مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۱٤٤-۱٤۹

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تلرانسی مجموعه‌های انعطاف‌پذیر شامل اثرات تماس برمبنای روش ضرایب تأثیر اصلاح شده

سعید خدایگان[۱*]، امیر قاسمعلی[۲]، حامد افراسیاب[۳]

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل
۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل
* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، khodaygan@sharif.edu

چکیده

در سازه‌های ورقی فلزی، به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد ورق‌ها، خطاهای ابعادی و هندسی تلرانس‌های مونتاژی را به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهند. از طرفی مراحل مختلف طراحی، ساخت و مونتاژ اجزای مجموعه‌های مکانیکی، درگیر با عوامل مختلف شامل عدم قطعیت‌های ابعادی، هندسی و مادی می‌باشد. از این رو، ارائه مدلی جامع که بتوان براساس آن انتشار تغییرات ناشی از عدم قطعیت‌ها طی فرآیندهای تولید و ارتباط آن‌ها با تلرانس‌های مونتاژی را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود، ضروری است. در روش ضرایب تأثیر معمولی، عدم لحاظ اثرات تماس بین اجزاء علاوه بر نفوذ سطوح تماس، باعث بروز خطا در تخمین تلرانس‌های مونتاژی نیز می‌گردد. در این مقاله با اصلاح روش ضرایب تأثیر و با درنظر گرفتن اثرات تماس اجزاء با استفاده از روش اجزاء محدود، روشی کارآمد جهت تحلیل تلرانسی سازه‌های ورقی انعطاف‌پذیر به منظور تخمین دقیق خطاهای انباشته در مشخصه‌های مونتاژی ارائه می‌گردد. در این راستا، یک استراتژی مناسب برمبنای مدل‌سازی و تحلیل عدم قطعیت‌های مؤثر در فرآیند مونتاژ مجموعه‌ها با اجزای انعطاف‌پذیر پیشنهاد می‌شود. در پایان، قابلیت‌های روش پیشنهادی با ارائه یک مثال موردی، بررسی و صحت نتایج حاصل از این روش در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو و نتایج تجربی صحه‌گذاری می‌گردد.

کلید واژگان: سازه ورقی انعطاف‌پذیر، روش ضرایب تأثیر، تحلیل تماس، روش المان محدود

Tolerance analysis of flexible assemblies with contact effects based on modified influence coefficients method

Saeed Khodaygan[1*], Amir Ghasemali[2], Hamed Afrasiab[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 11155-9567 Tehran, Iran, khodaygan@sharif.edu

ABSTRACT

In sheet metal structures, due to high flexibility of the sheets, the dimensional and geometrical errors do considerably influence the assembly tolerances. On one hand, various stages of design, manufacturing and assembly of mechanical sets are involved in various factors such as dimensional, geometrical and material uncertainties. As a result, presenting a comprehensive model based on which propagation of the changes resulted from the uncertainties of the manufacturing processes and their relations with assembly tolerances could be approximated with a high accuracy seems necessary. In normal influence coefficients method, neglecting the contact effects between the components not only causes the diffusion of contact surfaces, but also leads to errors in predicting assembly tolerances. In this paper, an applicative method for tolerance analysis of flexible sheet structures and precise prediction of abundant errors in assembly characteristics is presented by modifying the influence coefficients method and by considering the effects of components' contacts using finite element method (FEM). To do so, a proper strategy based on modeling and the analysis of effective uncertainties in the process of the assembly of the sets with flexible components has been proposed. At the end, the capabilities of the proposed method are investigated by presenting an example and the accuracy of the obtained results has been compared with Monte Carlo and experimental results.

Keywords: Contact Analysis, Flexible Sheet Metal Structure, Finite Element Method, Method of Influence Coefficients.

۱- مقدمه

هر مجموعه مکانیکی متشکل از اجزاء یا قطعات مونتاژ شده به یکدیگر می‌باشد. این قطعات دارای هندسه، جنس، کیفیت مواد اولیه، هزینه تولید، قابلیت تولید و شرایط کاری متفاوت بوده و هر یک تحت شرایط مختلفی از نظر ماشین‌ابزار، اپراتور و محیط کاری تولید می‌شوند. در مرحله طراحی، ابعاد مختلف قطعات تشکیل دهنده مجموعه مونتاژی دارای محدوده تغییرات ابعادی مجاز در قالب بازه‌های تلرانسی می‌باشند. پس از مونتاژ اجزاء، انتشار خطاهای ابعادی به‌صورت خطاهای انباشته بر بعد مونتاژی و عملکرد مجموعه مونتاژی تأثیر می‌گذارد. طی مراحل ساخت، ابعاد قطعات صنعتی از ابعاد دقیق طراحی منحرف می‌گردند. از آن‌جا که قطعات به‌ندرت به‌صورت مجزا و اغلب در قالب مجموعه‌ای از قطعات به‌کار گرفته می‌شوند، انباشتگی تغییرات ایجاد شده طی فرآیندهای تولید، می‌تواند منجربه اختلال در کارکرد مجموعه صنعتی گردد. تحلیل تلرانسی وسیله‌ای کاربردی است که طراح به کمک آن میزان تأثیر انحرافات ابعادی و هندسی ایجاد شده در ساخت قطعات را بر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Khodaygan, A. Ghasemali, H. Afrasiab, Tolerance analysis of flexible assemblies with contact effects based on modified influence coefficients method, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 144-149, 2015 (in Persian فارسی)

