

## بررسی عددی راندمان آببندی فلنج با گسکتهای مختلف

**چکیده:** اتصالات فلنجی از اجزای پرکاربرد در صنعت بوده و آسیب در فلنج می‌تواند خسارات زیست محیطی و مالی در پی داشته باشد. لذا کارایی صحیح آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. نحوه اعمال بارهای خارجی و میزان آنها از جمله علل صدمه دیدن فلنج و در نتیجه نشتی فلنج می‌تواند باشد. در مقاله پیش‌رو راندمان آببندی فلنج به همراه ۴ نوع گسکت تحت بارهای مکانیکی (گشتاور خمشی، نیروی کششی، فشار داخلی و بار پیچ‌ها) با در نظر گرفتن تأثیرات اعمال همزمان آن‌ها به کمک شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد بار پیچ نسبت به گشتاور خمشی تأثیر بیشتری بر راندمان آببندی دارد و همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش ۲۵ درصدی نیروی پیچ‌ها تنش تماسی به اندازه ۱۳ درصد افزایش می‌یابد که به معنای بهبود آببندی اتصال است. دیگر آن که مدول الاستیسیته با راندمان آببندی رابطه معکوس دارد به طوری که گسکتهای با مدول الاستیسیته کمتر آببندی بهتری را از خود نشان داده‌اند.

**واژه‌های راهنما:** فلنج، گسکت، آببندی، شبیه‌سازی عددی، نشتی

### مهدی ثابت‌قدم

دانشجوی کارشناسی مهندسی  
کشتی، دانشگاه صنعت نفت

### سید محمدحسین

#### شریفی\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک،  
دانشکده نفت آبادان، دانشگاه  
صنعت نفت

### مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴

### Mahdi Sabet Ghadam

BSc Student, Petroleum  
University of Technology,  
Iran

### Syed Mohammad H. Sharifi

Assistant Professor,  
Abadan Faculty of  
Petroleum, Petroleum  
University of Technology,  
Iran

## Numerical study of sealing performance of flange with different gaskets

**Abstract:** Flange joints are one of the most widely used components in industries and failure of joints results hazards to the environment, and economic loss. The methodology and magnitude of external forces applying cause failure therefore flange leakage. In this study sealing performance of flange joint with four gaskets under mechanical loads (internal pressure, bending moment, axial force and bolt load) simultaneously is studied by numerical simulation in Abaqus. The results show that bolt load is more effective on sealing performance than bending moment and in addition to, 25 percent increasing of bolt loads causes 13 percent increasing for contact gasket stress which improves sealing performance. There is an inverse relationship between modulus of elasticity and sealing performance such that gaskets with lower modulus have better sealing.

**Keywords:** Flange, Gasket, Sealing, Numerical simulation, Leakage

## ۱- مقدمه

پراساد و ماتان (۲۰۰۸) با استفاده از روش اجزای محدود، آب‌بندی فلنج دارای گسکت تحت گشتاور خمشی را با توجه به رفتار غیر خطی گسکت مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشانگر این بود که میزان گشتاور خمشی مجاز، به نوع گسکت، خواص آن هنگام تغییر شکل و میزان سفتی وابسته است. به طوری که با افزایش میزان سفتی مقدار گشتاور خمشی مجاز کاهش می‌یابد [۳].

تاکاگی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از تحلیل اجزای محدود و کار آزمایشگاهی، تأثیر گشتاور خارجی خمشی بر آب‌بندی از دیدگاه تغییرات تنش تماسی گسکت مورد مذاقه قرار دادند. آنان بیان کردند که تنش گسکت در بخش تحت کشش کاهش و در بخش تحت فشار افزایش می‌یابد. علت تفاوت در تغییرات تنش گسکت خاصیت هیستریزس منحنی تنش- کرنش گسکت است. نتیجه دیگر آن‌که تأثیر گشتاور خمشی بر آب‌بندی بیشتر از تأثیر فشار داخلی است.

نهایتاً هاب<sup>۱</sup> فلنج حساسیت بیشتری نسبت به گشتاور خمشی دارد، لذا تنش هاب یکی از فاکتورهای مهم در طراحی فلنج است [۴].

تاکاگی و همکاران (۲۰۱۱) آب‌بندی فلنج تحت فشار داخلی و گشتاور خارجی را مورد مطالعه قرار دادند. تحلیل اجزای محدود روش بررسی ایشان بود و با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی صورت گرفت.

حاصل این بود که با افزایش گشتاور خمشی، تنش هاب افزایش می‌یابد. نکته دیگر آن‌که با افزایش گشتاور خمشی، تنش گسکت کاهش و نهایتاً نرخ نشست افزایش می‌یابد [۵].

کوندو و ساوا (۲۰۱۵) نیز با استفاده از روش اجزای محدود و تست آزمایشگاهی بیان کردند که فلنج‌های با سطوح برآمده تحت فشار داخلی، وقتی تنش گسکت به حد تسلیم می‌رسد دارای آب‌بندی بهتری خواهند بود. هم‌چنین تنش گسکت در شعاع خارجی نسبت به شعاع داخلی بیشتر است [۶].

وانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از نرم‌افزار سزار<sup>۲</sup> بارهای خارجی فلنج را محاسبه کرده و تأثیر این بارها را بر آب‌بندی از دیدگاه تغییرات تنش گسکت با استفاده از نرم‌افزار انسیس<sup>۳</sup> ارزیابی کردند.

