

## آنالیز قابلیت اطمینان ظرفیت تحمل بار اتصال کمر بند گوه‌ای دارای عدم قطعیت پارامتری

علی داور

سید صدرالدین موسوی

رضا آذرافزا\*

استادیار، مجتمع دانشگاهی و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،  
 a\_davar@mut.ac.ir  
 کارشناس ارشد مکانیک، مجتمع دانشگاهی و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،  
 sadredin.mousavi@me.iut.ac.ir  
 استادیار، مجتمع دانشگاهی و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران،  
 azarkntu@yahoo.com

### چکیده

اتصال کمر بند گوه‌ای معمولاً برای اتصال پوسته‌های استوانه‌ای در صنعت استفاده می‌شود. در شرایط واقعی پارامترهای مختلف اتصال، همچون ضریب اصطکاک و نیروی کشش کمر بند دارای عدم قطعیت بوده و توزیع آماری دارند. در این مقاله مدل اجزاء محدود گسسته‌ای ارائه شده که ضمن داشتن سرعت حل مناسب، توانایی لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها را به شکلی منطبق با واقعیت دارد. بدین ترتیب که اتصال به چندین قطاع که در هر کدام تنها یک گوه حضور دارد، افزای شده و به جای هر کدام یک فنر خطی با سفتی‌های متفاوت گذاشته می‌شود. مدل ارائه شده با نتایج مقالات گذشته اعتبار سنجی شده است. در این مقاله ابتدا با استفاده از روش مونت کارلو توزیع آماری سفتی‌ها محاسبه شده و در ادامه به کمک مدل گسسته، ظرفیت تحمل بار محوری و خمشی محاسبه شده است. سپس با در نظر گرفتن مقادیر مختلف ضریب ایمنی، قابلیت اطمینان هر طرح به کمک مدل ساده شده محاسبه شده است. جدول بدست آمده گویای این مطلب است که طراح با انتخاب هر ضریب ایمنی به چه میزان از قابلیت اطمینان یا احتمال خرابی خواهد رسید.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت، مونت کارلو، اتصال کمر بند گوه‌ای، قابلیت اطمینان.

## Reliability Analysis of Bearing Load Capacity of V-Clamp Band Under Parameters' Uncertainty

A. Davar

S. S. Mousavi

R. Azarafza

Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Clamp band joints are commonly used for connection of the cylindrical shells. Parameters of the joint like coefficients of friction and preload of the metal belt are uncertain and follow a certain distribution in real world conditions. In this paper, a finite element model of the joint is introduced which takes parameters uncertainty into account with reasonable amount of computational costs in a way that best reflect the real world working conditions. Thus, the joint is partitioned into sectors which only contain one v-segment then each sector are substituted with an equivalent nonlinear spring. Results of the model are compared with experimental results in the literature for verification. Firstly, distribution of the stiffness and load bearing capacity are calculated utilizing Monte Carlo Simulation. Then, reliability of a joint designed by applying a known safety factor instead of utilizing uncertainty analysis is estimated. Finally a decision table is formed based on the simplified model in the design cycle, in which one can achieve appropriate safety factor by selecting uncertainty percent and required level of reliability.

**Keywords:** Uncertainty, Monte Carlo, V-Clamp Band, Reliability.

کمر بند کاملاً یکنواخت نبوده و فشار هر یک از لقمه‌ها به لبه‌های فلنج متفاوت بوده و در نتیجه سفتی موضعی اتصال در محل هر لقمه، با یکدیگر فرق دارد. به همین خاطر، خواص اتصال همچون بار نهایی قابل تحمل و سفتی آن با مقدار محاسبه شده با استفاده از پارامترهای نامی اتصال متفاوت خواهد بود و در موارد حساس، لازم است توزیع آماری این خواص، اندازه‌گیری شده و قابلیت اطمینان طرح محاسبه شود.

عمده تحقیقاتی که با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای اتصال و محاسبات آماری احتمال بروز خطا را بررسی کرده‌اند، به لحظه جدایش اتصال و عدم برخورد قطعات پس از جدایش معطوف شده است [2-6]. علی‌رغم پر کاربرد بودن اتصال کمر بند گوه‌ای در صنعت و تاثیر به سزای انعطاف پذیری آن در رفتار دینامیکی سازه هنوز مسئله آنالیز عدم قطعیت و تحلیل قابلیت اطمینان اتصال در حین پرواز، از لحظه پرتاب تا قبل از جدایش، بررسی نشده است. تحقیقات اخیر، صرفاً تاثیر انعطاف پذیری اتصال کمر بند گوه‌ای در دینامیک سازه

### ۱- مقدمه

اتصال کمر بند گوه‌ای به خاطر طراحی ساده، قابلیت باز و بسته شدن آسان و عملکرد مناسب، کاربرد وسیعی برای اتصال پوسته‌های استوانه‌ای همچون فلنج‌ها و لوله‌ها در صنعت دارد [1]. حین اعمال بارهای مختلف که به صورت دینامیکی و یا استاتیکی به سازه وارد می‌شود، نیروی عکس‌العمل بین دو بخش سازه توسط این اتصال منتقل می‌شود. بنابراین سفتی و حداکثر بار قابل تحمل توسط اتصال، تاثیر مهمی بر رفتار دینامیکی و استاتیکی سازه دارد. عملکرد اتصال بدین گونه است که ابتدا دو فلنج به هم متصل شده و سپس تعدادی لقمه گوه‌ای شکل که به یک کمر بند متصل هستند را دورتادور لبه فلنج‌ها قرار می‌دهند. سپس کمر بند با نیرویی که در طراحی محاسبه می‌شود، سفت شده و لقمه‌ها با فشاری که به لبه فلنج وارد می‌کنند، باعث اتصال دو فلنج می‌شوند. به خاطر وجود عدم قطعیت‌ها، نیروی

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: azarkntu@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۲۷

ماهواره‌بر را در حالت قطعی بررسی کرده‌اند. کین و همکاران معادله ارتعاشات محوری اتصال کمربند گوه‌ای را با فرض متقارن محوری و با در نظر گرفتن الاستیسیته فلنج‌ها و نیروی تماسی لقمه و فلنج‌ها استخراج کرده و سفتی محوری اتصال تمسه‌ای را محاسبه کردند [1]. سپس کین و همکاران، سازه ماهواره‌بر و ماهواره‌ای که به کمک اتصال کمربند گوه‌ای به آن متصل شده را مدل کردند. سازه ماهواره و ماهواره‌بر به صورت تیر مدل شده و برای مدل‌سازی سفتی اتصال از چندین فنر خطی فشاری-کششی استفاده شده و مدل نهایی درون نرم افزار اجزاء محدود Ansys ساخته شد [7]. این مدل قابلیت اعمال بارهای خمشی را داشت اما تنها سفتی اولیه آن به جهت بررسی رفتار دینامیکی سازه و محاسبه پاسخ فرکانسی آن استفاده شد. در این مقاله بار نهایی، قابلیت اطمینان و عدم قطعیت بحث نشده است. سپس کین و همکاران برای یک مدل تحلیلی برای بررسی رفتار خمشی اتصال ارائه کردند و از آن برای بررسی سفتی خمشی اتصال استفاده کردند [8]. این مدل قابلیت گسسته‌سازی نداشته و همچنین بار نهایی قابل اعمال به اتصال را محاسبه نمی‌کند. اخیراً توجه اکثر تحقیقات به قابلیت اطمینان اتصالات پیچی معطوف شده است، اما اثرات عدم قطعیت به طور کامل بررسی نشده و بیشتر به بررسی پارامترهای مختلف و به خصوص شل و یا سفت بودن پیچ‌ها بسنده شده است. لی و همکاران تأثیر شل بودن پیچ‌های اتصال پیچی بر روی پارامترهای مودال اتصال را بررسی کردند [9]. لی و همکاران تأثیر عدم یکنواختی فشار سطح به خاطر یکنواخت بسته نشدن پیچ‌ها را بررسی کرده است [10]. تانگ و همکاران مدل تحلیلی از اتصال پیچی را با در نظر گرفتن الاستیسیته پوسته آن در نظر گرفتند، اما در مورد عدم قطعیت‌ها بحث نکردند [11]. وانگ و همکاران، تأثیر گشتاور سفت کردن پیچ را بر رفتار ارتعاشی اتصال پیچی بررسی کردند [12].