روی کارکرد کل مجموعه مونتاژی تخمین می‌زند. محققان در دهه‌های اخیر روش‌های تحلیل تلرانسی مختلفی را ارائه کرده‌اند که بیشتر بر مبنای فرض صلب بودن قطعات ارائه شده‌اند و پیاده‌سازی این روش‌ها بر روی مجموعه-های انعطاف‌پذیر نتایج دقیقی را ارائه نمی‌دهند [۲،۱]. از این‌رو روش‌های تحلیل تلرانسی مبتنی‌بر تحلیل اجزاء محدود[1]، جهت به‌کارگیری در مجموعه-های انعطاف‌پذیر از سوی محققان پیشنهاد شده است [۳-۶]. از کاربردهای مهم تحلیل تلرانسی مجموعه‌های انعطاف‌پذیر، در مجموعه‌های متشکل از ورق‌های فلزی مانند تحلیل تلرانسی اجزای بدنه هواپیما و بدنه خودرو می-باشد. در واقع اهمیت مبحث تحلیل تلرانسی سازه‌های ورقی به دلیل خاصیت انعطاف‌پذیری بالای این سازه‌هاست. در مونتاژ یک مجموعه ورقی، به‌ناچار مقداری تغییرشکل در اجزای مجموعه در اثر استفاده از ابعاد غیرایده‌آل ایجاد می‌شود. هدف از تحلیل، تخمین میزان حساسیت این تغییرشکل‌ها به تلرانس‌های تولیدی است.

پیشگامان تحلیل تلرانسی سازه‌های انعطاف‌پذیر را باید لیو و هو [۳] دانست. آن‌ها در تئوری پیشنهادی خود که به روش ضرایب تأثیر[2] معروف است، با استفاده از روش اجزاء محدود و براساس رابطه خطی بین نیرو و جابه‌جایی توانستند که رابطه بین تلرانس‌های اولیه و تغییرشکل نهایی مجموعه را به کمک ماتریس حساسیت به‌دست آمده از این روش بیان کنند. تماس متقابل[3] سطوح مونتاژی باعث می‌شود که ارتباط خطی بین نیرو و جابه‌جایی در سازه با خطاهای محاسباتی قابل توجهی همراه باشد. از این‌رو، تحقیق‌های جدید انجام شده به سمت روش‌های تحلیل با در نظر گرفتن اثر تماس متقابل ورق‌ها پیش رفته و باعث ایجاد نوآوری‌هایی در زمینه تحلیل تلرانسی سازه‌های ورقی شده است [۷-۱۰]. در این زمینه کِی و همکاران [۷]، نشان دادند که مدل‌سازی خطی فرآیند مونتاژ، موجب دَرهم فرو رفتن قطعات خواهد شد. در این تئوری برای بیان رابطه غیرخطی نیرو- جابه‌جایی از بسط دوم سری تیلور استفاده شده است. اما نتایج این تئوری فقط زمانی از دقت مناسب برخوردار خواهد بود که مسأله به حالت خطی نزدیک باشد. دال‌استرام و لیندویست [۸] نیز تئوری دیگری برای بهبود روش ضرایب تأثیر براساس ترکیب آن با الگوریتم‌های تماس الاستیک ارائه کرده‌اند. در این روش، ابتدا سطوح تماس به کمک الگوریتم پیشنهادی شناخته شده و سپس معادلات تماس حل شده و نیروهای تماس بدست آمده در روش ضرایب تأثیر به‌کار می‌رود. اما این تئوری نیازمند اجرای یک الگوریتم نسبتاً پیچیده برای شناسایی نواحی دقیق تماسی بین سطوح است. در میان روش‌ها و تئوری-هایی که برای مدل‌سازی فرآیند مونتاژ براساس تحلیل تماس دو قطعه ارائه شده‌اند، روش‌های ارائه شده توسط لیائو و وانگ [۹] و زیه و همکاران [۱۰] مدل‌های مناسب‌تری برای تحلیل‌های غیرخطی فرآیند مونتاژ سازه‌های ورقی معرفی می‌کنند. در این روش‌ها با استفاده از توانایی‌های نرم‌افزارهای تجاری اجزاء محدود مانند انسیس[4] و آباکوس[5] که معادلات تماس الاستیک را مستقیماً حل می‌کنند، سعی شده است که ایرادات وارد بر روش‌های قبلی برطرف گردد. اخیراً هاشمیان و معتکف ایمانی [۱۱] روشی در تحلیل تلرانسی سازه‌های ورقی انعطاف‌پذیر ارائه کرده‌اند که در آن با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی، اثرات تماس متقابل و پیوستگی سطح ورق‌ها را درنظر گرفته و خطای مجموعه مونتاژی را محاسبه می‌نماید.

1. Finite Element Analysis
2. Method of Influence Coefficients
3. Contact Interaction
4. Ansys
5. Abaqus

در این مقاله، روشی جدید جهت تحلیل تلرانسی سازه‌های ورقی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن اثر تماس بین سطوح و اثرات عدم قطعیت‌های ناشی از ابعاد، هندسه و جنس ورق‌ها برمبنای اصلاح روش ضرایب تأثیر ارائه می‌شود که با استفاده از آن می‌توان خطاهای مونتاژی در مجموعه‌ها با اجزای انعطاف‌پذیر را با دقت‌های بالایی تخمین زد. از آن‌جایی که اساس روش ضرایب تأثیر برمبنای ارتباط خطی بین نیرو و جابه‌جایی و صرف‌نظر از اثرات تماس قطعات می‌باشد، به‌کارگیری مستقیم این روش در تحلیل تلرانسی یک مجموعه انعطاف‌پذیر، خطاهای محاسباتی بالایی را در پیش‌بینی تلرانس‌های مونتاژی آن مجموعه در پی خواهد داشت و از طرفی به دلیل سادگی در استفاده از روش ضرایب تأثیر و کاربردی بودن آن، سعی شده است با اصلاح روش ضرایب تأثیر، بدون افزودن پیچیدگی‌های رایج در تحلیل‌های غیرخطی و حفظ سادگی آن، روش اصلاح شده جدیدی که توانایی تخمین تلرانس‌های مونتاژی مجموعه‌های انعطاف پذیر را داشته باشد، ارائه گردد. به این منظور با در نظر گرفتن اثرات مختلف شامل عدم قطعیت در مشخصه‌های ابعادی، هندسی، مادی و محاسباتی مسأله، متغیرهای غیرقطعی مؤثر شناسایی و فرمول‌بندی روش پیشنهادی برمبنای توابع احتمالی ارائه گردیده است. در ادامه مقاله، در بخش ۲، مفاهیم اساسی در ارائه روش پیشنهادی به اختصار مرور می‌گردد. در بخش ۳، مراحل و فرمول‌بندی روش ضرایب تأثیر اصلاح شده جهت تحلیل تلرانسی مجموعه مونتاژی با قطعات انعطاف‌پذیر ارائه می-شود. در بخش ۴، قابلیت‌های روش پیشنهادی و دقت نتایج حاصل با ارائه یک مثال موردی، مورد بررسی و صحت نتایج حاصل از به‌کارگیری روش پیشنهادی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو و مشاهدات تجربی مقایسه و راستی‌آزمایی می‌شود و در بخش پایانی مقاله، روش پیشنهادی و نتایج حاصل مورد جمع‌بندی قرار می‌گیرد.

