



## اثر خطاهای فرآیند مونتاژ قطعات انعطاف پذیر در کیفیت ظاهری سطوح بدنه خودرو

سیدعلی هاشمیان<sup>1\*</sup>، بهنام معتکف ایمانی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* سبزوار، صندوق پستی 397-9617976487، a.hashemian@hsu.ac.ir

### چکیده

کیفیت ظاهری سطوح بدنه خودرو از جمله پارامترهایی است که در سال‌های اخیر به شکل قابل ملاحظه‌ای مورد توجه طراحان صنعت خودروسازی در سراسر دنیا قرار گرفته است. بیشتر اجزای بدنه خودرو از ورق‌های فلزی انعطاف پذیر ساخته شده است که به راحتی و در اثر اعمال نیرویی هرچند ناچیز دچار تغییر شکل و اعوجاج می‌شوند. در نتیجه، وجود خطاهای ناشی از فرآیندهای ساخت و مونتاژ قطعات تشکیل دهنده بدنه، باعث تغییرات زیادی در مجموعه نهایی نسبت به مدل ایده‌آل گردیده و در نهایت، کیفیت ظاهری و جلوه‌های زیبایی خودرو را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بررسی اثر این خطاها که معمولاً به دلیل وجود تolerانس‌های ابعادی، هندسی و یا مونتاژی در قطعات تشکیل دهنده یک سازه رخ می‌دهد، به وسیله تحلیل تolerانس محقق خواهد شد. به‌عنوان یکی از کاربردهای مهم تحلیل تolerانس در صنعت، در این تحقیق به ارزیابی کیفیت ظاهری بدنه خودرو به عنوان تابعی از خطاهای مونتاژی مجموعه پرداخته شده است. در متدولوژی ارائه شده با بهره‌گیری از تحلیل اجزای محدود غیرخطی و معرفی روش‌های ارزیابی کیفیت سطوح، روشی نظام مند برای سنجش کیفیت ظاهری بدنه خودرو ارائه شده است. تئوری مذکور بر روی بدنه یک خودرو پیاده‌سازی و همخوانی نتایج آن با داده‌های عملی به دست آمده از خط تولید بررسی شده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 06 تیر 1395  
پذیرش: 06 مرداد 1395  
ارائه در سایت: 03 مهر 1395

کلید واژگان:

تحلیل تolerانس

سازه‌های ورقی انعطاف پذیر

تحلیل اجزای محدود غیرخطی

ارزیابی کیفیت ظاهری سطوح

## Effect of Flexible-Body Assembly Errors on Appearance Quality of Automotive Bodies

Seyed Ali Hashemian<sup>1\*</sup>, Behnam Moetakef Imani<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* P.O.B. 9617976487-397, Sabzevar, Iran, a.hashemian@hsu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 26 June 2016  
Accepted 27 July 2016  
Available Online 24 September 2016

#### Keywords:

Tolerance Analysis  
Flexible Sheet Metal Assemblies  
Nonlinear Finite Element Analysis  
Quality Appearance Evaluation

### ABSTRACT

The appearance quality of automotive bodies is among the features which are, in recent years, significantly taken into consideration by designers throughout the world. Automotive bodies are, to a great extent, constructed from flexible sheet metal components and would deform and distort easily by even a slight assembly force. Therefore, errors due to manufacture and assembly processes of automotive bodies lead to major deviation from the ideal product and ultimately affect the appearance quality and cosmetic features of the vehicle. The effect of these errors, which commonly arise by dimensional, geometric or assembly tolerance of the components, can be examined by tolerance analysis. As one of the key quality characteristics in vehicle design, this paper evaluates the appearance quality of automotive bodies as a function of assembly derived errors. In the proposed methodology, by means of the nonlinear finite element analysis and by presenting the surface interrogation techniques, a comprehensive approach of quality appearance evaluation of vehicles is developed. The approach is validated by a vehicle example and the results show good agreement with practical data obtained from the production line.

### 1- مقدمه

که تاکنون در زمینه تحلیل تolerانس سازه‌های ورقی انعطاف پذیر صورت گرفته [4-2]، می‌توان از این شاخه علم تحلیل تolerانس، به عنوان ابزاری مهندسی برای ارزیابی کیفیت ظاهری بدنه خودرو نام برد که در این مقاله به بررسی آن پرداخته خواهد شد.

