

## ارائه مدل عددی و بررسی اجزا سیستم اتصال Mero تحت بارگذاری فشاری و کششی

محمد رضا داودی<sup>۱</sup>، مهدی عبادی جامخانه<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - davoodi@nit.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری سازه - دانشگاه سمنان - mehdi.ebadi@students.semnan.ac.ir

### چکیده

به منظور در نظر گرفتن تاثیر اتصال در تحلیل سازه، رفتار آنها باید تحت بارگذاری های مختلف بررسی شود. در شبکه های دو لایه که مرسومترین عضو خانواده سازه های فضاکار هستند، نیروهای محوری نقش کلیدی را ایفا می کنند. در مطالعه حاضر به کمک روش اجزای محدود سه بعدی، اثرات نیروی فشاری و کششی روی اتصال مرو و رابطه ی سختی های اتصال و اجزا آن بررسی شده است. در این مدل با لحاظ نمودن ماهیت هندسی مارپیچی رزوه در ساخت مدل پیچ امکان شبیه سازی دقیق توزیع تنش در رزوه های مختلف فراهم شده است. رابطه نیرو- تغییر مکان برای سیستم اتصال مرو تحت بارگذاری کششی و فشاری تعیین شد. همچنین، نتایج بدست آمده از شبیه سازی المان محدود با نتایج آزمایش تجربی تطبیق بسیار مناسبی دارد. در پایان مشخص گردید که در هر دو حالت بارگذاری، عضو گوی زودتر وارد مرحله پلاستیک می شود.

**کلید واژه:** رابطه نیرو- تغییر مکان، شبکه دولایه، شبیه سازی المان محدود، تاثیر اتصال

### مقدمه

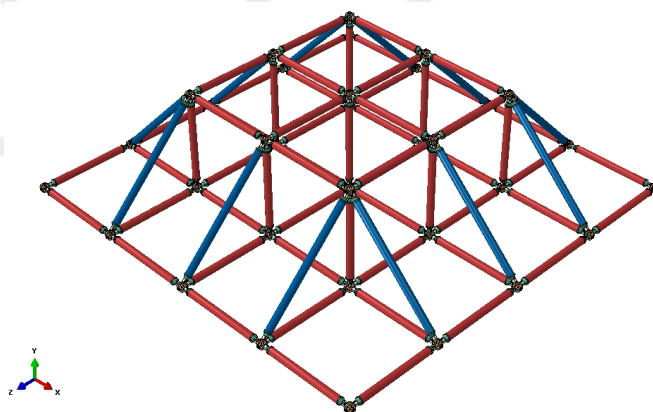
اتصال گویسان یکی از رایج ترین اتصالاتی است که در ساخت شبکه های دو یا چند لایه بکار می رود. مطالعات پیشین بر روی سازه های ساخته شده با این سیستم اتصالی نشان میدهد که پاسخهای بدست آمده از تحلیل بدون لحاظ نمودن اثر اتصال، تفاوت قابل توجهی با پاسخهای واقعی آن دارد. به همین سبب برای دستیابی به نتایج دقیقتر تحلیل بایستی اثر اتصال در تحلیل سازه لحاظ گردد. داودی و همکاران [۸] با ساخت یک شبکه دولایه با اتصال گویسان در مقیاس واقعی، رابطه بار - تغییر مکان چند گره از شبکه را در اثر اعمال یک بار متمرکز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که پاسخهای تحلیلی سازه بدون لحاظ کردن اثر اتصال تفاوت چشمگیری با پاسخهای واقعی آن دارند. آنها همچنین دریافتند که درجه سفت شدگی پیچها بر رفتار شبکه اثر می گذارد. پاشایی و همکاران [۷] با مطالعه تجربی بر روی همان شبکه نشان دادند که رفتار اتصال گویسان و درجه سفت شدگی پیچ آن تاثیر قابل توجهی بر روی پاسخهای دینامیکی شبکه دارد.

در تحلیل استاتیکی شبکه های دو یا چند لایه تحت بارهای اعمال شده بر گرهها (و در صورت برخورد محور طولی اعضای بهم متصل شده در مرکز گره مربوطه)، نیروی محوری غالب بوده و سایر نیروها و لنگرها نقش ثانویه دارند. جهت لحاظ کردن اثر اتصالات در تحلیل استاتیکی سازهها کافی است رابطه نیرو-تغییر مکان محوری آنها تعیین گردد. در یک اتصال گویسان نحوه انتقال نیرو در کشش و فشار متفاوت است. وجود اجزا مختلف با خصوصیات مکانیکی و هندسی متفاوت که بوسیله پیچ بهم متصل شده اند، وجود ناپیوستگی های میان اجزای تشکیل دهنده اتصال به همراه پیش تنیدگی ناشی از سفت شدگی پیچ و ماهیت مارپیچی رزوه پیچیدگی رفتار اتصال را تشدید می کنند. برای تعیین رابطه نیرو-تغییر مکان در هر اتصال، المانهای مختلف به گره وارد می شود و یک گوی تحت تاثیر نیروهای گوناگون قرار می گیرد.

داودی و همکاران [۲] با استفاده از تکنیک بهنگام سازی مدل اجزا محدود، رابطه نیرو- تغییر مکان یک اتصال گویسان را در یک شبکه دو لایه بدست آوردند. نتایج این مطالعه نشان داد که رابطه نیرو-تغییر مکان اتصال در شبکه شامل دو قسمت می باشد.

- قسمت اول که مربوط به مراحل اولیه بارگذاری است به صورت غیر خطی با تقعر به سمت بالا می باشد. این قسمت بیان کننده لقی اولیه و عمده عدم قطعیت‌های موجود در اتصال است.
- قسمت دوم که سختی بیشتری نسبت به قسمت اول دارد تقریباً همان رفتار اتصال به صورت مجزا را نشان می دهد.

