 6818 N

<sup>1</sup> Amsler

خستگی بر روی دستگاه خستگی نشان داده شده است. تعداد و مقدار نیروهای تناوبی وارد بر نمونه ها 6 مورد و از 45kN تا 70kN در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب مقدار حداقل و حداکثر بار تناوبی اعمالی پرهیز از طول عمر قطعات بالای یک میلیون دور و یا پایین تر از هزار دور می باشد.

#### 4-2- نتایج آزمایش های خستگی

نمودار تنش-عمر حاصل از آزمایش های خستگی برای نمونه ها در یک نمودار نیمه لگاریتمی در شکل 7 نشان داده شده است. آزمایش های خستگی برای هر نمونه دو بار در هر یک از بارهای اعمال شده انجام شده است. میانگین مقادیر دو آزمون خستگی بر روی نمودار S-N گزارش شده است. چنانچه از شکل 7 مشهود است تداخل و اعمال نیروی فشاری پیچ و مهره عمر خستگی نمونه ها را در مقایسه با نمونه های بدون عملیات افزایش داده است. اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه های دارای تداخل باعث افزایش نرخ بهبود عمر نمونه ها شده است؛ بطوری که بهبود عمر خستگی در نمونه های با نیروی فشاری بزرگتر (پیش بار بزرگتر)، بیشتر است بطوری که عمر خستگی نمونه های BIF6818 بزرگتر از نمونه های BIF3409 می باشد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که در بارهای پایین میزان بهبود عمر نمونه های دارای تداخل تحت نیروی فشاری (BIF) در مقایسه با نمونه های که فقط تحت عملیات تداخل (IF) قرار گرفته اند بسیار قابل ملاحظه می باشد. با افزایش بار، بهبود عمر خستگی نمونه ها کاهش یافته است؛ بطوری که در بارهای بالا عمر خستگی نمونه های IF و BIF3409 به هم نزدیک می باشد اما میزان بهبود عمر نمونه های BIF6818 قابل توجه



Fig. 6 Test specimen mounted on the fatigue test machine

شکل 6 نحوه بسته شدن نمونه های آزمایشی

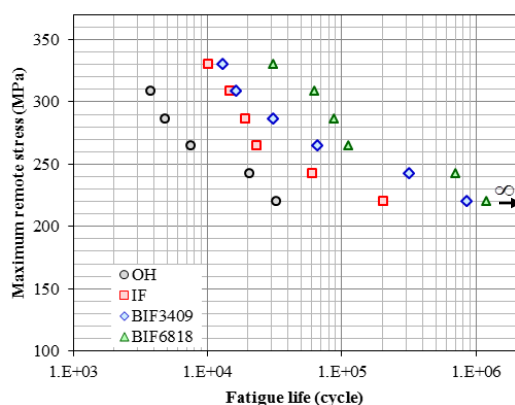


Fig. 7 Fatigue test (S-N) data

شکل 7 نمودار تنش برحسب عمر



Fig. 4 Torque meter

شکل 4 گشتاورسنج جهت تعیین گشتاور اعمالی

یک بوش فولادی استفاده شده است. با قرار دادن این بوش فولادی مابین واشر و ورق، کرنش محوری ایجاد شده در آن در نتیجه اعمال گشتاور به پیچ و مهره قابل اندازه گیری می باشد. بدین منظور از دو کرنش سنج که به صورت موازی با محور بوش و در مقابل هم، روی آن نصب شده اند، استفاده شده است. با استفاده از میانگین دو کرنش به دست آمده از کرنش سنج ها رابطه بین گشتاور اعمالی و نیروی فشاری وارد شده تعیین شده است. با در دست داشتن سطح مقطع بوش و مشخصات مکانیکی آن می توان با استفاده از قانون هوک و تعادل، رابطه بین گشتاور اعمالی و نیروی وارد شده به ورق را به طریق زیر محاسبه کرد:

$$F_{cl} = E_{bush} \varepsilon_m A_{bush} = E_{bush} \times \frac{\pi}{4} (9^2 - 5^2) \times \varepsilon_m \quad (2)$$

که در رابطه بالا  $E_{bush}$  مدول الاستیسیته بوش،  $\varepsilon_m$  میانگین کرنش محوری و  $A_{bush}$  سطح مقطع بوش می باشد. لازم به توضیح است در آزمایش ها برای بدست آوردن رابطه گشتاور اعمالی و نیروی پیش بار یک واشر مسطح بین مهره و بوش استفاده شده تا نیرو به صورت یکنواخت به بوش اعمال شود و از پلاستیسیتهی موضعی جلوگیری شود. در حین این آزمایش ها تنش ایجاد شده در بوش بسیار کمتر از مقاومت تسلیم بوش می باشد. رابطه خطی بین نیروی فشاری به دست آمده و گشتاور اعمالی در شکل 5 نشان داده شده است. بر این اساس با توجه به دو مقدار گشتاور انتخابی 3.5 و 7 Nm نیروی فشاری به ترتیب برابر 3409 و 6818 نیوتن می باشد.

#### 3-2- نحوه انجام آزمایش های خستگی

برای انجام آزمایش های خستگی از دستگاه زوویخ روئل اسمبل<sup>1</sup> استفاده شده است. بارگذاری از نوع سینوسی با نسبت بار 0.1 و در دمای اتاق و در فرکانس 4 هرتز انجام شده اند. در شکل 6 نحوه بسته شدن نمونه های

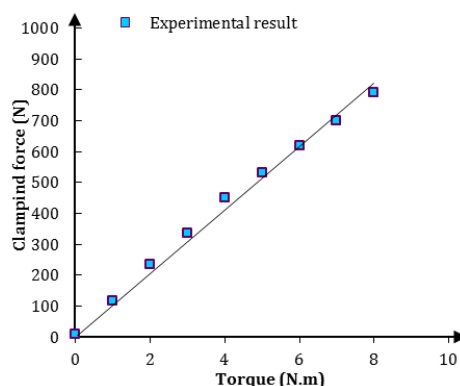


Fig. 5 Linear relation between tightening torque and bolt clamping force.

شکل 5 رابطه خطی بین گشتاور اعمالی و نیروی فشاری

<sup>1</sup> Zwick / Roell Amsler

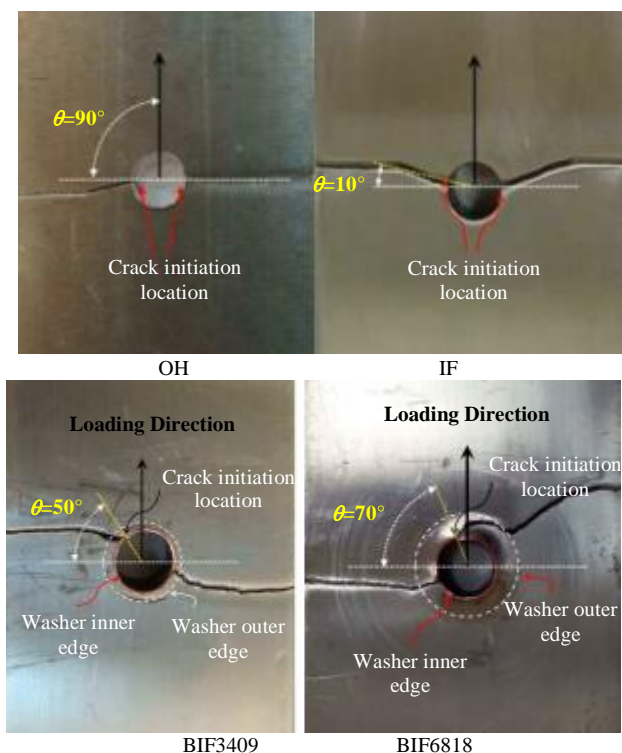


Fig. 9 Faying surface of samples

شکل 9 سطح سایش نمونه ها

شروع ترک به سمت جهت بارگذاری نزدیک شود؛ بطوری که در نمونه BIF3409 محل شروع ترک از  $q=50^\circ$  و در نمونه BIF6818 ترک از  $q=70^\circ$  شروع شود.