در این مقاله با استفاده از روش مونت کارلو توزیع آماری تحلیل عدم قطعیت ظرفیت تحمل بار در دو حالت خمشی و محوری انجام شده و سپس قابلیت اطمینان در حالتی که اتصال با یک ضریب ایمنی مشخص طراحی شده، محاسبه شد. سپس قابلیت اطمینان اتصال با در نظر گرفتن درصد عدم قطعیت‌های مختلف و با احتساب ضریب ایمنی‌های مختلف محاسبه شده و ضمن نشان دادن تاثیر انتخاب ضریب ایمنی در میزان کاهش احتمال خرابی، نمونه‌ای از یک ابزار مهندسی جهت انتخاب ضریب ایمنی با توجه به درصد عدم قطعیت برای دستیابی به سطح دلخواهی از قابلیت اطمینان معرفی شد. برای انجام تحلیل عدم قطعیت لازم است مدلی ساخته شود که در عین سادگی و سرعت حل بالا، بتواند اثرات عدم قطعیت پارامترهای اتصال را به صورت منطبق با واقعیت، لحاظ کند. در واقعیت با دقت خوبی می‌توان فرض کرد که خواص در ناحیه هر گوه یکنواخت بوده و با سایر ناحیه‌ها متفاوت باشد. بنابراین اتصال به چندین قطاع افراز شده و سفتی معادل هر قطاع با یک فنر خطی جایگزین می‌شود. سفتی محوری و بار نهایی محوری هر فنر جداگانه و با الهام از روابط استخراج شده توسط کین [1] و رابطه تجربی [13] محاسبه شده و نهایتاً ظرفیت تحمل بار در دو حالت محوری و خمشی، به کمک روش ارائه شده در این مقاله محاسبه شد. سپس به جهت اعتبار سنجی مدل، نتایج آن در حالت بدون عدم قطعیت، با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شد. پارامترهای مهم سیستم که ورودی روش مونت کارلو هستند، با انجام یک تحلیل

حساسیت شناسایی شده و توزیع سفتی محوری و خمشی یک اتصال دارای عدم قطعیت محاسبه شد. در نهایت با در نظر گرفتن اتصالی که با یک ضریب ایمنی معین طراحی شده، قابلیت اطمینان بر حسب میزان عدم قطعیت برای ضرایب ایمنی مختلف محاسبه شده و یک جدول تصمیم‌گیری ساخته شد. مهم‌ترین کاربرد جدول تصمیم‌گیری که بر مبنای مدل ساده شده جدید ساخته می‌شود، انتخاب ضریب ایمنی برای چک نهایی طرح با مدل کامل و یا استفاده از آن برای بهینه سازی سیستم بر حسب قابلیت اطمینان است.

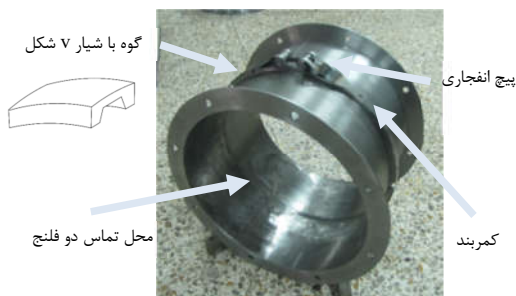
## ۲- مدل‌سازی

در این قسمت مدل اجزاء محدود ساده شده‌ای از اتصال کمربند گوه‌ای توسعه داده می‌شود که در کاربردهای عدم قطعیت قابل استفاده بوده و ضمن داشتن سرعت حل مناسب، توانایی مدل کردن عدم قطعیت‌ها به صورت صحیح و منطبق با واقعیت را دارا باشد. در این مدل گسسته، اتصال به چندین قطاع افراز شده و پارامترها درون هر قطاع یکسان همگن و متفاوت با قطاع‌های دیگر فرض شده است. سپس به جهت اعتبار سنجی مدل‌های ساخته شده، نتایج آن در حالتی که عدم قطعیت وجود ندارد، با نتایج سایر مقالات مقایسه می‌شود.

### ۲-۱- مدل‌سازی اتصال کمربند گوه‌ای بدون در نظر

#### گرفتن عدم قطعیت

اتصال کمربند گوه‌ای مورد بررسی از نوع ۱۱۹۴ بوده [14] و از دو تسمه فلزی که به وسیله دو پیچ انفجاری به هم محکم شده و تعدادی لقمه تشکیل شده است. نمونه‌ای از اتصال کمربند گوه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. لقمه‌ها به خاطر نیروی کششی که پیچ انفجاری در تسمه‌ها ایجاد می‌کند به لبه‌های دو فلنج فشار داده شده و آن‌ها را به هم متصل می‌کند. نمودار جسم آزاد یک برش شعاعی از فلنج بالایی، به همراه لقمه، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- اتصال کمربند گوه‌ای بین دو فلنج [15]

که در آن  $T$  نیروی محوری وارده به فلنج بوده و  $S_0$  نیرویی است که تسمه به لقمه وارد می‌کند. همچنین

$$m_r = \frac{\rho I_p}{\Delta R}$$

$$k_r = \frac{EI_r}{\bar{R}^2 \Delta R} + \frac{EAt_s(2 + \beta t_0 + \frac{\bar{R}^2 t_s}{\beta R_0^2 A})}{4\beta^3 R_0^2 \Delta R A + 4\beta^2 \bar{R}^2 \Delta R t_s}$$

$$r_0 = R_1 - R_0 - \frac{vR_0 A(\beta t_0 + 1)}{2\beta^3 R_0^2 A + 2\beta \bar{R}^2 t_s}$$

$$t_r = \frac{\bar{R}^2 t_s(\beta t_0 + 1)}{2\beta^2 R_0^2 A + 2\beta \bar{R}^2 t_s}$$

در این روابط نیز  $\Delta R = R_1 - R_0$  و  $\bar{R} = (R_1 + R_2)/2$   $t_0$  ضخامت لبه فلنج در ضخامت لبه فلنج در نقطه تماس با لقمه،  $t_s$  ضخامت لبه پوسته استوانه‌ای،  $R_b$  شعاع تسمه و  $I_r$  ممان اینرسی مقطع می‌باشد. ضریب تضعیف  $\beta$  نیز مطابق رابطه  $\beta = \sqrt[4]{3(1-v^2)/(R_0 t_s)^2}$  در ادامه مولفه افقی نیروی تماسی بین لقمه و فلنج  $f_v$  و سفتی تماسی بین دو لبه فلنج  $k_p$  از رابطه زیر محاسبه می‌شوند.