اهمیت مبحث تحلیل تolerانس در طراحی خودرو اولین بار توسط هو [5] و در قالب تئوری جریان تغییرات<sup>1</sup> بررسی شده است. در مطالعات مشابهی که در این زمینه انجام شده، نقش خطاهای ناشی از تolerانس‌های مونتاژی، که معمولاً از ایستگاهی به ایستگاه بعد منتقل می‌شوند، در فرآیند مونتاژ بدنه

امروزه، بهبود عملکرد محصولات، کاهش مدت زمان و هزینه‌های تولید، افزایش کیفیت و رضایت‌مندی مشتریان را می‌توان از جمله پارامترهای مهم در صنعت خودرو برشمرد که تمامی این موارد در اثر ترکیب تolerانس‌های ابعادی و مونتاژی در مجموعه، دستخوش تغییرات قرار می‌گیرند. بنابراین مبحث تحلیل تolerانس در صنایع خودروسازی از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. در واحدهای خودروسازی بطور میانگین 37% از کل ایستگاه‌های مونتاژ خودرو، به مونتاژ اجزای انعطاف پذیر اختصاص دارد که غالباً مربوط به سازه‌های ورق‌های بدنه می‌باشند [1]. لذا بر اساس تحقیق‌هایی

<sup>1</sup> Stream-of-Variation Theory

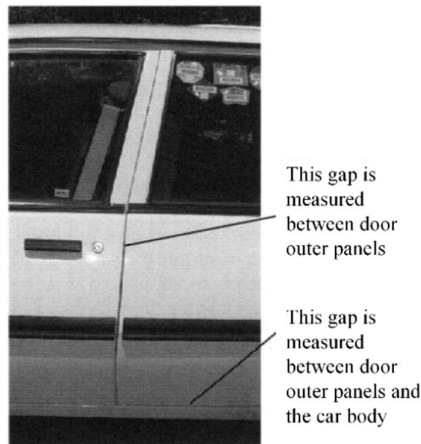


Fig. 1 Some gaps studied in quality appearance evaluation of vehicles [13]

شکل 1 چند نمونه از درزهای مورد بررسی در تحلیل کیفیت ظاهری خودروها [13]



Fig. 2 Application of highlight bands in quality appearance evaluation of a car body [23].

شکل 2 کاربرد روش تست مهتابی در بررسی کیفیت سطوح بدنه خودرو [23]

های متشکل از قطعات انعطاف‌پذیر به کمک تحلیل اجزای محدود غیرخطی بررسی و سپس در بخش 3، روش‌های ارزیابی کیفیت سطوح در قالب معیارهای کمی و کیفی معرفی می‌گردد. در بخش 4، تئوری ارائه شده بر روی بدنه یک خودرو پیاده‌سازی شده و در نهایت در بخش 5 به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد.

## 2- مدل‌سازی فرآیند مونتاژ قطعات انعطاف‌پذیر

پیش از آن که به بررسی اثر خطاهای ناشی از مونتاژ بدنه بر کیفیت ظاهری خودرو پرداخته شود، نیاز است که فرآیند مونتاژ قطعات انعطاف‌پذیر به کمک روش اجزای محدود مدل‌سازی شود. استفاده از تحلیل اجزای محدود به عنوان یکی از اصلی‌ترین مراحل فرآیند تحلیل تیرانی سازه‌های انعطاف‌پذیر شناخته می‌شود [2]. بطور کلی مراحل مونتاژ یک مجموعه ورق‌ری می‌تواند به چهار بخش کلی تقسیم نمود: (1) قرار دادن ورق‌ها بروی فیکسچرها؛ (2) حرکت فک‌های دستگاه جوش در جهت بستن فاصله بین ورق‌ها؛ (3) اتصال دو ورق به وسیله فرآیند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی؛ و (4) آزاد شدن فک‌ها و برگشت فنری<sup>6</sup> مجموعه. این مراحل به صورت شماتیک در "شکل 3" نمایش

خودرو مورد بررسی قرار گرفته است [6-8]. البته در این تحقیقات به ارزیابی کیفیت ظاهری و جنبه‌های زیبایی در خودرو توجه چندانی نشده است. تمرکز بر روی جنبه‌های زیبایی و کیفیت ظاهری خودرو به عنوان یکی از اهداف اصلی تحلیل تیرانی در صنعت خودرو، در سال‌های اخیر به شکل قابل ملاحظه‌ای مورد توجه طراحان قرار گرفته است [9-11]. روش‌های قدیمی‌تر در این زمینه معمولاً کیفیت ظاهری خودرو را براساس کیفیت درزهای موجود بین اجزای مختلف بدنه، مانند درز بین درب و گلگیر (شکل 1)، ارزیابی می‌کردند. در این تحقیقات پارامترهای یکنواختی<sup>1</sup> و همترازی<sup>2</sup> درزهای موجود در بدنه به‌عنوان مشخصه کلیدی<sup>3</sup> مجموعه تعریف شده‌اند [9-14].

