

## تحلیل تفرانسی مجموعه های مکانیکی با استفاده از روش اتصالات مجازی

مسعود شریعت پناهی\*<sup>۱</sup> و علی صادقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۷/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۶/۶، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

### چکیده

در این مقاله ضمن معرفی روش اتصالات مجازی<sup>۱</sup> برای تحلیل تفرانسی مجموعه های مکانیکی در حالت سه بعدی و اشاره به برخی از کاستی های آن، الگوریتم جدیدی برای بهبود این روش از طریق تشخیص خودکار موقعیت سطوح مونتاژی و شناسایی نوع سطوح محللهای مونتاژ و در نتیجه انتخاب نوع اتصالات سینماتیکی معادل، ارائه می گردد. در روش اتصالات مجازی با این فرض که خطاهای تفرانسی بوجود آمده در یک مجموعه مکانیکی را می توان در قالب مجموعه ای از انحرافات طولی و دورانی کوچک بیان کرد، یک مدل ریاضی مبتنی بر انباشتگی تغییرات تفرانسی در حلقه ها و زنجیره های سینماتیکی حاصل از مجموعه های مونتاژی ایجاد می گردد. با جایگزین کردن اتصالات سینماتیکی طولی برای خطاهای ابعادی و هندسی طولی، و اتصالات سینماتیکی دورانی برای خطاهای ابعادی و هندسی دورانی، مجموعه مونتاژی به یک مجموعه معادل تبدیل می شود که با استفاده از روابط سینماتیکی حاکم بر آن و به کمک الگوریتم جدید شناسایی محللهای مونتاژ، امکان مدلسازی ریاضی خطاهای ابعادی و هندسی مجموعه را فراهم می سازد. در این مقاله همچنین کارایی و اعتبار روش پیشنهادی از طریق بررسی یک مثال سه بعدی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

**واژه های کلیدی:** تحلیل تفرانسی<sup>۲</sup> - مجموعه های مکانیکی<sup>۳</sup> - انحرافات مونتاژ<sup>۴</sup> - روش اتصالات مجازی

### مقدمه

تولید سنتی به شمار می آید) استفاده از روشهای تحلیل تفرانس به عنوان ابزاری ارزشمند و کلیدی در مرحله طراحی محصول و طراحی فرایند تولید اجتناب ناپذیر می نماید. این روشها به طراح اجازه می دهند تا پیش از آغاز تولید، از طریق بررسی نحوه و میزان تأثیر هر یک از تغییرات در شکل یا ابعاد نامی قطعات بر عملکرد محصول نهایی، تفرانس های هندسی و ابعادی مناسب را برای قطعات مختلف تعیین نماید و از این طریق تا حد زیادی کیفیت محصول نهایی را از قبل پیش بینی نماید.

### مروری بر روشهای سنتی تحلیل تفرانسی

۱- روش بدترین حالت تفرانسی<sup>۵</sup>: که گاهی به عنوان روش نهایت ها<sup>۶</sup> هم شناخته می شود، ساده ترین و محافظه کارانه ترین روش سنتی و همچنین از رایجترین روشهای تحلیل تفرانسی نزد مهندسان طراح محسوب می شود. این روش با این فرض آغاز می شود که تفرانس همگی قطعات در مجموعه مونتاژی در بدترین حالت خود یعنی در حد بالا و پایین قرار دارند. در این روش، تفرانس خروجی یا به عبارتی تفرانس هدف در مجموعه مونتاژی از جمع حدود

پیشرفت چشمگیر روشهای تولید که امکان تولید محصولات با کیفیت بالا را فراهم کرده است از یکسو و ظهور روشها و ابزارهای اندازه گیری فوق دقیق که سنجش دقیق کیفیت این محصولات را ممکن ساخته از سوی دیگر سبب شده است تا انتظارات مشتریان کالاهای صنعتی نیز متناسب با این امکانات افزایش یابد. یکی از ویژگی های مهم کالاهای صنعتی، به ویژه مجموعه های مکانیکی، رعایت تفرانس های ساخت و مونتاژ این مجموعه هاست که نه تنها بر جنبه های ظاهری محصول (نظیر کیفیت بدنه خودرو) موثر است بلکه در بسیاری از موارد عملکرد محصول را نیز مستقیماً تحت تأثیر قرار می دهد.

پیچیدگی برخی از مجموعه های مکانیکی و تعدد منابع احتمالی خطا در آنها (کیفیت و دقت مواد اولیه، ابزارها و روشهای ساخت و مونتاژ، عوامل انسانی و نظایر آن) باعث شده است که تلاش برای تضمین نسبی برآورده کردن نیازهای تفرانسی مجموعه های مکانیکی به یکی از دشوارترین چالش های پیش روی طراحان و تولید کنندگان این مجموعه ها تبدیل گردد. برای پرهیز از هزینه گزاف روشهای آزمون و خطا (که شیوه غالب در فرایندهای

$$T_{RSS} = \sqrt{\sum T_i^2} \quad (۲)$$

در این مدل فرض بر این است که تکرانهای قطعات به توانایی های فرایند وابسته است. بنابراین هنگامی که طراح تکرانسی را تغییر می دهد قابلیت های فرآیند ساخت هم تغییر می کند. این فرض یکی از نقاط ضعف روش تحلیل تکرانسی RSS محسوب می شود [۱] و [۲].

**۳- روش شبیه سازی مونت کارلو:** روش شبیه سازی مونت کارلو بر اساس ارزیابی تک تک قطعات مجموعه مونتاژی، تکران مورد نظر در مجموعه مونتاژی را مورد بررسی و تحلیل قرار می دهد. در این روش از یک تابع تولید کننده اعداد تصادفی برای نسبت دادن یک مقدار به هر یک از متغیرهای مربوط به تولید و اندازه های قطعات، استفاده می شود. متغیرهای تصادفی بر اساس نوع تابع توزیع آماری که توسط طراح به متغیرها اختصاص داده شده و یا تابع توزیعی که از اطلاعات تولید محصول بدست می آید، انتخاب می شوند. نکته مهم در استفاده از روش مونت کارلو، جایگزینی دسته های اعداد تصادفی به جای ابعاد و اندازه های قطعات مجموعه مونتاژی و محاسبه تغییرات در متغیرهای مجموعه مونتاژی برای هر مجموعه است، در موارد فوق باید تابع مجموعه مونتاژی، یک تابع صریح و غیر ضمنی باشد. دقت این روش به تعداد دفعات استفاده از اعداد تصادفی یا به عبارتی تعداد نمونه گیری و دفعات تحلیل بستگی دارد. این موضوع برای نتیجه گیری با دقت های بالا سبب بالا رفتن زمان محاسباتی خصوصاً در مجموعه های مونتاژی با معادلات ضمنی خواهد شد [۴] و [۵].