۲- مفاهیم اساسی

روش پیشنهادی ضرایب تأثیر اصلاح شده بر پایه برخی از مفاهیم اساسی ارائه خواهد شد که در این بخش این مفاهیم به اختصار مرور می‌گردد.

۲-۱- روش ضرایب تأثیر معمولی

روش ضرایب تأثیر بر مبنای ارتباط خطی بین نیرو و جابه‌جایی می‌باشد و دارای سه مرحله زیر است [۳]:

۱- مطابق با رابطه (۱)، یک نیروی واحد در محل jام خطا (j=1,2,...,N) در نظر گرفته می‌شود و جابه‌جایی‌ها در گره‌های دارای خطا بدست می‌آید. در رابطه (۱)، $[C]$ معرف ماتریس ضرایب تأثیر و $\{V\}$ بیانگر بردار خطاهای اولیه می‌باشد؛

$$\{V\} = [C]\{F\} \tag{۱}$$

۲- در این مرحله، معکوس ماتریس ضرایب تأثیر ($[C]^{-1}$) تحت عنوان ماتریس سختی (یعنی ماتریس $[K]$ در رابطه ۲) محاسبه می‌گردد؛

$$\{F\} = [K]\{V\} \tag{۲}$$

از رابطه (۲) می‌توان دریافت که مؤلفه‌های ماتریس سختی، نیروهای موردنیاز برای ایجاد انحراف واحد در jامین محل خطا می‌باشند. آن‌ها همچنین نیروهای آزاد شده از طرف کلمپ‌ها در محاسبه برگشت فنری[6] می-باشند.

۳) در مرحله آخر، برگشت فنری کلی را می‌توان به‌صورت رابطه (۳) محاسبه نمود که در این رابطه $\{U\}$ بردار برگشت فنری کلی، $[S]$ ماتریس

6. Spring Back

حساسیت و $\{V\}$ بردار انحراف اولیه می‌باشد؛

$$\{U\} = [S]\{V\} \quad (۳)$$

بدین ترتیب ماتریس حساسیت، برگشت فنری را به‌صورت خطی به انحراف‌های اولیه مربوط می‌سازد.

۲-۲- تئوری تماس الاستیک

در یک مدل کلی از یک مسأله تماس الاستیک سه بعدی دو جسم Q_1 و Q_2 به‌ترتیب به‌عنوان اجسام هدف[1] و کنتاکتور[2] فرض می‌شوند [۱۲]. جهات اصلی روی سطح تماس مشترک دو جسم به‌صورت (t_1, t_2, n) تعریف می‌شود که t_1 و t_2 بیان‌گر جهات مماس و n بیان‌گر جهت عمود بر سطح تماس می‌باشد. مطابق با رابطه (۴) بردار p_c نیز که معرف نیروهای ناشی از تماس دو جسم در سطح تماس مشترک دو جسم می‌باشد، به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود؛

$$p_c = (p_{t_1}, p_{t_2}, p_n) \quad (۴)$$

به‌طوری‌که p_{t_1}، p_{t_2} و p_n به‌ترتیب معرف نیروی مماسی تماس در جهت t_1، نیروی مماسی تماس در جهت t_2 و نیروی تماس در جهت عمود بر سطح تماس هستند. اگر $u_n^{(1)}$ و $u_n^{(2)}$ به‌ترتیب برابر جابه‌جایی سطوح تماس دو جسم در جهت عمودی و d_0 برابر مقدار فاصله اولیه در این جهت باشد؛ آن‌گاه بنا به رابطه (۵) شرط اول برای عدم نفوذ دو جسم در یکدیگر آن است که فاصله نرمال تماس یعنی؛

$$g_n = u_n^{(1)} - u_n^{(2)} - d_0 \quad (۵)$$

روی مرز تماس، باید $g_n \geq 0$ باشد. علاوه بر این شرط، باید شرط $p_n \leq 0$ را در نظر گرفت که بیان‌گر این مطلب است که سطوح تماسی نمی‌توانند یکدیگر را به‌سوی یکدیگر بکشند و همواره در حال فشردن هم بوده و یا از یکدیگر جدا هستند. با توجه به این واقعیت که دو جسم یا با یکدیگر در حال تماس هستند $(g_n = 0,\ p_n < 0)$ و یا از هم جدا می‌باشند $(g_n > 0,\ p_n = 0)$ شرط سومی به‌شکل $p_n \cdot g_n = 0$ نیز باید تعریف شود که وقوع یکی از دو حالت تماس یا جدایی را تضمین می‌نماید. برای حالتی که سطوح با هم در تماس هستند و از یکدیگر جدا نشده‌اند می‌توان براساس تئوری کولمب، دو حالت لغزش[3] سطوح بر روی یکدیگر و چسبیدن[4] سطوح بر روی یکدیگر را درنظر گرفت. برای این‌که سیستم متشکل از دو سطح تماس در حال تعادل باشد، براساس تئوری کار مجازی باید تغییرات انرژی داخلی سیستم با کار انجام شده توسط نیروهای تماسی p_c برابر باشد.