هنگام وارد کردن پیچ داخل سوراخ حین فرآیند تداخل به دلیل جریان پلاستیک ماده ناحیه برآمده در ناحیه ورودی و خروجی اطراف سوراخ ایجاد می شود که ناحیه برآمده در صفحه ی خروجی پیچ قابل توجه تر می باشد. ناحیه برآمده باعث می شود که واشر به صورت کامل روی سطح ورق قرار نگیرد و تماس واشر با ورق بر روی ناحیه برآمده متمرکز شود. این عمل موجب می شود که هنگام اعمال بارگذاری سیکلی ناحیه اطراف سوراخ ساییده شود. این پدیده باعث کاهش نیروی فشاری در سمت مهره شده و یک ناحیه ی آسیب دیده در این منطقه ایجاد می شود. در شکل 10 ناحیه خراشیده شده به صورت نمونه نشان داده شده است.

بررسی ماکروسکوپیکی سطح مقطع نمونه ها دو منطقه متفاوت را نشان می دهد. ناحیه اول، ناحیه خستگی (منطقه ایجاد و گسترش ترک های خستگی) که به صورت شفاف و روشن می باشد. ناحیه دوم، ناحیه شکست



Fig. 10 scuffed region during cyclic loading

شکل 10 ناحیه خراشیده هنگام بارگذاری سیکلی

می باشد. چنانچه از شکل 7 مشاهده می شود در نمونه های با پیش بار پایین تر بیشترین بهبود عمر نسبت به نمونه های تداخل در حدود 250 درصد و در پیش بار بزرگ تر بهبود عمر خستگی در حدود 700 درصد می باشد.

## 5-2- سطح مقطع شکست نمونه ها

پس از انجام آزمایش های خستگی به منظور بررسی محل و نحوه ی شروع ترک خستگی و همچنین منطقه گسترش ترک خستگی بررسی مقاطع شکست لازم می باشد. سطوح مقاطع شکسته شده برای چهار گروه مختلف نمونه های آزمایشی در شکل 8 در بار 60 کیلونیوتن نشان داده شده است. چنانچه سطح مقطع شکست نمونه ها نشان می دهد در نمونه های بدون عملیات ترک های خستگی از نزدیکی لبه ی میانی سوراخ شروع و به صورت نیم بیضی از دو طرف سوراخ گسترش یافته اند. در نمونه های دارای تداخل ترک های خستگی از لبه ورودی سوراخ ایجاد شده و گسترش آن ها به صورت ربع بیضی از دو طرف سوراخ می باشد. در نمونه های دارای تداخل که تحت نیروی فشاری قرار گرفته اند ترک از لبه ی ورودی شروع شده و سپس در راستای عمود بر بارگذاری در امتداد ضخامت گسترش یافته است. همچنین در این نمونه ها شروع و رشد ترک خستگی در سطح خروجی نیز مشاهده می شود. با این حال، ناحیه رشد ترک در صفحه خروجی در مقایسه با صفحه ی ورودی قابل توجه نیست. در نمونه هایی که تحت نیروی فشاری قرار گرفته اند موقعیت شعاعی محل ایجاد ترک متفاوت است. در این نمونه ها ترک ها از صفحه ی ورودی و در موقعیتی دورتر از لبه سوراخ، مابین لبه داخلی و خارجی واشر ایجاد شده است.

به منظور بررسی بیشتر تأثیر نیروی فشاری بر نحوه ایجاد و رشد ترک خستگی سطوح سایش نمونه ها نشان داده شده است. شکل 9 سطح سایش نمونه ها را در صفحه ی ورودی پین برای بار 60 کیلونیوتن نشان می دهد. موقعیت زاویه ای محل رشد ترک در این شکل مشخص شده است. زاویه  $q=0^\circ$  در جهت عمود بر بارگذاری و  $q=90^\circ$  در جهت بارگذاری می باشد. چنانچه شکل نشان می دهد در نمونه های بدون عملیات، ترک از زاویه  $q=0^\circ$  شروع می شوند و در نمونه های دارای تداخل زاویه شروع ترک  $q=10^\circ$  می باشد. اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه ها باعث می شود که موقعیت محل ایجاد ترک به ناحیه دورتر از کوچک ترین سطح مقطع منتقل شود و محل

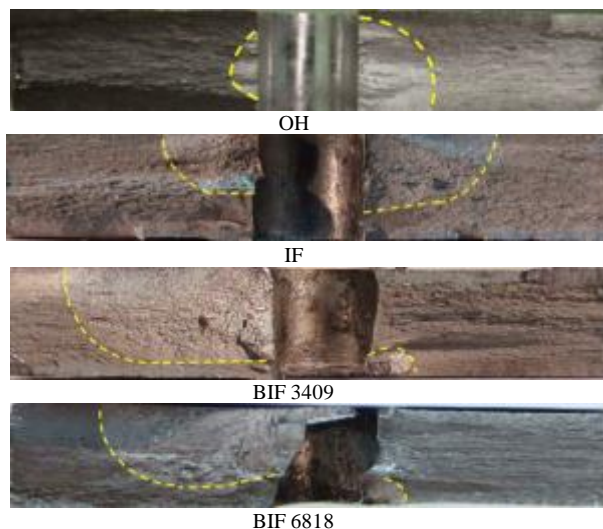
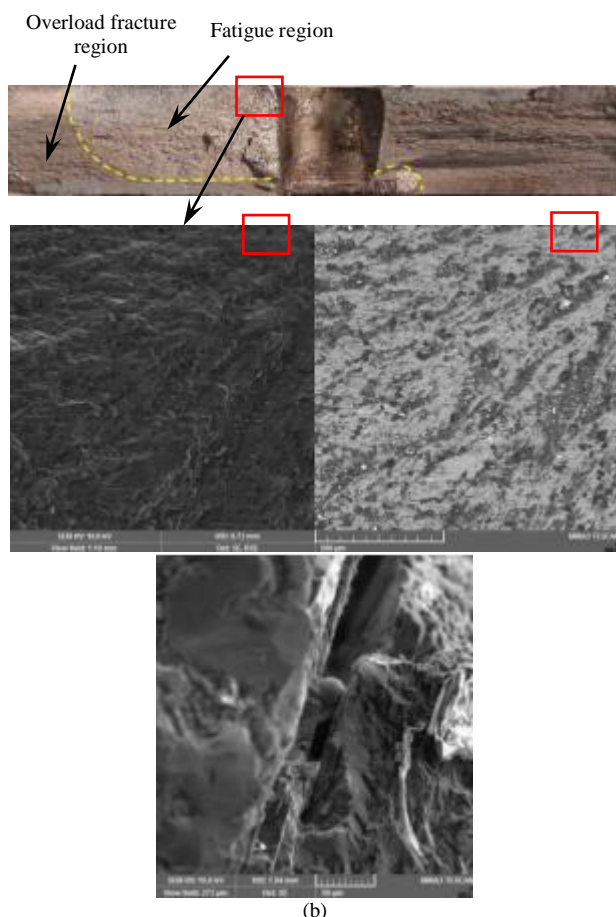


Fig. 8 Fracture section of specimens (upper face is bolt entrance plane)  
شکل 8 سطح مقطع شکست نمونه ها (سطح بالا محل ورود پیچ است)



**Fig. 11** Fracture sections of specimens along with SEM images with high magnifications of depicted areas (a) the IF specimen at load 60 kN (b) the BIF3409 specimen at load 60 kN.