$$f_v = \frac{(1 - \mu \tan \alpha) S_0}{2(\tan \alpha + \mu) R_b} + \frac{\mu S_0}{2(\tan^2 \alpha - \mu^2) R_b} \times \frac{T}{T_m}$$

$$k_p = \begin{cases} 0 & z_r > 0 \\ \frac{E(R_1 - R_3)^3 (R_1 + 3R_3)}{6t_0 \bar{R} \Delta R} & z_r \leq 0 \end{cases}$$

$$T_m = \frac{\pi(1 + \mu \tan \alpha) S_0}{\tan \alpha - \mu}$$

که در آن نیز  $T_m$  بیشینه بار محوری مجاز برای اتصال است [۱۰]. نیروی اینرسی در رابطه ۲ نسبت به سایر کمیت‌ها کوچک بوده و قابل صرف نظر کردن است. بنابراین جابجایی اتصال تحت نیروی محوری  $T$  برابر رابطه زیر خواهد بود.

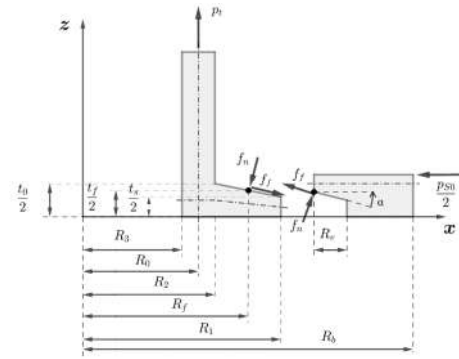
$$z_r(T, S_0) = \frac{r_0 \frac{T}{\pi R_0} - 2(R_1 - R_f) f_v + (t_r - \frac{t_f}{2}) \frac{S_0}{R_b}}{k_p + k_r} \quad (3)$$

و در نهایت سفتی هر قطاع از طریق رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$K = \frac{\delta T}{\delta z_r} \quad (4)$$

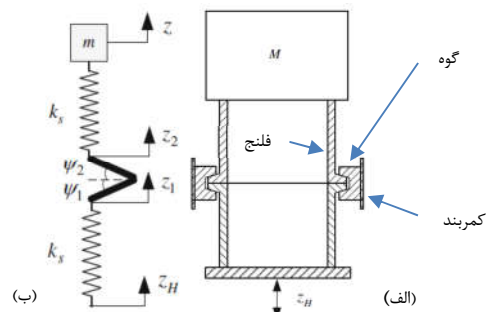
## ۲-۲- توسعه مدل گسسته برای اتصال کمر بند گوه‌ای با پارامترهای دارای عدم قطعیت

عدم قطعیت‌ها باعث می‌شوند که پارامترهای تاثیر گذار همچون ضریب اصطکاک بین لقمه‌ها و لبه‌های فلنج، زاویه شیب آن‌ها و نیروی فشاری لقمه‌ها برای هر یک از لقمه‌های اتصال متفاوت باشد. برای سادگی تحلیل، اتصال را به صورت فرضی به  $N$  قطاع تقسیم می‌کنیم که درون هر قطاع تنها یک لقمه وجود داشته باشد. هنگامی که نیرو یا ممان خارجی به فلنج و در نتیجه به اتصال وارد شود، هر قطاع، از اتصال قسمتی از آن را تحمل خواهد کرد. اگر تغییرات پارامترها محدود باشد می‌توان فرض کرد که نیروی وارده به هر قطاع، تحت اعمال نیرو و ممان خارجی به سازه، در راستای محور ماهواره‌بر خواهد بود. بنابراین، هر یک از این قطاع‌ها همانند  $N$  فنر خطی موازی عمل می‌کنند که بین دو فلنج باشند. شکل ۴ نمایانگر وضعیتی است که در آن اتصال با



شکل ۲- نمودار جسم آزاد یک برش شعاعی از فلنج بالایی به همراه لقمه

کین و همکاران [۱] سیستمی را در نظر گرفتند که در آن یک جسم به وسیله دو فلنج، که خود به واسطه اتصال کمر بند گوه‌ای به همدیگر متصل شده‌اند، به پایه متحرکی متصل شده است و سپس ارتعاشات محوری آن را بررسی کردند. تصویری از این سیستم، به همراه مدل ساده شده معادل آن، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل،  $k_s$  سفتی محوری معادل فلنج‌ها،  $m$  جرم وزنه،  $\psi$  زاویه چرخش لبه فلنج‌ها نسبت به افق و متغیرهای  $Z$  موقعیت عمودی هستند. یعنی موقعیت پایه،  $Z_1$  موقعیت نقطه داخلی لبه فلنج بالایی،  $Z_2$  موقعیت نقطه داخلی لبه فلنج پایینی و  $Z$  موقعیت وزنه است.



شکل ۳- سیستم اصلی و معادل یک جسم که به کمک اتصال کمر بند گوه‌ای و دو فلنج به پایه متحرک متصل شده (الف) سیستم اصلی (ب) سیستم معادل [۱]

میزان جابجایی محوری اتصال که برابر با بازشدگی آن تحت نیروی محوری است، از رابطه  $z_r = z_{r2} - z_{r1}$  قابل محاسبه است که در آن با علم به این مسئله که طول لبه فلنج  $\Delta R = R_1 - R_0$  می‌باشد، جابجایی محوری هر کدام از دو فلنج از رابطه  $z_{ri} = \psi_i \Delta R$  قابل محاسبه خواهد بود. کین و همکاران معادله ارتعاشات سیستم مشخص شده در شکل ۳ را با فرض متقارن محوری بودن اتصال به صورت زیر بدست آوردند [۱].

$$m_r \ddot{z}_r + (k_r + k_p) z_r = r_0 \frac{T}{2\pi R_0} - (R_1 - R_f) f_v + (t_r - \frac{t_f}{2}) \frac{S_0}{2R_b} \quad (1)$$

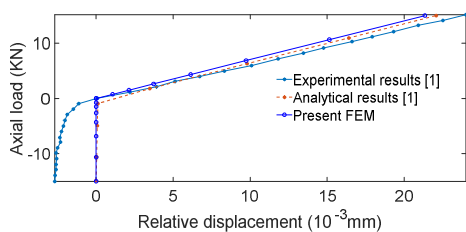
$N$  فنر خطی که سفتی هر کدام  $k_i$  باشد معادل شده است.

می‌شود. مقادیر نامی پارامترهای اتصال بر اساس داده‌های جدول ۱ است.