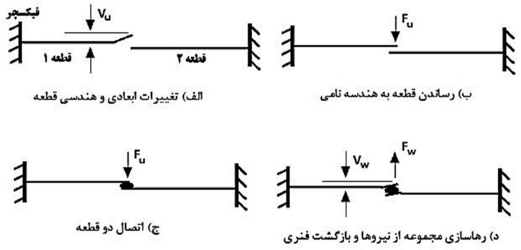
۳- ارائه روش تحلیل تلرانسی ضرایب تأثیر اصلاح شده

در این بخش مراحل و فرمول‌بندی روش ضرایب تأثیر اصلاح شده جهت تحلیل تلرانسی مجموعه مونتاژی با قطعات انعطاف‌پذیر ارائه می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی فرآیند مونتاژ قطعات انعطاف‌پذیر

اساس کار فرآیند مونتاژ یک مجموعه ورقی که در آن یکی از قطعات دارای تغییرشکل اولیه یا به عبارت دیگر تلرانس V می‌باشد، در شکل ۱ آمده است. مطابق شکل ۱، مراحل مونتاژ یک مجموعه ورقی را می‌توان به چهار دسته کلی تقسیم نمود:

۱) قرار دادن ورق‌ها بر روی فیکسچرها؛



شکل ۱ فرآیند مونتاژ مجموعه‌های ورقی انعطاف‌پذیر

۲) رساندن ورق‌ها به موقعیت ایده‌آل و بستن فاصله بین آن‌ها با اعمال نیرو[5]؛
۳) اتصال ورق‌ها به یکدیگر به کمک جوش، پیچ یا سایر فرآیندهای مونتاژ؛
۴) آزاد کردن مجموعه (حذف نیرو) و برگشت فنری مجموعه مونتاژی.

۳-۲- مدل‌سازی اثرات عدم قطعیت در تحلیل تلرانسی

از آن‌جایی که تلرانس‌های ساخت و مونتاژ دارای ماهیت تصادفی بوده و دارای مقدار قطعی نمی‌باشند، بنابراین تحلیل تلرانسی همواره با تحلیل‌های عدم قطعیت همراه بوده و ارائه نتایج قطعی در مورد تحلیل تلرانسی مجموعه‌ها منطقی نمی‌باشد. در واقع تحلیل عدم قطعیت جزء همیشه همراه در بحث تحلیل تلرانسی می‌باشد. از این‌رو در تحلیل تلرانسی سازه‌های ورقی انعطاف‌پذیر نیاز به استفاده از تحلیل‌های عدم قطعیت جهت تخمین محدوده تغییرات مشخصه‌های مونتاژی است. از مهم‌ترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت می‌توان به روش‌های حساب بازه‌ای تصادفی[6]، روش فازی[7] و تابع چگالی احتمال[8] اشاره نمود. در فرمول‌بندی روش پیشنهادی، از مفهوم تابع چگالی احتمال در مدل‌سازی متغیرهای مؤثر در تحلیل تلرانسی مجموعه‌های انعطاف‌پذیر استفاده شده است.

اگر متغیر تصادفی پیوسته x دارای تابع چگالی احتمال $p(x)$ باشد، احتمال این‌که x مقداری در بازه $[a, b]$ داشته باشد، طبق رابطه (۶) برابر است با؛

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b p(x)dx \quad (۶)$$

یکی از توابع چگالی احتمال متداول در تحلیل‌های آماری، تابع چگالی احتمال نرمال است که این تابع براساس مقادیر میانگین (μ) و انحراف استاندارد (σ) به‌صورت $N(\mu, \sigma)$ تعریف می‌گردد.

در فرمول‌بندی روش پیشنهادی، به‌جای بیان قطعی مقادیر و متغیرها در روش ضرایب تأثیر از توابع چگالی احتمال مناسب جهت توصیف عدم قطعیت مربوط به مشخصه‌های ابعادی، هندسی، مادی و محاسباتی استفاده می‌گردد. در این مقاله، از روش جذر مجموع مربعات[9] در تخمین انباشتگی خطاها و عدم قطعیت‌های ناشی از عوامل مختلف از جمله خطاهای مادی مانند جنس قطعات، خطاهای مراحل ساخت و مونتاژ و خطاهای محاسباتی استفاده می‌گردد.

۳-۳- فرمول‌بندی روش پیشنهادی

روش پیشنهادی را می‌توان در ۳ مرحله اساسی بیان کرد.

۱- در این مرحله، یک نیروی واحد در محل jام خطا $(j=1,2,..,N)$ درنظر گرفته می‌شود. جهت نیروی واحد همان جهت خطا می‌باشد. روش المان محدود می‌تواند برای محاسبه پاسخ تحت این نیروی واحد استفاده گردد. اگر

1. Target
2. Contactor
3. Slip
4. Stick

5. Clamping Force
6. Random Interval Arithmetic Method
7. Fuzzy Method
8. Probability Density Function
9. Root Sum Squares

فرض شود که مجموعه تحت اثر ترکیبی از N نیروی دلخواه ($\tilde{F}_j,\ j = 1,2 \dots, N$) باشد، آن‌گاه جابه‌جایی‌ها به‌صورت رابطه (۷) بدست می‌آید که در این رابطه $[\tilde{C}]$ ماتریس ضرایب تأثیر اصلاح شده و $\{\tilde{V}\}$ بردار خطاهای اولیه متناظر می‌باشد. علامت «~» در بالای هریک از درایه‌های ماتریس نشان دهنده این است که این مقادیر قطعی نبوده و هریک برمبنای یک تابع چگالی احتمالی نرمال با مقدار میانگین و انحراف استاندارد مشخص می‌باشند.