شکل 11 سطح مقطع شکست نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (الف) نمونه IF در بار 60kN (ب) نمونه BIF در بار 60kN

داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و مقاومت تسلیم برای آلومینیم 7075-T6 به ترتیب 0.33، 71.5GPa و 503MPa می باشد. رفتار پیچ فولادی، واشر و مهره مورد استفاده بصورت الاستیک با مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب 209 GPa و 0.33 در نظر گرفته شده است. در شکل 12 مدل المان محدود نشان داده شده است. این مدل از 24336 المان سولید 185 همچنین 2244 المان تماس، 2544 المان هدف و 28192 نود تشکیل شده است.

شرایط مرزی مورد استفاده در مدل را می توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول شرایط مرزی هستند که به علت استفاده از مدل یک چهارم باید از آن ها استفاده نمود. این شرط مرزی، شرط مرزی متقارن است که بر اساس آن حرکت گره های روی سطح، در جهت عمود بر سطح محدود می گردد. این شرط مرزی بر سطوح تقارن صفحه سوراخ دار و پیچ اعمال می گردد. شرایط مرزی دسته دوم ناشی از قیودی هستند که به طور فیزیکی در عمل بر قطعه اعمال می شوند. مانند حرکت پیچ که برای آن از قید جابجایی در راستای محور Z استفاده می شود و اثر حضور استوانه فولادی نگه دارنده ورق آلومینیوم به صورت اعمال قیدهای جابجایی در جهت Z به گره های زیرین ورق که ما بین فاصله شعاعی 5 و 17.5 میلی متر از مرکز سوراخ مقید شده است، اعمال می گردد. شبیه سازی عددی در چندین مرحله انجام گرفته شده است. در مرحله اول فرایند تداخل شبیه سازی شده است. برای مدل سازی

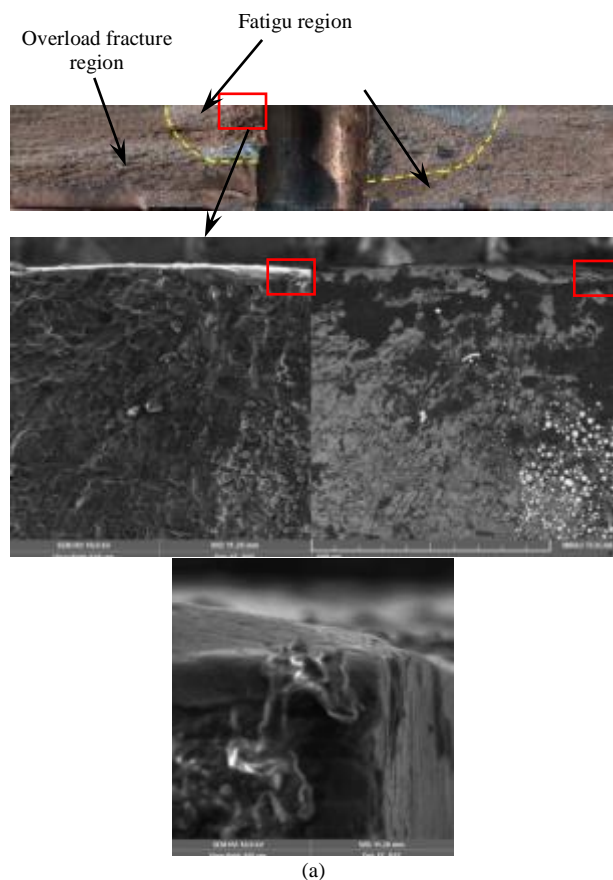
نهایی زبر ناشی از اضافه بار مکانیکی که به صورت تیره تر می باشد. به منظور ارائه دید واضح تر مقاطع شکست و مشخص کردن محل و نحوه شروع ترک خستگی و همچنین منطقه گسترش ترک خستگی برای دو مورد از نمونه ها عکس هایی که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی گرفته شده است در شکل 11 نشان داده شده است.

### 3- شبیه سازی عددی

#### 1-3- مدل المان محدود

برای تحلیل عددی تنش و کرنش به روش المان محدود از نرم افزار انسیس<sup>1</sup> نسخه 12 استفاده شده است [15]. برای صرفه جویی در زمان حل مسئله و با توجه به اینکه مدل دارای دو محور تقارن می باشد، فقط یک چهارم مدل شبیه سازی شده است. برای مش بندی مدل از المان های سه بعدی سولید<sup>2</sup> 185 استفاده شده است که دارای 8 گره و هر گره دارای سه درجه آزادی می باشد. نوع تماس بکار گرفته شده در مدل سازی از نوع تماس قابل انعطاف با سطح قابل انعطاف و مدل اصطکاک کولمب می باشد. برای شبیه سازی مسئله تماس، المان های تماس بکار گرفته شده اند. این المان ها باعث می شود که سطوح تماس بدون وجود تداخل (نفوذ) با یکدیگر امکان تبادل نیرو داشته باشند. سه جفت تماس در مدل تعریف شده است. تماس بین سطح پیچ با سطح داخل سوراخ، تماس بین سر پیچ با سطح بالایی ورق و سومین جفت بین سطح واشر با سطح زیرین ورق تعریف شده است.

برای مدل کردن رفتار ورق از نتایج به دست آمده از آزمون کشش ساده آلومینیم 7075-T6 استفاده شده است. رفتار ماده به صورت الاستیک-پلاستیک با سخت شونده گی سینماتیکی در نظر گرفته شده و در شکل 1 نشان



<sup>1</sup> ANSYS  
<sup>2</sup> Solid

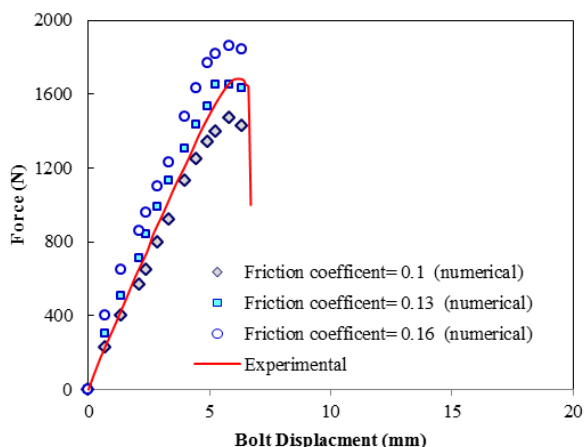


Fig. 13 Bolt fitting force in experimental and simulations

شکل 13 نیروی اعمالی به پیچ در حین تداخل بصورت تجربی و عددی

0.288 در نظر گرفته شده است.

#### 4- نتایج مدل المان محدود

در شکل 14 توزیع تنش های ناشی از فرایند تداخل را برای نسبت تداخل 3.5 درصد و باز توزیع آن بعد از اعمال نیروی فشاری در سه صفحه ی ورودی، میانی و خروجی نشان داده شده است. همانطور که در شکل 14 نشان داده شده است تنش مماسی ناشی از اعمال بین در طول ضخامت صفحه غیر یکنواخت می باشد. توزیع تنش ناشی از تداخل در لبه های بالایی و پایینی به صورت کششی و در لبه ی میانی به صورت فشاری می باشد. بعد از اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه های دارای تداخل توزیع تنش در نواحی دور از سوراخ تقریباً یکسان با قبل از اعمال نیروی فشاری می باشد. اما توزیع تنش در نقاط نزدیک سوراخ به شدت تغییر می کند. با افزایش نیروی فشاری پیچ و مهره این تغییرات بیشتر می شود.