تعیین قسمت اول رابطه نیرو- تغییر مکان یک اتصال گویسان در یک شبکه دولایه به دلیل عدم قطعیت‌های مختلف تنها از طریق بررسی رفتار اتصال در یک سازه امکان پذیر است. قسمت دوم رابطه نیرو-تغییر مکان را می توان با مطالعه یک اتصال مجزا به صورت تجربی و یا عددی تعیین نمود. فنگ و همکاران [۱] روی دو اتصال سوکت و گویسان تحت اثر لنگر خمشی با و بدون اعمال نیروی محوری آزمایش تجربی انجام دادند. نتیجه تحقیق آنها بدینصورت بود که سیستم‌های اتصال سوکت و گویسان دارای سختی خمشی خوبی هستند. Wierszycki و همکاران [۴] مدلی سه بعدی از بولت بکار رفته در صنعت دندانپزشکی تحت نیروی محوری و برشی و لنگر سفت شدگی ارائه کرد. آنها برای اینکار شکل مارپیچی رزوه را بصورت سه بعدی مدل کردند و توانستند سفت شدگی و شل شدگی بولت را مدل کنند. Florestan Mathurin و همکاران [۹] مدلی سه بعدی از بولت با رزوه ارائه کردند و آن را تحت لنگر سفت شدگی قرار دادند. چن و شین [۱۰] مطالعاتی را با روش المان محدود روی اتصال پیچی انجام دادند. در این مدلها اثرات اصطکاک و زاویه میل رزوه‌ها بر روی توزیع بار در هر رزوه بررسی شد. قاسمی و همکاران [۵] با مطالعه تجربی یک اتصال گویسان مجزا رابطه نیرو-تغییر مکان آن را در حالت کششی و با درجات سفت شدگی متفاوت بدست آوردند. از آنجائیکه کار قاسمی تنها در حالت تک محوره بود و اختلاف نتایج تجربی حاصل از آزمایش یک اتصال و تعمیم آن به رفتار سایر اتصالات در کل سازه و استفاده از این نتایج در کار عددی برای کل شبکه دو لایه، حاکی از این امر است که در واقعیت به بعضی از گره‌ها المان با تعداد و آرایش‌های گوناگون وارد می شود. به عنوان مثال به گره‌های کناری ۳ المان و میانی ۴ یا ۵ المان وارد می شود. (شکل ۱)



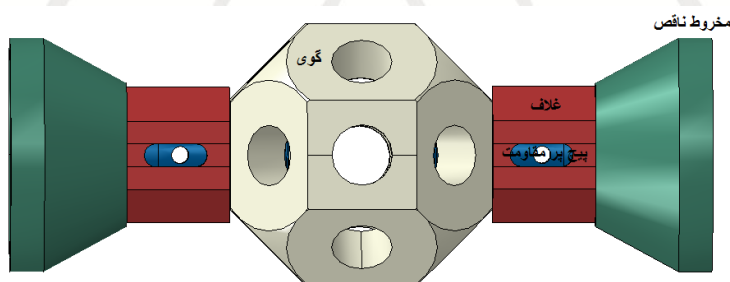
شکل ۱ - المانهای وارد شده به گره‌ها

به همین دلیل امکان انجام آزمایش تجربی برای هر کدام از حالات امری زمان بر، غیر اقتصادی و تا حدی ناممکن است. در سازه فضایی واقعی، اتصالات تحت تاثیر بارهای کششی و فشاری قرار می گیرند. از اینرو باید این نوع بارگذاری‌ها را برای

در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی اتصالات لحاظ شود. با توجه به این موضوع ایجاد یک آزمایشگاه مجازی که قابلیت تحلیل اتصال گویسان تحت بارگذاری متفاوت کششی و فشاری را داشته باشد، ضروری است. اعتبار سنجی مدل شبیه سازی شده با توجه به کار تجربی انجام گرفته در حالت تک محوری انجام گرفت. در کار حاضر به منظور درک بهتر از رفتار اجزای اتصال در حالات و آرایش های گوناگون بارگذاری مدلی سه بعدی شبیه سازی شده است. تعیین و بررسی رفتار اجزای مختلف یک اتصال گویسان تحت بارگذاری و تعیین محدوده اتصال، موضوع کار حاضر می باشد. با در نظر گیری رزوه های پیچ (و گوی) در این مدل، قابلیت مدل سازی انتقال تنش بین اجزای مختلف اتصال وجود داشت. رابطه نیرو-تغییر مکان اتصال گویسان در حالت های کشش و فشار به روش عددی بدست آمده است. نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه گردید.

#### ۱. سیستم اتصال MERO:

تاکنون انواع مختلفی از سیستم های گویسان پیش ساخته در جهان تولید شده است. اکثر این سیستم ها دارای اتصال پیچی هستند. سیستم اتصال مرو یک سیستم چند محوره است که تا ۱۴ عضو لوله ای به آن می تواند وارد شود. این سیستم متشکل از المان های لوله ای است که بوسیله سیستم اتصال مرو در یک گره بهم می رسند. شکل (۲) نمایی از این اتصال را نمایش می دهد.



شکل ۲. سیستم اتصال mero

سیستم kk (مرو) از یک کره توپر فولادی همراه با سوراخهای رزوه شده و اعضای لوله ای ساخته شده از فولاد تشکیل شده است. اعضای این سیستم مرکب از لوله و قطعه های مخروطی شکل (که به انتهای لوله جوش می شوند) و غلاف های آچارخور و پیچ رزوه شده می باشد. به منظور بهبود نشیمن غلاف های آچارخور بر روی گوی و بالا بردن کیفیت و کاهش میزان تیرانس، سطح تختی در اطراف سوراخ های رزوه شده گویها با استفاده از ماشین های تراش ایجاد می گردد.

#### ۱.۱. اجزاء سیستم اتصالی MERO

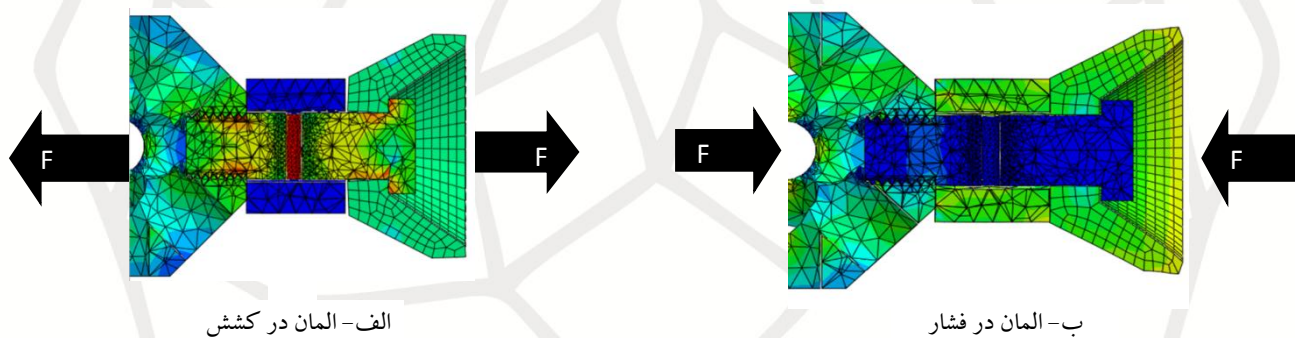
سیستم اتصالی MERO همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، از اجزای زیر تشکیل می گردد:

- گوی فلزی آهنگری شده با سوراخ های رزوه شده.
- قطعه مخروط ناقص انتهایی که به انتهای لوله جوش می شود.
- پیچ با مقاومت کششی بالا که از انتهای مخروط می گذرد و به داخل گوی پیچ می شود.

- غلاف که از آن جهت چرخاندن پیچ استفاده می‌شود (غلاف دو دریچه در دو سوی مخالف دارد).
- خار اتصال که از آن جهت مقید کردن پیچ به غلاف استفاده می‌شود. دریچه‌های روی غلاف جابجایی خار اتصال را مقدور می‌سازد و این جابجایی میزان نفوذ پیچ در گوی را نشان می‌دهد.