$$\{\tilde{V}\} = \begin{Bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \vdots \\ \tilde{V}_N \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^{N} \begin{Bmatrix} \tilde{c}_{1j} \\ \tilde{c}_{2j} \\ \vdots \\ \tilde{c}_{Nj} \end{Bmatrix} \tilde{F}_j = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{11} & \cdots & \tilde{c}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{c}_{N1} & \cdots & \tilde{c}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{F}_1 \\ \vdots \\ \tilde{F}_N \end{bmatrix}$$

$$= [\tilde{C}]\{\tilde{F}\} \qquad (۷)$$

۲- در این مرحله برای یافتن نیروهای کلمپ، معکوس ماتریس ضرایب تأثیر اصلاح شده تحت عنوان ماتریس سختی اصلاح شده (یعنی ماتریس $[\tilde{K}]$ در رابطه ۸) محاسبه می‌گردد؛

$$\{\tilde{F}\} = [\tilde{C}]^{-1}\{\tilde{V}\} = [\tilde{K}]\{\tilde{V}\} \qquad (۸)$$

مؤلفه‌های ماتریس سختی، نیروهای آزاد شده از طرف کلمپ‌ها در محاسبه برگشت فنری می‌باشند.

۳- در مرحله آخر با داشتن نیروهای کلمپ بدست آمده از رابطه (۸)، مجموعه مونتاژی با تغییرشکل اولیه در محیط المان محدود مدل‌سازی شده و با درنظر گرفتن تماس بین سطوح، مقادیر برگشت فنری در هر گره تعیین می‌گردد. حال اگر انحرافی با اندازه $\tilde{V}_j$، به‌جای انحراف واحد درنظر گرفته شود، با ترکیب همه محل‌های خطا، برگشت فنری کلی را می‌توان به‌صورت رابطه (۹) نوشت که در این رابطه $\{\tilde{U}\}$ بردار برگشت فنری کلی، $[\tilde{S}]$ ماتریس حساسیت اصلاح شده و $\{\tilde{V}\}$ بردار انحراف اولیه می‌باشد.

$$\{\tilde{U}\} = \begin{Bmatrix} \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \\ \vdots \\ \tilde{U}_M \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^{N} \begin{Bmatrix} \tilde{s}_{1j} \\ \tilde{s}_{2j} \\ \vdots \\ \tilde{s}_{Mj} \end{Bmatrix} \tilde{V}_j = \begin{bmatrix} \tilde{s}_{11} & \cdots & \tilde{s}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{s}_{M1} & \cdots & \tilde{s}_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \vdots \\ \tilde{V}_N \end{bmatrix}$$

$$= [\tilde{S}]\{\tilde{V}\} \qquad (۹)$$

پس از تعیین ماتریس حساسیت، با استفاده از روش تابع چگالی احتمال، تحلیل آماری عدم قطعیت انجام می‌شود. به این صورت که هم برای مقادیر ورودی (خطاهای اولیه) و هم برای هر یک از درایه‌های ماتریس حساسیت، یک توزیع نرمال درنظر گرفته شده و طبق رابطه (۹) یک توزیع نرمال برای خروجی مورد نظر بدست می‌آید.

۴- مطالعه موردی

در این بخش توانایی روش پیشنهادی در تحلیل تلرانسی مجموعه‌های مونتاژی شامل قطعات انعطاف‌پذیر با ارائه یک مثال موردی بررسی و صحت نتایج حاصل از به‌کارگیری روش پیشنهادی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو و نتایج تجربی مقایسه و راستی‌آزمایی می‌گردد.

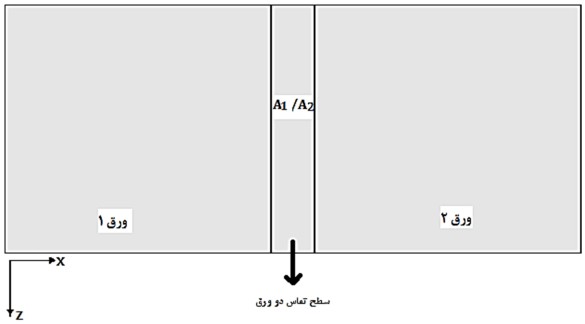
۴-۱- شرح مسأله

مطابق شکل ۲، مونتاژ دو ورق فلزی مسطح با ابعاد یکسان که دارای سطح تماس مشترک هستند، به‌طوری‌که مساحت A_1 از ورق ۱ با مساحت A_2 از ورق ۲ در تماس می‌باشد، در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که سطوح تماس دارای اصطکاک می‌باشد که برای مدل‌سازی آن از مدل اصطکاک کولمب با ضریب اصطکاک ۰/۱ استفاده شده است. هر دو ورق دارای ابعاد ۲۱۲/۸۵×۱۶۶/۳۷ میلی‌متر مربع و ضخامت یکسان ۱/۲۷ میلی‌متر می‌باشند. مدول یانگ و ضریب پواسن ورق‌ها نیز به‌ترتیب برابر ۲۰۶ گیگاپاسکال و ۰/۳ هستند.