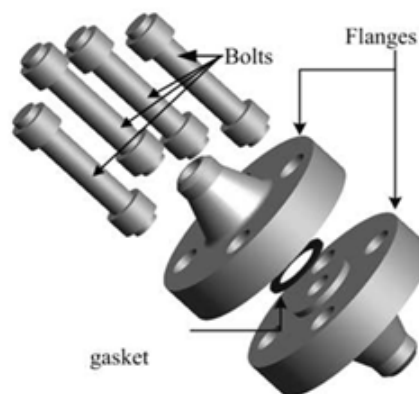
نتایج نشان داد که تنش گسکت در بخش تحت کشش به مقدار زیادی کاهش و در بخش تحت فشار اندکی افزایش دارد و دیگر آنکه بار خارجی احتمال رخ دادن نشستی را افزایش می‌دهد [۷].

کوندو و همکاران (۲۰۱۶) تغییرات نیروی پیچ‌ها، تنش هاب، توزیع تنش گسکت و آب‌بندی فلنج دارای گسکت فلزی را مورد بررسی قرار دادند. در ابتدا با تحلیل اجزای محدود، خواص مکانیکی اتصال فلنجی تحت فشار داخلی آنالیز گردید. در ادامه به صورت تجربی عامل بار<sup>۴</sup> و تنش هاب و نرخ نشستی بررسی شد. هم‌چنین ارتباط بین نرخ نشستی و تنش گسکت با استفاده از دستگاه پلتن<sup>۵</sup> اندازه‌گیری گردید.

آنها بیان کردند که با افزایش تنش گسکت، نرخ نشستی کاهش می‌یابد و زمانی که گسکت دچار تغییر شکل پلاستیک شود، آب‌بندی بهبود خواهد یافت. به علاوه در محدوده تغییر شکل الاستیک گسکت، عرض آن با بهبود آب‌بندی رابطه مستقیم دارد

اتصالات فلنجی در صنایعی از قبیل نیروگاه‌ها، صنایع نفت و گاز، خطوط انتقال آب، پتروشیمی و ... کاربرد فراوان دارد. اتصال فلنجی از بخش‌های فلنج‌های بالا و پایین، پیچ‌های محکم‌کننده و گسکت تشکیل شده است. در اتصال فلنجی پیچ‌ها وظیفه محکم نگه‌داشتن مجموعه فلنج‌ها و گسکت را بر عهده دارند و گسکت که میان دو فلنج قرار می‌گیرد باعث آب‌بندی کامل سطح بین فلنج‌ها و به نوعی موجب حذف اثر عدم انطباق کامل سطوح فلنج‌ها می‌گردد. در شکل ۱ مجموعه اتصال فلنجی شامل پیچ‌ها، فلنج‌ها و گسکت نمایش داده شده است.

در صورت پدیدار شدن نشستی در یک اتصال فلنجی احتمال خسارات زیست محیطی و مالی زیادی وجود دارد لذا در مباحث مربوط به اتصالات فلنجی، راندمان آب‌بندی بسیار مهم بوده و این امر نشانگر نقش تعیین‌کننده گسکت‌ها در این خصوص است.



شکل ۱ اجزای اتصال فلنجی

عواملی که باعث ایجاد نشستی در اتصالاتی فلنجی می‌شود در ذیل آمده است [۱]:

- کاهش شدید تنش بین فلنج‌ها (که باعث محکم بسته شدن فلنج‌ها می‌گردد)
- آسیب دیدن سطح فلنج یا گسکت
- وجود عیب در ماده سازنده گسکت
- بارهای خارجی اعمالی بر لوله

در پژوهش حاضر تأثیر بارهای خارجی اعمالی بر راندمان آب‌بندی اتصال فلنجی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بررسی‌ها از طریق تحلیل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس و برای چهار نوع گسکت مختلف و با سه شرط بارگذاری انجام پذیرفته است.

## ۱-۱- پیشینه پژوهش

پراساد و همکاران (۲۰۰۷) جهت بررسی راندمان آب‌بندی فلنج دارای گسکت، یک مدل سه بعدی فلنج را به روش تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند و خواص بارگذاری و باربرداری بدست آمده از کار آزمایشگاهی، مورد استفاده قرار گرفت. فلنج مورد بررسی از نوع گردن جوشی کلاس ۶۰۰ بود. آن‌ها بیان کردند که با افزایش فشار داخلی تنش گسکت کاهش می‌یابد که با ادامه یافتن این کاهش احتمال رخ دادن نشستی وجود دارد [۲].

<sup>۱</sup>Hub <sup>۲</sup>Caesar <sup>۳</sup>Ansys <sup>۴</sup>load factor <sup>۵</sup>platen

نتیجه رسیدند که با افزایش فشار داخلی، نیروی پیچ‌ها افزایش یافته و تنش گسکت کاهش می‌یابد [۱۲].

از آنجایی که در شرایط واقعی بارهای مکانیکی گشتاور خمشی، نیروی کششی، نیروی پیچ و فشار داخلی می‌تواند به صورت همزمان بر مجموعه اتصال فلنج و گسکت اعمال شود و با توجه به اینکه در پژوهش‌های پیشین این امر مشاهده نشد، در پژوهش حاضر تأثیر مدول الاستیسیته و ترکیب بارهای مکانیکی فوق به صورت همزمان بر راندمان آب‌بندی گسکت‌های مختلف بررسی می‌شود. لازم به ذکر است از آنجایی که تحلیل انجام شده در پژوهش پیشرو استاتیکی می‌باشد لذا پارامتر زمان در این بررسی نقشی نخواهد داشت.