جدول ۱- پارامترهای اتصال کمر بند گوه‌ای برای اعتبار سنجی [8], [1]

پارامتر	میانگین	پارامتر	میانگین
$\rho$ ( $kg/m^3$ )	۲۷۰۰	$R_b$ (m)	۰/۶۲۳
$\alpha$ (degree)	۱۵	$l_s$ (m)	۰/۴
$E$ (MPa)	۷۱/۷	$t_s$ (m)	۰/۰۰۸
$R_1$ (m)	۰/۶۰۷۵	$\nu$	۰/۳۳
$R_0$ (m)	۰/۵۹۴	$\mu$	۰/۱۲۵
$R_{f0}$ (m)	۱۵		

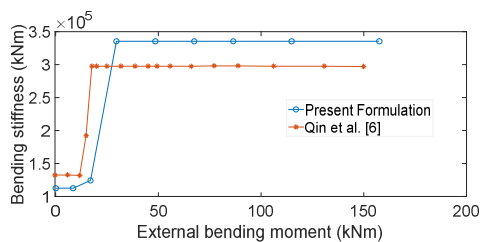
برای اعتبار سنجی روش ارائه شده، اتصالی را در نظر می‌گیریم که مطابق روش ارائه شده در شکل ۵ به ۳۰ قطاع افزایش شده باشد. در اینجا برای مقایسه نتایج مدل گسسته، فرض می‌کنیم که تمامی پارامترهای آن با مقدار نامی خود برابر باشد. سپس جابجایی محوری اتصال بر حسب نیروی محوری خارجی با استفاده از روش ارائه شده محاسبه شده و با نتایج تجربی و شبیه‌سازی کین و همکاران [۱] مقایسه شد. نمودار جابجایی محوری بر حسب نیروی خارجی، که از سه روش مذکور محاسبه شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است و همخوانی قابل قبولی با نتایج کین و همکاران [۱] دارد. داده‌های نمودار با فرض  $S = 0.7 kN$  رسم شده است. مطابق رابطه (۲)، بار محوری مجاز برای این میزان از کشش کمر بند تقریباً برابر با ۱۵ kN است.



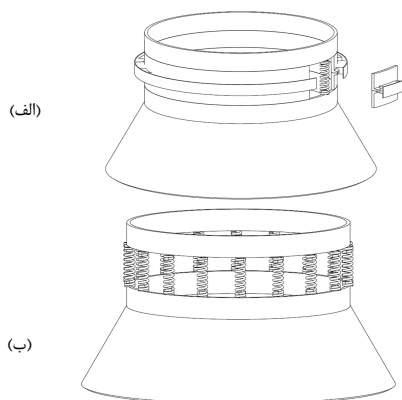
شکل ۵- نمودار جابجایی محوری اتصال کامل تحت نیروی محوری خارجی (با فرض مقادیر نامی برای تمام پارامترها) [1]

در ادامه نتیجه مدل ارائه شده بار دیگر در مسئله محاسبه سفتی خمشی اعتبار سنجی شد. بنابراین با فرض  $S = 25 kN$  سفتی خمشی بر حسب ممان خالص اعمالی مطابق شکل ۷ خواهد بود که نتایج آن با نتایج کین و همکاران [۸] که از شبیه‌سازی بدست آمده، همخوانی دارد. مطابق رابطه (۷)، بار خمشی مجاز برای این کشش کمر بند تقریباً برابر با ۱۷۰ kNm است [۸]:

$$M_m = \frac{\pi R_0 (1 + \mu \tan \alpha) S_0}{2(\tan \alpha - \mu)} \quad (7)$$



شکل ۷- سفتی خمشی بر حسب ممان خالص اعمالی [8]



شکل ۴- مدل سازی اتصال کمر بند گوه‌ای به صورت معادل به کمک فنرهایی که فقط سفتی محوری دارند

قدم بعدی محاسبه سفتی فنر خطی معادل می‌باشد که برابر با سفتی معادل هر قطاع از اتصال تحت اعمال نیروی محوری خواهد بود. با فرض اینکه سفتی پوسته استوانه‌ای و فلنج‌ها در مقایسه با سفتی لقمه‌ها زیاد باشد و یا به عبارت دیگر لبه فلنج‌ها پس از تغییر شکل اتصال دایره باقی بماند، جابجایی هر قطاع با زاویه محوری  $\varphi$ ، که در شکل ۴ نشان داده شده، تحت نیروی محوری  $T$ ، بر مبنای رابطه (۳) برابر رابطه زیر خواهد بود.

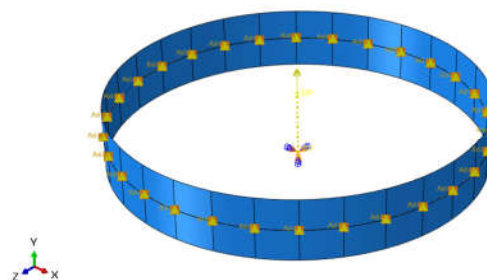
$$Y_i(T, S_0) = z_r(T, S_0) \times \frac{2\pi}{\varphi} \quad (5)$$

$$= \frac{r_0 \frac{2T}{\varphi R_0} - 2(R_1 - R_f) f_v \times \frac{\pi}{\varphi} + (t_r - \frac{t_f}{2}) \frac{S_0}{2R_b}}{k_p + k_r}$$

و در نهایت سفتی هر قطاع، برای نخستین بار در مقاله حاضر، از طریق رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$K_i = \frac{\delta T_i}{\delta Y_i} \quad (6)$$

حال که سفتی هر فنر محاسبه شده، مدل اصلی به صورت دو پوسته استوانه‌ای که با ۳۰ فنر خطی به هم متصل شده‌اند مطابق شکل ۵ ساخته شد. سفتی هر فنر به صورت جداگانه از رابطه (۶) محاسبه شده و اعمال می‌شود.



شکل ۵- مدل اجزاء محدود اتصال کمر بند گوه‌ای

### ۳-۲- اعتبار سنجی مدل

در این مرحله ابتدا اعتبار مدل اجزاء محدود ساده شده اتصال و میزان دقت آن در راستای محوری و سپس در راستای خمشی، بررسی

### ۳- روش‌های آماری در تحلیل عدم قطعیت

در روش‌های آماری، پارامترهای دارای عدم قطعیت به صورت متغیر تصادفی مدل می‌شوند. تحلیل عدم قطعیت می‌تواند از روش‌های عددی یا تحلیلی انجام شود. روش تحلیلی بر روی مسائلی قابل پیاده سازی هستند که معادلات سیستم و توزیع متغیرها به صورت صریح در دسترس باشد و پیدا کردن پاسخ در برخی موارد بسیار پیچیده است. حال آنکه روش‌های عددی این محدودیت‌ها را ندارند. یکی از محبوب‌ترین روش‌های عددی شبیه سازی مونت کارلو می‌باشد که در این مقاله نیز به عنوان روش اصلی تحلیل عدم قطعیت و آنالیز قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. برای تحلیل عدم قطعیت لازم است توزیع آماری خروجی محاسبه شود، به همین جهت تعداد زیادی شبیه سازی غیر آماری و با پارامترهای قطعی انجام شده، و توزیع آماری متغیر مورد نظر از نتیجه این شبیه سازی‌ها محاسبه شده است. در هر شبیه سازی برای انتخاب مقدار هر پارامتر، یک نمونه آماری از توزیع همان پارامتر گرفته می‌شود و در نهایت توزیع خروجی برابر با توزیع فراوانی مقدار خروجی مورد نظر است. بنابراین اگر  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  پارامترهای سیستم باشند که توزیع آماری مشخصی دارند، در هر بار یک نمونه برداری انجام شده و بردار  $X_i$  به عنوان ورودی شبیه سازی این مرحله انتخاب می‌شود. در نهایت با اتمام شبیه سازی‌ها، توزیع خروجی با توزیع فراوانی  $f_i(X_i)$  برابر خواهد بود. در صورتی که روش مونت کارلو برای سنجش قابلیت اطمینان استفاده شود، لازم است که ابتدا احتمال خرابی سیستم محاسبه شود. به همین جهت، در هر بار شبیه سازی، مقدار تابع  $I(X_i)$  که به صورت زیر تعریف می‌شود، محاسبه می‌شود.