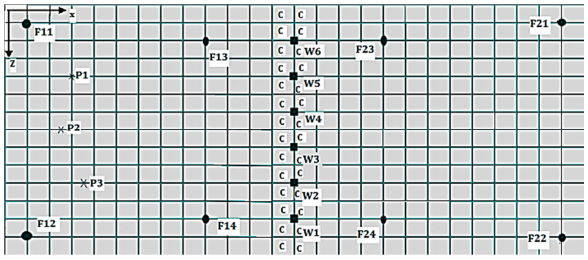
۴-۲- تحلیل تلرانسی برمبنای روش ضرایب تأثیر اصلاح شده

استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزارهای تجاری المان محدود برای حل عددی مسأله تماس از مزایای این نرم‌افزارها به‌شمار می‌روند. برای این منظور از نرم‌افزار آباکوس در این مقاله استفاده شده است. شکل ۳ مجموعه مدل شده در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. در این شکل مکان‌هایی که با علامت «•» نشان داده شده‌اند، محل فیکسچرها می‌باشند. در ورق ۱، فیکسچرهای F11 و F12 ورق را در سه جهت X و Y و Z مقید کرده‌اند، در حالی که فیکسچرهای F13 و F14 فقط در جهت عمود بر صفحه (Z) آن را مقید کرده‌اند. در ورق ۲ نیز به‌طریق مشابه، فیکسچرهای F21 و F22 ورق را در سه جهت X و Y و Z مقید کرده‌اند، در حالی که فیکسچرهای F23 و F24 فقط در جهت عمود بر صفحه (Z) آن را مقید کرده‌اند. بعد از مونتاژ مجموعه و اتصال دو ورق به یکدیگر، فیکسچرهای F13 و F14 در ورق ۱ و فیکسچر-های F23 و F24 در ورق ۲ آزاد شده و سپس برگشت فنری پس از مونتاژ تعیین می‌شود. دو ورق در ۶ نقطه به یکدیگر مونتاژ شده‌اند که اتصال آنها به‌صورت کوپل می‌باشد (فرقی بین جوش و پرچ درنظر نگرفته شده است). این ۶ نقطه در شکل ۳ با علامت «■» مشخص شده است. سطوح تماس با نشانه «C» در شکل ۳ علامت‌گذاری شده‌اند. همچنین ۳ نقطه P_1، P_2 و P_3 نقاط کنترل می‌باشند که خروجی‌های پس از مونتاژ در این ۳ نقطه اندازه‌گیری شده‌اند. به منظور ساده‌سازی فرض شده است که تغییرات اولیه در نقاط اتصالِ قرار گرفته روی ورق ۱ برابر ۲/۴ میلی‌متر بوده و ورق ۲ هیچ خطای اولیه‌ای ندارد.

به‌منظور مقایسه، ابتدا مسأله مورد نظر با روش ضرایب تأثیر معمولی حل شده است که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. میانگین برابر با انحراف ابعادی اولیه و انحراف استاندارد به‌صورت $3\sigma = \pm 0.1V$ فرض شده است که V بردار



شکل ۲ مونتاژ دو ورق مسطح یکسان



شکل ۳ مدل المان محدود مونتاژ دو ورق در نرم افزار آباکوس

انحراف اولیه است. بنابراین بردار میانگین اولیه $\mu_p=[۲/۴\ ۲/۴\ ۲/۴\ ۲/۴\ ۲/۴\ ۲/۴]^T$ و بردار انحراف استاندارد اولیه $\sigma_p=[۰/۰۸\ ۰/۰۸\ ۰/۰۸\ ۰/۰۸\ ۰/۰۸\ ۰/۰۸]^T$ می‌باشد. میانگین و انحراف استاندارد از رابطه (۱۰) و (۱۱) محاسبه شده است [۳]

$$\{\mu_a\} = [S]\{\mu_p\} \quad (۱۰)$$

$$\{\sigma_a^2\} = [S^2]\{\sigma_p^2\} \quad (۱۱)$$

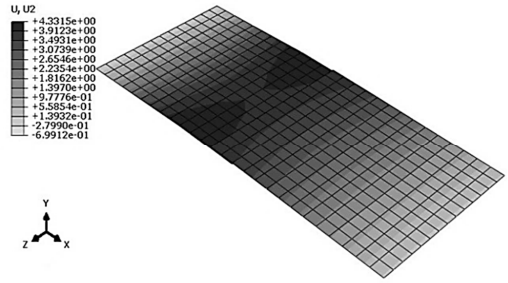
در ادامه مجموعه مونتاژی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و مطابق با الگوریتم پیشنهادی، پس از بدست آمدن نیروهای کلمپ و اعمال آنها در نقاط اتصال ورق ۱ که در واقع همان محل‌های خطا هستند، و همچنین تعریف تماس اصطکاکی بین سطوح A_1 و A_2 نشان داده شده در شکل ۲، مونتاژ بین دو ورق انجام شده و مقادیر برگشت فنری پس از مونتاژ استخراج شده‌اند که توزیع آن در شکل ۴ آمده است. سپس با داشتن مقادیر ورودی و خروجی، ماتریس حساسیت اصلاح شده بدست آمده است. با مشخص شدن ماتریس حساسیت اصلاح شده، با استفاده از روش آماری مجذور مجموع مربعات و بنا به پارامترهای مؤثر در این ماتریس، میزان عدم قطعیت ٪۵ برای هریک از درایه‌های این ماتریس لحاظ شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب[1]، یک توزیع نرمال بر اساس ۱۰۰ نمونه تصادفی برای هر درایه ایجاد شده است. همچنین برای انحراف اولیه نیز یک توزیع نرمال براساس ۱۰۰ نمونه معادل با مقدار میانگین انحراف اولیه (۲/۴ میلی‌متر) و انحراف استاندارد مطابق با سطح اطمینان ٪۹۹/۷ یعنی الگوی $\pm 3\sigma$ برابر با ±۰/۲۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سپس یک تحلیل آماری برای داده‌های خروجی (مقادیر ابعادی مونتاژ) انجام گرفته است که نتایج مقادیر برگشت فنری پس از مونتاژ برمبنای روش ضرایب تأثیر اصلاح شده براساس بازه اطمینان ٪۹۹/۷ در

جدول ۱ مقادیر برگشت فنری پس از مونتاژ براساس روش ضرایب تأثیر معمولی

نقاط کنترل	مقدار برگشت فنری (میلی‌متر)	میانگین (میلی‌متر)	انحراف استاندارد (میلی‌متر)
P_1	۲/۱۹۹۸	۲/۱۹۹۸	۰/۰۶۸۷
P_2	۱/۶۹۵۵	۱/۶۹۵۵	۰/۰۵۰۰
P_3	۲/۷۰۷۱	۲/۷۰۷۱	۰/۰۸۵۳