اعمال گشتاور بر روی نمونه ها باعث کاهش مقادیر تنش کششی ایجاد شده در صفحات ورودی و خروجی شده است و مقادیر تنش فشاری در صفحه ی میانی قدری افزایش یافته است (مقادیر تنش فشاری تر شده است). مقادیر کاهش تنش برای گشتاور 7 Nm قابل توجه تر از گشتاور 3.5 Nm می باشد. در هر دو گشتاور اعمالی به دلیل وجود ناحیه برآمدگی در طول عملیات تداخل در صفحه خروجی، کاهش مقادیر تنش در صفحه خروجی بیشتر است. هنگام اعمال گشتاور بر روی نمونه های تداخل، یک ناحیه تماس محلی بین ناحیه ی برآمده و مهره ایجاد شده است و این امر موجب کاهش قابل توجهی مقادیر تنش در سطح خروجی می شود.

جهت آگاهی از توزیع تنش حاصل از اثر اعمال تنش ماکزیمم به ورق پیچ شده توزیع تنش در هر سه صفحه ی ورودی، میانی و خروجی کوچک ترین سطح مقطع برای بار 60 کیلو نیوتن در شکل 15 نشان داده شده است. در حالت کلی این نمودارها تأثیر مثبت تداخل و اعمال نیروی فشاری پیچ و مهره (در نزدیکی های لبه ی سوراخ) پس از بارگذاری را نشان می دهند. چنانچه نمودارهای شکل 15 نشان می دهد مقادیر تنش در نمونه های IF و BIF در هر سه صفحه در مقایسه با نمونه های OH کاهش محسوسی داشته است. در صفحه ورودی کمترین مقدار تنش در لبه ی سوراخ در نمونه هایی که تحت اعمال نیروی فشاری قرار گرفته اند به دست آمده است. بطوری که با افزایش مقدار نیروی فشاری، مقدار کاهش تنش بیشتر شده است. در صفحه میانی مقادیر تنش برای نمونه های IF و BIF با هم تقریباً یکسان می باشد. در

فرآیند تداخل ابتدا پیچ به صورت هم مرکز در تماس با لبه سوراخ صفحه قرار گرفته است. با جابجایی گره های بالای پین، پین در امتداد محور به سمت پایین حرکت داده می شود. پین به اندازه 11 میلی متر به سمت پایین حرکت داده می شود و در داخل سوراخ باقی می ماند. پس از انجام فرایند تداخل به عنوان بارگذاری مرحله اول و پس از انجام تنظیمات و تغییرات مربوط، نیروی فشاری در بارگذاری مرحله دوم بر روی مدل اعمال می شود. برای اعمال نیروی فشاری از المان پری تنشن 179 استفاده شده است. با استفاده از این المان دو مقدار نیروی فشاری بر روی نمونه های تداخل اعمال شده است. مرحله ی بعدی اعمال بار ماکزیمم محوری کششی به صورت شبه استاتیکی در جهت محور طولی و دور از سوراخ در انتهای سمت راست مدل (بارگذاری) و سپس اعمال بار مینیمم محوری بر روی نمونه می باشد (باربرداری).

لازم به توضیح می باشد که جهت اطمینان از درستی روش المان محدود ابتدا این مسئله برای حالت دو بعدی که توسط محققین قبلی مانند وانگ [16] بصورت ریاضی حل شده است، شبیه سازی شده و با روش ریاضی موجود مقایسه گردیده است و پس از اطمینان از درستی مدل دو بعدی، مدل سازی سه بعدی انجام شده است. برای اطمینان از درستی مدل سه بعدی از مدل های قبلی که فقط اثر یکی از تکنیک ها را بصورت مجزا که بصورت سه بعدی بررسی کرده اند [16] کمک گرفته شده است. در این مدل سازی همگرایی جواب ها از نظر تعداد المان های مورد استفاده کنترل شده است.

#### 3-2- تعیین ضریب اصطکاک بین سطوح تماس

تخمین ضریب اصطکاک مابین سطح پیچ و دیواره ی سوراخ بر مبنای نیروی اعمالی به پیچ در حین عملیات تداخل انجام شده است. در پژوهش های پیشین ضریب اصطکاک بین سطح داخلی پیچ و دیواره سوراخ برابر با 0.1 فرض شده است [6,5]. در این پژوهش با استفاده از سعی و خطا مقادیر مختلفی برای ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده و نیروی مقاوم در برابر عبور پیچ از داخل سوراخ در چندین مرحله استخراج شده است. نتایج برای چند مقدار ضریب اصطکاک به همراه نیروی ثبت شده در آزمایش تجربی در شکل 13 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 13 پیداست مدلی که ضریب اصطکاک آن برابر با 0.13 است، تخمین درست تری از نیروی اعمالی به پیچ به دست می دهد. از این رو ضریب اصطکاک ما بین سطح داخلی پیچ و دیواره سوراخ برابر با 0.13 در نظر گرفته شد. همچنین ضریب اصطکاک بین سطح واشر و سطح ورق بر اساس نتایج به دست آمده در [4] برابر

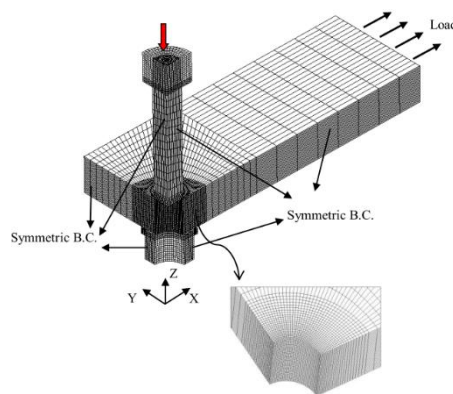
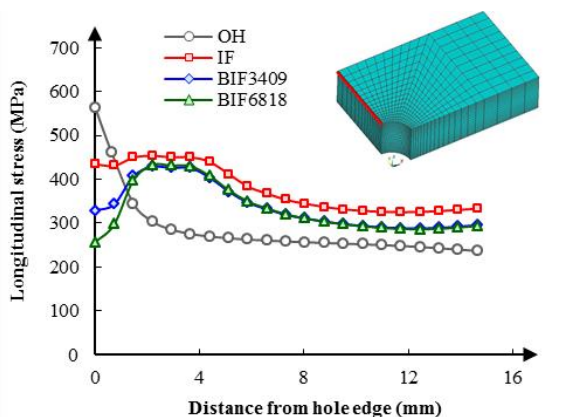


Fig. 12 Finite element model

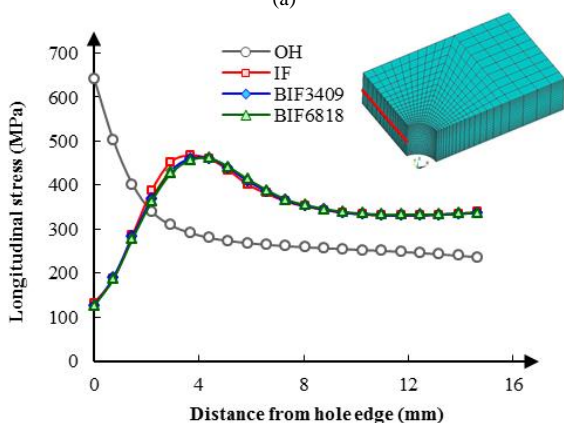
شکل 12 مدل المان محدود

صفحه در مقایسه با دو صفحه دیگر برای جوانه زنی و گسترش ترک مستعدتر می باشد. در نمونه های بدون عملیات، آزمایش های تجربی نشان می دهد که ایجاد و انتشار ترک از لبه میانی سوراخ بوده است که نتایج تحلیل تنش نیز نشان دهنده وقوع بیشینه مقدار تنش محوری در این محل برای نمونه های مذکور می باشد.

