

## بررسی سیستم‌های اتصال نیمه صلب MERO تحت بارگذاری ترکیبی لنگر خمشی و بار محوری

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 واقعی آنها باید تحت بارگذاری های ترکیبی بررسی شود. در مطالعه حاضر به کمک روش اجزای محدود سه بعدی، اثرات نیروی فشاری و نیروی برشی و لنگر خمشی روی اتصال مرو و میزان دخالت اعضا در سهیم بودن تحمل بار 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 لنگر خمشی - دوران برای سیستم اتصال مرو تحت بارگذاری فشاری و لنگر خمشی تعیین شد. در پایان مشخص گردید که نیروی محوری فشاری، سختی خمشی اولیه ی اتصال را افزایش می دهد. لنگر خمشی الاستیک با افزایش نیروی فشاری، کاهش یافت.

**کلید واژه :** لنگر خمشی، اتصال مرو، اجزای محدود، تحلیل سازه

### ۱. مقدمه

اتصال گویسان یکی از رایج ترین اتصالاتی است که در ساخت شبکه های دو یا چند لایه بکار می رود. مطالعات تجربی و عددی زیادی در جهت بررسی تاثیر سختی اتصالات روی رفتار سازه های فضاکار انجام گرفته است. مطالعات پیشین در دانشگاه کمبریج که توسط See [۱] و Fathelbab [۲] انجام شده است، نشان می دهد که رفتار یک سازه با اتصالات مفصلی متفاوت با رفتار همان سازه با اتصال صلب است. Fathelbab [۳ و ۴] همچنین نشان داد که سختی اتصال تاثیر قابل ملاحظه ای روی رفتار نیرو - تغییر مکان سازه دارد. Aitziber [۵-۶]، Ma [۷]، Fan [۸] و Kato [۹] نیز نشان دادند که صلبیت اتصال مهمترین فاکتوری است که بر روی رفتار یک سازه تک لایه گنبدی تاثیر می گذارد. به همین سبب برای دستیابی به نتایج دقیقتر تحلیل بایستی اثر اتصال در تحلیل سازه لحاظ گردد. El-Sheikh [۱۰]، چناقلو و نوشین [۱۱] دریافتند که رفتار کلی سازه و مود شکست یک سازه از سختی خمشی اتصال تاثیر می پذیرد. چناقلو [۱۲] دریافت که نیروی محوری فشاری تاثیر بسیار مهمی روی پارامترهای رفتار لنگر - دوران یک اتصال MERO دارد و همچنین مدل ریاضی از رفتار لنگر - دوران ارائه کرد تا تاثیر نیروی محوری در نظر گرفته شود. Ueki [۱۳] نشان داد که صلبیت اتصال تحت نیروی فشاری ثابت افزایش و تحت نیروی کششی ثابت کاهش می یابد. داودی و همکاران [۱۴] 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. از مطالعات انجام گرفته نتیجه می شود که سختی و مقاومت

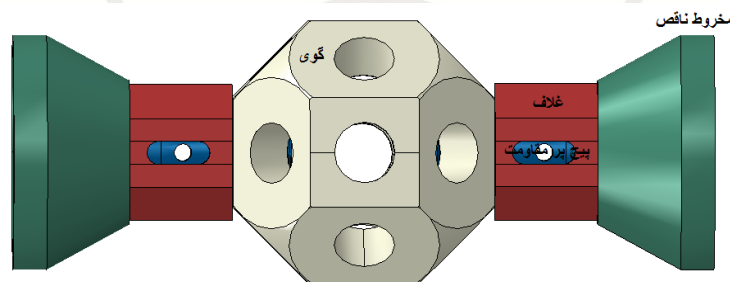
اتصالات لازم است که برای تحلیل سازه های فضا کار در نظر گرفته شوند. در رفتار واقعی سازه های فضا کار، اتصالات تحت تاثیر ترکیبی از نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی هستند.

در تحلیل استاتیکی شبکه های دو یا چند لایه تحت بارهای اعمال شده بر گره ها (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 سازه ها 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.

در سازه فضایی واقعی، اتصالات تحت تاثیر بارهای کششی و فشاری قرار می گیرند. از اینرو باید این نوع بارگذاری ها 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 ترکیبی، 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 لنگر خمشی-دوران به روش عددی بدست آمد.