## ۲- معادلات اساسی حاکم

سریرترین مورد برای تأیید آب‌بندی اتصال فلنجی، بار گسکت است. زمانی که بار فشاری از مقدار بار بستن اتصال بیشتر شود و یا حتی به آن مقدار نزدیک شود، احتمال رخ‌دادن نشتی وجود خواهد داشت. تنش گسکت را می‌توان طبق رابطه زیر بیان نمود:

$$\sigma_{\text{gasket}} = \frac{p \circ T \times \frac{N_{\text{bolts}}}{d} - \pi D_{\text{inside}}^2 \frac{P}{4 \times 10^6}}{\pi w D_{\text{inside}}} \quad (4)$$

در این رابطه  $\sigma_{\text{gasket}}$  تنش تماسی،  $T$  گشتاور پیچ،  $N$  تعداد پیچ‌ها،  $d$  قطر پیچ،  $D_{\text{inside}}$  قطر داخلی گسکت،  $w$  عرض گسکت،  $p$  فشار داخلی است. مشاهده می‌شود، افزایش گشتاور پیچ و تعداد پیچ‌های محکم‌کننده اتصال، باعث افزایش تنش آب‌بندی اتصال خواهد شد و افزایش فشار داخلی باعث کاهش تنش مذکور خواهد شد [۱].

در شبیه‌سازی مذکور بین سطوح گسکت و فلنج و همچنین بین پیچ‌ها و فلنج اصطکاک در نظر گرفته می‌شود. رابطه مورد استفاده در مدل‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu p \quad (5)$$

که در این رابطه  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $p$  فشار تماسی بین سطوح و  $\tau_{\text{crit}}$  تنش برشی بحرانی است. تا زمانی که میزان تنش برشی از این مقدار بحرانی کمتر باشد، حرکت مماسی بین سطوح رخ نخواهد داد.

## ۳- تحلیل عددی

در پژوهش حاضر نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> جهت تحلیل اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفته است. فلنج مورد بررسی ۸ اینچی کلاس ۳۰۰ بوده که مشخصات هندسی فلنج، گسکت و پیچ در شکل ۲ قابل مشاهده است.

مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فلنج، پیچ و گسکت‌ها در جدول ۱ ذکر شده است و همچنین نمودارهای تنش-کرنش گسکت‌ها در شکل ۳ بیان گردیده است.

طبق روابط (۶) و (۷) می‌توان به مقادیر تنش حقیقی و کرنش حقیقی دست یافت.

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}), \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}}(1 + \epsilon_{\text{nom}}). \quad (7)$$

حال آن که در محدوده تغییر شکل پلاستیک، بهبود آب‌بندی از عرض گسکت مستقل است. [۸].

عبید و خان (۲۰۱۸) ترکیبی از بارهای محوری، گشتاور خمشی و فشار داخلی را در نظر گرفته و تغییرات تنش در بخش‌های مختلف اعم از لوله، هاب، پیچ و گسکت را مورد بررسی قرار دادند. فلنج مورد مطالعه ایشان ۴ اینچ کلاس ۹۰۰ بود. تحلیل به روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. طبق مشاهدات در بارگذاری مرکب، بار محوری تأثیر برجسته‌ای در جابجایی محوری و متعاقباً بر آب‌بندی دارد. به طوری که با افزایش بار محوری، آب‌بندی کاهش خواهد یافت [۹].

وانگ و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل سه بعدی الاستو-پلاستیک مورد مطالعه قرار دادند تا راندمان اتصال را تحت فشار داخلی و دمای بالا ارزیابی کنند. نتایج نشان داد با افزایش دما، ماکزیمم تنش پیچ افزایش و تنش تماسی گسکت کاهش می‌یابد [۱۰].

عبید و همکاران (۲۰۱۸) استحکام و آب‌بندی فلنج دارای گسکت را تحت بار پیچ‌ها، فشار داخلی، نیروی محوری و بارگذاری حرارتی با استفاده از تحلیل اجزای محدود به صورت سه بعدی و غیر خطی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که بارهای محوری و حرارتی بر استحکام فلنج تأثیر دارد به نحوی که بارهای حرارتی تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر آب‌بندی تأثیرگذار بوده و برای دماهای بالاتر امکان شکست وجود دارد. همچنین روش (استراتژی) بستن پیچ‌ها در هنگام مونتاژ به میزان زیادی بر آب‌بندی فلنج تأثیر می‌گذارد [۱۱].

ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) بر مبنای پارامترهای نرخ نشتی، رابطه‌ای بین نیروی پیچ و تنش گسکت استخراج کردند. آن‌ها رابطه‌ای بین نرخ نشتی و فشار داخلی بیان کردند که به صورت زیر می‌باشد:

$$L_{pV} = A_L S_{gr}^{-N_L} T^{M_L} p \quad (1)$$

در این رابطه  $L_{pV}$  نرخ حجم نشتی (برحسب  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ )،  $A_L$ ،  $N_L$  و  $M_L$  ثوابت گسکت،  $S_{gr}$  (برحسب MPa) تنش باقی‌مانده گسکت،  $T$  دما (برحسب K) و  $p$  فشار داخلی (برحسب MPa) فلنج می‌باشد.