جدول ۲ مقادیر برگشت فنری پس از مونتاژ براساس روش ضرایب تأثیر اصلاح شده

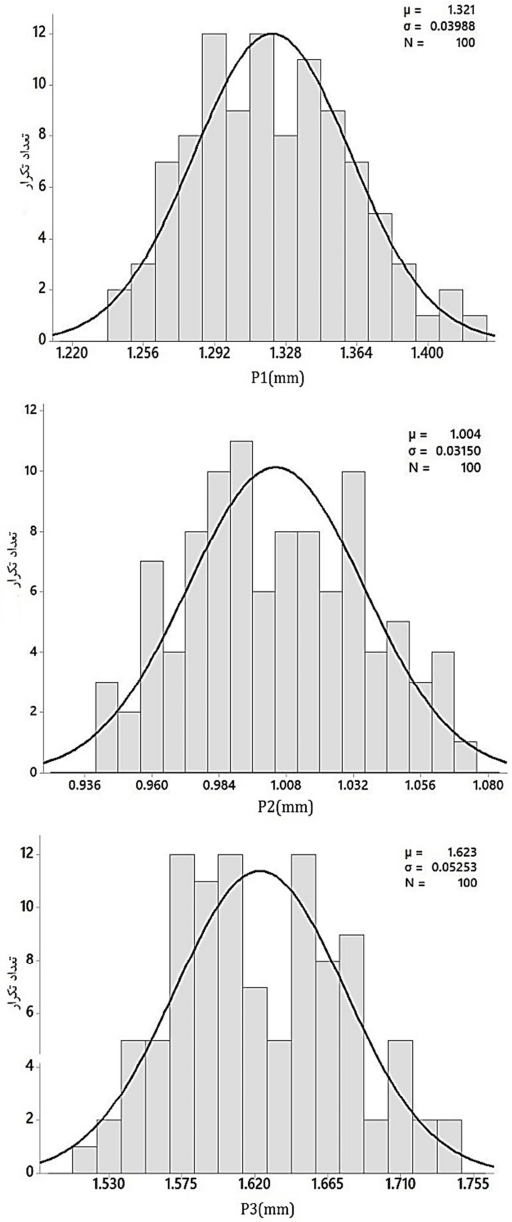
نقاط کنترل	بازه اطمینان (٪۹۹/۷) (میلی‌متر)	میانگین (میلی‌متر)	انحراف استاندارد (میلی‌متر)
P_1	[۱/۲۰۱۳ ,۱/۴۴۰۷]	۱/۳۲۱۰	۰/۰۳۹۹
P_2	[۰/۹۰۹۵ ,۱/۰۹۸۵]	۱/۰۰۴۰	۰/۰۳۱۵
P_3	[۱/۴۶۵۵ ,۱/۷۸۰۵]	۱/۶۲۳۰	۰/۰۵۲۵



شکل ۴ توزیع برگشت فنری پس از مونتاژ در نرم‌افزار آباکوس

1. Matlab

جدول ۲ آمده است. نتایج حاصل در جدول ۲ بیانگر بازه‌هایی است که تغییرات مونتاژی با درصد اطمینان ٪۹۹/۷ در آن بازه قرار دارند. نمودارهای هیستوگرام مربوط به این مقادیر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ نمودار هیستوگرام مقادیر برگشت فنری پس از مونتاژ در نقاط کنترل براساس تئوری ضرایب تأثیر اصلاح شده

۴-۳- بحث و نتیجه‌گیری

به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، تعداد ۵۰ نمونه شبیه‌سازی مونت‌کارلو براساس انحراف ابعادی اولیه با توزیع نرمال شامل مقدار میانگین ۲/۴ میلی‌متر و انحراف استاندارد با سطح اطمینان ٪۹۹/۷ ($\pm 3\sigma$) برابر با ±۰/۲۴ میلی‌متر انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. در ضمن، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش ضرایب تأثیر معمولی و نتایج تجربی (ارائه شده در مرجع [۹])، مقایسه شده که در جدول ۴ آمده

جدول ۳ مقادیر برگشت فنری بدست آمده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو

نقاط کنترل	میانگین (میلی‌متر)	انحراف استاندارد (میلی‌متر)
P_1	۱/۳۱۳۰	۰/۰۴۵۱
P_2	۰/۹۹۷۵	۰/۰۳۴۸
P_3	۱/۶۱۲۰	۰/۰۵۵۳

جدول ۴ مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف نسبت به نتایج تجربی

نقاط کنترل(*)	P_1	P_2	P_3
ضرایب تأثیر معمولی	۲/۱۹۹۸	۱/۶۹۵۵	۲/۷۰۷۱
(درصد خطا)	(۶۱/۹۱۶۷٪)	(۶۷/۲۵۸۵٪)	(۷۶/۰۴۸۶٪)
شبیه‌سازی مونت‌کارلو	۱/۳۱۳۰	۰/۹۹۷۵	۱/۶۱۲۰
(درصد خطا)	(-۳/۳۵۶۴٪)	(-۱/۵۹۸۱٪)	(۴/۸۳۱۹٪)
ضرایب تأثیر اصلاح شده	۱/۳۲۱۰	۱/۰۰۴۰	۱/۶۲۳۰
(درصد خطا)	(-۲/۷۶۷۵٪)	(-۰/۹۵۶۹٪)	(۵/۵۴۷۲٪)
روش تجربی	۱/۳۵۸۶	۱/۰۱۳۷	۱/۵۳۷۷

(*) همه واحدها به میلی‌متر می‌باشند.

است. برای مقایسه و ارزیابی، درصد خطای نسبی برای هر یک از نتایج استخراج شده در جدول ۴ محاسبه گردیده است. لازم به‌ذکر است که خطا-های نسبی ارائه شده در جدول ۴ نسبت به مقادیر میانگین می‌باشد.