## ۲. 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 (۱) نمایی از این اتصال را نمایش می دهد.



شکل ۱. سیستم اتصال MERO

سیستم 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 غلافهای آچارخور و پیچ رزوه شده

می‌باشد. به منظور بهبود نشیمن غلاف‌های آچارخور بر روی گوی و بالا بردن کیفیت و کاهش میزان تیرانس، سطح تختی در اطراف سوراخهای روزه شده گویها با استفاده از ماشینهای تراش ایجاد می‌گردد.

### ۱.۲ اجزاء سیستم اتصالی MERO

سیستم اتصالی MERO از اجزای زیر تشکیل می‌گردد:

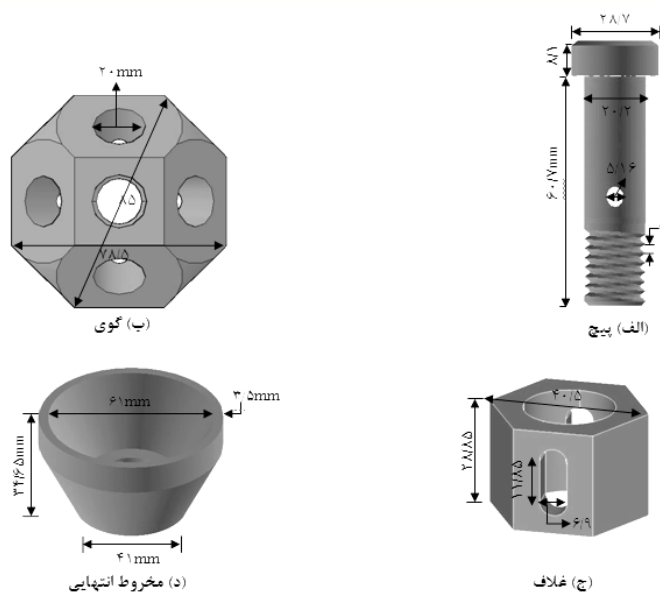
- گوی فلزی آهنگری شده با سوراخ‌های روزه شده.
- قطعه مخروط ناقص انتهایی که به انتهای لوله جوش می‌شود.
- پیچ با مقاومت کششی بالا که از انتهای مخروط می‌گذرد و به داخل گوی پیچ می‌شود.
- غلاف که از آن جهت چرخاندن پیچ استفاده می‌شود (غلاف دو دریچه در دو سوی مخالف دارد).
- خار اتصال که از آن جهت مقید کردن پیچ به غلاف استفاده می‌شود. دریچه‌های روی غلاف جابجایی خار اتصال را مقدور می‌سازد و این جابجایی میزان نفوذ پیچ در گوی را نشان می‌دهد.

### ۳. 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 روزه 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 قابلیت آن بسیار مناسب برای حل مسائل شبه استاتیکی و دینامیکی سه بعدی با شرایط تماسی پیچیده و تغییر مکانهای زیاد مانند تماس روزه‌ها با یکدیگر، هست.

### ۱.۳ شکل کلی روزه پیچ و گوی

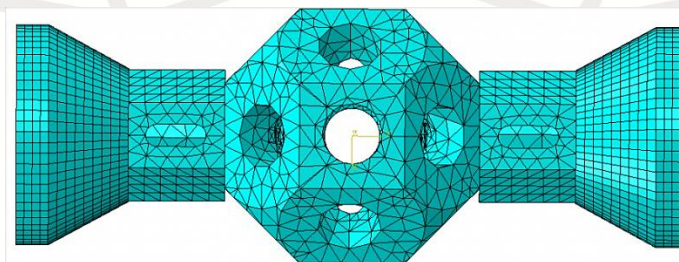
از آنجاکه هیچ دستورالعملی برای موضوع تشکیل روزه پیچ نیست، هندسه‌ی آنها و مونتاژشان اغلب از یک تولیدکننده به تولیدکننده دیگر متفاوت است. با این وجود، این مطالعه تنها پیچهایی که رزوهشان با مشخصات ISO هستند، در نظر گرفته شده است. شکل اتصال در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲- پارامترهای اجزا اتصال سیستم مرو

#### ۴. بارگذاری و شبیه سازی پارامترها

همانطور که در شکل ۳ 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 حدوداً 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 شده است. باید اذعان داشت که مدل بصورت کامل، ۳۶۰ درجه، با تمام پیچیدگیهای هندسی و تقارن کامل مدلسازی گردید. همچنین چون میزان تغییر مکان و تاثیر نیرو بر قطعات مختلف اتصال مدنظر بود، اندازه مش بندی تاثیر شگرفی در پاسخ مسئله نداشت.