اما امروزه در جهان رقابتی صنعت خودرو، ارزیابی کیفی بدنه خودرو نمی‌تواند تنها به بررسی درزهای موجود در بدنه اکتفا کند. کیفیت سطوح بیرونی بدنه، یکی دیگر از ویژگی‌های مهم یک خودرو است که همواره مورد توجه مشتریان قرار دارد. وجود هرگونه تغییر شکل یا اعوجاج در بدنه به ایجاد ناراضی در مشتری منجر شده و نقطه ضعفی بزرگ برای تولیدکننده محسوب می‌شود. بررسی کیفیت سطوح بدنه در حالت کلی به وسیله تشخیص تغییرشکل‌های موضعی در سطوح امکان‌پذیر است که برخی از تکنیک‌های عیب‌یابی سطوح بدنه خودرو در [15] آمده است. همچنین اگر مدل ریاضی سطوح بدنه بر اساس استانداردهای طراحی به کمک کامپیوتر (کد)<sup>4</sup> موجود باشد، می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های ارزیابی سطح<sup>5</sup> [16-20] به تحلیل کیفیت ظاهری بدنه خودرو پرداخت. یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی کیفیت سطوح بدنه، استفاده از تست مهتابی است که در واقع به بررسی خطوط بازتابش یک یا چند منبع نور بر روی بدنه می‌پردازد [21-23]. این خطوط کمک می‌کنند که تغییرات انحنا و یا هرگونه تغییرشکل و اعوجاج در سطوح به خوبی نمایان شوند. کاربرد این روش در بررسی کیفیت سطوح بدنه خودرو در "شکل 2" مشاهده می‌شود.

در این مقاله به عنوان یکی از کاربردهای مهم تحلیل تیرانی در صنعت، به بررسی خطاهای ابعادی فرآیند مونتاژ بدنه خودرو و اثر مستقیم آن بر کیفیت ظاهری بدنه پرداخته می‌شود. همانطور که پیشتر اشاره شد، بخش قابل توجهی از بدنه خودرو از ورق‌های فلزی انعطاف‌پذیر تشکیل شده است. از این رو، در مقایسه با مطالعات قبلی صورت گرفته در زمینه ارزیابی کیفیت ظاهری بدنه خودرو که بر فرض صلب بودن اجزای بدنه استوار هستند، در این تحقیق اثر انعطاف‌پذیری ورق‌های تشکیل دهنده بدنه نیز در تحلیل لحاظ شده است. بدین ترتیب می‌توان اثر خطاهای ناشی از مونتاژ قطعات انعطاف‌پذیر را به کمک روش‌های ارزیابی کیفیت سطوح به صورت کمی و کیفی مورد بررسی قرار داد. روش ارائه شده برای این منظور از سه بخش اصلی تشکیل شده است: (1) تحلیل اجزای محدود غیرخطی فرآیند مونتاژ بدنه؛ (2) بررسی کیفیت سطوح تغییرشکل یافته بدنه با بهره‌گیری از روش‌های ارزیابی کیفیت سطوح؛ و (3) محاسبه محدوده تغییرات مشخصه کلیدی (فاکتور سنجش کیفیت) به کمک تحلیل‌های آماری. کاربرد این روش به‌وسیله مسئله ای برگرفته از واحد مونتاژ بدنه یکی از شرکت‌های خودروسازی بررسی و نتایج آن با داده‌های عملی بدست آمده از خط تولید صحه‌گذاری شده است. در ادامه این مقاله ابتدا در بخش 2، مدل‌سازی فرآیند مونتاژ مجموعه-

<sup>1</sup> Uniformity

<sup>2</sup> Flushness

<sup>3</sup> Key Characteristic

<sup>4</sup> Computer-aided Design (CAD)