**۴- روش ممانهای سیستم:** در این روش برای بیان تغییرات در مجموعه مونتاژی از ممانهای توزیع آماری اجزاء در یک مجموعه آماری استفاده می گردد. ممان ها از بسط سری تیلور تابع مجموعه مونتاژی حول نقطه میانگین با صرف نظر کردن از مشتقهای مرتبه بالاتر بدست می آید. در صورتیکه مشتقهای تابع مجموعه مونتاژی قابل محاسبه باشد، روش ممان های سیستم بدلیل دسترسی سریع به جواب برای فرآیند های تکراری طراحی مناسب می باشد. این روش دارای دقت و سرعت خوبی است که این مزیت آنرا به روشی مناسب برای تحلیل تکرانسی به کمک کامپیوتر<sup>۹</sup> تبدیل کرده است. در این روش امکان استفاده از متغیرهای ورودی با توزیع غیر نرمال و همچنین تخمین

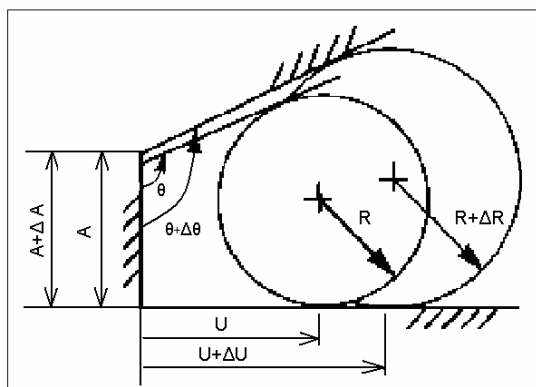
تکرانسی هر یک از قطعات در بدترین حالت ممکن مطابق با رابطه (۱) بدست می آید.

$$T_{WC} = \sum_{i=1}^n |T_i| \quad (۱)$$

که در آن  $T_i$  تکرانسی قطعه  $i$  ام و  $n$  تعداد قطعات تشکیل دهنده مجموعه است. تنها فرض موجود در روش بدترین حالت این است که صد در صد قطعات در محدوده تکرانسی واقع شده اند. هر چند این فرضیه همیشه درست نیست اما به دلیل محافظه کارانه بودن بیش از حد، این روش همواره مونتاژ پذیر بودن صد در صد قطعات را تضمین می نماید. مهمترین نقطه ضعف تحلیل به روش بدترین حالت وقتی آشکار می شود که تعداد قطعات در مجموعه مونتاژی زیاد باشند یا اینکه تکرانسی خروجی مورد نظر خیلی بسته (کوچک) باشد. در این گونه کاربرد ها استفاده از این روش برای تعیین تکرانسی قطعات منجر به تعیین محدوده های بسیار بسته تکرانسی برای هر یک از قطعات می شود که این مسئله باعث بالا رفتن هزینه های تولید می گردد [۱] و [۲].

**۲- روشهای آماری:** در تکرانسی گذاری آماری طراح این هدف بزرگ و ایده آل را که ۱۰۰٪ قطعات قابلیت تعویض پذیری در مونتاژ را داشته باشند کنار گذاشته و از همان ابتدای طراحی درصد کوچکی خطا و انحراف را برای مجموعه مونتاژی می پذیرد. تکرانسی گذاری آماری بجای اینکه تکرانسی یک قطعه را تعیین کند به تعیین تکرانسی یک مجموعه (شامل قطعه مورد نظر) می پردازد. از آنجا که روش آماری به اندازه روش بدترین حالت بدبینانه نیست، حدود تکرانسی بازتری را برای مجموعه های مونتاژی انتخاب می نماید [۳]. یکی از رایجترین روشهای آماری که برای تحلیل تکرانسی مجموعه های مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرد روش جذر مجموع مربعات (RSS)<sup>۷</sup> است. در این روش تحلیل تکرانسی، فرض اولیه این است که احتمال ساخته شدن قطعات در وسط حدود تکرانسی خیلی بیشتر از حدود بالا و پایین است. همچنین فرض دیگر در روش RSS این است که اندازه ها و حدود تکرانسی ساخته شده، دارای یک توزیع آماری بصورت نرمال هستند که در عمل این فرض چندان صحیح نیست. تکرانسی هدف در مجموعه مونتاژی بروس RSS از جذر مجموع مربعات تکرانسیهای قطعات تشکیل دهنده مجموعه، مطابق با رابطه (۲) محاسبه می گردد.

روابط سینماتیکی است. البته این ابزار در صورتی موفقیت آمیز عمل خواهد کرد که یک پل ارتباطی مناسب بین خطاهای ایجاد شده در هر یک از قطعات مجموعه مونتاژی و روابط سینماتیکی مربوطه برقرار شود، و یا به بیان دیگر مدل صحیحی از خطاهای ایجاد شده در مجموعه بکمک روابط سینماتیکی ایجاد شود [۱۸] و [۱۹]. مثال ارائه شده در شکل (۱) نشان می دهد که چگونه خطاهای بوجود آمده در ابعاد و هندسه قطعه کار، می تواند باعث انحراف آن از حالتی شود که طراح در نظر گرفته است. در استوانه و شیار نشان داده شده در شکل (۱) تغییرات کوچک  $\Delta$  به هر یک از اندازه های اسمی  $R$ ،  $A$  و  $\theta$  داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، این تغییرات باعث جابجایی قطعه استوانه ای و ایجاد موقعیت جدید برای این قطعه خواهند شد. انحرافات و خطاهای ایجاد شده در اثر ساخت در قطعات مجموعه مونتاژی، بصورت سینماتیکی در مجموعه منتشر می شوند و بر روی هم انباشته می گردند و خطای  $\Delta$  را بر روی اندازه  $U$  که به اندازه های دیگر وابسته است و از نکات مورد توجه طراح می باشد، بوجود می آورد. خطاهای ناشی از ساخت، همچنین می توانند در شکل و فرم قطعه، ایجاد انحراف کنند. در شکل (۲) چگونگی انحراف در موقعیت استوانه و ایجاد تغییر  $\Delta$  در اندازه  $U$  در اثر خطاهای هندسی بوجود آمده در دایروی بودن استوانه، زاویه شیار و تختی کف شیار مشاهده می گردد [۱۷].



شکل ۱: نمایشگر جابجایی های سینماتیکی در اثر انحرافات ابعادی [۱۷].

هر دو نوع خطای تفرانسی بوجود آمده در مجموعه های مونتاژی، چه از نوع ابعادی و چه از نوع هندسی، بصورت سینماتیکی در مجموعه مونتاژی منتشر می شوند و بصورت آماری بر روی هم انباشته می گردند [۲۰]. بنابراین در

غیرنرمال تابع مدل وجود دارد. در صورت استفاده از بسط مرتبه دوم، این روش پاسخهای دقیقتری برای توابع غیرخطی به همراه خواهد داشت [۴] و [۶].