شکل ۳- 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



اندرکنش‌ها استفاده شده است. 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 شده اند. 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. موارد و پارامترهای مونتاژ در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- پارمترهای بارگذاری

مدل	قطر سوراخ (mm)	تغییر مکان اعمالی فشاری (mm)
MERO	۱۰/۸	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.

#### ۵. خصوصیات مصالح:

برای مدلسازی خصوصیات مصالح فولادی اعضای اتصال، از ضریب پواسون  $0.3$  و مدول الاستیسیته  $200000$  مگا پاسکال و رفتار ارتجاعی-خمیری چند خطه با معیار تسلیم فون میسز و جانسون-کک، قانون جریان وابسته و قانون سخت شونده همسانگرد در نظر گرفته شده است.

نکته ای که باید به آن اشاره شود اینست که موادی که بصورت نرمال از کارخانه تهیه می شود دارای خصوصیات مشخصی می باشد. اما مصالح موجود در کار حاضر پس از خروج از کارخانه بر روی آنها عمل جوش و حرارت و فورج صورت گرفته است که به طبع آن مشخصات آنها تغییر یافته است. لذا نمی توان به مشخصات نرمال تهیه شده از کارخانه اکتفا و تکیه کرد. با توجه به اینکه خصوصیات مصالح بصورت دقیق در دست نیست، برای بدست آوردن خصوصیات و رفتار از روشهای تقریبی و دقیق موجود در آیین نامه ها بهره گرفته می شود. برای بدست آوردن رفتار مصالح از روشهای رایج در ASTM استفاده می شود (ASTM-E8) (ASTM-E9). از آنجا که برای تهیه نمونه های استاندارد برای آزمون کشش و فشار طبق روش های ASTM نمیشد ابعاد و اندازه ای مطابق با دستورالعمل استخراج کرد، لذا با این روشها نمی توان منحنی تنش - کرنش برای مواد یافت.

برای یافتن سختی سطحی و تنش تسلیم از روش ویکرز، برینل و راکول استفاده می شود. در کار حاضر از روش ویکرز بهره گرفته شده است. ابتدا سطوح مورد آزمایش بطور کامل سمباده زده شده (شکل ۴) تا سطحی کاملاً صاف و صیقلی بدست آید.



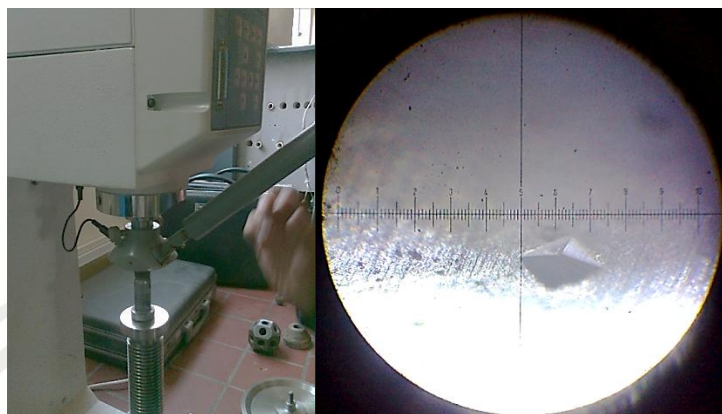
شکل ۴- سمباده زدن اجزا مختلف اتصال

سپس تک تک اعضا تحت آزمایش ویکرز قرار گرفتند. برای هر قطعه، این آزمایش ۳ بار تکرار گردید و مقدار میانگین بدست آمده از سختی ملاک قرار گرفت. شایان ذکر است که عضو مخروطی شکل به دلیل شکل هندسی خاص، اعمال بار به سطح آن امکان پذیر نبود. بنابراین با استفاده از دستگاه برش قطعه ای از آن بریده و تست شد. با انجام آزمایش ویکرز بر روی مصالح موجود سختی و تنش تسلیم به شرح ذیل بدست آمده است.