رابطه بین نیروی پیچ کلی  $W_p$  و نیروی فشاری وارد بر گسکت  $F_p$  به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$W_p = \frac{\pi}{4} D_i^2 p + F_p \quad (2)$$

که  $D_i$  (برحسب mm) شعاع داخلی گسکت است و تنش گسکت بدین صورت قابل محاسبه خواهد بود:

$$S_{gr} = \frac{F_p}{\frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2)} = \frac{W_p - 0.785 D_i^2 p}{\frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2)} \quad (3)$$

که  $D_o$  شعاع خارجی (برحسب mm) گسکت است.

همچنین نرخ نشتی بر اساس نیروی پیچ مدل شد. بوسیله این مدل، نرخ نشتی مستقیماً از طریق نیروی پیچ قابل استحصال بوده و نهایتاً راندمان آب‌بندی می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور صحت‌سنجی، کار آزمایشگاهی نیز انجام پذیرفت. به این

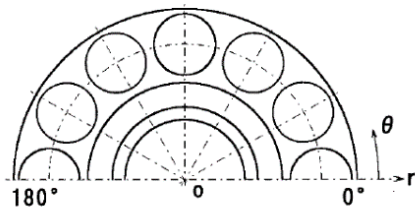
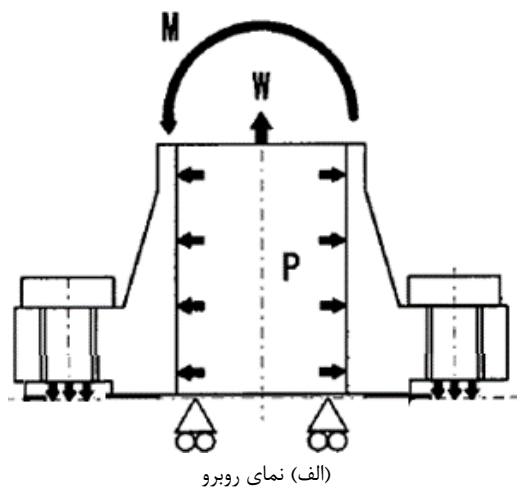
<sup>1</sup>Abaqus

در جدول ۲ مقادیر بارهای اعمالی در سه حالت مختلف بارگذاری بیان شده است.

جدول ۲ بارهای اعمالی بر اتصال فلنجی

بار	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
نیروی کششی (kN)	۱۲۵	۱۶۰	۱۶۳
نیروی پیچ (kN)	۴۹	۱۱۸/۵	۲۱۴
فشار داخلی (MPa)	۴	۵/۱	۵/۲
گشتاور خارجی (kN.m)	۴۵	۷۶	۹۴

در شکل ۴ شرایط مرزی و شرایط بارگذاری نشان داده شده است. نکته قابل ذکر اینست که ضریب اصطکاک ۰/۲ جهت تماس بین گسکت و فلنج و هم‌چنین تماس بین پیچ و فلنج در نظر گرفته شده است [۱۳].

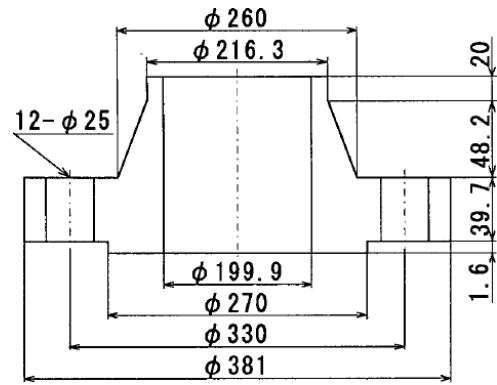


(compression side) (tensions side)  
(ب) نمای بالا

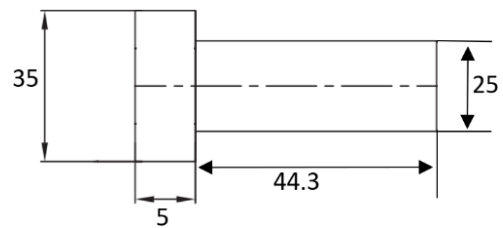
شکل ۴ شرایط مرزی و بارگذاری.

در ادامه به بررسی میزان تأثیر هر کدام از بارهای مکانیکی بر راندمان آب‌بندی اتصال فلنجی پرداخته شده است، بدین صورت که با تغییر دادن یک عامل و ثابت بودن سایر عوامل، میزان اثر هر بار مشخص می‌شود. اعمال این شرایط در زاویه ۱۸۰ درجه و در شعاع ۱۳۱/۸ میلی‌متر صورت می‌گیرد. در جدول ۳ بارگذاری اعمالی مذکور، بیان شده است.

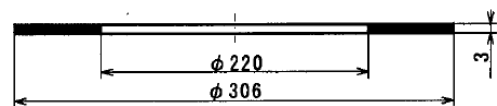
به دلیل این که اطلاعات ورودی هیچ یک از نتایج آزمایشگاهی موجود با نتایج تحلیل عددی این تحقیق مشابهت نداشت برای اعتبارسنجی تحلیل عددی، اعتبارسنجی در روش مدل‌سازی انجام پذیرفته است. نمودار شکل ۵ تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج مطالعه پیش رو با پژوهش انجام‌شده توسط ساوا (۲۰۰۳) [۱۳] را نشان می‌دهد که از آن می‌توان صحت روش بکارگرفته شده در شبیه‌سازی عددی را نتیجه گرفت.