### پیشینه پژوهش در زمینه تحلیل تفرانسی

تحلیل تفرانسی یکی از شاخه های نسبتاً جدید مهندسی است که پژوهش در آن بویژه در زمینه تدوین نرم افزارهای تحلیل خودکار تفرانسی مجموعه ها هرروز گسترش بیشتری می یابد. از جمله این پژوهش ها می توان به موارد زیر اشاره کرد: مدلسازی حدود تفرانسی<sup>۱۰</sup> توسط Davidson [۷]، Roy [۸]، Clement [۹] و Gossard [۱۰]، تفرانس گذاری آماری<sup>۱۱</sup> توسط O'Connor [۱۱]، Varghese [۱۲] و Lin [۱۳] و نیز تحقیقات مختصری که در زمینه تفرانس گذاری پارامتریک<sup>۱۲</sup> و کاربردی صورت گرفته است که در بین آنها می توان به تفرانس گذاری سینماتیکی<sup>۱۳</sup> برای مکانیزمهای دو بعدی توسط Sacks [۱۴] و تحلیل تفرانسی با اتصالات سینماتیکی معادل در فضای دو بعدی توسط Faerber [۱۵] و Laperriere [۱۶] اشاره کرد. پژوهش حاضر در ادامه کار Laperriere برای مدلسازی تمامی خطاهای تفرانسی هندسی در فضای سه بعدی بصورت خودکار صورت گرفته است.

### مکانیزم انتشار خطا در مجموعه های مکانیکی

در فرایند ساخت و مونتاژ قطعات مکانیکی، خطاهایی بوجود می آید که گریزی از آنها نیست و قطعاً در عملکرد مجموعه مونتاژی حاصله تأثیر گذار خواهند بود. این خطاها باعث می شوند تا مجموعه مونتاژی از حالت اسمی و ایده آلی که طراح در نظر داشته است خارج شده و رفتاری تا حدودی متفاوت از خود نشان دهد. خطاهای ناشی از مراحل مختلف تولید و مونتاژ می توانند به سه شکل بر روی قطعات در مجموعه های مونتاژی تأثیر گذار باشند:

- ۱- خطاهای ابعادی (خطاهای مربوط به طول و زاویه)
- ۲- خطاها و انحرافات هندسی و خطاهای مربوط به شکل (موقعیت، دایروی بودن، تعامد و ...)
- ۳- انحرافات سینماتیکی (جابجایی های کوچک در بین قطعات به هم مونتاژ شده). [۱۷]

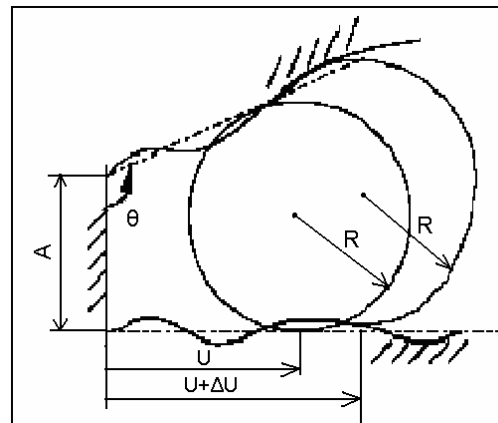
یکی از کارآمدترین ابزارهای ریاضی و آماری که برای تحلیل این طیف خطاها پیشنهاد شده است استفاده از

شش تایی و در ازای هر محل اتصال، یک مجموعه با شش اتصال مجازی دیگر در نظر گرفته می شود. سپس مدل ریاضی مورد نظر با متصل کردن یک دستگاه مختصات ساده و ابتدایی به هر یک از اتصالات مجازی بوجود می آید. در هر یک از این دستگاههای مختصات، فقط یک جابجایی صورت می گیرد چه از نوع طولی و چه از نوع دورانی. به عبارت دیگر متناظر با هر یک از شش جابجایی رایج طولی و دورانی، یک دستگاه مختصات منظور می گردد. در این صورت امکان محاسبه ماتریس تغییر شکل برای هر یک از انحرافات نسبت به دستگاه مختصات مرجع یا جهانی بوجود می آید. بدین ترتیب آثار هر یک از جابجایی های کوچک طولی و دورانی ناشی از انحرافات تیرانسی در یک نقطه دلخواه از مجموعه مونتاژی، با استفاده از محاسبه ماتریس ژاکوبین برای هر یک از اتصالات مجازی ایجاد شده، محاسبه می گردد. حاصل محاسبات انجام شده، دستیابی به شش معادله است که می توانند میزان انحرافات در جهت و موقعیت یک نقطه دلخواه را در دستگاه مختصات کارتزین نشان دهند [۲۳].

### مبانی ریاضی مدلسازی پراکندگی ها

با نسبت دادن مجموعه های شش تایی اتصالات مجازی به اندازه ها و المانهای کاربردی و محل های اتصال قطعات به یکدیگر، مجموعه مونتاژی قطعات، به یک مجموعه مجازی که از اتصالات مجازی بوجود آمده است، تبدیل می گردد. در این صورت مسئله مدلسازی تأثیر پراکندگی ها و انحرافات المانهای کاربردی بر روی نقاطی که مورد نظر طراح بوده و در اینجا الزامات کاربردی نام گرفته است، [۲۲] با پرداختن به این مهم صورت می گیرد که بتوان آثار جابجایی های کوچک هر یک از المانهای کاربردی را در نتیجه اتصالات مجازی که به آنها نسبت داده شده است مدلسازی کرد. برای هر المان کاربردی، شش اتصال مجازی، سه اتصال برای جابجایی های طولی و سه اتصال برای جابجایی های محوری در نظر گرفته می شود. در این حالت شش پراکندگی ناشی از این المان کاربردی، به شش جابجایی در هر نقطه دلخواه از زنجیره یا حلقه سینماتیکی نسبت داده شده و تأثیر انحرافات ناشی از تیرانسهای المان کاربردی مزبور، در آن محل مشاهده می گردد. برای ایجاد یک رابطه قانونمند بین انحرافات ایجاد شده در هر یک از المانهای کاربردی و الزامات کاربردی

صورت ایجاد ارتباطی صحیح و اصولی بین خطاهای بوجود آمده در مجموعه های مونتاژی و روابط سینماتیکی، مدل ریاضی قدرتمندی از خطاهای موجود در مجموعه بوجود خواهد آمد که می تواند تغییرات ایجاد شده در اثر خطاهای تیرانسی در هر نقطه مورد نظر را به طراح اعلام نماید.