جدول ۲- نتایج آزمایش ویکرز روی اجزا اتصال

عضو	قطر فرورفتگی	سختی سطحی (DPH)	تنش تسلیم ( $\text{Kg/mm}^2$ )
بولت	۲۲	۳۸۲	۶۳/۸۲
غلاف	۲۴	۳۱۳	۵۲/۲۹
مخروط	۲۶	۲۶۷	۴۴/۶۰
گوی	۳۰	۲۰۰	۳۳/۴۱

اثر اعمال بار و محاسبه قطر در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵- اثر ، نوع اعمال بار و محاسبه قطر محل فرو رفتگی روی اجزا مختلف اتصال

در کار حاضر بار به میزان ۳۰ کیلوگرم و به مدت ۱۰ ثانیه بطور افزایشی خطی اعمال شده است و در پایان قطر فرو رفتگی اعمال شده قرائت شد و با استفاده از رابطه فوق سختی ویکرز بدست آمد. تمام آزمایش در حالت HV30 انجام شد. در این آزمایش از دستگاه سختی سنجی UNIVERSAL HARDNESS TESTER- MODEL:UV1 استفاده شده است.

#### ۱.۵. 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. [۱۵]

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

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 ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای مدل وابسته به مصالح فولادی بکار رفته در اتصال سیستم مرو [۱۵]

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

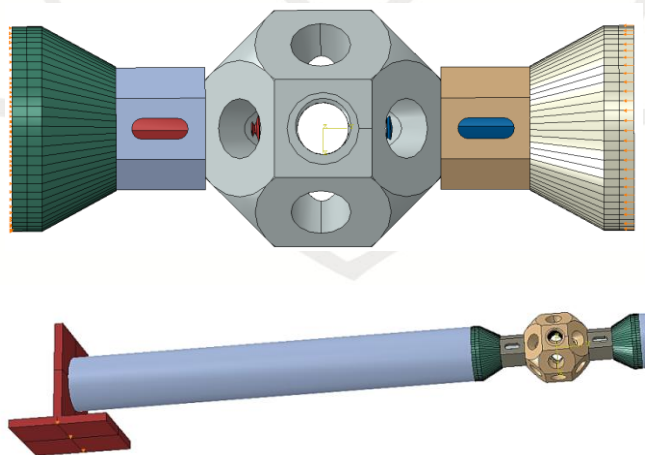
طریق پیچ منتشر شود. با استفاده از اطلاعات مواد ایزوترمال در شبیه سازی عددی فرض می شود که هیچ گرمایی تولید نمی شود و تنش تسلیم با صرفنظر کردن اثر نرم شدگی حرارتی بیش از حد انتظار می شود.

#### ۶. مش بندی

تحلیلگر ABAQUS / Standard عمل شبکه بندی را با روش حل مسئله انتشار موج انجام می دهد [۱۶]. 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 می یابد. 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 عنوانی 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 می شود، 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.

#### ۷. شرایط مرزی

همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، قید تکیه گاهی مفصلی برای پایداری اتصال در انتهای یکی از مخروط ها وارد شده است. چون اتصال از نظر بارگذری دارای تقارن کامل است ولی به دلیل وجود رزوه در پیچ و گوی تقارن هندسی بهم میخورد که این امر باعث می شود تحت حالات مختلف بارگذاری ناپایدار و دچار دوران گردد. در مورد اتصال با لوله که تحت بار لنگر خمشی است، قید تکیه گاهی مفصلی در زیر دو ورق انتهایی قرار داده شده است.