## ۲.۱. رفتار سیستم اتصالی MERO

اندرکنش بین المان‌های لوله‌ای و اتصالات در سازه‌های دولایه اغلب شامل اثرات کشش و فشار می‌باشد. همانطوری که قبلاً گفته شد نیروی غیر محوری در شبکه‌های دولایه معمولاً نقش ثانویه دارند بنابراین فقط به بررسی نیروهای محوری می‌پردازیم. کشش در المان لوله توسط مخروط انتهایی و پیچ به گوی منتقل می‌شود. این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده است. در این حالت پیچ تحت کشش بوده و غلاف غیر فعالی باشد. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، نیروی فشاری در المان از طریق مخروط انتهایی و غلاف به گوی منتقل می‌شود. در این حالت غلاف در فشار و پیچ غیر فعال می‌باشد.



الف- المان در کشش

ب- المان در فشار

شکل ۳- رفتار اتصال MERO در کشش و فشار

## ۲. مدلسازی اتصال مرو:

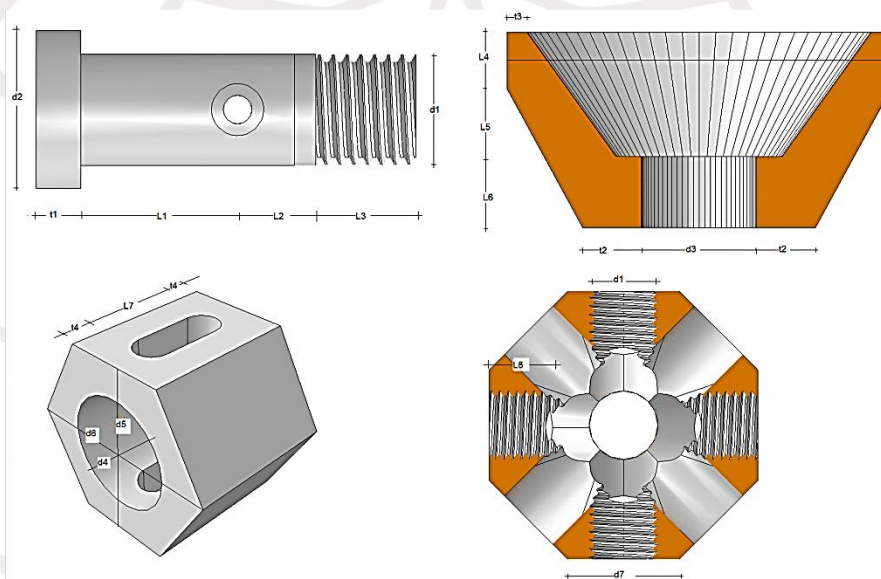
در سالهای اخیر، شبیه‌سازی‌های المان محدود بطور چشمگیری با پیشرفت تکنولوژی کامپیوتر و روشهای عددی فراگیر شده است. در نتیجه، روشهای عددی برای فرآیندهای خاص شبیه‌سازی مانند عملیات شکل دهی مواد، رولینگ و اشکال پیچیده هندسی مناسب هستند، زیرا آنها دقیق هستند و علاوه بر آن زمان محاسباتی را کاهش می‌دهند. شبیه‌سازی عددی شکل رزوه و بخش‌های مختلف اتصال که در این مقاله ارائه شده است با استفاده از نرم افزار Solidworks ۲۰۱۲ و تحلیل آن با کمک نرم افزار اجزا محدود ABAQUS 6.11 انجام گردیده است. ABAQUS نرم افزار پر قدرت المان محدودی است که بر پایه روش اجزا محدود برنامه ریزی شده است و برای طیف وسیع شبیه‌سازی‌ها از مسائل ساده خطی تا مسائل پیچیده غیرخطی را شامل می‌شود. در این مقاله از ABAQUS /Standard برای مدل شبیه‌سازی استفاده شده است. شایان ذکر است که آن بسیار مناسب برای حل مسائل شبه استاتیکی و دینامیکی سه بعدی با شرایط تماسی پیچیده و تغییر مکانهای زیاد مانند تماس رزوه‌ها با یکدیگر، هست.

۱.۲. شکل کلی رزوه پیچ و گوی:

از آنجاکه هیچ دستورالعملی برای موضوع تشکیل رزوه پیچ نیست، هندسه ی آنها و مونتاژشان اغلب از یک تولیدکننده به تولید کننده دیگر متفاوت است. با این وجود، این مطالعه تنها پیچهایی که رزوهشان با مشخصات ISO هستند، در نظر گرفته شده است. شکل اتصال در شکل ۴ و پارامترهای هندسی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ - مشخصات و ابعاد هندسی اعضای اتصال سیستم مرو

M20	بولت (mm)						مخروط (mm)						غلاف (mm)						گوی (mm)	
	L 1	L2	L3	d 1	t 1	d2	L 4	L 5	L6	t2	t3	d3	t4	L 7	d4	d5	d6	d7	L 8	
	28 .4	14.1 75	18.1 25	2 0	8	28. 7	1 0	1 2	12. 6	10. 4	3. 5	20.3 5	5.7 2	18 .7 5	11	35	40. 5	32. 5	21	

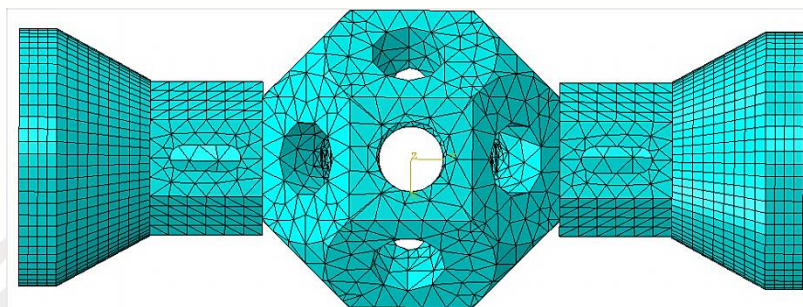


شکل ۵- پارامترهای اجزا اتصال سیستم مرو

۳. بارگذاری و شبیه سازی پارامترها:

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مدل استفاده شده در این مقاله ترکیبی از چهار المان است: یک پیچ با سطح مقطع دایره ای M8.8x20 که لنگر پیچشی به آن وارد می گردد، یک غلاف به طول ۳۰ میلیمتر، مخروط ناقص که با غلاف و پیچ در تماس است و بار محوری به آن وارد می شود و گوی با قطر خارجی ۸۰ میلیمتر. همچنین در آزمایش خمش از لوله ای با طول ۵۰۰ میلیمتر و قطر خارجی برابر با قطر خارجی مخروط انتهایی استفاده شد. باید اذعان داشت که مدل بصورت کامل، ۳۶۰ درجه، با تمام پیچیدگیهای هندسی و تقارن کامل مدلسازی گردید. باید گفت که مش بندی قطعات تا آنجائیکه ممکن بود بصورت درشت در نظر گرفته شد. چرا که با در نظر گرفتن مش بندی ریز می بایستی شاهد انجام تحلیل به مدت یک

هفته تا یک ماه بود. همچنین چون میزان تغییر مکان و تاثیر نیرو بر قطعات مختلف اتصال مدنظر بود، اندازه مش بندی تاثیر شگرفی در پاسخ مسئله نداشت.