(الف) فلنج [۱۳]



(ب) پیچ

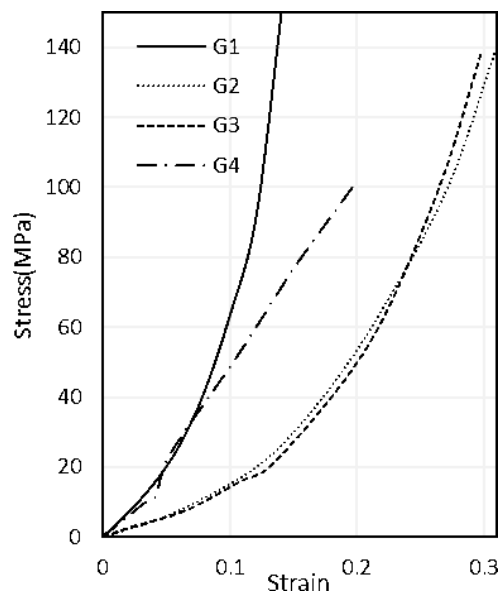


(ج) گسکت [۱۳]

شکل ۲ مشخصات هندسی اتصال مورد بررسی

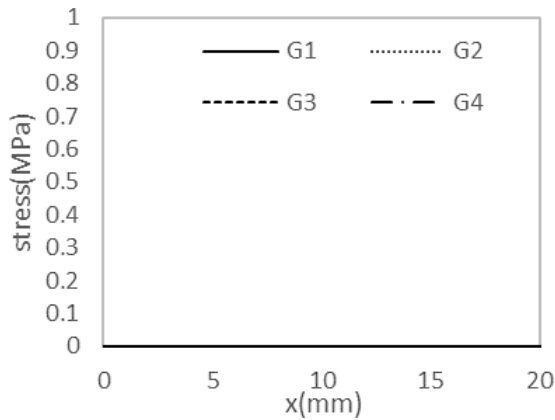
جدول ۱ خواص مکانیکی اجزای اتصال فلنجی مورد بررسی

قطعه	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)
فلنج	۰/۳	۲۰۶۰۰۰
پیچ	۰/۳	۲۰۶۰۰۰
گسکت ۱	۰/۳۴	۱۱۳
گسکت ۲	۰/۳۴	۳۳۰
گسکت ۳	۰/۳	۱۲۶
گسکت ۴	۰/۳	۳۰۳



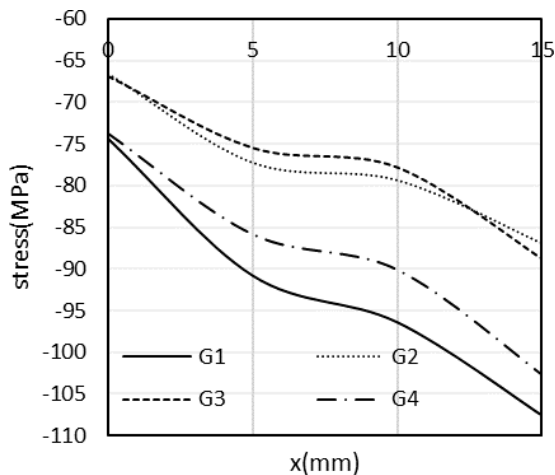
شکل ۳ تنش-کرنش گسکت‌های مورد مطالعه

مطابق آنچه در شکل ۷ نشان داده شده است در زوایای ۹۰ و ۰ درجه تنش تماسی در راستای شعاع تمامی گسکت‌ها تحت بارگذاری ۱ (حالت ۱) صفر است، لذا می‌توان گفت در این زوایا و تحت این بارگذاری تمامی گسکت‌ها دچار نشتی خواهند شد.



شکل ۷ تنش تماسی در راستای شعاع در زوایای ۰ و ۹۰ درجه تحت بارگذاری ۱.

نمودار شکل ۸ بیانگر تغییرات تنش تماسی گسکت در شرایط بارگذاری ۱ (حالت ۱) از داخلی‌ترین شعاع تا خارجی‌ترین شعاع در زاویه ۱۸۰ درجه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در راستای شعاع با فاصله گرفتن از مرکز گسکت، تنش تماسی تمامی گسکت‌ها افزایش می‌یابد. در این زاویه و تحت بارگذاری ۱ تنش تماسی صفر نبوده و نشتی رخ نمی‌دهد. باید توجه داشت که در این زاویه گشتاور خمشی اعمال باعث فشرده شدن اتصال فلنجی شده و به افزایش تنش تماسی کمک می‌کند، در حالی که در زوایای ۰ و ۹۰ درجه چنین نیست.

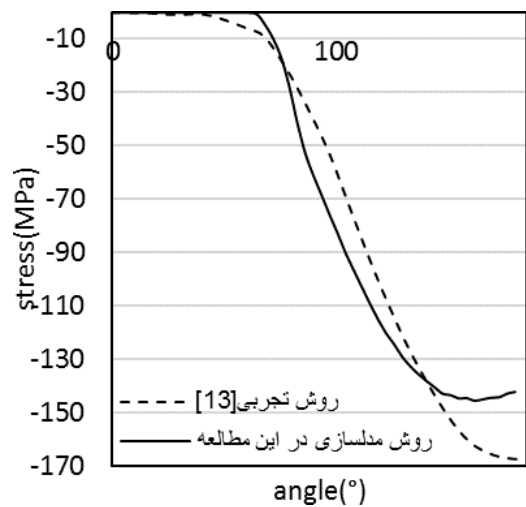


شکل ۸ تغییرات تنش تماسی گسکت در شرایط بارگذاری ۱ از داخلی‌ترین شعاع تا خارجی‌ترین شعاع و در زاویه ۱۸۰.