شکل ۶- اعمال شرایط مرزی



## ۸. نتایج آزمایش و بحث

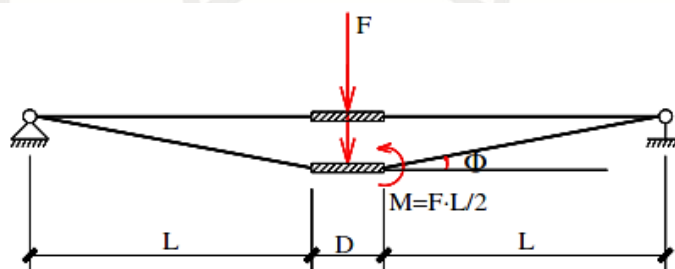
### • اتصال تحت لنگر خمشی

رفتار مکانیکی اتصالات را می‌توان به صورت منحنی لنگر - دوران که ارتباط بین لنگر خمشی اعمالی و دوران مرتبط با آن را نشان می‌دهد، بیان نمود. در مطالعه‌ی حاضر نمودار لنگر خمشی - دوران بصورت غیر مستقیم بدست آورد. این مقادیر با قرائت تغییر مکان اتصال و رابطه‌ی زیر بدست می‌آید. لنگر خمشی اعمالی به اتصال برابر با نیروی تکیه گاه در طول یک لوله است که در شکل (۷) نشان داده شده است. تغییر شکل دورانی نیز برابر با مجموع تغییر شکل‌های الاستیک لوله‌ی فلزی و تغییر شکل دورانی اتصال است. در این مطالعه، تغییر شکل الاستیک لوله خیلی کم و در حد ۱٪ است که در قیاس با تغییر شکل اتصال قابل صرف نظر کردن است. بنابراین تغییر شکل دورانی تقریباً برابر با تغییر شکل اتصال است.

$$\theta = \frac{\sum_{k=1}^n \phi_{ij}}{n}$$

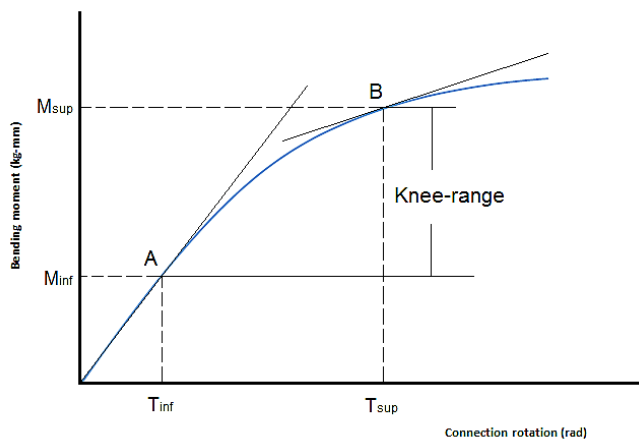
$$\phi_{ij} = \arctan\left(\frac{\delta_i - \delta_j}{l_{ij}}\right)$$

در روابط فوق  $\delta_i$  و  $\delta_j$  تغییر مکان‌های اندازه‌گیری شده نقاط ابتدا ی لوله و ابتدای گوی می‌باشد.  $l_{ij}$  فاصله‌ی بین این دو نقطه است.



شکل ۷- اعمال لنگر خمشی

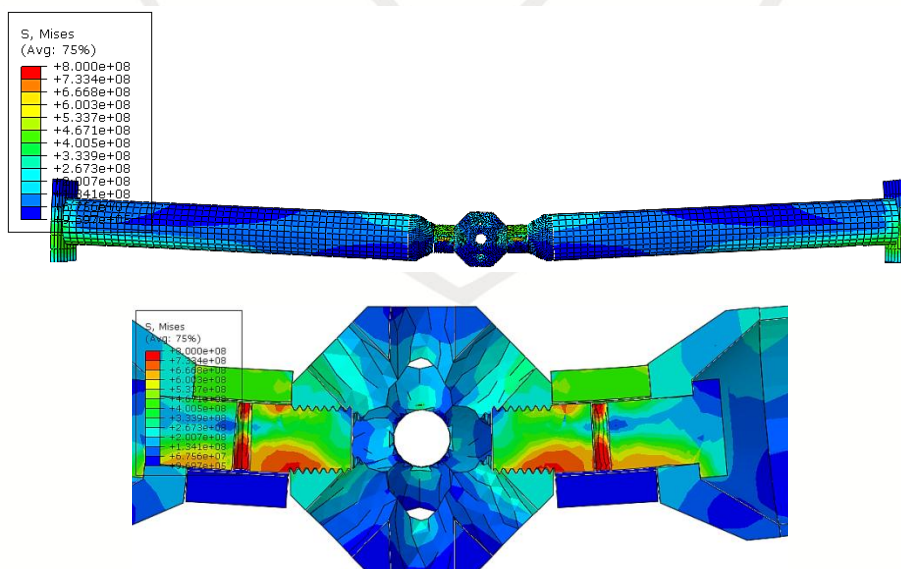
از منحنی لنگر خمشی - دوران می‌توان به سختی خمشی اولیه، لنگر مقاوم و ظرفیت دورانی اتصال پی برد. در این ارتباط از روش [۱۷] که در زیر توضیح داده شده است بهره گرفته شد. (شکل ۸).