<sup>5</sup> Surface Interrogation Methods

<sup>6</sup> Spring-back

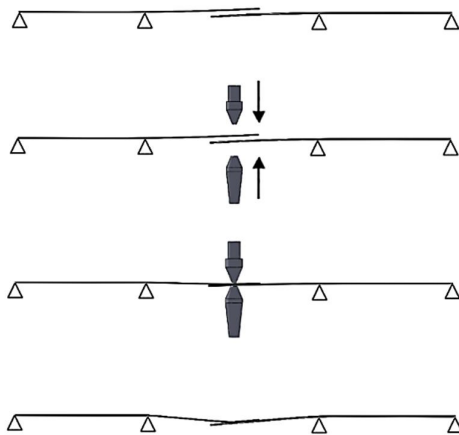


Fig. 3 Assembly process of compliant sheet metal parts [2]

شکل 3 نمایش مراحل مونتاژ یک مجموعه ورقی [2]

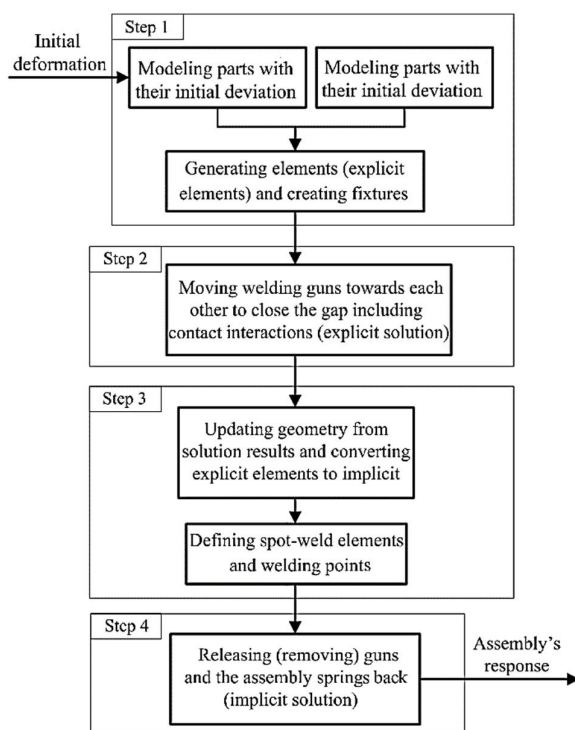


Fig. 4 Four-step modelling of the assembly process of compliant sheet metal structures [2]

شکل 4 مراحل چهارگانه مدل‌سازی فرآیند مونتاژ سازه‌های ورق‌فلزی انعطاف‌پذیر [2]

کنترل بسشتر باشد، کنترل بهتری بر روی تغییرات سطح وجود دارد و به عبارت دیگر تغییرات سطح بهتر مدل خواهد شد.

### 2-3- معیارهای کمی ارزیابی کیفیت سطوح

معیارهای کمی ارزیابی کیفیت سطوح معیارهایی هستند که به بررسی ویژگی‌هایی از تغییرات سطح مانند انحنا و همواری، که قابل اندازه‌گیری هستند، می‌پردازند. این معیارها می‌توانند در ادامه برای بررسی آماری کیفیت

داده شده است. در تحلیل اجزای محدود فرآیند مونتاژ باید توجه داشت که تماس متقابل سطوح ورق‌ها و همچنین تماس ورق‌ها با فک‌های دستگاه جوش و یا سایر ابزارهای مورد استفاده در فرآیند مونتاژ موجب غیرخطی شدن تحلیل خواهد شد. از این رو برای مدل‌سازی فرآیند مونتاژ باید روش اجزاء محدود غیرخطی استفاده قرار گیرد.

در این تحقیق، روش تحلیل صریح-ضمنی<sup>1</sup> که در محیط نرم‌افزار آنسیس<sup>2</sup> مجهز به حلگر ال‌اس‌داینا<sup>3</sup> اجرا شده، برای مدل‌سازی فرآیند مونتاژ ورق‌های انعطاف‌پذیر به کار گرفته شده است. "شکل 4" چگونگی اجرای مراحل چهارگانه مدل‌سازی فرآیند مونتاژ به روش تحلیل صریح-ضمنی را نمایش می‌دهد که طی آن متغیرهای ورودی (نلرانس اولیه ورق‌ها) به مشخصه کلیدی مجموعه (به عنوان مثال تغییرشکل یک نقطه از مجموعه مونتاژی) مرتبط شده است. توضیحات کاملتر در مورد چگونگی انجام این تحلیل در [2] آمده است.