شکل ۲: نمایشگر جابجایی های سینماتیکی در اثر انحرافات هندسی [۱۷]

### تحلیل تیرانسی به روش اتصالات مجازی

این روش بر پایه ارائه یک مدل ریاضی متأثر از انباشتگی ها و تغییرات تیرانسی در حلقه ها و زنجیره های سینماتیکی حاصل از مجموعه های مونتاژی عمل می کند. در این روش کلیه خطاهای بوجود آمده در یک مجموعه مونتاژی در قالب دو دسته کلی انحرافات دورانی و انحرافات طولی در نظر گرفته می شود. همچنین فرض می شود که کلیه انحرافات دورانی و طولی بوجود آمده در محدوده های تیرانسی بسیار کوچک هستند بطوریکه برای یک انحراف زاویه ای می توان نوشت [۲۱]:

$$\sin \alpha = \alpha \text{ (Rad)} \quad \text{و} \quad \cos \alpha = 1$$

این روش به ارائه تعدادی مجموعه شش تایی از اتصالات مجازی سینماتیکی می پردازد که هر مجموعه شش تایی می تواند کلیه خطاهای طولی و دورانی را در بر داشته باشد. سه اتصال سینماتیکی برای مدلسازی خطاهای طولی و سه اتصال سینماتیکی برای مدلسازی خطاهای دورانی استفاده می شوند. هر یک از این مجموعه ها می تواند آثار ناشی از انحرافات موقعیتهای و جهتها را برای هر یک از قطعات مجموعه مونتاژی و محل های اتصال قطعات به یکدیگر، به طور جداگانه شبیه سازی کند. به بیان دیگر، در ازای هر قطعه یا هر المان کاربردی [۲۲]، یک مجموعه

ماتریس سمت راست رابطه (۴)، یک ماتریس  $6 \times n$  است که برای محاسبه هر یک از ستونهای شماره  $i$  این ماتریس از رابطه فوق استفاده می شود. سه سطر اول هر ستون این ماتریس، نتیجه یک ضرب برداری است که مطابق با رابطه (۵) محاسبه می شود. این رابطه، ضرب برداری را بصورت دترمینانی بیان می کند.

$$A \times B = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix} \quad (۵)$$

در رابطه (۴) بردار سمت چپ علامت ضرب برداری، ستون  $z$  یعنی ستون سوم ماتریس تبدیل  $i-1$  نسبت به دستگاه مختصات مرجع می باشد و بردار سمت راست علامت ضرب، از تفاضل فاصله های نقطه هدف به نقطه مورد نظر و نقطه قبل از ستون  $i$  ام بدست می آید. یعنی حاصل تفاضل ستون چهارم ماتریس تبدیل مربوط به نقطه هدف و ستون چهارم ماتریس تبدیل شماره  $i-1$ ، نسبت به دستگاه مختصات مرجع، که در اینجا دستگاه شماره صفر است.

سطر پایینی ماتریس سمت راست معادله (۴) حاصل اتصال مجازی دورانی  $i$  ام در جابجایی دورانی کوچک نقطه مورد نظر است، که با ساده سازی های انجام شده به هنگام تعریف محورهای مختصات برای محاسبه این قسمت، کافی است به ستون سوم ماتریس تبدیل  $i-1$  یعنی  $T_0^{i-1}$  مراجعه شده و سه سطر اول این ستون، عیناً به عنوان سه سطر پایینی ستون  $i$  ام ماتریس ژاکوبین در نظر گرفته شود. یک اتصال مجازی با حرکت طولی یا کشویی، هیچ تأثیری بر جابجایی های دورانی کوچک نقطه مورد نظر نخواهد داشت، لذا برای اتصالات مجازی طولی یا کشویی رابطه (۴) به صورت زیر ساده سازی می شود. [۲۳]

$$J_i = \begin{bmatrix} z_0^{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

### مدلسازی اتصالات مجازی

برای دستیابی به هدف تفراس گذاری، یک سری دستگاههای مختصات به همراه مجموعه هایی از اتصالات مجازی بر روی هر یک از المانهای کاربردی ایجاد می گردد. اتصالات مجازی ایجاد شده در المانهای کاربردی،

مورد نظر مهندسين طراح، از ماتریس ژاکوبین استفاده می شود. در این جا از ماتریس ژاکوبین به عنوان ابزاری ریاضی برای مدلسازی جابجایی های کوچک مورد استفاده فرار می گیرد. [۲۳]

$$\begin{bmatrix} \delta s \\ \delta \alpha \end{bmatrix} = [J_1 J_2 \dots J_n] \cdot \delta \quad (۳)$$

در رابطه فوق

$\delta s$ : بردار سه مؤلفه ای انتقالهای کوچک برای نقطه مورد نظر،

$\delta \alpha$ : بردار سه مؤلفه ای دورانهای کوچک برای نقطه مورد نظر،

$J_i$ : ستون  $i$  ام از ماتریس ژاکوبین و

$\delta$ : بردار پراکندهگیها و انحرافات کوچک اتصالات مجازی است.

هر ستون از ماتریس ژاکوبین، به سادگی قابل محاسبه است. البته برای ساده شدن محاسبه ماتریس ژاکوبین، لازم است برخی نکات در شکل دهی دستگاههای مختصات محلی رعایت شوند. برای این منظور باید توجه شود که محور  $z$  هر یک از دستگاههای مختصات محلی مربوط به اتصالات مجازی، به صورتی قرار گیرد که همواره محور جابجایی یا دوران باشد. یعنی برای هر یک از اتصالات مجازی که بیانگر جابجایی های کوچک طولی هستند، محور  $z$  در راستای جهت جابجایی طولی بوده و برای کلیه اتصالات مجازی که بیانگر دورانهای کوچک هستند محور  $z$  دستگاه مختصات بگونه ای قرار گیرد که همواره محور دوران باشد. [۲۳]

در صورت ارضاء قانون فوق اگر نماد  $T_0^{i-1}$  برای نمایش تبدیل صورت گرفته بین دستگاههای مختصات  $O_{i-1}$  و  $O_0$  در نظر گرفته شود ( $O_0$  دستگاه مختصات مبنا یا اصلی می باشد)، ستون  $i$  ام از ماتریس ژاکوبین که با نماد  $J_i$  نمایش داده می شود، از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$J_i = \begin{bmatrix} z_0^{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \\ z_{i-1}^0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

در این رابطه :

$z_0^{i-1}$ : سومین ستون از ماتریس انتقال  $T_0^{i-1}$  (بین دستگاه مختصات  $i-1$  و  $0$ ) می باشد

$d_0^{i-1}$ : آخرین ستون از ماتریس  $T_0^{i-1}$  است. [۲۳]

انجام شده بین دستگاههای مختصات مربوط به اتصالات مجازی لحاظ می گردد. از آنجاییکه محور z دستگاه مختصات هر اتصال باید در راستا و یا در امتداد حرکت انجام شده در آن اتصال باشد، برای دستیابی به این هدف، هر دستگاه مختصات برای انتقال به دستگاه مختصات بعدی باید دورانهایی حول محورهای خود به اندازه ۹۰ درجه انجام دهد. در روابط (۷) تا (۱۲) هر یک از تبدیلهای لازم در دستگاههای مختصات نشان داده شده در شکل (۳) ارائه شده است.