نمودار شکل ۹ بیانگر تغییرات تنش تماسی گسکت در شرایط بارگذاری ۲ (حالت ۲) از داخلی‌ترین شعاع تا خارجی‌ترین شعاع و در زاویه ۰ درجه است. مشاهده می‌شود که تنش تماسی در این زاویه و تحت بارگذاری ۲ برای گسکت‌های ۱ و ۴ صفر شده است لذا در این موارد نشتی رخ خواهد داد در حالی که برای گسکت‌های ۲ و ۳ تنش تماسی تا فاصله ۵ میلی‌متر از داخلی‌ترین شعاع صفر نیست، بنابراین آب‌بندی خود را حفظ نموده‌اند.

جدول ۳ بارگذاری‌های اعمالی جهت بررسی تأثیر بارهای مختلف.

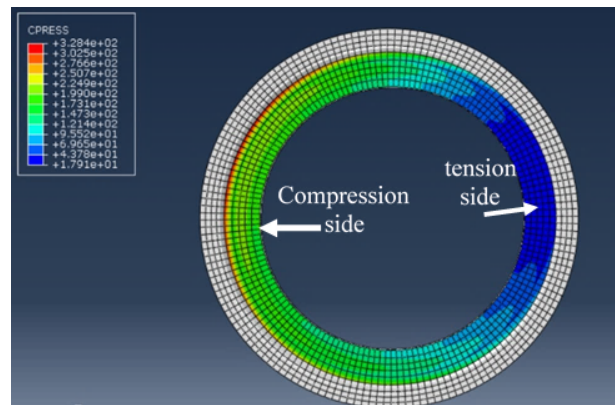
نوع بارگذاری	گشتاور (N.m)	نیروی کششی (N)	نیروی پیچ (N)	فشار داخلی (MPa)
بارگذاری اولیه	۷۶۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	۱۱۸۵۰۰	۴
بارگذاری ثانویه ۱ (فشار متغیر)	۷۶۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	۱۱۸۵۰۰	۵
بارگذاری ثانویه ۲ (گشتاور متغیر)	۷۷۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	۱۱۸۵۰۰	۴
بارگذاری ثانویه ۳ (نیروی کششی متغیر)	۷۶۰۰۰	۱۶۳۰۰۰	۱۱۸۵۰۰	۴
بارگذاری ثانویه ۴ (نیروی پیچ متغیر)	۷۶۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۴



شکل ۵ مقایسه نتایج در شعاع ۱۲۴/۲۵ جهت اعتبارسنجی روش عددی.

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

در شکل ۶ تصویری از توزیع تنش تماسی گسکت تحت بارگذاری‌های اعمالی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بخشی از گسکت تحت فشار و بخشی از آن تحت کشش است. علت این امر را اعمال گشتاور خمشی بر مجموعه فلنج و گسکت می‌توان دانست.



شکل ۶ توزیع تنش تماسی در گسکت تحت بارگذاری.

۴ و رفتار گسکت‌های ۲ و ۳ تقریباً نزدیک به هم است، دلیل این امر را می‌توان به نزدیک بودن نمودارهای خواص آن‌ها نسبت داد. در جدول ۴ نتایج حاصل از مقایسه اثر هر یک از عوامل بر راندمان آب‌بندی بیان شده است.

**جدول ۴** بارگذاری‌های اعمالی جهت بررسی تأثیر بارهای مختلف.

بارگذاری	تغییر تنش تماسی (%)	افزایش هر متغیر (%)	تنش تماسی (MPa)
بارگذاری اولیه	-	-	۱۳۶/۶۲۷۷
بارگذاری ثانویه (۱ فشار متغیر)	۰/۵۹۳	۲۵	۱۳۵/۸۱۶۹
بارگذاری ثانویه ۲ (گشتاور متغیر)	۰/۶۲۳	۱/۳۲	۱۳۷/۴۷۹۴
بارگذاری ثانویه ۳ (نیروی کششی متغیر)	۰/۰۱۹۳	۱/۸۷۵	۱۳۶/۶۵۴۱
بارگذاری ثانویه ۴ (نیروی پیچ متغیر)	۱۴/۹	۲۷	۱۵۶/۹۸۵۳

همان‌طور که در جدول ۴ بیان شده، نتایج حاکی از آن است که افزایش فشار داخلی، تنش تماسی را کاهش می‌دهد که این نتیجه با رابطه (۱) نیز هم‌خوانی دارد. گشتاور خمشی نیز تنش تماسی را افزایش داده است، دلیل این امر این است که تحقیق پیش رو در زاویه ۱۸° درجه انجام گرفته و با توجه به جهت اعمال گشتاور خارجی، این ناحیه تحت فشار است. به عبارتی دیگر گشتاور در این ناحیه مانند نیروی پیچ باعث افزایش تنش تماسی می‌شود.