### 3- ارزیابی کیفیت سطوح

روش‌های ارزیابی کیفیت سطح از اهمیت ویژه‌ای در طراحی به کمک کامپیوتر برخوردار هستند. هر کجا که سطوح فری‌فرم<sup>4</sup> مورد استفاده قرار گرفته باشد (مانند بدنه خودرو)، کیفیت این سطوح اغلب باید از نقطه نظر قیود هندسی، یکنواختی، جنبه‌های زیبایی و ... مورد ارزیابی قرار گیرند. برای ارزیابی کیفیت یک سطح معیارهای متعددی پیشنهاد شده است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی معیارهای کمی مانند بررسی توزیع انحنا و یا اندازه‌گیری فاکتور همواری<sup>5</sup> در سطح و معیارهای کیفی مانند نمایش خطوط بازتابش<sup>6</sup> تقسیم‌بندی نمود [16-20] که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته خواهد شد. پیش از آن‌که بتوان یک سطح را براساس معیارهای ارزیابی کیفیت مورد بررسی قرار داد لازم است که مدلی ریاضی از سطح براساس تئوری سطوح پارامتری در اختیار باشد که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### 3-1- مدل‌سازی ریاضی سطوح بر اساس تئوری سطوح پارامتری

اولین مرحله در ارزیابی کیفیت سطوح در اختیار داشتن مدلی ریاضی از سطح است که این امر معمولاً به وسیله تئوری سطوح پارامتری محقق می‌شود. یکی از رایج‌ترین انواع سطوح پارامتری، سطوح بی-اسپلاین<sup>7</sup> هستند که به خوبی با روش‌های ارزیابی کیفیت سطح سازگارند. ضمناً اکثر سطوح در بدنه خودرو نیز از همین خانواده هستند. یک سطح بی-اسپلاین، یک تابع دومتغیره از درجه  $(p, q)$  است که به وسیله شبکه‌ای متشکل از  $(m + 1)(n + 1)$  نقطه کنترل معلوم به شکل زیر تعریف می‌گردد [24]:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) P_{ij} \quad (0 \leq u, v \leq 1) \quad (1)$$

بدین ترتیب، اگر مجموعه‌ای از نقاط یک سطح معلوم باشد (به عنوان مثال موقعیت گره‌های هر ورق که از حل اجزای محدود بدست می‌آید)، در این صورت می‌توان با استفاده از روش‌های برازش سطوح [24-26]، نقاط کنترل را یافته و سپس ضابطه ریاضی سطح را تعیین نمود. طبیعتاً هرچه تعداد نقاط

<sup>1</sup> Explicit-Implicit  
<sup>2</sup> ANSYS  
<sup>3</sup> LS-DYNA  
<sup>4</sup> Free-form Surfaces  
<sup>5</sup> Fairness  
<sup>6</sup> Reflection Lines (Highlight Bands)  
<sup>7</sup> B-spline Surfaces

ظاهری سطوح و در تست‌های کنترل کیفیت به کار روند.

### 3-2-1- توزیع انحنای سطح

برخلاف یک منحنی که دارای یک مقدار انحنای مشخص است، برای یک سطح می‌توان در هر نقطه بینهایت انحنا تعریف نمود که مقادیر ماکزیموم و مینیموم این انحناها ( $\kappa_1$  و  $\kappa_2$ ) به‌عنوان انحناهای اصلی<sup>1</sup> شناخته شده و در ارزیابی کیفیت سطح مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقادیر انحناهای اصلی برابر ریشه‌های معادله زیر خواهند بود [25].

$$\begin{vmatrix} L - \kappa E & M - \kappa F \\ M - \kappa F & N - \kappa G \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

برای سطح پارامتری  $S(u, v)$  ثابت‌های رابطه فوق براساس مشتقات اول و دوم  $S$  عبارت خواهند بود از  $E = S_u \cdot S_u$ ،  $F = S_u \cdot S_v$ ،  $G = S_v \cdot S_v$ ،  $L = S_{uu} \cdot n$ ،  $M = S_{uv} \cdot n$ ،  $N = S_{vv} \cdot n$  که  $n$  بردار نرمال سطح است و از رابطه زیر بدست می‌آید [25]:

$$n = \frac{S_u \times S_v}{\|S_u \times S_v\|} = \frac{S_u \times S_v}{\sqrt{EG - F^2}} \quad (3)$$