$$T_0^1 = T_{z0} R_x(90^\circ) \quad (7)$$

$$T_0^2 = T_0^1 T_{z1} R_z(90^\circ) R_x(90^\circ) \quad (8)$$

$$T_0^3 = T_0^2 T_{z2} R_z(90^\circ) R_x(90^\circ) \quad (9)$$

$$T_0^4 = T_0^3 R_{z3} R_x(-90^\circ) \quad (10)$$

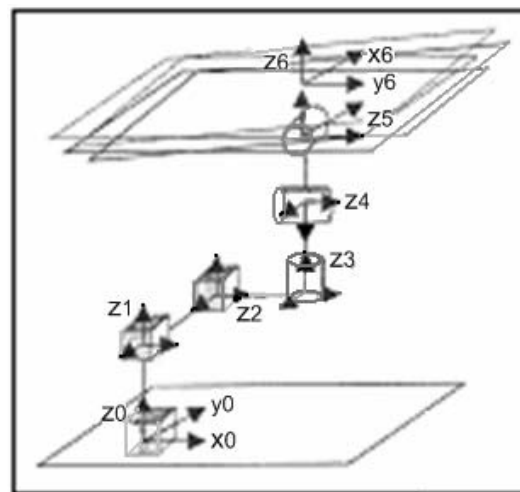
$$T_0^5 = T_0^4 R_{z4} R_z(-90^\circ) R_x(90^\circ) \quad (11)$$

$$T_0^6 = T_0^5 R_{z5} R_z(90^\circ) R_x(90^\circ) \quad (12)$$

در این روابط سه انتقال جابجایی با نمادهای  $(T_{z0})$ ،  $(T_{z1})$  و  $(T_{z2})$  و سه انتقال دورانی به صورت  $(R_{z3})$ ،  $(R_{z4})$  و  $(R_{z5})$  دیده می شوند. این انتقالها برای وارد کردن اندازه های طولی و زاویه ای موجود در هر المان کاربردی به محاسبات مربوط به ماتریسهای انتقال در نظر گرفته شده اند. یعنی اگر در یک المان کاربردی، مانند محللهای اتصال دو قطعه به یکدیگر، هیچ نوع اندازه فیزیکی طولی و زاویه ای وجود نداشته باشد، آرایه های مربوط به انتقال و دوران در این ماتریسها، صفر منظور می شوند. در صورت وجود اندازه های طولی بین دستگاه مختصات اول و هر یک از دستگاههای مختصات در مجموعه شش تایی اتصالات مجازی، مقدار این اندازه های طولی با توجه به اینکه در راستای کدامیک از محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  قرار گرفته اند به ترتیب و با توجه به جهت محور  $z$  دستگاه مربوطه، در یکی از انتقالهای  $(T_{z0})$ ،  $(T_{z1})$  و  $(T_{z2})$  وارد می شوند. به همین ترتیب اگر دو صفحه انتخاب شده در یک المان کاربردی با هم اندازه زاویه ای داشته باشند با توجه به اینکه

کلیه خطاهای ایجاد شده در هر المان کاربردی را که در محدوده تolerانس ابعادی و هندسی این المانها بوجود می آیند، مدلسازی می کنند و امکان شبیه سازی انحرافات ناشی از عدم دقت در ساخت و مونتاژ را بوجود می آورند. از این رو روش اتصالات مجازی بر یک سری اتصالات سینماتیکی ساده پی درپی و متوالی مبتنی است، که هر یک از آنها فقط دارای یک درجه آزادی هستند و به هر یک از این اتصالات فقط یک دستگاه مختصات اختصاص داده شده است. علت این امر همانطور که در گذشته گفته شد، ساده سازی و ایجاد سهولت در محاسبه ماتریس ژاکوبین می باشد. با توجه به این نکته که، همواره حرکت انجام شده در هر یک از این اتصالها، باید در راستا و یا حول محور  $z$  دستگاه مختصات مربوطه باشد. بنابراین کلیه پراکندگی ها و انحرافات ایجاد شده در یک المان کاربردی با شش اتصال سینماتیکی مجازی و شش دستگاه مختصات چسبیده به هر اتصال مدلسازی می شوند که سه اتصال مربوط به انحرافات طولی کوچک و سه اتصال مربوط به انحرافات دورانی کوچک می باشند.

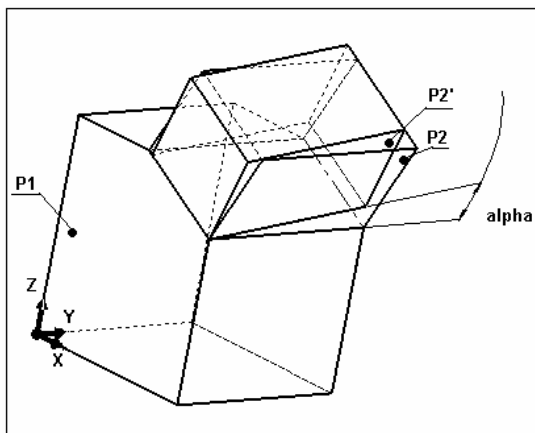
شکل (۳) نشان می دهد که چگونه هر یک از شش انحراف ممکن برای یک المان کاربردی شامل دو صفحه از یک قطعه توسط اتصالات مجازی بوجود آمده مدلسازی می گردد.



شکل ۳: جانمایی یک مجموعه اتصالات مجازی در یک المان کاربردی.

در این شکل اتصالاتی که با مکعب مشخص شده اند نمایشگر انحرافات طولی و اتصالاتی که با استوانه مشخص گردیده اند بیانگر انحرافات دورانی می باشند. واضح است که اندازه های طولی و زاویه ای، در یکی از جابجایی های

شش تایی صورت گرفته باشد. در این صورت تمامی انحرافات محدوده های تیرانسی در سطح زاویه دار، با وجود دستگاه مختصات جدید به شکلی انجام می شوند که گویی در صفحه ای بدون زاویه و دوران اتفاق افتاده اند. بدین ترتیب طراح می تواند با محاسباتی ساده انحرافات زاویه ای و طولی در محدوده تیرانسیهای هندسی و ابعادی را بدست آورده و بدون نگرانی از چگونگی تبدیل این انحرافات به دستگاه مختصات مرجع، این مقادیر را وارد محاسبات با ماتریس ژاکوبین نماید. برای مثال، در شکل (۴)، سطح اتصال دو قطعه به یکدیگر به اندازه زاویه alpha دچار انحراف زاویه ای شده است.



شکل ۴: در این شکل سطح زاویه دار در محدوده تیرانسی هندسی خود، به اندازه زاویه alpha منحرف شده است.