$$I(X_i) = \begin{cases} 1 & \text{if system is failed} \\ 0 & \text{if system is not failed} \end{cases} \quad (8)$$

در نهایت اگر تعداد کل شبیه سازی‌های انجام شده  $N$  باشد، احتمال خرابی سیستم از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$P_f = \frac{\sum x_i I(X_i)}{N} \quad (9)$$

همگرا شدن خروجی، به عنوان شرط خاتمه شبیه سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود. به صورت خاص اگر خروجی مورد نظر یک عدد نبوده و یک توزیع آماری باشد، همگرا شدن پارامترهای آن توزیع شرط خاتمه خواهد بود. هر چه تعداد متغیرهایی که عدم قطعیت دارند بیشتر باشد، شبیه سازی‌های لازم تا همگرا شدن پاسخ بیشتر خواهد بود. به همین جهت لازم است تا متغیرهایی را که تغییرات آن‌ها در بازه محاسبه شده، تاثیر چندانی بر خروجی ندارند، از لیست پارامترهای دارای عدم قطعیت حذف کرد تا حجم محاسبات کمتر شده و همگرایی سریع‌تر حاصل شود. در این مقاله حساسیت نسبی پارامتر نسبی  $x_i$  بر خروجی تابع  $f(x)$  به صورت رابطه تعریف شده است.

$$\Delta_i = \max_{x_i} f(x) - \min_{x_i} f(x) \quad (10)$$

برای تشخیص پارامترهایی که تاثیر نسبی زیادی بر خروجی دارند، باید حساسیت نسبی تمام پارامترها محاسبه شده و مقدار نرمال شده آن‌ها نسبت به بزرگ‌ترین مقدار، محاسبه شود. سپس پارامترهایی که حساسیت نسبی نرمال شده آن‌ها از یک عدد مشخص، مثلاً 0.3 بیشتر باشد به عنوان پارامتر مهم انتخاب شده و سایر پارامترها از لیست متغیرها حذف خواهد شد.

### ۴- نتایج و بحث

در روش مهندسی معمول برای طراحی اتصال، یک ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود تا حتی با وجود عدم قطعیت‌های محیطی، بار اعمالی از بار نهایی مجاز اتصال دور بماند. مدل ساخته شده در بخش مدل‌سازی توانایی لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها و تاثیرات آن‌ها را ضمن داشتن سرعت حل بالا دارد. برای نشان دادن قدرت روش و همچنین اهمیت بالای لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها در طراحی مهندسی، در این بخش قابلیت اطمینان طراحی‌های مختلف اتصال با روش معمول محاسبه شده است. ابتدا یک اتصال کمر بند گوه‌ای که به روش معمول طراحی شده در نظر گرفته شده و انتشار عدم قطعیت آن تحلیل شده است. سپس در بخش بعدی قابلیت اطمینان آن در شرایط مختلف و بررسی شده و نتایج آن اعلام گردیده است.

#### ۴-۱- تحلیل عدم قطعیت اتصال کمر بند گوه‌ای

یک اتصال که به روش معمول مهندسی طراحی شده را در نظر گرفته شده که پارامترهای طراحی این اتصال در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای اتصال

جنس فلنج پایین	جنس فلنج بالا	زاویه گوه‌ها (درجه)	شعاع $R_0$ (میلی‌متر)	تعداد لقمه‌ها	ضخامت لبه $t_0$ (میلی‌متر)
آلومینیوم	آلومینیوم	۱۵	۵۹۴	۳۰	۸

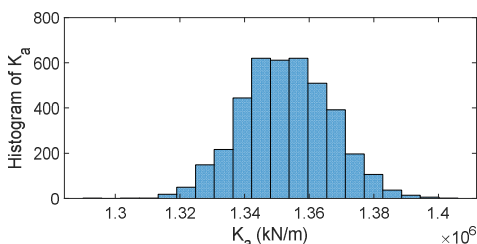
عدم قطعیت پارامترهای اتصال باعث می‌شوند که قابلیت اطمینان اتصال در شرایط مختلف متفاوت باشد. ابتدا لازم بوده پارامترهایی که عدم قطعیت آن‌ها تاثیر محسوسی بر قابلیت اطمینان اتصال می‌گذارد شناسایی شود. با توجه به شرایط فیزیکی و معادلات حاکم بر رفتار اتصال، پنج پارامتر مدول یانگ، ضریب اصطکاک، زاویه گوه‌ها، ضریب پواسون و کشش کمر بند بر سفتی اتصال تاثیر دارند. نیروی کشش کمر بند، ضریب اصطکاک و زاویه شیار رابطه مستقیمی با توانایی کمر بند در نگه داری اتصال دارند و نماینده تمام اثراتی هستند که بر سفتی موضعی اتصال تاثیر گذارند. ضریب پواسون و مدول یانگ نیز به خاطر اثرشان بر سفتی لبه فلنج‌ها و افزایش یا کاهش بار نهایی و سفتی اتصال به عنوان کاندیدای بررسی انتخاب شدند.

پارامترهای دارای عدم قطعیت در این مقاله، به کمک توزیع نرمال توصیف شده‌اند و دو متغیر توزیع نرمال یعنی میانگین و انحراف معیار که به ترتیب با  $\mu$  و  $\sigma$  نمایش داده می‌شود، با توجه به تئوری هر پارامتر مقدار دهی شده‌اند. لازم به ذکر است که ۹۹.۹ درصد از مقادیر توزیع نرمال درون بازه‌ای از اعداد حقیقی که  $\sigma 4$  بیشتر از میانگین و  $\sigma 4$  کمتر از میانگین مقادیر توزیع باشد، قرار می‌گیرد. بنابراین متغیرهای توزیع نرمال یک پارامتر با میانگین  $a$  و تئوری  $b$  از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

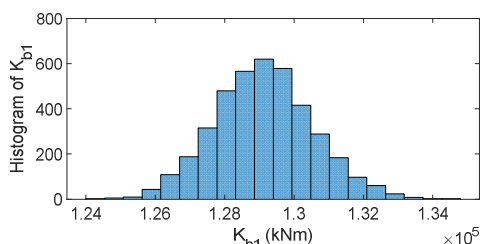
$$\mu = a, \quad \sigma = b/4 \quad (11)$$

در این مقاله، چندین حالت مختلف برای عدم قطعیت، از نظر شدید و ضعیف بودن آن بررسی شده، بنابراین در هر یک از حالت‌های فرضی، مقدار فاکتور عدم قطعیت تغییر کرده و توزیع پارامترهای سیستم، هر بار مجدداً بر حسب فاکتور عدم قطعیت جدید محاسبه

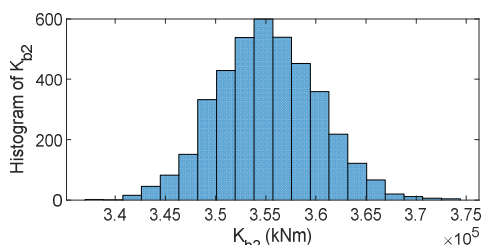
دو خطی بوده و شیب این دو خط به ترتیب با پارامترهای  $K_{b2}$  و  $K_{b1}$  نشان داده شده‌اند.