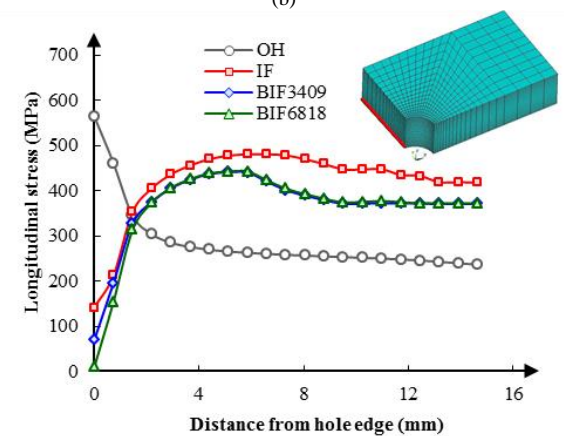
تأثیر بارگذاری و باربرداری دوردست بر روی میدان پیش تنش به صورت تأثیر آن بر روی تنش میانگین  $s_m$  و دامنه ی تنش  $s_a$  مورد بررسی قرار گرفته است. این مقادیر بر اساس روابط زیر به دست می آید.



(a)



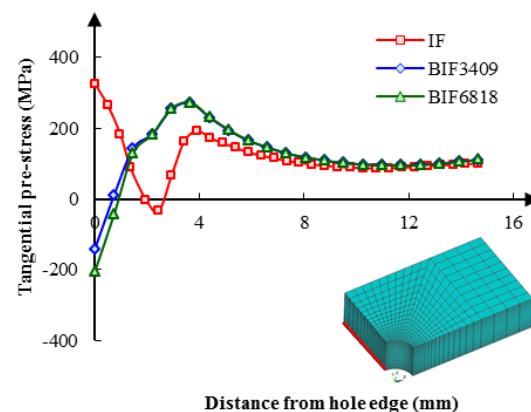
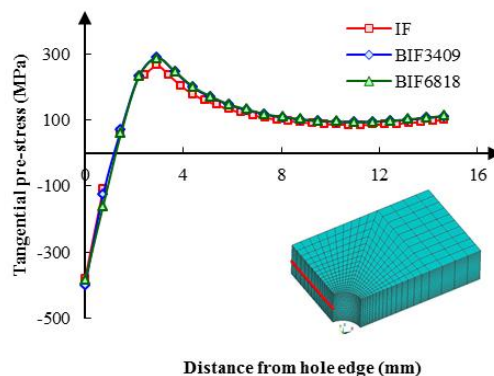
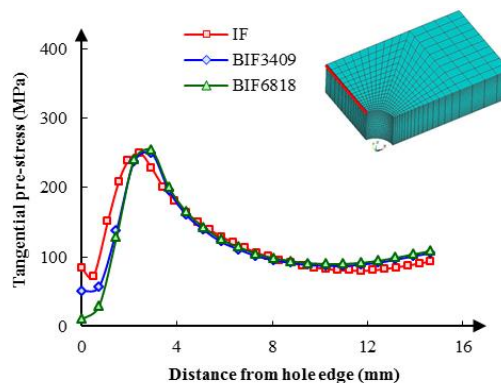
(b)



(c)

**Fig. 15** Distributions of longitudinal stress (i.e. in X-direction) result in at load 60kN (a) Entrance plane (b) Mid plane (c) Exit plane.

شکل 15 توزیع تنش طولی ناشی از بارگذاری 60 kN (الف) صفحه ورودی (ب) صفحه میانی (ج) صفحه خروجی

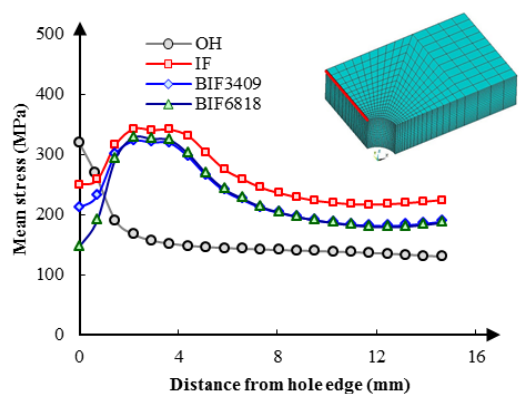


**Fig. 14** Distributions of tangential pre-stress (i.e. in X-direction) results in the interference fit and its redistribution after bolt clamping force (a) Entrance plane (b) Mid plane (c) Exit plane.

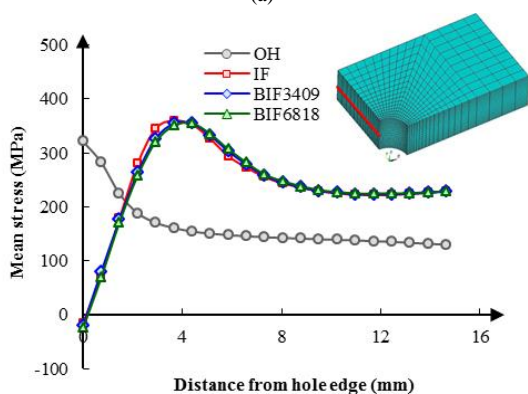
شکل 14 توزیع تنش مماسی ناشی از تداخل و توزیع مجدد آن پس از اعمال نیروی فشاری (الف) صفحه ورودی (ب) صفحه میانی (ج) صفحه خروجی.

صفحه خروجی نتایج حاکی از آن است که اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه های دارای تداخل باعث کاهش محسوس تنش در این نمونه ها در مقایسه با نمونه های IF شده است. همچنان که قبلاً ذکر شد در نمونه های دارای تداخل که تحت نیروی فشاری قرار گرفته اند، نیروی فشاری حاصل از بستن پیچ و مهره در سطح پایینی (صفحه ی خروجی) بر روی منطقه برآمده متمرکز شده و تأثیر بیشتری در کاهش تنش نهایی هنگام اعمال بارگذاری در صفحه ی خروجی دارد. نتایج به دست آمده تصدیق کننده نتایج آزمایش های تجربی در مورد محل ایجاد و انتشار ترک می باشند. نتایج تجربی نشان می دهد که در نمونه های IF و BIF ترک های خستگی از لبه ورودی ایجاد و گسترش یافته اند. نتایج تحلیل تنش نیز نشان می دهد که بیشترین مقدار تنش هنگام اعمال بارگذاری سیکلی در صفحه ورودی به دست می آید و این

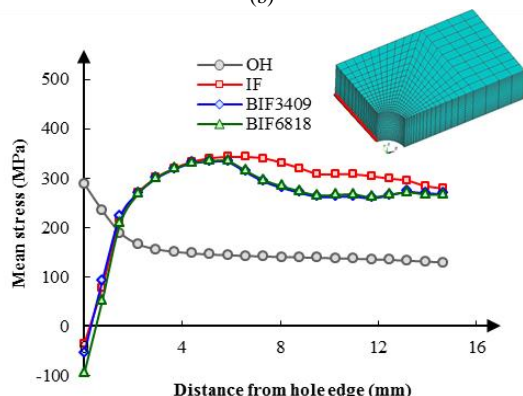




(a)