اگر در روش اتصالات مجازی اندازه های زاویه ای سطوح مونتاژی لحاظ نمی شد، طراح ناگزیر بود برای محاسبه انحراف زاویه ای در مثال ارائه شده نسبت به دستگاه مختصات مرجع، تصویر انحراف ایجاد شده alpha در هر یک از صفحات دستگاه مختصات مرجع را محاسبه نماید. این کار در نمونه های با تعداد قطعات زیاد، سبب پیچیدگی مساله و بالا رفتن زمان محاسبات و همچنین ایجاد خطای احتمالی در اثر رفتن میزان عملیات محاسباتی می گردید. برای درک بهتر این مطلب، مثال زیر ارائه می گردد. فرض کنیم که هدف، محاسبه اتصالات مجازی مورد نیاز برای مدلسازی خطاهای ابعادی و هندسی موجود در شکل (۵) می باشد. در این شکل دو قطعه در یک سطح زاویه دار که بر روی قطعه پایه قرار دارد به یکدیگر مونتاژ شده اند. همانطور که در شکل دیده می شود، دوران صفحه زاویه دار حول محور y دستگاه مختصات مرجع صورت گرفته است. از آنجا که حرکت های طولی و دورانه همواره باید

صفحه زاویه دار در اثر دوران حول محور z کدام یک از اتصالات مجازی بوجود آمده است، مقدار این اندازه زاویه ای، به دوران ( $R_z$ ) مربوط به آن اتصال وارد می شود.

مدل ریاضی ارائه شده ای که بتواند انحرافات حاصل از تیرانسیهای هیرالمان کاربردی را مدلسازی کند، برای یک زنجیره یا حلقه تیرانسی که دارای n المان کاربردی مؤثر، بر یک الزام کاربردی خاص است، به صورت رابطه (۱۳) بیان می گردد.

$$\begin{bmatrix} \delta s \\ \delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_3 & J_4 & J_5 & J_6 \\ J_1 & J_2 & J_3 & J_4 & J_5 & J_6 \end{bmatrix}_{FE_1} \dots \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_3 & J_4 & J_5 & J_6 \end{bmatrix}_{FE_{n-1}} \begin{bmatrix} \delta_{FE_1} \\ \vdots \\ \delta_{FE_n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

در این رابطه :

$\delta s$ : بردار سه مؤلفه ای، در بردارنده جابجایی های طولی کوچک نقطه مورد نظر،

$\delta \alpha$ : بردار سه مؤلفه ای، در بردارنده جابجایی های دورانی کوچک نقطه مورد نظر،

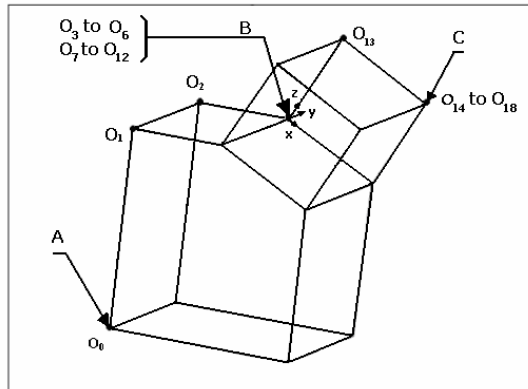
$\delta_{FE_i}$ : شش بردار از انحرافات طولی و زاویه ای کوچک مربوط به المان کاربردی i ام ( که یک ماتریس ستونی  $n \times 1$  را بوجود می آورند)، و

$(J_1 J_2 \dots J_6)_{FE_i}$ : ماتریس ژاکوبین  $6 \times 6$  برای المان کاربردی i ام است ( که بر اساس مجموعه های شش تایی شکل گرفته است و در رابطه فوق، یک ماتریس  $6 \times n$  تشکیل می دهند).

در بخش بعد، مثال ساده ای برای درک بیشتر روابط فوق ارائه می گردد.

یکی از ویژگی های مدلسازی بروش اتصالات مجازی، این است که تیرانسیهای مربوط به محل های تماس زاویه دار، بدور از هر نگرانی از اتفاقی که در محل تماس می افتد، وارد محاسبات می شوند. در این روش با این فرض اولیه، که محور مختصات z همواره باید در راستای حرکت های طولی و یا بعنوان محور دوران در حرکت های دورانی قرار گیرد، شرایطی بوجود می آید تا تمامی دورانهای لازم برای دستگاه های مختصات، به منظور ارضاء خواسته فوق قبل از رسیدن به آخرین دستگاه مختصات موجود در مجموعه

$O_{12}$  به منظور مدل‌سازی خطاهای تolerانسی محل اتصال و همچنین دستگاههای مختصات  $O_{13}$  تا  $O_{18}$  به منظور مدل‌سازی خطاهای تolerانسی قطعه فوقانی در نظر گرفته شده اند.



شکل ۶: جاگذاری دستگاههای مختصات مربوط به هر یک از اتصالات مجازی.

از آنجا که اندازه زاویه ای موجود در مونتاژ مربوط به قطعه پایه می باشد، در این قسمت ماتریسهای مورد نیاز برای تبدیل دستگاههای مختصات شش اتصال مجازی مربوط به المان کاربردی قطعه پایه نسبت به دستگاه مختصات مرجع ارائه می گردد. بدین ترتیب اندازه زاویه ای وارد محاسبات می شود و در صورت وجود خطاهای تolerانسی برای این زاویه، تأثیر این خطاها بر مجموعه مونتاژی آشکار میگردد.

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & D2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_0^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & D3 \\ 1 & 0 & 0 & D2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

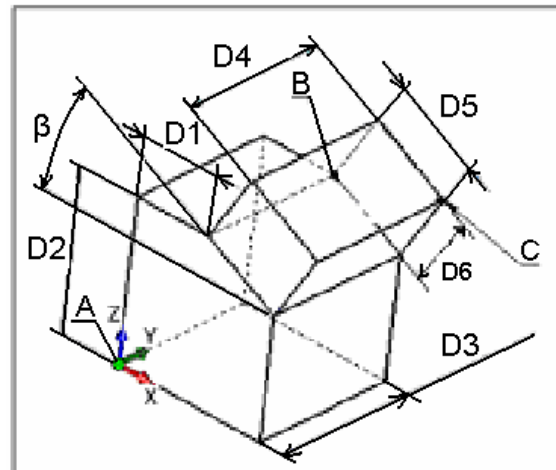
$$T_0^3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & D1 \\ -1 & 0 & 0 & D3 \\ 0 & 0 & 1 & D2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_0^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & D1 \\ -1 & 0 & 0 & D3 \\ 0 & -1 & 0 & D2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & D1 \\ 0 & 0 & 1 & D3 \\ 1 & 0 & 0 & D2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_0^6 = \begin{bmatrix} 0.866 & 0 & 0.5 & D1 \\ 0 & 1 & 0 & D3 \\ -0.5 & 0 & 0.866 & D2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ماتریس تبدیل  $T_0^6$  بصورت زیر محاسبه شده است.

$$T_0^6 = T_0^5 R_z(\beta) R_z(90) R_z(90) \quad (15)$$

در امتداد یا حول محور  $z$  صورت گیرند، در اینجا نیز مشاهده می شود که با توجه به شکل (۳) دوران انجام شده صفحه زاویه دار در شکل (۵)، حول محور  $z$  دستگاه مختصات اتفاق افتاده است.