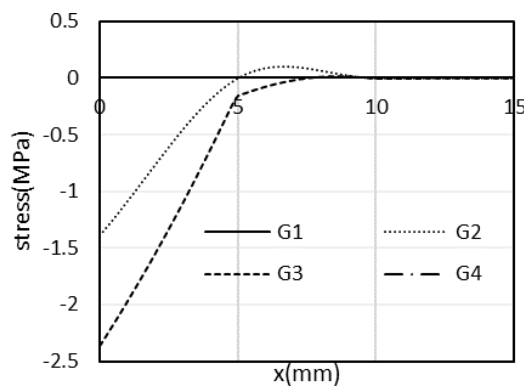
با توجه به نتایج جدول ۴ و اگر برون‌یابی کار صحیحی باشد می‌توان گفت با افزایش ۲۵ درصدی هر کدام از عوامل فشار داخلی، بار خمشی، نیروی کششی و نیروی پیچ، تغییرات تنش تماسی گسکت به ترتیب برابر با ۰/۶، ۱۱، ۰/۳ و ۱۳ درصد خواهد بود که به معنای تأثیرگذاری بیشتر نیروی پیچ بر تنش تماسی و به تبع آن بر راندمان آب‌بندی است. البته طبق آنچه در بالا اشاره شد فشار داخلی تأثیر منفی و نیروی پیچ تأثیر مثبت بر راندمان آب‌بندی دارد.

### ۵- نتیجه‌گیری

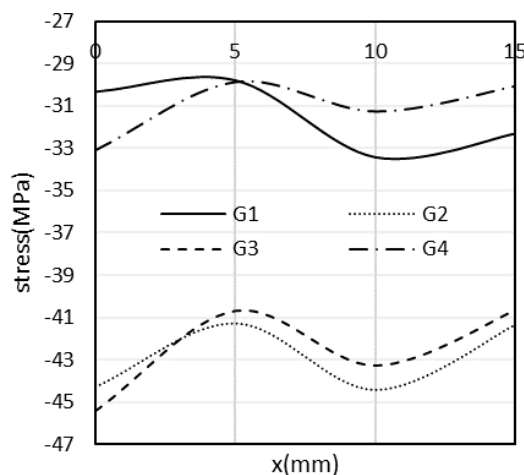
در این پژوهش راندمان آب‌بندی چهار نوع گسکت متفاوت تحت سه نوع بارگذاری مختلف از طریق روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. بارهای مکانیکی که به صورت هم‌زمان اعمال شده‌اند عبارت‌اند از: گشتاور خمشی، نیروی کششی، فشار داخلی و نیروی پیچ‌ها.

جهت بررسی راندمان آب‌بندی، تنش تماسی گسکت مورد بررسی قرار گرفته‌است. همان‌طور که بیان شد اگر تنش تماسی از داخلی‌ترین شعاع تا بیرونی‌ترین شعاع صفر شود به‌منزله رخ دادن نشتی خواهد بود. نتایج نشان داد که:

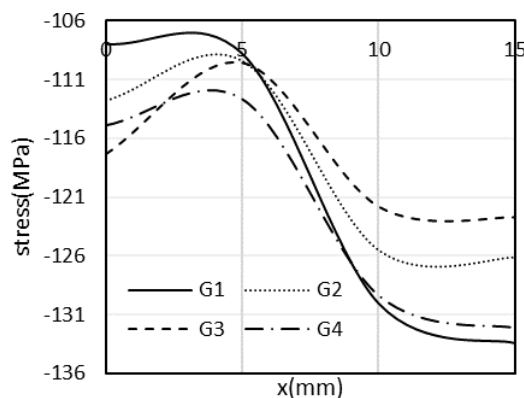
- تحت بارگذاری ۱ (نیروی کششی، نیروی پیچ، فشار داخلی و گشتاور به ترتیب ۱۲۵ kN و ۴۹ kN و ۴ MPa، ۴۵ kN.m) تمامی گسکت‌ها دچار نشتی شدند، تحت بارگذاری ۲ (نیروی کششی، نیروی پیچ، فشار داخلی و گشتاور به ترتیب ۱۶۰ kN و ۱۱۸/۵ kN و ۱/۵ MPa، ۷۶ kN.m) گسکت‌های ۱ و ۴ دچار نشتی شده و در بارگذاری ۳ (نیروی کششی، نیروی پیچ، فشار داخلی



شکل ۹ تغییرات تنش تماسی در زاویه ۰ درجه از داخلی‌ترین شعاع تا خارجی‌ترین شعاع تحت بارگذاری ۲.



الف) نتایج در زاویه ۱۰ درجه



ب) نتایج در زاویه ۹۰ درجه

شکل ۱۰ تغییرات تنش تماسی در زوایای ۰ و ۹۰ درجه مختلف از داخلی‌ترین شعاع تا خارجی‌ترین شعاع تحت بارگذاری ۳.

شکل ۱۰ بیانگر تغییرات تنش تماسی گسکت در شرایط بارگذاری ۳ (حالت ۳) از داخلی‌ترین شعاع تا خارجی‌ترین شعاع و در زوایای ۰ و ۹۰ درجه است.

مطابق نمودار شکل ۱۰ الف، تنش تماسی گسکت‌های ۲ و ۳ مقدار بیش‌تری نسبت به تنش‌های گسکت‌های ۱ و ۴ دارند. نمودار ۱ ب نشانگر این است که به‌طور کلی با افزایش فاصله از مرکز گسکت، تنش تماسی افزایش می‌یابد.