شکل ۹- توزیع سفتی محوری اتصال با فرض عدم قطعیت ۲۰ درصد

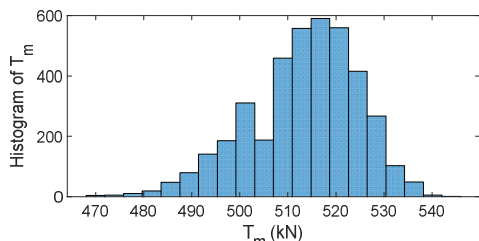


شکل ۱۰- توزیع سفتی خمشی اولیه اتصال با فرض عدم قطعیت ۲۰ درصد



شکل ۱۱- توزیع سفتی خمشی نهایی اتصال با فرض عدم قطعیت ۲۰ درصد

در ادامه توزیع آماری بار نهایی مجاز محوری و خمشی اتصال محاسبه شده و در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ در حالتی که درصد عدم قطعیت ۲۰ درصد باشد، نشان داده شده است. برای محاسبه بار نهایی کل، ابتدا بار نهایی قابل تحمل توسط هر فنر به کمک رابطه (۲) محاسبه شده است که برای هر فنر مقدار متفاوتی می‌باشد. سپس بار خمشی و محوری خارجی به اتصال وارد شده و مقدار آن تا لحظه‌ای که حداقل یک فنر آسیب ببیند ادامه پیدا می‌کند.

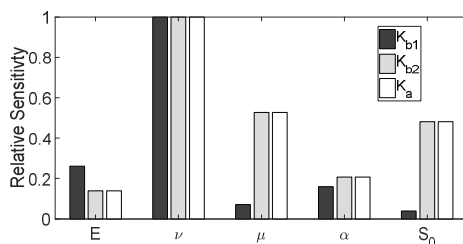


شکل ۱۲- توزیع بار نهایی محوری اتصال کمر بند گوه‌ای

شده است. برای این کار، به هر متغیر یک وزن اختصاص داده می‌شود. سپس تفرانس هر متغیر با فرض این که در شرایط عدم قطعیت خاصی قرار گیرد محاسبه شده است. به عبارت دیگر اگر در مورد یک متغیر خاص، وزن آن ۲ باشد و فاکتور عدم قطعیت نیز ۰.۰۵ باشد، تفرانس این متغیر در شرایط مذکور ۰.۱۰ یا ۱۰ درصد می‌باشد. مقادیر میانگین و انحراف معیار، از روی این مقدار تفرانس، به کمک رابطه (۱۱) محاسبه شده است. دامنه تغییرات احتمالی و وزن اختصاص داده شده به هر پارامتر در جدول ۳ آورده شده است. آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی ۱۰۵۰ بوده و توزیع خواص آن از مراجع [۱۶-۱۸] استخراج شده و توزیع دو پارامتر  $S_0$  و  $\alpha$  به صورت تجربی تعیین شده‌اند. تفرانس معمول پارامترها نیز که در جدول آورده شده، از مرجع خوانده شده و مستقل از فاکتور عدم قطعیت است. در حقیقت مبنای انتخاب وزن هر متغیر، همین تفرانس معمول پارامترها بوده است. در ادامه تاثیر نسبی پارامترهایی که عنوان شد، به کمک رابطه (۱۱) محاسبه شده و در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول ۳- توزیع پارامترهای دارای عدم قطعیت اتصال (۱۴-۱۲)

پارامتر	میانگین	وزن (در فاکتور عدم قطعیت)	تفرانس (مستقل از فاکتور عدم قطعیت) (+/-)
$E$ (MPa)	۷۰/۴	۲	۱/۷
$\nu$	۰/۳۳	۱	۰/۰۱
$\mu$	۰/۱۲۵	۳	۰/۰۱۰
$S_0$ (kN)	۲۵	۵	۴
$\alpha$ (deg)	۱۵	۰/۵	۰/۰۵



شکل ۸- حساسیت نسبی پارامترهای اتصال بر خروجی‌های آن

با توجه به حساسیت نسبی پارامترها، سه پارامتر زاویه شیار، ضریب اصطکاک و مدول یانگ به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت در آنالیز قابلیت اطمینان لحاظ می‌شود. حال با انجام شبیه‌سازی مونت کارلو توزیع خروجی مدل ساخته شده از اتصال دارای عدم قطعیت استخراج می‌شود. روش کار بدین ترتیب است که شبیه‌سازی به تعداد زیادی انجام می‌شود، و در هر بار مقادیر پارامترها به صورت یک عدد و نه توزیع در نظر گرفته می‌شود. مقدار این عدد نیز به صورت تصادفی از روی توزیع مشخص شده خوانده شده و در نهایت توزیع خروجی مورد نظر از مدل، از محاسبه فرکانس تکرار مقادیر خروجی بدست خواهد آمد. توزیع بار نهایی و سفتی اتصال در دو حالت محوری و خمشی در حالتی که درصد عدم قطعیت ۲۰ درصد باشد، در ادامه و از شکل ۹ تا شکل ۱۱ آمده است. سفتی محوری همانند شکل ۹ خطی بوده و با پارامتر  $K_a$  نشان داده شده است، اما با توجه به شکل ۱۰ سفتی خمشی

فیزیکی سیستم تغییر می‌کند و به طور دقیق قابل محاسبه یا اندازه گیری نیست. در این بخش مسئله مجدداً مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما این بار، برای هر ضریب ایمنی که طراح در نظر می‌گیرد، میزان عدم قطعیت را تغییر می‌دهیم و در هر شرایط قابلیت اطمینان سیستم را به کمک تحلیل عدم قطعیت و شبیه سازی مونت کارلو محاسبه می‌کنیم. قابلیت اطمینان طرح نسبت به تحمل بار محوری خالص، بار خمشی خالص و بار ترکیبی محوری و خمشی با نسبت ۱ به ۱ محاسبه شده و در جداول ۵ تا ۷ آمده است. پارامترهای این اتصال در جدول ۲ و جدول ۳ آمده است. برای محاسبه جدول‌ها، ابتدا ضریب ایمنی خاصی فرض شده و معادل با آن حداکثر نیروی قابل تحمل اتصال بر مبنای ضریب ایمنی محاسبه شده است. سپس با انجام شبیه سازی مونت کارلو و در هر مرحله از آن بررسی شده که هر اتصال تصادفی قابلیت تحمل بار محاسبه شده را داشته باشد. در صورتی که این اتصال تصادفی ضعیف‌تر از حد تعیین شده باشد، این اتصال آسیب دیده در نظر گرفته شده و مبنای محاسبه قابلیت اطمینان و احتمال خرابی قرار خواهد گرفت.