شکل ۵: نمونه ای از یک محل اتصال دارای اندازه زاویه ای.

### جانمایی اتصالات مجازی

در مثال فوق دستگاه مختصات مرجع  $O_0$  در نقطه  $A$  قرار داده می شود. با مراجعه به شکل (۵) دیده می شود که اندازه  $D2$  در امتداد محور  $z$  دستگاه مختصات  $O_0$  قرار گرفته است بنابراین بوسیله انتقال  $T_{z0}$  وارد محاسبات شده و دستگاه مختصات  $O_0$  به  $O_1$  منتقل می شود.

اندازه  $D3$  در جهت مخالف محور  $z$  دستگاه مختصات  $O_1$  قرار گرفته است، بنابراین بوسیله انتقال  $T_{z1}$  و با علامت منفی وارد محاسبات می شود. به همین ترتیب دستگاه مختصات  $O_2$  از انتقال در امتداد اندازه  $D3$  و دستگاه مختصات  $O_3$  از انتقال در امتداد اندازه  $D2$  بدست خواهد آمد. دستگاههای مختصات  $O_4$  و  $O_5$  بدون هیچ تغییری با شکل (۳) در نقطه  $B$  جاگذاری می شوند و دستگاه مختصات  $O_6$  بدلیل دوران انجام شده حول محور  $z$  دستگاه مختصات  $O_5$  با چرخشی به اندازه  $\beta$  حول محور  $y$  خود در مجموعه جاگذاری می شود. و مقدار این دوران توسط دوران  $R_{z5}$  لحاظ گردیده و وارد محاسبات می شود. نحوه جاگذاری هر یک از دستگاههای مختصات مربوط به اتصالات مجازی، در شکل (۶) نشان داده شده است. دستگاه مختصات نشان داده شده در نقطه  $B$ ، دستگاه مختصات  $O_6$  است که تحت زاویه  $\beta = 30^\circ$  دوران کرده است. دستگاههای مختصات  $O_0$  تا  $O_6$  به منظور مدل‌سازی خطاهای تolerانسی قطعه پایه و دستگاههای مختصات  $O_7$  تا



یکدیگر نوع اتصال سینماتیکی معادل با محل مونتاژ شناسایی می شود. در نهایت با استفاده از دسته بندی انجام شده توسط ژائو [۵] برای خطاهای هندسی سطوح مونتاژی، خطاهای هندسی قابل ایجاد توسط هر یک از این سطوح استخراج می گردد.

### مزایای مدل سازی با روش اتصالات مجازی

- عمده ترین مزیت های بکارگیری روش اتصالات مجازی عبارتند از:
- ۱- توانایی مدل سازی کلیه انحرافات ایجاد شده در قطعه اعم از هندسی و ابعادی،
  - ۲- توانایی مدل سازی خطاهای حاصل از لقی در محل اتصالات سینماتیکی و سطوح مونتاژی با در نظر گرفتن یک مجموعه اتصال مجازی منحصر به محل های مونتاژ،
  - ۳- امکان استفاده از نرم افزارهای تجاری تحلیل سینماتیکی مانند ADAMS و WorkingModel با ایجاد یک مدل سینماتیکی معادل با هر یک از زنجیره ها و حلقه های ابعادی مهم در مجموعه مونتاژی و استفاده از امکانات این نرم افزارها برای شبیه سازی خطاهای تیرانسی و انجام تحلیل،
  - ۴- سادگی نسبی معادلات خروجی مدل که امکان تصمیم گیری در مورد حساسیت هر یک از ابعاد و تیرانسها را فراهم می سازد،
  - ۵- سهولت پیاده سازی روش در قالب نرم افزار کامپیوتری

### جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی مدل سازی انحرافات ابعادی و تیرانسی مجموعه های مکانیکی با استفاده از روش جدید "اتصالات مجازی" به تفصیل ارائه گردید. روش اتصالات مجازی بدلیل فراگیر بودن ذاتی خود و عدم محدودیت به زیر مجموعه خاصی از سیستم های مکانیکی می تواند قدرت مهندسان طراح را در زمینه تحلیل -و در نهایت تخصیص- تیرانس در مجموعه های مکانیکی به نحو قابل توجهی افزایش دهد. با توجه به اینکه در این روش برای هر خطای زاویه ای و طولی یک اتصال مجازی معادل در نظر گرفته می شود، طراح قادر خواهد بود کلیه خطاهای ایجاد شده در اثر انحرافات ابعادی و هندسی را بطور همزمان مدل سازی نماید. همچنین از آنجا که در این روش برای

ماتریسهای تبدیل برای بقیه اتصالات مجازی که در مدل سازی خطاهای تیرانسی محل اتصال دو قطعه به هم و خطاهای قطعه بالایی مورد استفاده قرار می گیرند همانند گذشته محاسبه می شوند. بعنوان مثال ماتریس تبدیل دستگاه مختصات هفتم از رابطه زیر بدست می آید.

$$T_0^7 = T_0^6 T_{z7} R_x \quad (90) \quad (16)$$

پس از بدست آمدن ماتریس های تبدیل بین دستگاههای مختصات و دستگاه مختصات شماره صفر لازم است ستونهای ماتریس ژاکوبین از روابط (۴) و (۶) محاسبه گردد. بعنوان مثال ستون چهارم ماتریس ژاکوبین با استفاده از رابطه (۴) بصورت زیر محاسبه می گردد.

$$J_4 = \begin{bmatrix} z_0^3 \times (d_0^{18} - d_0^3) \\ z_3^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ D5 \cos \beta + D6 \sin \beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

در نهایت با جاگذاری ماتریس ژاکوبین بدست آمده و مقادیر انحراف هر یک از اتصالات مجازی در رابطه (۱۳) شش مقدار انحرافات زاویه ای و طولی نقطه مورد نظر در دستگاه مختصات صفر بدست می آید.