تنش تماسی هیچکدام از گسکت‌ها تحت این حالت بارگذاری صفر نیست یعنی تمامی اتصالات فلنجی آب‌بندی خود را حفظ کرده‌اند. نکته قابل مشاهده دیگر این که رفتار گسکت‌های ۱ و

- nection. in *ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference*, pp. 73–80. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2010.
- [5] Horiuchi, Kazuhide, Takagi, Yoshio, and Sawa, Toshiyuki. Fem stress analysis and the sealing performance evaluation of pipe flange connections subjected to external bending moments and internal pressure. in *ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference*, pp. 179–186. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2011.
- [6] Kondo, Koji and Sawa, Toshiyuki. A determination method of bolt preload for bolted pipe flange connections with metal gaskets under internal pressure. in *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2015.
- [7] Wang, He Hui, Feng, Ya Juan, Zhu, Wen Min, and Zhang, Zhi Ming. Finite element analysis of bolted flanged joints subjected to external loads. in *Applied Mechanics and Materials*, vol. 750, pp. 324–329. Trans Tech Publ, 2015.
- [8] Kondo, Koji, Sato, Koji, Takahashi, Satomi, and Sawa, Toshiyuki. The mechanical characteristics and sealing performance evaluation of bolted pipe flange connections with metallic flat gaskets subjected to internal pressure. in *ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2016.
- [9] Abid, Muhammad and Khan, Niaz B. Behavior of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure, axial, and bending load: Three-dimensional numerical study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 232(3):314–322, 2018.
- [10] Wang, Lu, Chen, Xuedong, Fan, Zhichao, and Xue, Jilin. Fem stress analysis of bolted flange joints in elevated temperature service condition. in *ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.
- [11] Abid, Muhammad, Nash, David Hugh, Javed, Saif, and Wajid, Hafiz Abdul. Performance of a gasketed joint under bolt up and combined pressure, axial and thermal loading—fea study. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 168:166–173, 2018.
- [12] Zhuang, Fa Kun, Li, Xiao Peng, Xie, Guo Shan, Shi, Jin, and Wang, Yian. Sealing performance evaluation for bolted flange joint with spiral wound gasket based on the bolt force. in *Key Engineering Materials*, vol. 795, pp. 246–253. Trans Tech Publ, 2019.
- [13] Sawa, Toshiyuki, Matsumoto, Mitsuhiro, and Ando, Fumio. Fem stress analysis and sealing performance in pipe flange connections with gaskets subjected to external bending moment: Case where internal fluid is liquid. in *ASME 2003 Pressure Vessels and Piping Conference*, pp. 85–95. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2003.
- و گشتاور به ترتیب  $۱۶۳ \text{ kN}$  و  $۲۱۴ \text{ kN}$ ،  $۲/۵ \text{ MPa}$ ،  $۹۴ \text{ kN.m}$  تمامی گسکت‌ها آب‌بندی خود را حفظ نمودند. لذا می‌توان گفت گسکت‌های ۲ و ۳ از سایرین، راندمان آب‌بندی بالاتری داشته‌اند. این امر را می‌توان به مدول الاستیسیته نسبت داد که در گسکت‌های ۲ و ۳ نسبت به گسکت‌های ۱ و ۴ مقدار کمتری دارد.
- میزان تأثیرگذاری عوامل مختلف بر راندمان آب‌بندی اتصال فلنجی به ترتیب میزان تأثیر نیروی پیچ، بار خمشی، فشار داخلی و نیروی کششی است.
  - افزایش ۲۵ درصدی نیروی پیچ‌ها، تنش تماسی را به اندازه ۱۳ درصد افزایش می‌دهد.
  - رفتار تنش تماسی گسکت‌های ۲ و ۳ و رفتار تنش تماسی گسکت‌های ۱ و ۴ مشابه هم است که این امر را می‌توان به شباهت نمودارهای تنش-کرنش آن‌ها نسبت داد.
- ### فهرست علائم
- |                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| $\sigma$ [Pa]                         | تنش حقیقی                |
| $\sigma_{\text{nom}}$ [Pa]            | تنش مهندسی               |
| $\epsilon$                            | کرنش حقیقی               |
| $\epsilon_{\text{nom}}$               | کرنش مهندسی              |
| $\sigma_{\text{gasket}}$ [Pa]         | تنش گسکت                 |
| $N_{\text{bolt}}$                     | تعداد پیچ‌ها             |
| $d$ [m]                               | قطر پیچ                  |
| $w$ [m]                               | عرض گسکت                 |
| $P$ [MPa]                             | فشار داخلی               |
| $M$ [N.m]                             | گشتاور خارجی             |
| $W$ [N]                               | نیروی کششی               |
| $D_{\text{inside}}$ [m]               | قطر داخلی گسکت           |
| $L_{pV}$ [ $\text{Pa.m}^3/\text{s}$ ] | نرخ حجم نشستی            |
| $S_{\text{gr}}$ [MPa]                 | تنش باقی‌مانده گسکت      |
| $T$ [K]                               | دما                      |
| $D_i$ [mm]                            | شعاع داخلی گسکت          |
| $W_p$ [N]                             | نیروی پیچ کلی            |
| $F_p$ [N]                             | نیروی فشاری وارد بر گسکت |
| $D_o$ [mm]                            | شعاع خارجی گسکت          |
| $\mu$                                 | ضریب اصطکاک              |
| $\tau_{\text{crit}}$ [MPa]            | تنش برشی بحرانی          |
- ### مراجع
- [1] Sofronas, T. Case 25: The leaking flange gasket. *Hydrocarbon processing (International ed.)*, 84(2), 2005.
- [2] Krishna, M Murali, Shunmugam, MS, and Prasad, N Siva. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(6):349–357, 2007.
- [3] Mathan, G and Prasad, N Siva. A study on the sealing performance of flange joints with gaskets under external bending using finite-element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 222(1):21–29, 2008.
- [4] Takagi, Yoshio, Torii, Hiroyasu, Sawa, Toshiyuki, and Omiya, Yuya. Effect of external bending moment on the sealing performance of pipe flange con-