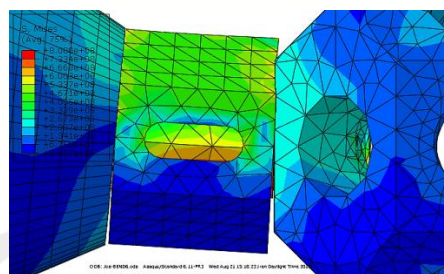


شکل ۸- منحنی لنگر خمشی - دوران

در شکل فوق خط مماس بر نقطه ی A دارای شیبی است که همان سختی خمشی اولیه نامیده می شود. خط مماس بر نقطه ی B دارای شیب کمتری نسبت به شیب اولیه است که سختی کاهش یافته است و ۲۰ درصد سختی خمشی اولیه می باشد. بدین ترتیب لنگر های متناظر با نقاط A و B لنگرهای الاستیک و پلاستیک نامیده می شوند. Knee range محدوده ای بین سختی اولیه و سختی خمشی کاهش یافته است. از پایین به  $M_{inf}$  و  $\Phi_{inf}$  و از بالا به  $M_{sup}$  و  $\Phi_{sup}$  ختم می شود.

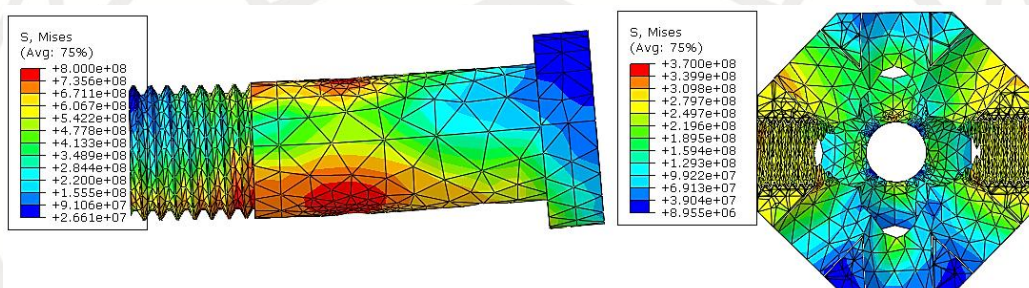
نحوه ی اعمال بارگذاری بصورت تغییر مکان به بالای گوی و افزایشی خطی است. شکل (۹) شکل تغییر شکل یافته ی اتصال را تحت بارگذاری لنگر خمشی نشان داده است. در شکل (۱۰) تنش ها و تغییر شکل سایر اعضای اتصال به تفکیک آمده است.





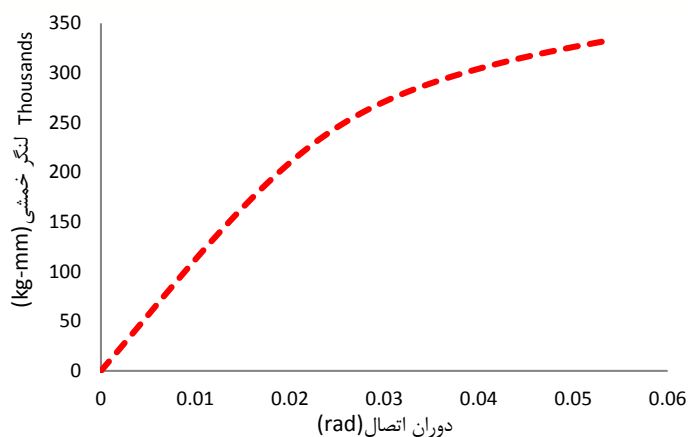
شکل ۹- شکل تغییر شکل یافته ی اتصال تحت لنگر خمشی

در اثر اعمال بار لنگر خمشی در شکل ۹ مشاهده می شود که قسمت بالای غلاف تحت فشار قرار می گیرد و پایین غلاف تحت تنش های کششی است. همچنین از شکاف و ایجاد فاصله بین غلاف و گوی این موضوع قابل درک است.