شکل ۶- مدل مش بندی کل اتصال سیستم مرو

سطوح تماسی بین اجزا مختلف از نوع تماس عمومی و در تمام حالات تماسی از ضریب اصطکاک ۰,۱۴ و حالت **Hard Contact** استفاده شده است. برای برطرف کردن تداخل احجام هندسی در نواحی دارای شکستگی و رزوه از دستور **smoothing** در بخش اندرکنش ها استفاده شد. علاوه بر این تغییر مکان تنها در راستای دو عضو عمود بر هم تعریف شده است. با وجود این شرایط، پیچ و بقیه اعضا بصورت شکل پذیر و با رفتار واقعی در طول مونتاژ کردن، در نظر گرفته شدند. به تبع، زمان پردازش CPU افزایش پیدا میکند. اما با کاهش تعداد المان بدون آنکه بر نتیجه تحلیل تاثیری بگذارد، موضوع افزایش زمان برطرف شد. با این وجود، نکات و پارامترهای اصلی این مطالعه، بارگذاری افزایشی و اعمال نیرو در جهات مختلف هستند. موارد پارامترهای مونتاژ در جدول ۲ آمده است.

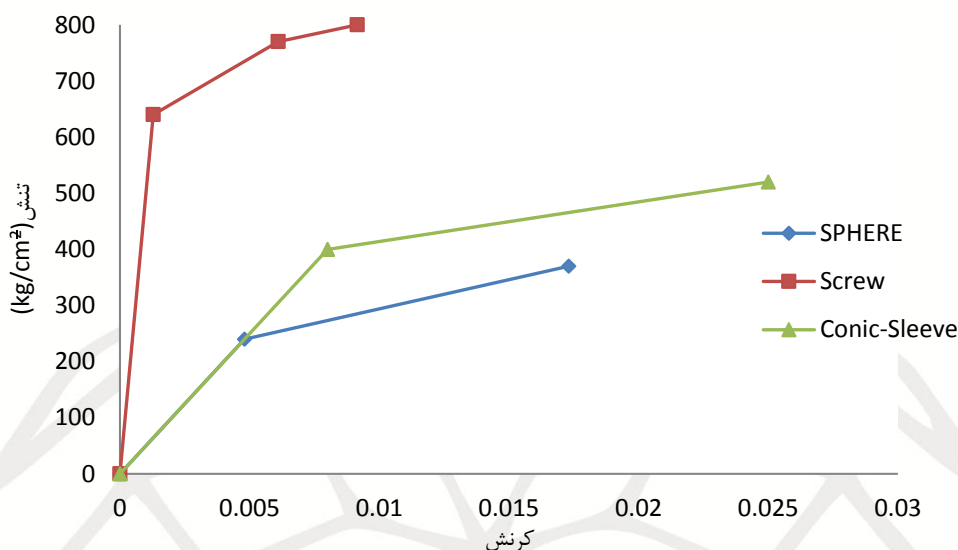
جدول ۲- پارامترهای بارگذاری

مدل	قطر(mm) سوراخ	نرخ سرعت (mm/s)	تغییر مکان اعمالی کششی (mm)	تغییر مکان اعمالی فشاری (mm)
Mero	۱۰,۸	۰,۱	۲	۱

از نظر محاسباتی یک مدل از رویدادهای شبه استاتیکی تحت **ABAQUS** مانند فرایند شکل گیری فلز در مدت زمان طبیعی خود غیر عملی است. به معنای واقعی کلمه میلیونها تلاش (increment) از افزایش زمان لازم است. بنابراین، لازم است برای افزایش سرعت این فرایند دنبال یک راه حل مقرون به صرفه بود. بارگذاری در حالات مختلف کشش و فشار به اتصال اعمال شده است.

#### ۴. خصوصیات مصالح:

برای مدلسازی خصوصیات مصالح فولادی اعضای اتصال، از ضریب پواسون ۰,۳ و مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ مگا پاسکال رفتار ارتجاعی- خمیری چند خطه با معیار تسلیم فون میسز و جانسون-کک، قانون جریان وابسته و قانون سخت شوندگی همسانگرد در نظر گرفته شده است. خصوصیات مصالح بکار رفته در شکل ۷ آمده است.



شکل ۷- خصوصیات مصالح فولادی در اتصال حاضر

#### ۱.۴. قانون (معیار) رفتار مواد:

برای در نظر گرفتن رفتار گسیختگی مواد از معیار Johnson-Cook استفاده شد که تنش تسلیم به عنوان تابعی از تنش، نرخ کرنش و دما در معادله ۱ نشان داده شده است. [۳]

$$\sigma_y(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right) \quad (1)$$

همگی پارامترهای مدل هستند،  $T_m$  دمای ذوب ماده و  $T_r$  دمای محیط می باشد. پارامترهای مدل وابسته به مشخصات مکانیکی فولاد است که در آزمایشات استفاده شده است، در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای مدل وابسته به مصالح فولادی بکار رفته در اتصال سیستم مرو [13]

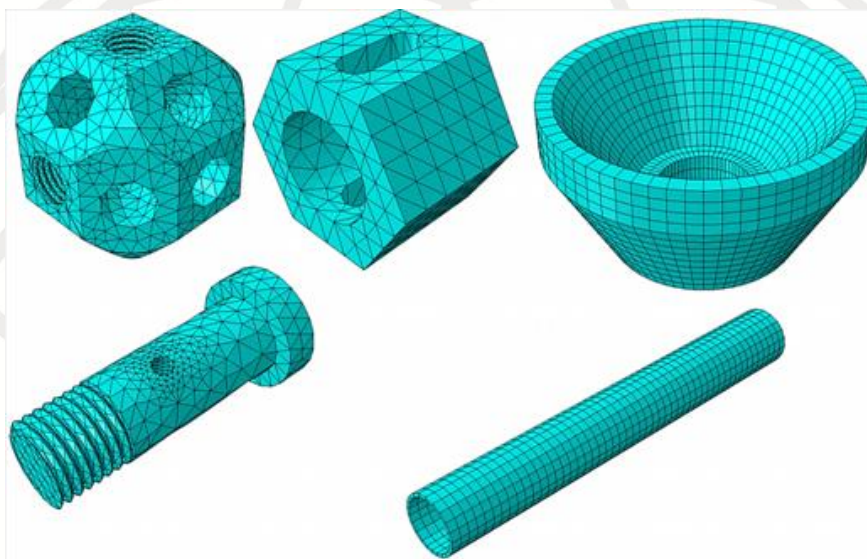
A(MPa)	B(Mpa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$	$T_r(K)$	$T_m(K)$	M
560	300	0.32	0.022	1	298	1773	0.55

در ابتدا به منظور در نظر گرفتن رفتار فولاد با طیف وسیع نرخ کرنش، تغییرات جزئی در مواد انجام می شود. سپس باید گفت که پدیده حرارت در مدلسازی در نظر گرفته نشده است و رفتار عایق گونه در مدلسازی و شکل دهی رزوه استفاده شده است. با توجه به اینکه قطعات اتصال Mero از بخشهای شکل پذیر ساخته شده اند گرمای تولید شده در طی فرایند سفت شدن میتواند از طریق پیچ منتشر شود. با استفاده از اطلاعات مواد ایزوترمال در شبیه سازی عددی فرض می شود که هیچ گرمایی تولید نمی شود و تنش تسلیم با صرف نظر کردن اثر نرم شدگی حرارتی بیش از حد انتظار می شود.