همان‌طور که از جدول ۴ مشخص است با به‌کارگیری روش پیشنهادی مقادیر برگشت فنری پس از مونتاژ می‌تواند به‌خوبی و با دقت قابل قبولی پیش‌بینی شود که دلیل آن درنظر گرفتن پارامترهای عدم قطعیت موجود و لحاظ نمودن اثرات تماس بین سطوح می‌باشد. بدین ترتیب روش پیشنهادی توانسته است که با اصلاح روش ضرایب تأثیر، بدون افزودن پیچیدگی‌های رایج در تحلیل‌های غیرخطی و حفظ سادگی آن، روش کارآمد و مناسبی برای تحلیل تلرانسی مجموعه‌های مکانیکی شامل قطعات انعطاف‌پذیر با درنظر گرفتن اثرات تماس بین سطوح قطعات مبتنی بر روش اجزاء محدود با قابلیت تخمین دقیق خطاهای انباشته در مشخصه‌های مونتاژی مجموعه ارائه کند. همچنین مقادیر خطای نسبی به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو نشان از دقت روش پیشنهادی دارد.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله، روشی کارآمد جهت تحلیل تلرانسی سازه‌های ورقی انعطاف‌پذیر که شامل اثرات تماس می‌باشند، ارائه گردید. این روش، با درنظر گرفتن اثرات عدم قطعیت‌های ناشی از ابعاد، هندسه و جنس ورق‌ها و اعمال اثر تماس بین سطوح و همچنین لحاظ کردن خطاهای محاسباتی، فرمول‌بندی جدید و توسعه یافته‌ای از روش ضرایب تأثیر است؛ به‌طوری‌که، روش ارائه شده می-تواند برای تخمین خطاهای مونتاژی با دقت بالا در مجموعه‌هایی با قطعات انعطاف‌پذیر مورد استفاده مهندسان و طراحان قرار گیرد. طبق روش پیشنهادی، ابتدا مجموعه مونتاژی همراه با تغییرشکل اولیه در محیط نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی شد و سپس به‌کمک نیروهای کلمپ بدست آمده از روش ضرایب تأثیر، مراحل مختلف مونتاژ شبیه‌سازی گردید. با استفاده از داده‌های ورودی (خطاهای اولیه) و همچنین نتایج خروجی (مقادیر برگشت فنری پس از مونتاژ) بدست آمده از تحلیل المان محدود شامل اثرات تماس، ماتریس حساسیت اصلاح شده به‌دست آمد و سپس با انجام تحلیل عدم قطعیت‌های موجود برای هریک از درایه‌های این ماتریس، ماتریس حساسیت اصلاح شده به‌صورت غیرقطعی بیان گردید. در ادامه، با استفاده از این ماتریس و داشتن خطاهای اولیه، محدوده خطای مونتاژ محاسبه شد. در پایان، قابلیت‌های روش پیشنهادی و دقت نتایج حاصل با ارائه یک مثال موردی، بررسی و نتایج حاصل با مقایسه با نتایج شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو و نتایج تجربی صحه‌گذاری گردید. روش پیشنهادی با رفع ضعف‌های روش ضرایب تأثیر، در عین سادگی توانایی بالایی در پیش‌بینی خطاهای مشخصه-های مونتاژی مجموعه‌های انعطاف‌پذیر دارد و می‌تواند برای تحلیل تلرانسی مجموعه‌های انعطاف‌پذیر صنعتی پیچیده مانند مجموعه مونتاژی بدنه خودرو به‌کار گرفته شود.

٦- مراجع

[1] Y. Ding, D. Ceglarek, J. Shi, Modeling and Diagnosis of Multistage Manufacturing Process: Part I – State Space Model, in *Japan–USA Symposium of Flexible Automation*, Ann Arbor, MI, 2000.

[2] R. Mantripragada, D. E. Whitney, Modeling and controlling variation propagation in mechanical assemblies using state transition models, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 1, pp. 124-140, 1999.

[3] S. C. Liu, S. J. Hu, Variation Simulation for Deformable Sheet Metal Assemblies Using Finite Element Methods, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, No. 3, pp. 368-374, 1997.

[4] J. Camelio, S. J. Hu, D. Ceglarek, Modeling Variation Propagation of Multi-Station Assembly Systems With Compliant Parts, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 125, No. 4, pp. 673-681, 2003.

[5] J. A. Camelio, S. J. Hu, D. Ceglarek, Impact of fixture design on sheet metal assembly variation, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 23, No. 3, pp. 182-193, 2004.

[6] J. A. Camelio, S. J. Hu, S. P. Marin, Compliant Assembly Variation Analysis Using Component Geometric Covariance, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, No. 2, pp. 355-360, 2004.

[7] W. W. Cai, C.-C. Hsieh, Y. Long, S. P. Marin, K. P. Oh, Digital Panel Assembly Methodologies and Applications for Compliant Sheet Components, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 270-279, 2006.

[8] S. Dahlstrom, L. Lindkvist, Variation Simulation of Sheet Metal Assemblies Using the Method 4of Influence Coefficients With Contact Modeling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, No. 3, pp. 615-622, 2007.

[9] X. Liao, G. G. Wang, Non-linear dimensional variation analysis for sheet metal assemblies by contact modeling, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 44, No. 1-2, pp. 34-44, 2007.

[10] K. Xie, L. Wells, J. A. Camelio, B. D. Youn, Variation Propagation Analysis on Compliant Assemblies Considering Contact Interaction, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, No. 5, pp. 934-942, 2007.

[11] S.A. Hashemian, B. Moetakef Imani, Tolerance analysis of flexible sheet metal structures including effects of contact interaction and surface continuity of components, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 12, pp. 199-208, 2014. (In Persian)

[12] D.A. Hills, *Mechanics of Elastic Contact*, pp. 45-72, Boston: Butterworth-Heinemann, 1992.