**جدول ۵- قابلیت اطمینان اتصال دارای عدم قطعیت تحت بار محوری خالص**

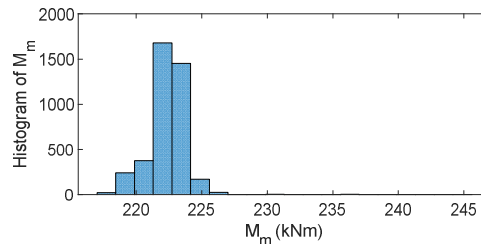
فاکتور عدم قطعیت					قابلیت اطمینان	
۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۵		
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰	ضریب ایمنی
۰/۱۲۸	۰/۵۵۷	۰/۸۸۰	۰/۹۹۶	۱/۰۰۰	۱/۱	
۰/۹۶۶	۰/۹۹۴	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۲	
۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۳	
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۴	
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۵	

**جدول ۶- قابلیت اطمینان اتصال دارای عدم قطعیت تحت بار خمشی خالص**

فاکتور عدم قطعیت					قابلیت اطمینان	
۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۵		
۰/۱۷۶	۰/۲۲۵	۰/۲۸۶	۰/۳۹۶	۰/۵۸۴	۱/۰	ضریب ایمنی
۰/۸۶۲	۰/۸۹۴	۰/۹۴۹	۰/۹۸۵	۱/۰۰۰	۱/۱	
۰/۹۸۷	۰/۹۸۸	۰/۹۹۶	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۱/۲	
۰/۹۹۰	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۳	
۰/۹۹۶	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۴	
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۵	

**جدول ۷- قابلیت اطمینان اتصال دارای عدم قطعیت تحت بار ترکیبی محوری و خمشی**

فاکتور عدم قطعیت					قابلیت اطمینان	
۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۵		
۰/۰۱۹	۰/۰۶۱	۰/۱۱۸	۰/۱۹۱	۰/۳۸۶	۱/۰	ضریب ایمنی
۰/۸۷۶	۰/۹۳۱	۰/۹۷۵	۰/۹۹۸	۱/۰۰۰	۱/۱	
۰/۹۹۲	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۲	



**شکل ۱۳- توزیع بار نهایی خمشی اتصال کمر بند گوه‌ای**

همان طور که از توزیع‌ها مشهود است، توزیع پارامترهایی همچون سفتی محوری و خمشی بیشتر به توزیع نرمال شبیه شده و توزیع دو پارامتر بار نهایی محوری و خمشی چون رابطه‌ای غیر خطی داشته و لحظه‌ای اتفاق می‌افتد که حداقل یک فنر آسیب دیده باشد، از توزیع نرمال فاصله گرفته است. نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است، غیر قابل پیشبینی بودن نوع توزیع پیش از انجام تحلیل عدم قطعیت است و طراح نمی‌تواند دید درستی از اثر عدم قطعیت بر بار بحرانی داشته باشد. بدین ترتیب حتی اگر طراح عددی را به عنوان ضریب ایمنی در نظر بگیرد تا اثرات عدم قطعیت را لحاظ کند مجبور است ضریب زیادی در نظر بگیرد که ممکن است طرح مقرون به صرفه نباشد.

شرط خاتمه شبیه‌سازی مونت کارلو، همگرا شدن توزیع‌های خروجی است. میانگین و انحراف معیار نهایی سفتی محوری و خمشی به همراه درصد تغییر آن‌ها با افزایش تعداد شبیه‌سازی‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشهود است، مقدار میانگین به سرعت همگرا شده و با افزایش تعداد شبیه‌سازی‌ها، انحراف معیار همگرا می‌شود. در صورتی که درصد تغییر کمتر از ۱ درصد شود، همگرایی حاصل شده و نیازی به ادامه شبیه‌سازی نیست. بنابراین در این مسأله، شبیه‌سازی بعد از حدود ۱۵۰۰ اجرا متوقف شده است.

**جدول ۴- درصد تغییر متغیرهای توزیع‌های سفتی با افزایش تعداد شبیه‌سازی در روش مونت کارلو**

مقدار نهایی	تعداد شبیه‌سازی‌ها در روش مونت کارلو					پارامتر متغیر	
	۳۱۰۰	۱۷۰۰	۱۳۰۰	۹۰۰	۵۰۰		۱۰۰
۱/۳۵۳ × ۱۰ <sup>۶</sup>	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۹	$K_a$
۱/۳۷۸ × ۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۲۷	۰/۳۸	۰/۱۹	۲/۰۲	۳/۳۶	۱۵/۲۲	
۱/۲۹۱ × ۱۰ <sup>۱۱</sup>	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۱۰	$K_{b1}$
۱/۴۳۱ × ۱۰ <sup>۹</sup>	۰/۰۲	۰/۴۶	۱/۵۶	۱/۸۰	۶/۷۵	۱۲/۹۳	
۳/۵۵۲ × ۱۰ <sup>۱۱</sup>	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۸	$K_{b2}$
۵/۰۲۳ × ۱۰ <sup>۹</sup>	۰/۷۱	۰/۳۳	۰/۱۷	۱/۴۱	۴/۷۱	۱۳/۰۳	

#### ۴-۲- آنالیز قابلیت اطمینان اتصال کمر بند گوه‌ای

در یک طراحی به روش معمول، طراح با در نظر گرفتن ضریب ایمنی، سعی می‌کند اثرات عدم قطعیت در مقاومت سازه در برابر شکست را بدون انجام آنالیز عدم قطعیت و محاسبات آماری لحاظ کند. نکته اینجاست که میزان عدم قطعیت بسته به شرایط محیطی و

۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۳
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۴
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۵

در ادامه از آنجا که روش طراحی معمول به این گونه است که یک ضریب ایمنی برای لحاظ کردن اثرات عدم قطعیت اعمال می‌شود، یک روش انتخاب ضریب ایمنی بر مبنای قابلیت اطمینان نیز ارائه شد. بدین ترتیب که ابتدا یک اتصال که به روش معمول و با ضریب ایمنی خاصی طراحی شده، در شرایط مختلف عدم قطعیت در نظر گرفته شد و با انجام تحلیل عدم قطعیت به کمک روش مونت کارلو، قابلیت اطمینان هر طرح محاسبه شد. سپس روشی برای انتخاب ضریب ایمنی برای حصول ضریب اطمینان مورد نظر ارائه شد. مهم‌ترین نتیجه روش معرفی شده، این است که تحلیل آماری تنها یکبار و برای ساخت جدول قابلیت اطمینان بر اساس مدل اجزاء محدود ساده شده و با حجم محاسبات کم، بر حسب دو مؤلفه درصد عدم قطعیت و ضریب ایمنی، انجام می‌شود. سپس برای هر بار کاربرد دیگر و بررسی نهایی طرح روی مدل کامل اتصال و یا باز طراحی دیگر، تنها کافی است که ضریب ایمنی مناسب از جدول خوانده شده یا محل متناظر در جدول شناسایی شود. در این صورت قابلیت اطمینان و احتمال خرابی با تخمین خوبی در محدوده لازم برای طرح مورد نظر خواهد بود و نیازی به انجام مجدد تحلیل آماری نخواهد بود. نکته دیگر این است که اگر این جدول با هزینه محاسبات کم ساخته شود، قابلیت استفاده در فرآیند بهینه سازی بر مبنای قابلیت اطمینان را خواهد داشت که سرعت همگرایی را تا حد زیادی بالا خواهد برد.

روش ارائه شده با توجه به شرایط واقعی یک اتصال کمر بند گوه‌ای مدل‌سازی را انجام می‌دهد و قادر است تا در هر طرح مشابهی به کار گرفته شود. همچنین توزیع‌های محاسبه شده به کمک این مدل را می‌توان در یک تحلیل دینامیک برای بررسی رفتار یک سازه با اتصالات کمر بند گوه‌ای مورد بررسی قرار داد.