### الگوریتم شناسایی سطوح مونتاژی

یکی از مراحل اساسی در انجام تحلیل تیرانسی، شناسایی نوع سطوحی است که در گره های مونتاژی (نقاط اتصال چند قطعه به هم) حضور دارند. در این پژوهش الگوریتم جدیدی برای شناسایی این سطوح پیشنهاد می شود. این الگوریتم که در حال حاضر در محیط نرم افزار SOLIDWORKS پیاده سازی شده است، به سادگی در دیگر محیط های گرافیکی نیز قابل پیاده سازی است. براساس این الگوریتم، ابتدا اعضای حاضر در یک گره مونتاژی به دسته های کلی نقطه، خط، منحنی، صفحه، استوانه و کره تقسیم بندی می شوند و متناسباً کدهایی از صفر تا پنج به هر یک اختصاص داده می شود. سپس اطلاعات مربوط به سطوح مونتاژی قطعات حاضر در گره در یک فایل متنی در زیر مجموعه ای بنام هر یک از این قطعات ذخیره می گردد. آنگاه با مقایسه این کدها با

الگوریتمی برای شناسایی و دسته بندی سطوح مونتاژی حاضر در گره های مونتاژی ارائه گردید که نیاز به دخالت کاربر را در مراحل مختلف مدلسازی و تحلیل تoleransi مجموعه مورد نظر تا حد زیادی کاهش می دهد. در پایان نیز کارایی روش پیشنهادی و نحوه بکارگیری آن در قالب یک مثال مورد بررسی قرار گرفت.

محل‌های اتصال یک مجموعه اتصال مجازی بصورت جداگانه در نظر گرفته می شود، امکان مدلسازی خطای بوجود آمده در اثر انطباقات نیز وجود خواهد داشت. علاوه بر این در صورت حل روابط ارائه شده بصورت پارامتریک، معادلاتی بدست می آید که بیانگر میزان حساسیت انحراف در هر یک از ابعاد مجموعه می باشد. در مقاله حاضر همچنین

## مراجع

- 1 - Curtis, M. A. (2002). *Dimensional Management: A Comprehensive Introduction*. Industrial Press Inc.
- 2 - Drake, Paul J. Jr. (1999). *Dimensioning and Tolerancing Handbook*. McGraw-Hill.
- 3 - Chase, K.W. (1999). "Tolerance allocation methods for designers." *ADCATS Report No. 99-6*, Mechanical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah.
- 4 - Cvetko, R. (1997). *Characterization of Assembly Variation Analysis Methods*. Master of Science Thesis, Mechanical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah.
- 5 - Gao, J., Chase, K. W. and Magleby, S. P. (1995). "Comparison of assembly tolerance analysis by the direct linearization and modified monte carlo simulation." *Proc., ASME Design Engineering Technical Conferences*, Boston, MA, DE-Vol. 82, PP.353-360.
- 6 - Chase, K. W., Gao, J. and Magleby, S. P. (1995). "General 2-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments." *Design and Manufacturing*, Vol. 5, No.1995, PP. 263-274.
- 7 - Davidson, J. and Shah, J. J. (2004). "Mathematical model to formalize tolerance specifications and enable full 3D tolerance analysis." *Proc., 2004 NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference.*, SMU, Dallas, Texas.
- 8 - Roy, U., Pramanik, P., Wang, H., Sudarsan, R., Sriram, R. D. and Lyons, K. W. (2003). "Tolerance synthesis scheme." *Report No. 6836, National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD.
- 9 - Clement, A., Riviere, A., Serre, P. and Valade, C. (1998). "The TTRSs : 13 constraints for dimensioning and tolerancing." *Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications 98.*, H. A. Elmaraghy ed., Chapman & Hall, PP.121-131.
- 10 - Gossard, D. C., Zuffante, R. P. and Sakurai, H. (1998). "Representing dimensions, tolerances and features in MCAE systems." *IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications*, Vol. 8, No. 2, PP. 51-59.
- 11 - O'Connor, M. A. and Srinivasan, V. (1997). "Composing distribution zones for statistical tolerance analysis." *Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications 98.*, H. A. Elmaraghy ed., Chapman & Hall, PP. 65-76.
- 12 - Varghese, P., Braswell, R. N., Wang, B. and Zhang, C. (1996). "Statistical tolerance analysis using FRPDF and numerical convolution." *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 9, PP. 723-732.
- 13 - Lin, S., Wang, H. and Zhang, C. (1997). "Statistical tolerance analysis based on beta distributions." *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.16, No. 2, PP. 273-282.
- 14 - Sacks, E. and Joskowicz, L. (1998). "Parametric kinematic tolerance analysis of general planar systems." *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 9, PP. 707-714.
- 15 - Faerber, P. J. (1999). "Tolerance analysis of assemblies using kinematically derived sensitivities." *ADCATS Report No. 99-3*.

- 16 - Laperriere, L. and Lafond, Ph. (1999). "Tolerance analysis and synthesis using virtual joints." *Proc., 6<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*, University of Twente, Enschede, The Netherlands, PP.405-414.
- 17 - Chase, K. W. (1999). "Tolerance analysis of 2-D and 3-D assemblies." *ADCATS Report No. 99-4*.
- 18 - Salomons, O. W., Haalboom, F. J., Poerink, H. J., Van-Slooten, F., Van Houten, F. J. A. M. and Kals, H. J. J. (1996). "A computer-aided tolerancing tool II: tolerance analysis." *CIRP/JSPE/ASME Proceedings of the 4th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*, University of Tokyo, Yokyo, Japan, PP. 53-72.
- 19 - Salomons, O. W., Poerink H. J., Van Slooten F., Van-Houten, F. J. A. M. and Kals, H. J. J. (1998). "A computer-aided tolerancing tool based on kinematic analogies." *Computers in Industry*, Vol. 7, No. 3, PP. 302-310.
- 20 - Dabling, J. G. (2001). *Incorporating Geometric Feature Variation with Kinematic Tolerance Analysis of 3-D Assemblies*. Master of Science Thesis, Mechanical Engineering Department, Brigham Young University, Provo, Utah.
- 21 - Anselmetti, B., Mejbri, H. and Mawussi, K. (2003). "Coupling experimental design-digital simulation of junctions for the development of complex tolerance chains." *Computers in Industry*, Vol. 50, Issue 3, PP. 277 - 292.
- 22 - Laperriere, L. (1997). "Identifying and quantifying functional element dispersions during functional analysis." *Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications 98.*, H. A. Elmaraghy ed., Chapman & Hall, PP.157-171.
- 23 - Asada, H. and Slotine, J.- J. E. (1986). *Robot Analysis and Control*. Wiley-Interscience .

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- |                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 - Virtual Joints Method      | 2 - Tolerance Analysis            |
| 3 - Mechanical Assemblies      | 4 - Assembly Variations           |
| 5 - Worst Case Method          | 6 - Method of Extremes            |
| 7 - Root Sum Square            | 8 - Monte Carlo Simulation Method |
| 9 - Computer-Aided Tolerancing | 10 - Tolerance-Limits Modeling    |
| 11 - Statistical Tolerancing   | 12 - Parametric Tolerancing       |
| 13 - Kinematic Tolerancing     |                                   |