شکل ۱۰- شکل تغییر شکل یافته ی اجزای اتصال تحت اثر لنگر خمشی اتصال

از آنجائیکه اگر یک تیر تحت لنگر خمشی مثبت قرار بگیرد، تارهای فوقانی تحت فشار و تارهای تحتانی تحت کشش قرار می گیرند. در اتصال حاضر بارگذاری به صورتی است که اگر کل اتصال را یک تیر در نظر بگیریم، این موضوع صادق است. به تبع انتظار می رود که بخش بالایی بولت تحت فشار و تحتانی تحت کشش باشند. اما با نگاه به بولت این موضوع را نمی توان یافت. از مهمترین دلایلی که می توان به آن اشاره نمود اینست که سیستم اتصال از ۹ بخش با هندسه ی مجزا تشکیل شده است. نکته ی دیگر اینست که در هنگام اعمال بار بخش فوقانی گوی تحت فشار و قسمت تحتانی ان تحت کشش است و سوراخ رزوه شده گوی به بخش های پایینی بولت فشار ناشی از باز شدن وارد میکند و این باعث ایجاد تنش های فشاری در بولت می گردد که در شکل (۱۰) چند رزوه اول بولت تنش قابل توجهی را تحمل می کنند. در شکل (۱۱) منحنی لنگر خمشی - دوران آمده است.



شکل ۱۱- منحنی لنگر خمشی - دوران اتصال

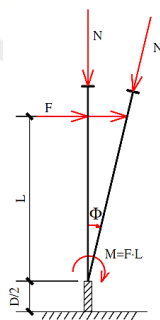
با توجه به منحنی لنگر خمشی - دوران، لنگر خمشی الاستیک اتصال 100 kg-m و دوران متناظر با آن ۰/۰۱ رادیان می باشد. به همین ترتیب لنگر پلاستیک ۲۱۰ کیلوگرم متر و دوران متناظر با آن ۰/۳۵ رادیان است. در جدول (۳) نتایج آمده است.

جدول ۳- مقادیر بدست آمده از منحنی لنگر خمشی - دوران

	$M_{inf}(kg-m)$	$M_{sup}(kg-m)$	KR	$f_{inf}(rad)$	$f_{sup}(rad)$	$S_j(kg-m/rad)$
M20	۱۰۰	۲۱۰	۱۱۰	۰/۰۱	۰/۰۳۵	۱۰۰۰۰

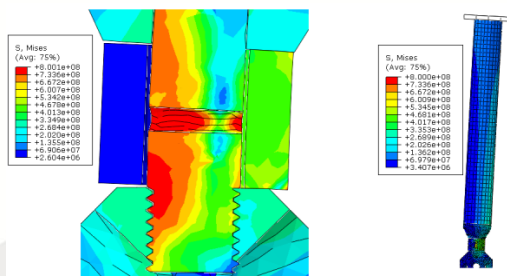
## ۲.۷. اتصال تحت بارگذاری همزمان نیروی فشاری، برش و لنگر خمشی

در واقعیت ممکن است ترکیبی از بارگذاری ها به سیستم اتصال وارد شود لذا در این بخش به بررسی اثر ترکیبی بار فشاری و برش و لنگر خمشی پرداخته می شود. با توجه به شکل ۱۲ میزان دوران اتصال و لنگر خمشی قابل محاسبه است.



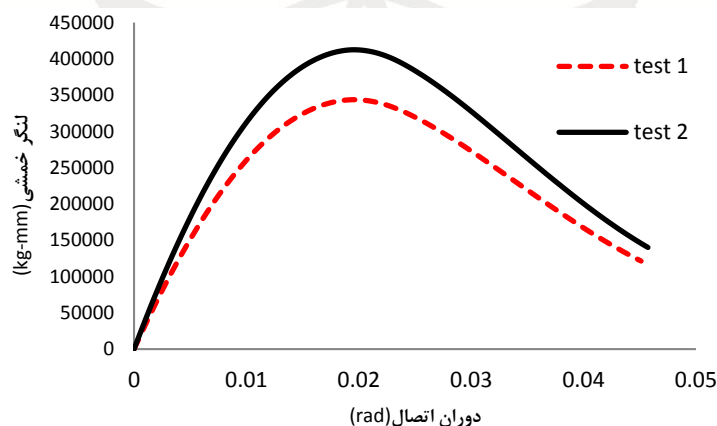
شکل ۱۲- تعریف لنگر خمشی و دوران اتصال





شکل ۱۳- تنش‌های ایجاد شده در اعضای اتصال تحت لنگر خمشی و نیروی محوری فشاری

از شکل ۱۳ می‌توان به تاثیر بارگذاری جانبی و فشاری و شکافی که بین غلاف و گوی ایجاد می‌شود و همچنین نیروی فشاری که به رزوه‌های بولت اعمال می‌گردد، پی برد. در شکل ۱۴ منحنی لنگر خمشی - دوران آمده است.