#### ۵. مش بندی:

تحلیلگر ABAQUS / Standard عمل شبکه بندی را با روش حل مسئله انتشار موج انجام می دهد [۶]. بنابراین، نیروهای خارج از تعادل به عنوان امواج تنش بین المانهای نزدیک منتشر شده و یک راه حل محدود تنها زمانی به دست می آید که نمو

زمان کمتر از افزایش زمان پایدار است. نمو پایدار حداقل زمانی است که یک موج اتساعی طول میکشد تا طول یک المان از مدل را طی کند. بنابراین، زمان پردازنده برای محاسبه نمو با کاهش اندازه المان افزایش می‌یابد. با اینحال، دقت راه حل به شدت در اصلاح مش به خصوص در مناطق بسیار تغییر شکل بستگی دارد. در نتیجه، لازم است به منظور بهینه سازی روند محاسبه، تعادل بین زمان محاسبات پردازنده و اندازه مش برقرار شود. پیچ، غلاف و گوی به عنوان ک بخش گسسته، با C3D10M عناصر چهار وجهی ده گرهی مدل شده است. مخروط ناقص بصورت C3D8R با المانهای شش وجهی هشت گرهی که برای المانهای شکل پذیر توصیه می‌شود، مدل شده است. توجه داشته باشید که اندازه المانها در مناطق رزوه به دلیل حفظ هندسه و نتایج خروجی مناسب از سایر بخشها ریزتر در نظر گرفته شدند. (شکل ۸)



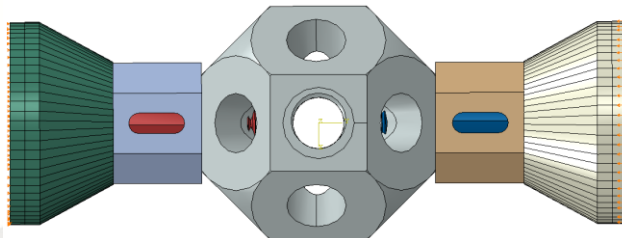
شکل ۸- مش بندی تک تک اعضای اتصال سیستم مرو

در نهایت، مش بندی سازگاری با استفاده از روش ALEABAQUS برای مطابقت با تغییر شکل بزرگ که در محل رزوه و به منظور بهبود دقت حل در منطقه رزوه، انجام شده است.

#### ۶. شرایط مرزی

قید تکیه گاهی مفصلی برای پایداری اتصال در انتهای یکی از مخروط ها وارد شده است. چون اتصال از نظر بارگذاری دارای تقارن کامل است ولی به دلیل وجود رزوه در پیچ و گوی تقارن هندسی بهم میخورد که این امر باعث می‌شود تحت حالات مختلف بارگذاری ناپایدار و دچار دوران گردد.



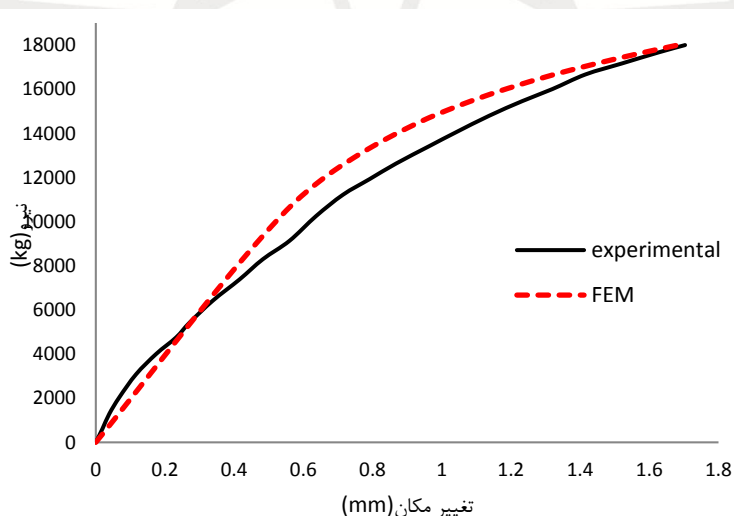


شکل ۹ - تکیه گاه مفصلی در انتهای مخروط

## ۷. نتایج آزمایش و بحث

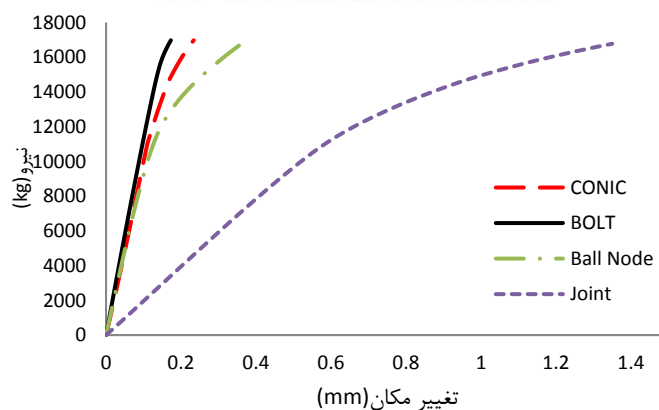
### ۱,۷. اتصال تحت نیروی کششی خالص محوری

برای اطمینان از رفتار سیستم اتصال مرو، اتصال تحت آزمایش تجربی قرار گرفت و نتایج عددی با آن در حالات بارگذاری کششی و فشاری مقایسه گردید. شکل (۱۰) نتیجه آزمایش تجربی (۷) و مدل شبیه سازی شده در حالت بارگذاری کششی محوری به کمک نرم افزار ABAQUS Standard را نشان می دهد.



شکل ۱۰ - مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی اتصال مرو در حالت بارگذاری کششی

با توجه به مقایسه بین منحنی های نیرو - تغییر مکان اجزای مختلف اتصال و اتصال mero مشاهده می شود که گوی زودتر از سایر اعضا وارد مرحله غیر خطی می شود. و این امر باعث تغییر مسیر نمودار نیرو - تغییر مکان کل اتصال می گردد. در شکل (۱۱) این موضوع آمده است.