(b)



(c)

**Fig. 17** The distribution of mean stress at smallest cross section for load 60 kN (a) Entrance plane (b) Mid plane (c) Exit plane

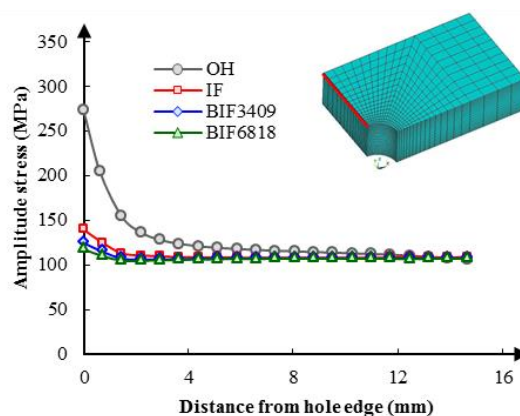
شکل 17 توزیع تنش میانگین تحت بار اعمالی 60 kN در کوچکترین سطح مقطع (الف) صفحه ورودی (ب) صفحه میانی (ج) صفحه خروجی

بین ورق دارای تداخل و ورقی که بعد تداخل تحت نیروی فشاری پیچ و مهره قرار گرفته مشاهده نمی شود. بستن پیچ و مهره هم موجب کاهش میانگین تنش ها و هم منجر به کاهش دامنه تنش شده است. اعمال نیروی فشاری بر نمونه ها موجب ایجاد پیش تنش فشاری شده و بیشترین تأثیر پیش تنش فشاری کاهش مقادیر تنش میانگین می باشد. چنانچه نتایج نشان می دهد کاهش تنش میانگین در مقایسه با کاهش دامنه تنش، قابل توجه تر می باشد. همچنین مشاهده می شود که کاهش تنش میانگین و دامنه تنش با افزایش نیروی فشاری، افزایش می یابد. بیشترین کاهش دامنه تنش و تنش میانگین در صفحه خروجی اتفاق افتاده است. میزان کاهش مقادیر دامنه و میانگین تنش برای نیروی فشاری بزرگ تر، بیشتر می باشد.

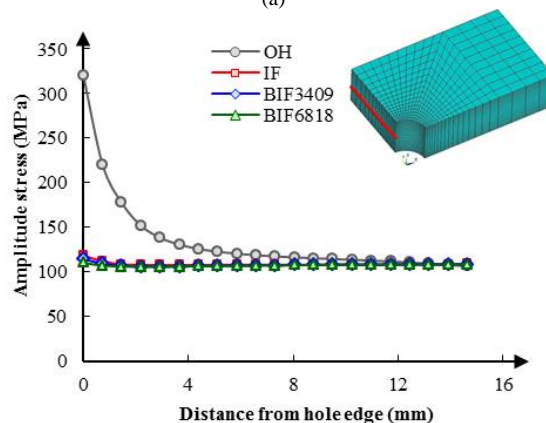
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4)$$

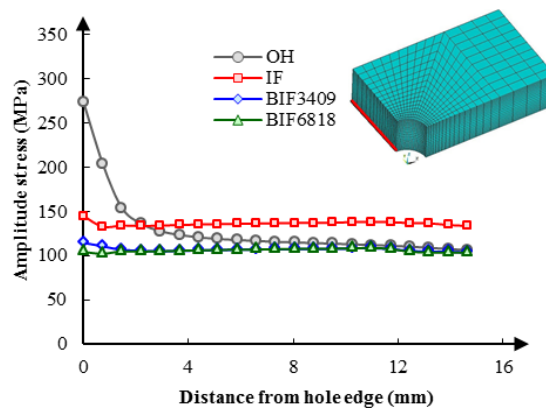
بدین منظور تغییرات تنش میانگین و دامنه تنش روی سه صفحه ورودی، میانی و خروجی در کمترین سطح مقطع ورق برای تنش اعمالی 265 مگاپاسکال به ترتیب در شکل 16 و 17 نشان داده شده است. همچنان که از نمودارها پیداست، تأثیر بستن پیچ و مهره بیشتر بر روی صفحات ورودی و خروجی مشاهده می شود، در حالی که در صفحه میانی تفاوت چندانی ما



(a)



(b)



(c)

**Fig. 16** The distribution of stress amplitude at smallest cross section for load 60 kN (a) Entrance plane (b) Mid plane (c) Exit plane

شکل 16 توزیع دامنه تنش تحت بار اعمالی 60 kN در کوچکترین سطح مقطع (الف) صفحه ورودی (ب) صفحه میانی (ج) صفحه خروجی

5- بحث

با توجه به پژوهش انجام یافته نتایج تجربی و عددی حاکی از افزایش و تأثیر مثبت تداخل در عمر خستگی نمونه ها می باشد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که فرآیند تداخل در بارهای پایین اعمالی در بیشترین حالت حدود 500 درصد باعث بهبود عمر خستگی شده است. سه تأثیر مهم فرآیند تداخل در بهبود عمر خستگی بدین صورت می باشد:

دلیل اول ایجاد پیش تنش محیطی مؤثر در اطراف سوراخ می باشد که این پیش تنش باعث کاهش دامنه تنش در اطراف سوراخ می شود. دلیل دوم قرار گرفتن پین در داخل سوراخ سبب ایجاد یک مسیر انتقال بار می شود و زمانی که صفحه تحت بار سیکلی قرار می گیرد، مقدار تنش سیکلی محلی در اطراف سوراخ کاهش یابد. دلیل سوم کاهش ضریب تمرکز تنش در اطراف سوراخ می باشد که این عمل موجب به تأخیر افتادن شروع ترک و همچنین گسترش ترک شده و در نتیجه باعث افزایش عمر خستگی می شود. تأثیر فرآیند تداخل بر روی ضریب تمرکز تنش در یک سوراخ پیچ (پین) شده بر حسب انتقال باری که از طریق پیچ (پین) در هنگام بارگذاری ورق انتقال می یابد، می توان توضیح داد. زمانی که نمونه بصورت سوراخ باز می باشد بار اعمالی باعث تغییر فرم اطراف سوراخ می شود، این تغییر شکل سبب ایجاد ضریب تمرکز تنش در اطراف سوراخ می گردد. در نمونه های تحت تداخل قسمتی از بار از طریق پیچ انتقال می یابد و از این رو ضریب تمرکز تنش کوچک تری در اطراف سوراخ ایجاد می شود.

بدلیل متفاوت بودن حالت تنش در امتداد ضخامت ورق و ورود تدریجی پیچ به داخل سوراخ توزیع تنش در امتداد ضخامت ورق در فرآیند تداخل غیر یکنواخت می باشد. در صفحات ورودی و خروجی به خاطر کم بودن قید مادی حالت تنش به صورت تنش صفحه ای می باشد این در حالی است که در صفحه ای میانی بدلیل قید مادی زیاد و ضخامت نسبتاً زیاد ورق شرایط کرنش صفحه ای حاکم است. هنگام اعمال گشتاور به پیچ و مهره، یک نیروی کششی به پیچ وارد شده و پیچ و مهره را به سمت هم می کشد. این عمل موجب می گردد که ورق تحت فشار قرار گرفته و پیش تنش فشاری غیریکنواخت دیگری در نزدیکی سوراخ ایجاد گردد. پیش تنش فشاری ناشی از اعمال گشتاور در صفحات ورودی و خروجی دارای بیشترین مقدار بوده و در صفحه ای میانی دارای مقادیر کمتری می باشد. میدان تنش ناشی از بستن پیچ و مهره در اثر کرنش های سطحی حاصل از فشار مهره و سر پیچ می باشد. هنگام اعمال نیروی فشاری پیچ و مهره بر نمونه های دارای تداخل تنش فشاری ناشی از اعمال پیچ و مهره به پیش تنش ناشی از تداخل اضافه می شود. چنانچه شکل 18 نشان می دهد اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه های دارای تداخل از شدت غیر یکنواختی مقادیر تنش کم کرده و توزیع تنش در امتداد ضخامت بصورت یکنواخت تر شده است. این مسئله به عنوان یکی از مهم ترین عوامل بهبود عمر قطعات دارای تداخل همراه با نیروی فشاری پیچ و مهره، می باشد.