## ۶- مراجع

- [1] Qin Z. Y., Yan S. Z. and Chu F. L., Dynamic analysis of clamp band joint system subjected to axial vibration. *J. of Sound Vibration*, Vol. 329, No.21, pp. 4486-4500, 2010.
- [2] Liu Y., Wang J., and Chen. L., Dynamic Characteristics of the Flange Joint with a Snap in Aero-Engine. *Int. J. of Acoust. Vibration.*, Vol. 23, No. 2, pp. 168-174, 2018.
- [3] Tang Q., Li C., She H. and Wen B., Modeling and dynamic analysis of bolted joined cylindrical shell. *Nonlinear Dynamics.*, Vol. 93, No. 4, pp. 1953-1975, 2018.
- [4] Roshanian J. and Talebi M. Monte Carlo simulation of stage separation dynamics of a multistage launch vehicle. *Appl. Math. Mech.*, Vol. 29, No. 11, pp. 1411-1426, 2008.
- [5] Samani M. and Pourtakdoust S. H. Analysis of two-stage endo-atmospheric separation using statistical methods. *J. of Theor. Appl. Mech.*, Vol. 52, No. 4, pp. 1115-1125, 2014.
- [6] Singaravelu J., Jeyakumar D. and B. Nageswara Rao, Taguchi's approach for reliability and safety assessments in the stage separation process of a multistage launch vehicle. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, Vol. 94, No. 10, pp. 1526-1541, 2009.
- [7] Qin Z. Y., Yan S. Z. and Chu F. L., Dynamic characteristics of launch vehicle and spacecraft connected by clamp band. *J. of Sound Vibration*, Vol. 330, No. 10, pp. 2161-2173, 2011.
- [8] Qin Z. Y., Yan S. Z. and Chu F. L., Analytical modeling of clamp band joint under external bending moment. *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 25, No. 1, pp. 45-55, 2013.
- [9] Li, H., Zhu, M., Xu, Z., Wang, Z. and Wen, B., The influence on modal parameters of thin cylindrical shell under bolt looseness boundary. *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID 4709257, 15 pages, 2016.

معیار خرابی اتصال، خرابی حداقل یک فنر از آن انتخاب شده است. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود در ضرایب ایمنی نزدیک به یک، احتمال خرابی بسیار بالاست. در مورد بار خالص محوری، مطابق جدول ۵، قابلیت اطمینان برای ضریب ایمنی یک برای تمام مقادیر فاکتور عدم قطعیت صفر بدست آمده است. زیرا در این حالت، به همه قطعات نیروی یکسان وارد می‌شود و حداقل یکی از قطعاتی اتصال ضعیف‌تر از حد معمول بوده و اتصال خراب شده است. اما در مورد ممان خالص و بار ترکیبی، ممکن است قطعاتی ضعیف در ناحیه‌ای قرار گرفته باشند که نیروی کمتری به آن‌ها وارد شود و به همین جهت بعضی از اتصالات خراب نشده و قابلیت اطمینان حتی برای ضریب ایمنی یک، بر خلاف حالت نیروی محوری خالص بزرگتر از صفر است. در ادامه و با افزایش ضریب ایمنی قابلیت اطمینان بیشتر و بیشتر می‌شود. اگر طراح پیش از طراحی بتواند با تحلیل عدم قطعیت این جدول را تهیه نماید، به راحتی قادر است تا برای هر شرایطی که پیش رو دارد، ضریب ایمنی بهینه را با میزان قابلیت اطمینان مورد نیاز طرح انتخاب نماید. طرز استفاده از جدول نیز باید بدین صورت باشد که طراح با ملاحظه شرایط کارکرد حدود عدم قطعیت سیستم را محاسبه نماید. یعنی اگر قرار است سیستم در شرایط معمولی کار کند، عدم قطعیت معمولی که مثلاً ۱۰ درصد است و اگر قرار است سیستم در شرایط حساس و غیر قابل پیش بینی کار کند، عدم قطعیت ۲۰ درصد را در نظر بگیرد. سپس با فرض عدد عدم قطعیت، در جدول حرکت کند و میزان قابلیت اطمینان مورد نیاز خود را پیدا کند. هر میزانی که مناسب بود به راحتی ضریب ایمنی متناظر با آن را انتخاب کرده و در طرح استفاده کند. همچنین نکته دیگر اینجاست که این جدول بر اساس مدل ساده شده اجزاء محدود ساخته می‌شود و برای چک نهایی طرح با مدل کامل و یا انجام فرآیند باز طراحی اتصال برای سایر کاربردها و بدون انجام آنالیز قابلیت اطمینان و محاسبات آماری مجدد حجم محاسبات را تا حد زیادی کاهش خواهد داد. کاربرد مهم دیگر این جدول در فرآیند بهینه سازی بر مبنای قابلیت اطمینان است.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه گیری

در این مقاله مدل اجزاء محدود گسسته‌ای معرفی شد که ضمن داشتن حجم محاسبات کم، توانایی لحاظ کردن اثرات عدم قطعیت به صورت منطبق بر واقعیت مسئله را دارا می‌باشد. شرایط هر لقمه در اتصال کمر بند گوه‌ای با لقمه دیگر متفاوت بوده و در خود لقمه با تقریب مناسبی یکنواخت است. بنابراین، روش بدین ترتیب است که اتصال به چندین قطعه افزای شده و هر قطعه با یک فنر خطی جایگزین می‌شود. سپس به جهت اعتبار سنجی، نتایج مدل پیشنهاد شده در حالتی که عدم قطعیت نداشته باشد، با نتایج آزمایش و شبیه‌سازی موجود در تاریخچه مقایسه شد. در نهایت با فرض پارامترهای اتصال در یک طرح صنعتی، توزیع سفتی و بار نهایی در دو حالت محوری و خمشی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه شد.



- [10] Li S., Gao H., Liu, Q. and Liu B., Dynamic modeling method of the bolted joint with uneven distribution of joint surface pressure. *AIP Advances*, Vol. 8, No. 3 p.035116, 2018.
- [11] Tang, Q., Li, C., She, H. and Wen, B., Vibration analysis of bolted joined cylindrical-cylindrical shell structure under general connection condition. *Applied Acoustics*, 140, pp.236-247, 2018.
- Wang, F., Li, J., Li, Y.Q. and Luo, Z., The investigation of vibration characteristics on the bolted disk-drum joints structure. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(3), p.1687814019831477, 2019.
- [12] NASA, Marman clamp system design guidelines," Guideline No. GD-ED-2214, Goddard Space Flight Center, 2000
- [13] Zheng C., *LM-3A Series Launch Vehicle User's Manual*. China Academy of Lanch Vehicle Technology, 2011.
- [14] Qin Z. Y., Yan S. Z. and Chu F. L., Finite element analysis of the clamp band joint. *Appl. Math. Model*, Vol. 36, No. 1, pp. 463-477, 2012.
- [15] Lord, J.D. and Morrell, R., Measurement Good Practice Guide No. 98, Elastic Modulus Measurement. National Physical Lab. Report, pp.41-65, 2006.
- [16] Engineering ToolBox, (2004). Friction and Friction Coefficients for various Materials. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html) [Accessed 5/10/2019].
- [17] Engineering ToolBox, (2008). Poisson's ratio. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d\\_1224.html](https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html) [Accessed 5/10/2019].