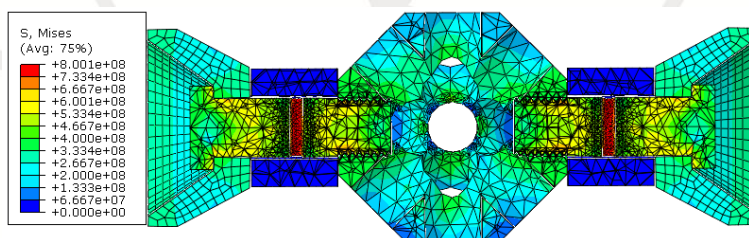
شکل ۱۱- منحنی نیرو - تغییر مکان اجزای اتصال در یک سیستم اتصال تحت بارگذاری کششی

در جدول (۴) مقایسه‌ای بین سختی‌های منحنی نیرو - تغییر مکان انجام گرفته است. لازم به ذکر است که بصورت سه خطی نتایج سختی‌ها ارائه شده‌اند.

جدول ۴- سختی‌های اتصال در مدل شبیه‌سازی شده و آزمایش تجربی

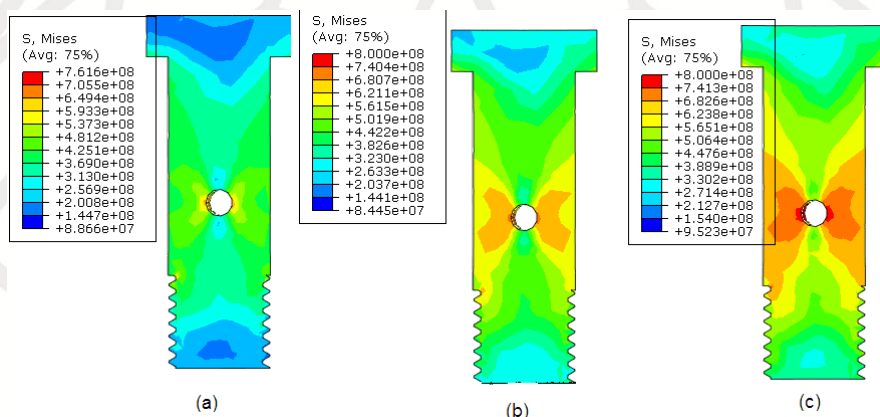
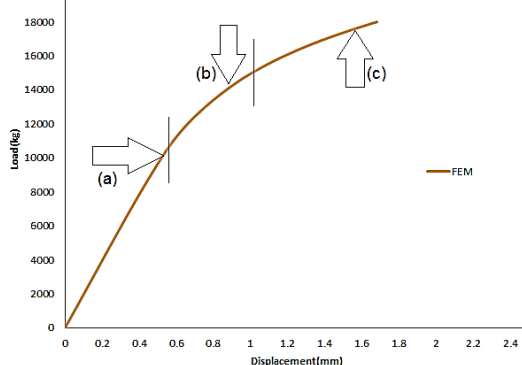
	K1 (kg/mm)	K2(kg/mm)	K3(kg/mm)
Experimental	18400	8012	4640
Numerical	19075	7837	3620
Ratio (%)=N/E	1.037	0.978	0.78

با توجه به نتیجه‌ی می‌توان چنین برداشت نمود که در ناحیه خطی سختی اتصال مدلسازی شده با سختی اتصال آزمایش شده مطابقت بسیار خوبی دارد (اختلاف ۰,۰۳۷ درصد). بتدریج که بارگذاری افزایش می‌یابد و اتصال وارد ناحیه غیر خطی می‌شود، سختی محوری اتصال مدلسازی شده کمی کمتر از سختی اتصال آزمایش شده می‌باشد که این بیانگر مدلسازی صحیح اتصال می‌باشد. در حالت کششی بولت نقش اساسی را در مکانیسم انتقال نیرو ایفا می‌کند و غلاف در این مکانیسم نقشی ندارد. در شکل‌های ۱۲ این امر بخوبی نشان داده شده‌اند.



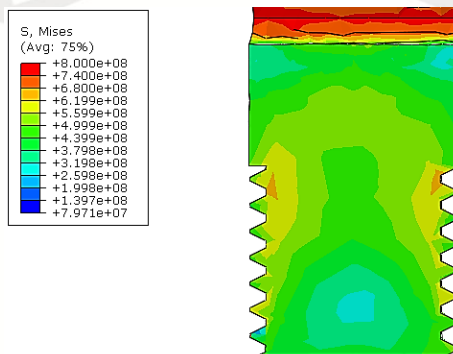
شکل ۱۲- رفتار مناسب اتصال و توزیع تنش در اجزا مختلف

در پایان مرحله الاستیک (تسلیم) و مرحله غیر خطی به تفکیک تنش عضو کلیدی ( بولت) آورده شده است و می‌توان مشاهده کرد که در چه گامی وارد مرحله پلاستیک شده است که باعث تغییر مسیر نمودار نیرو - تغییر مکان شده است. واحد اعداد در کانتور تنش برحسب پاسکال می‌باشد.(شکل ۱۳)

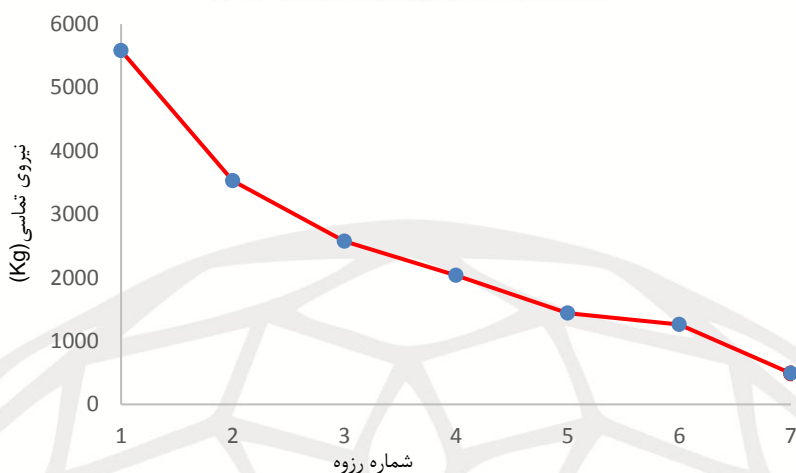


شکل ۱۳- توزیع تنش در بولت در مراحل بارگذاری کششی

از آنجائیکه در محل شکاف و مکانهایی که دارای شکستگی و سطح مقطع کمتری هستند تمرکز تنش بیشتر است طبق شکل فوق این امر به وضوح دیده می شود. محل سوراخ که جای پین است و محل رزوه‌ها بیشترین تنش‌ها را تحمل می کنند. طبق مطالعات پیشین [۱۲] سه رزوه اول بیشترین سهم را در جذب نیروی محوری دارند که در شکل ۱۴ و ۱۵ بخوبی نشان داده شده است. همچنین با تعریف سطوح تماس بین رزوه ی بولت و گوی نیروی تماسی عمود بین دو سطح بدست آمد که این امر را تایید می نماید.