باید اشاره شود که در نمونه های دارای تداخل تحت نیروی فشاری کاهش مقادیر تنش در صفحه ای خروجی در مقایسه با دو صفحه ورودی و میانی بسیار قابل توجه می باشد. کاهش تنش در صفحه ای خروجی به دو دلیل می باشد. دلیل اول مربوط به تمرکز نیروی فشاری روی ناحیه برآمدگی اطراف سوراخ در صفحه ای خروجی به جا مانده از اعمال فرآیند تداخل می باشد. دلیل دوم مربوط به بزرگ تر بودن نیروی فشاری در سمت مهره (صفحه ای خروجی) در مقایسه با قسمت سر پیچ (صفحه ای ورودی) می باشد. لازم به توضیح است در نمونه بدون تداخل (سوراخ دارای لقی) نیروی فشاری

در سمت سر پیچ و در سمت مهره با هم یکسان است و تفاوتی بین اینکته گشتاور از سمت سر پیچ و یا از سمت مهره اعمال شود وجود ندارد. با این حال، در نمونه های دارای تداخل شرایط کاملاً متفاوت است. در این نمونه ها به علت تغییر شکل به وجود آمده ناشی از تداخل نیروی فشاری در سمت مهره (محل اعمال گشتاور) بیشتر می باشد.

تأثیر اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه های دارای تداخل بصورت کاهش مقادیر دامنه تنش و تنش میانگین در صفحات ورودی و خروجی می باشد. برای نمونه در تنش اعمالی 265 مگاپاسکال بیشترین کاهش تنش میانگین در صفحه ای ورودی اتفاق افتاده است. بطوری که مشاهده می شود در نمونه های BIF6818 تنش میانگین در حدود 60 درصد و در نمونه های BIF3409 در حدود 20 درصد در مقایسه با نتایج نمونه های IF کاهش یافته است. این در حالی است که بیشترین کاهش دامنه تنش در صفحه ای خروجی رخ داده است. در نمونه های BIF6818 میزان کاهش دامنه تنش در حدود 20 درصد و در نمونه های BIF3409 در حدود 10 درصد می باشد. در صفحه ای میانی مقادیر دامنه تنش و تنش میانگین در نمونه های IF و BIF تفاوت چندانی با هم ندارد که دلیل آن مربوط به ضخامت نسبتاً زیاد ورق می باشد. هنگام اعمال بارگذاری سیکلی تماس اصطکاکی بین واشر و سطح ورق به وجود می آید که این تماس اصطکاکی باعث کاهش دامنه تنش در صفحات خروجی و ورودی در نمونه های BIF می شود. تماس اصطکاکی با از بین بردن کرنش سطحی در سطوح تماس اثر بارگذاری دور دست را کاهش داده و از این رو باعث کاهش دامنه تنش و کرنش می شود. همچنین تماس اصطکاکی بین واشر و سطح ورق باعث محدود شدن بازشدگی دهانه ترک و یا سطوح ترک می شود. این عمل موجب کاهش ضریب شدت تنش در نوک ترک شده و از این رو باعث تأخیر در گسترش ترک شده و عمر خستگی را افزایش می دهد.

چنانچه نتایج تجربی نشان می دهد در نمونه های IF ترک از صفحه ای ورودی شروع و گسترش می یابد و این صفحه در برابر شروع ترک آسیب پذیر می باشد. دامنه تنش و تنش میانگین دو عامل بسیار تأثیرگذار در شروع و گسترش ترک خستگی می باشند. کاهش مقادیر دامنه تنش و تنش میانگین باعث به تعویق انداختن جوانه زنی ترک و کاهش رشد ترک شده و در نتیجه عمر خستگی را افزایش می دهند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد در نمونه های BIF در صفحه ای ورودی مقادیر دامنه تنش و تنش میانگین

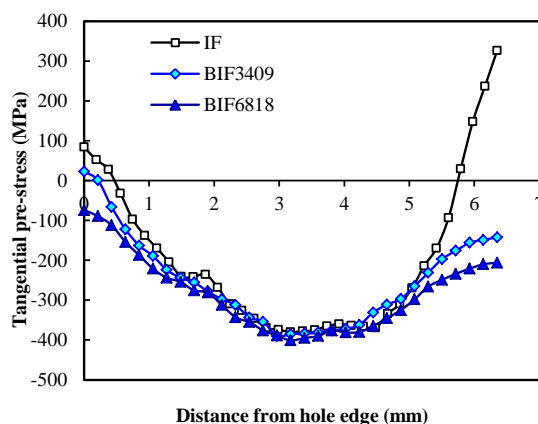


Fig. 18 The distribution of tangential stress through the thickness at smallest cross section at the hole edge

شکل 18 توزیع تنش مماسی در امتداد ضخامت کوچک ترین سطح مقطع در لبه سوراخ

- باز توزیع پیش‌تنش بصورت یکنواخت‌تر در امتداد ضخامت ورق و همچنین تأثیر تماس اصطکاکی بین سطوح واشر و ورق مهم‌ترین دلایل بهبود عمر در نمونه‌های BIF می‌باشند.
- اعمال نیروی پیش‌بار باعث کاهش مقادیر تنش میانگین در دو صفحه ورودی و خروجی شده است. بیشترین کاهش دامنه تنش و تنش میانگین در صفحه خروجی اتفاق افتاده است. میزان کاهش مقادیر دامنه و میانگین تنش برای نیروی فشاری بزرگ‌تر، بیشتر می‌باشد
- سطح مقطع شکست نشان می‌دهد که ترک‌های خستگی در نمونه‌های بدون تداخل از دو طرف سوراخ از صفحه‌ی میانی شروع شده و گسترش می‌یابد. در نمونه‌های دارای تداخل و همچنین در نمونه‌هایی که تحت نیروی فشاری قرار گرفته‌اند ترک از لبه‌ی ورودی شروع شده و در امتداد ضخامت ورق گسترش یافته است. در نمونه‌های دارای تداخل تحت نیروی فشاری، شروع و رشد ترک از صفحه‌ی ورودی در موقعیت دورتر از لبه سوراخ اتفاق می‌افتد. در این نمونه‌های دارای تداخل تحت نیروی فشاری شروع و رشد ترک خستگی در سطح خروجی نیز مشاهده می‌شود. با این حال، ناحیه رشد ترک در صفحه‌ی خروجی در مقایسه با صفحه ورودی قابل توجه نیست. موقعیت شعاعی محل ایجاد ترک در نمونه‌هایی که تحت نیروی فشاری قرار گرفته‌اند به سمت جهت بارگذاری انتقال یافته است.