شکل ۱۴- منحنی لنگر خمشی - دوران اتصال تحت اعمال لنگرهای خمشی مختلف

در آزمایش اول بارگذاری فشاری بصورت تغییر مکانی و به میزان ۱ میلیمتر اعمال شده است و در آزمایش دوم بارگذاری فشاری ۲ میلیمتری اعمال گردید. اعمال همزمان نیروی فشاری و لنگر خمشی باعث افزایش سختی خمشی اولیه می‌شود. این بدلیل آنست که با اعمال نیروی فشاری توام با لنگر خمشی، جدا شدن قطعات اتصال و ایجاد شکاف بین آن‌ها به تاخیر می‌افتد اما زمانیکه شکاف بین قطعات ایجاد شود، این فاصله و شکاف تسریع می‌یابد. این موضوع باعث کاهش ناحیه ی Knee-range می‌شود.

## ۹. نتیجه گیری

در مطالعه حاضر روی سیستم اتصال MERO بررسی عددی انجام گرفت و این اتصال تحت بارهای لنگر خمشی و ترکیب بار فشاری و لنگر خمشی قرار گرفت. منحنی لنگر خمشی - دوران برای آن ارائه گردید. نیروی محوری فشاری، سختی خمشی اولیه ی اتصال را افزایش می دهد. لنگر خمشی الاستیک با افزایش نیروی فشاری، کاهش یافت.

## مراجع

- [1] See T., Large displacement elastic buckling space structures. Ph.D. Thesis, University of Cambridge, September 1983.
- [2] Fathelbab F A., The effect of joints on the stability of shallow single layer lattice domes, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, September 1987.
- [3] Fathelbab FA, McConnel RE. Approximate tangent stiffness matrix includes the effects of joint properties for space frame member. Proc IASS Congr, Madrid 1989; Vol.5.
- [4] Fathelbab FA. Tangent stiffness matrix for space frame members with both member and joint imperfections. In: Parke GAR, Howard CM, editors. Space structure 4. conf. Guildford, Sept. 1993 London: Th. Telford Publ; 1993. p. 1323-33.
- [۵] Lo'pez Aitziber, Puente Iñigo, Serna Miguel A. Direct evaluation of the buckling loads of semi-rigidly jointed single-layer latticed domes under symmetric loading. Eng Struct 2007;29:101-9.
- [۶] López Aitziber, Puente Inigo, Serna Miguel A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints. Comput Struct 2007;85:360-74.
- [۷] Ma Huihuan, Fan Feng, Shen Shizhao. Numerical parametric investigation of single-layer latticed domes with semi-rigid joints. J Int Assoc Shell Spat Struct 2008;49(2):99-110.
- [۸] Fan Feng, Ma Hui-huan, Cao Zheng-gang, Shen Shi-zhao. Direct estimation of critical load for single-layer reticulated domes with semi-rigid joints. Int J Space Struct 2010;25(1):15-24.
- [۹] Kato S, Mutoh I, Shomura M. Collapse of semi-rigidly jointed reticulated domes with initial geometric imperfections. J Constr Steel Res 1998;48:145-68.
- [۱۰] EI-Sheikh AI. Numerical analysis of space trusses with flexible member-end joints. Int J Space Struct 1993;8(3):189-97.

- [۱۱] Chenaghlou MR, Nooshin H. Response of semi-rigidly jointed space structures. Space structures 5. London: Thomas Telford; 2002.
- [۱۲] Mohammad Reza Chenaghlou, Semi-rigidity of connections in space structures, Ph.D. Thesis, University of Surrey, October, 1997.
- [۱۳] Ueki T, Matsushita F, Shibata, Kato S. Design procedure for large single-layer latticed domes. Proceedings of the fourth international conference of space structures UK: University of Surrey; 1993. p. 237–46.
- [۱۴] 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.
- [۱۵] 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.
- [۱۶] ABAQUS user's manual—version 6.11. Pawtucket, RI: Hibbit, Karlsson & Sorenson; 2011.
- [۱۷] Girão Coelho AM., Simões da Silva L., Bijlaard FSK. “Ductility analysis of bolted extended end-plate beam-to-column connections”, The third international conference on steel & composite structures; 2004.