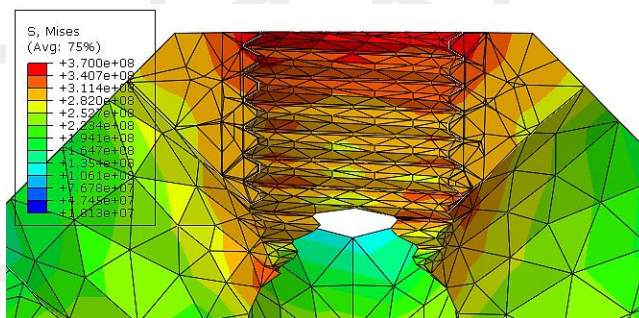


شکل ۱۴- تمرکز تنش در رزوه های ابتدایی و محل پین



شکل ۱۵- نیروی تماسی ایجاد شده بین رزوه های بولت و گوی در اثر بارگذاری کششی

با دقت در سه رزوه اول می توان مشاهده نمود که این سه رزوه بیشترین سهم را در جذب نیروی کششی محوری دارند. در شکل (۱۶) این موضوع نشان داده شده است.

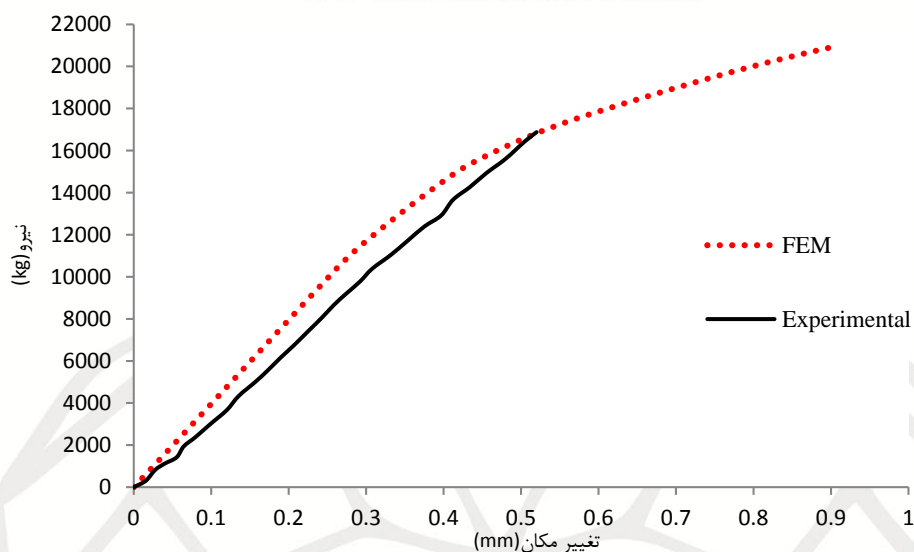


شکل ۱۶- سهم رزوه های اولیه گوی از بارگذاری کششی

با مشاهده مقادیر تنش اعضا اتصال مشاهده می شود که در حالت کششی خالص، محل سوراخ موجود در بولت، لبه بیرونی مخروط انتهایی اتصال و رزوه اول و محلهایی از گوی که دارای ضخامت و سطح مقطع کمی هستند زودتر به حالت تسلیم رسیدند.

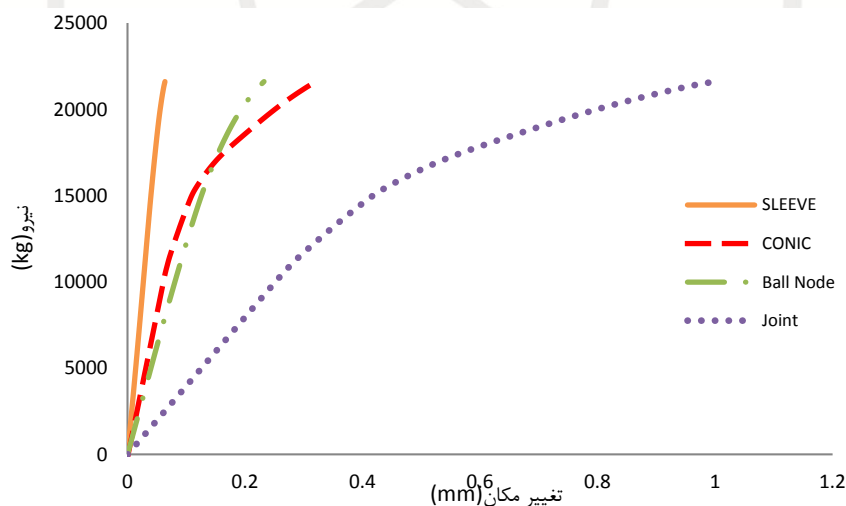
## ۲.۷. اتصال تحت نیروی فشاری خالص محوری

در شکل (۱۷) می توان دقت و مدلسازی صحیح و درست رفتار اتصال مدل سازی شده و مقایسه ی آن با نتیجه تجربی (۷) در حالت بارگذاری فشاری مشاهده نمود.



شکل ۱۷- مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی اتصال مرو در حالت بارگذاری فشاری

همانطور که مشاهده می شود ، سختی فشاری در محدوده رفتار خطی غلاف از سختی فشاری مدل اتصال بیشتر می باشد. با مقایسه بین منحنی های نیرو - تغییر مکان بین اعضای اتصال و کل اتصال در شکل ( ۱۸ ) مشاهده می شود که مخروط زودتر از سایر اعضا تسلیم شده است که این باعث تغییر مسیر نمودار شده است. لازم به ذکر است که مقادیر تغییر مکان اعضا، از اتصال گرفته شده و بصورت جداگانه آزمایش نشده است.



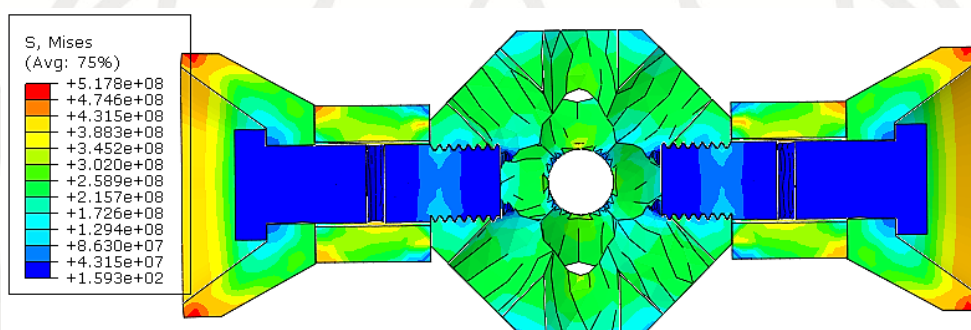
شکل ۱۸- منحنی نیرو - تغییر مکان اجزای اتصال در یک سیستم اتصال تحت بارگذاری فشاری

در جدول ( ۵ ) مقایسه ای بین سختی منحنی نیرو - تغییر مکان حالت نیروی فشاری خالص انجام گرفته است.