#### 7- فهرست علائم

A	سطح مقطع
D	قطر پین (mm)
E	مدول الاستیسیته (GPa)
$F_{cl}$	نیروی فشاری
I	نسبت تداخل
d	قطر پیچ

#### علائم یونانی

$\sigma_a$	دامنه تنش محلی
$\sigma_m$	تنش میانگین محلی
$\sigma_{max}$	ماکزیمم تنش محلی
$\sigma_{min}$	مینیمم تنش محلی

#### 8- مراجع

- [1] T. Chakherlou, J. Vogwell, A novel method of cold expansion which creates near-uniform compressive tangential residual stress around fastener holes, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, pp. 343-351, 2004.
- [2] M. Burlat, D. Julien, M. Levesque, T. Bui-Quoc, M. Bernard, Effect of local cold working on the fatigue life of 7475-T7351 aluminium alloy hole specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 8, pp. 2042-2061, 2008.
- [3] A. Lanciotti, C. Polese, The effect of interference-fit fasteners on the fatigue life of central hole specimens, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 28, No. 7, pp. 587-597, 2005.
- [4] T. Chakherlou, R. Oskouei, J. Vogwell, Experimental and numerical investigation of the effect of clamping force on the fatigue behaviour of bolted plates, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 15, No. 5, pp. 563-574, 2008.
- [5] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, J. Vogwell, Experimental and numerical investigations into the effect of an interference fit on the fatigue life of double shear lap joints, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 7, pp. 2066-2080, 2009.
- [6] T. Chakherlou, H. Taghizadeh, A. Aghdam, Experimental and numerical comparison of cold expansion and interference fit methods in improving fatigue life of holed plate in double shear lap joints, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 29, No. 1, pp. 351-362, 2013.

بصورت قابل توجهی کاهش یافته است. کاهش مقادیر دامنه تنش و تنش میانگین در این صفحه تأثیر بسزایی در به تأخیر انداختن شروع و همچنین کاهش رشد ترک دارد. بر اساس نتایج المان محدود می‌توان انتظار داشت که نمونه‌های BIF بهبود عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های IF داشته باشند که نتیجه به دست آمده مطابق با نتایج تجربی به دست آمده است. چنانچه نتایج تجربی به دست آمده نشان می‌دهد نمونه‌هایی که تحت نیروی فشاری قرار گرفته‌اند دارای بیشترین عمر بوده و با افزایش نیروی فشاری عمر خستگی بیشتر شده است.

در نمونه‌های بدون عملیات ترک‌های خستگی از لبه‌ی میانی سوراخ شروع و گسترش یافته‌اند نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها بیشترین دامنه تنش در صفحه‌ی میانی به وجود آمده است، از این‌رو با توجه به بالا بودن دامنه تنش ترک از این صفحه آغاز شده است. انجام عملیات تداخل بطوری که روی نمونه‌ها باعث ایجاد پیش‌تنش در اطراف سوراخ شده است، پیش‌تنش ایجاد رفتار خستگی نمونه‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. چنانچه نتایج شکل 16 و 17 نشان می‌دهد در نمونه‌های تحت تداخل دامنه تنش و تنش میانگین در صفحه ورودی در مقایسه با دو صفحه دیگر (صفحه‌ی میانی و خروجی) دارای مقادیر بیشتری می‌باشد و از این‌رو احتمال شروع و جوانه‌زدن ترک از صفحه ورودی بالاتر می‌باشد. نتایج تجربی هم نشان می‌دهد که در نمونه‌های تحت تداخل ترک از صفحه‌ی ورودی جوانه‌زده و شروع شده است. علیرغم اینکه بعد از بستن پیچ و مهره بر روی قطعات دارای تداخل از شدت غیر یکنواختی توزیع پیش‌تنش کاسته شده، صفحه‌ی ورودی ورق همچنان دارای بیشترین مقادیر دامنه تنش و همچنین تنش میانگین می‌باشد. علاوه بر این بدلیل خستگی سایشی در صفحات ورودی و خروجی در نمونه‌های تحت نیروی فشاری پیچ و مهره ترک از صفحه‌ی خروجی شروع شده است.

#### 6- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از انجام پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:

- آزمایش‌های خستگی بر روی نمونه‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیم AL-7075-T6 در بارهای مختلف اعمالی انجام شده است. آزمایش‌های خستگی نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای تداخل و نمونه‌هایی که تحت نیروی پیش‌بار قرار گرفته‌اند افزایش عمر خستگی قابل توجهی در مقایسه با نمونه‌های بدون عملیات دارند. بهبود عمر در بارهای پایین‌تر بیشتر از بارهای بالاتر می‌باشد
- نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد اعمال نیروی پیش‌بار بر نمونه‌های تداخل (IF) باعث تغییر رفتار خستگی نمونه‌ها و بهبود عمر خستگی می‌شود. نمونه‌هایی که تحت نیروی پیش‌بار بالاتری قرار گرفته‌اند بهبود عمر خستگی بیشتری را نشان می‌دهند. بطوری که بهبود عمر نمونه‌های BIF6818 در حدود 7 برابر عمر نمونه‌های IF می‌باشد.
- برای توجیه و بررسی رفتار خستگی و افزایش عمر خستگی نمونه‌ها از شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد که اعمال پیش‌بار باعث باز توزیع پیش‌تنش ناشی از تداخل شده و باعث یکنواخت‌تر شدن توزیع پیش‌تنش در امتداد ضخامت صفحه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اعمال گشتاور بر روی نمونه‌ها باعث کاهش مقادیر تنش کششی ایجاد شده در صفحات ورودی و خروجی شده است این در حالی است که مقدار تنش فشاری در صفحه‌ی میانی دارای تغییرات بسیار کمی می‌باشد.

- Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 18, No. 1, pp. 47-63, 1995.
- [12] A. Özdemir, R. Hermann, Effect of expansion technique and plate thickness on near-hole residual stresses and fatigue life of cold expanded holes, *Journal of Materials Science*, Vol. 34, No. 6, pp. 1243-1252, 1999.
- [13] S. Ismonov, S. Daniewicz, J. Newman, M. Hill, M. Urban, Three dimensional finite element analysis of a split-sleeve cold expansion process, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 131, No. 3, pp. 031007, 2009.
- [14] K. Iyer, C. Rubin, G. Hahn, Influence of interference and clamping on fretting fatigue in single rivet-row lap joints, *Journal of Tribology*, Vol. 123, No. 4, pp. 686-698, 2001.
- [15] ANSYS Release 12.0 Documentation, Ansys, Inc., Canonsburg, PA, 2008.
- [16] G. Wanlin, Elastic-plastic analysis of a finite sheet with a cold-worked hole, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 46, No. 3, pp. 465-472, 1993.
- [7] R. Oskouei, T. Chakherlou, Reduction in clamping force due to applied longitudinal load to aerospace structural bolted plates, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 325-330, 2009.
- [8] T. Chakherlou, B. Abazadeh, J. Vogwell, The effect of bolt clamping force on the fracture strength and the stress intensity factor of a plate containing a fastener hole with edge cracks, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 1, pp. 242-253, 2009.
- [9] J. Alegre, F. Gutiérrez-Solana, A. Aragón, A finite element simulation methodology of the fatigue behaviour of punched and drilled plate components, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, No. 5, pp. 737-750, 2004.
- [10] A. Aragon, J. Alegre, F. Gutierrez-Solana, Effect of clamping force on the fatigue behaviour of punched plates subjected to axial loading, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 2, pp. 271-281, 2006.
- [11] D. Ball, Elastic-plastic stress analysis of cold expanded fastener holes,