جدول ۵- سختی های اتصال در مدل شبیه سازی شده و آزمایش تجربی

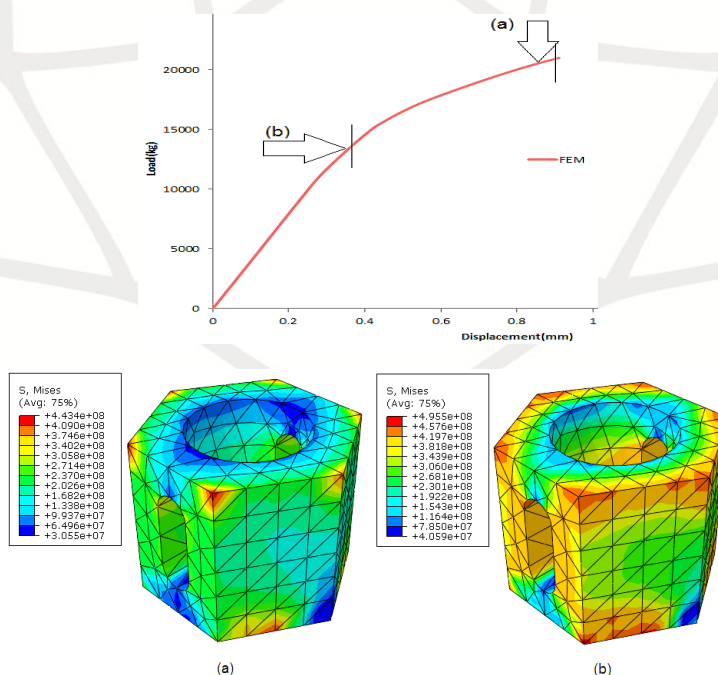
	K1 (kg/mm)	K2(kg/mm)
Experimental	۳۳۲۵۰	-
Numerical	۳۳۷۱۵	۹۹۸۶
Ratio (%)=N/E	۱,۰۱۴	-

نتیجه مدل سازی نشان دهنده ی اختلاف ۰,۰۱۴ درصد بین نتیجه ی شبیه سازی و تجربی است که بسیار تطبیق خوبی دارد. مکانیسم انتقال نیرو در حالت فشار بدین ترتیب است که اتصال تحت نیروی فشاری خالص، نیروی فشاری از مخروط به غلاف و سپس به گوی منتقل می گردد. در سیستم انتقال نیروی فشاری، بولت از این مکانیسم خارج می گردد و هیچ نیرویی را به گوی منتقل نمی کند. البته در نواحی دو رزوه اول بولت، به دلیل فشرده شدن رزوه های گوی رزوه های بولت تحت فشار قرار می گیرند و مقداری تنش تحمل می کنند که این امر در شکل ۱۹ بخوبی نشان داده شده است.



شکل ۱۹- رفتار مناسب اتصال و توزیع تنش در اجزا مختلف تحت بارگذاری فشاری

در شکل ۲۰ تنش عضو موثر غلاف در حالت فشاری خالص در مرحله تسلیم اتصال و پایان بارگذاری نشان داده شده است.



شکل ۲۰- توزیع تنش در بولت در مراحل بارگذاری فشاری

در حالت فشاری مشخص شده است که ابتدا نواحی رزوه شده گوی، لبه بیرونی مخروط انتهایی و گوشه‌ها و لبه‌های باز شو ی غلاف که دارای سطح مقطع کمی هستند، زودتر به تنش تسلیم رسیدند. نواحی آبی رنگ تحتانی در غلاف نشان دهنده ی اینست که این نواحی در تماس با گوی نبودند و نواحی آبی رنگ ( نواحی با تنش خیلی کم) فوقانی غلاف بیانگر این مطلب است که سطح تماسی بین غلاف و بولت در حالت فشاری وجود ندارد.

#### ۸. نتیجه گیری

در مطالعه حاضر روی سیستم اتصال mero بررسی عددی انجام گرفت و این اتصال تحت بارهای فشاری و کششی قرار گرفت. منحنی‌های نیرو - تغییر مکان برای آن ارائه گردید. نتایج مهم مطالعات بصورت خلاصه در ادامه آمده است:

۱. در حالت نیروی کششی خالص اتصال تا نیروی ۱۱۲۰۰ کیلوگرم در حالت الاستیک قرار دارد و سپس وارد ناحیه غیر خطی می‌شود. اولین قطعه‌ای که وارد مرحله ی غیر خطی می‌شود گوی است.
۲. در حالت نیروی فشاری اتصال تا نیروی ۱۳۴۶۰ کیلوگرم در فاز خطی است و سپس با تسلیم شدن مخروط وارد مرحله ی غیر خطی می‌شود. همچنین باید گفت که سختی اولیه ی اتصال در حالت فشاری ۱,۸۱ برابر سختی اتصال در حالت کششی است.

#### مراجع:

- [1] Feng Fan, Huihuan Ma, Gengbo Chen, ShizhaoShen, "Experimental study of semi-rigid joint systems subjected to bending with and without axial force", Journal of Constructional Steel Research, 126-137, 2012.
- [2] Mohammad Reza Davoodi, Javad Vaseghi Amiri, Sirous Gholampour, Seyed Amin Mostafavian, "Determination of nonlinear behavior of a ball joint system by model updating", 52-62, 2012.
- [3] Gordon R. Johnson, William H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 3148, 1985.
- [4] M. Wierszycki, W. Kąkol, T. Łodygowski, "The Screw Loosening and Fatigue Analyses of Three Dimensional Dental Implant Model", ABAQUS Users' Conference, 2006.
- [5] M. Ghasemi, M.R. Davoodi, S.A. Mostafavian, "Tensile Stiffness of MERO-Type Connector Regarding Bolt Tightness", Journal of applied science, 724-730, 2010.
- [6] ABAQUS/CAE User's Manual Version 6.9, PDF Documentation, Dassault Systemes, USA, 2007.
- [7] Davoodi. M.R, Pashaei. M.H., and Mostafavian. S.A., "Experimental study of the Effects of Bolt Tightness on The Behaviour of MERO-Type Double Layer Grids", Journal of the International association for shell and spatial structures (IASS), 48, 1, 2007.
- [8] Vaseghi. J and Davoodi. MR, "Modeling of semi rigid Behavior of MERO Jointing System", Proceeding of International conference of space structures, university of surrey, UK, 306-316, 2002.

[9] Florestan Mathurin, Jean Guillot, Pierre Stéphan, Alain Daidié, "3D Finite Element Modeling of an Assembly Process With ThreadForming Screw", Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol 131, 2009.

[10] Chen, J.J & Shih, Y.S, " A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis", Nuclear Engineering and Design , 109-116, 1999.