برای سهولت بیشتر معمولاً انحناهای یک سطح را همانند انحناهای یک منحنی فقط با یک مقدار نمایش می‌دهند که این مقدار می‌تواند حاصلضرب و یا میانگین انحناهای اصلی سطح باشد که به ترتیب انحناهای گوسی<sup>2</sup> و انحناهای میانگین<sup>3</sup> نامیده شده و با  $K$  و  $H$  نمایش داده می‌شوند [25]. بدین ترتیب برای بررسی کیفیت سطح می‌توان مقادیر انحناهای گوسی یا میانگین در هر نقطه از سطح را مورد ارزیابی قرار داد.

$$K = \kappa_1 \kappa_2 \quad (4)$$

$$H = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \quad (5)$$

### 3-2-2- اندازه‌گیری فاکتور همواری در سطح

یکی دیگر از معیارهای بررسی تغییرات سطح، اندازه‌گیری فاکتوری بنام همواری می‌باشد، به طوری که هرچه این فاکتور کوچکتر باشد سطح هموارتر خواهد بود. برای اندازه‌گیری این فاکتور روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که همگی بر پایه انتگرال‌گیری از مجذور انحنا بر روی سطح هستند. یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه همواری سطح، بهره‌گیری از معیار میزان انرژی کرنشی<sup>4</sup> در سطح است. براساس این معیار، میزان همواری در سطح به شکل زیر قابل محاسبه است [20,18]:

$$I = \iint (\kappa_1^2 + \kappa_2^2) dA \quad (6)$$

در این رابطه المان سطح در فضای پارامتری به شکل رابطه (7) تعریف می‌شود:

$$dA = \|S_u \times S_v\| dudv = \sqrt{EG - F^2} dudv \quad (7)$$

با توجه به این‌که معمولاً تغییرات انحنا در یک سطح از اهمیت بیشتری برخوردار است روش دیگری در [27] پیشنهاد شده است که در آن طبق رابطه زیر به‌جای انحنا از مشتقات آن انتگرال‌گیری می‌شود. این فاکتور همواری که اموی‌اس<sup>5</sup> نامیده می‌شود، نقش مهمی در طراحی سطوح با مینیموم تغییرات دارد.

$$I = \iint \left[ \left( \frac{\partial \kappa_1}{\partial e_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial \kappa_2}{\partial e_2} \right)^2 \right] dA \quad (8)$$

<sup>1</sup> Principal curvatures

<sup>2</sup> Gaussian Curvature

<sup>3</sup> Mean Curvature

<sup>4</sup> Strain Energy Fairness Criterion

<sup>5</sup> Minimum Variation Surface (MVS)

مزیت استفاده از فاکتور اموی‌اس در این است که برای سطوح استوانه‌ای، کروی، مخروطی و مسطح مقدار انتگرال برابر صفر خواهد شد و در نتیجه می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی کیفیت سطوح باشد. بدین معنی که هر چه این فاکتور به صفر نزدیک‌تر باشد، سطح هموارتر خواهد بود. در رابطه فوق، بردارهای  $e_1$  و  $e_2$  بردارهای نرمال عمود برهم یا همان جهات اصلی متناظر با انحناهای اصلی سطح هستند و به شکل زیر تعریف می‌گردند:

$$e_1 = \frac{S_u}{\sqrt{E}} \quad (9)$$

$$e_2 = \frac{ES_v - FS_u}{\sqrt{E(EG - F^2)}} \quad (10)$$

مقادیر مشتقات انحناهای اصلی نسبت به بردارهای  $e_1$  و  $e_2$  در رابطه (7) نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{\partial \kappa_1}{\partial e_1} = \frac{1}{E} \frac{\partial \kappa_1}{\partial u} (e_1 \cdot S_u) + \frac{1}{G} \frac{\partial \kappa_1}{\partial v} (e_1 \cdot S_v) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \kappa_2}{\partial e_2} = \frac{1}{E} \frac{\partial \kappa_2}{\partial u} (e_2 \cdot S_u) + \frac{1}{G} \frac{\partial \kappa_2}{\partial v} (e_2 \cdot S_v) \quad (12)$$

### 3-3- معیارهای کیفی ارزیابی کیفیت سطوح

معیارهای کمی که در بالا مورد بررسی قرار گرفت، می‌توانند برای کیفیت یک سطح، عددی بر مبنای میزان انحنا و یا همواری آن سطح ارائه کنند؛ اما در طرف مقابل معیارهای کیفی می‌توانند به بررسی ویژگی‌هایی بصری از سطح بپردازند که به وسیله چشم قابل درک می‌باشد.

یکی از روش‌های کیفی رایج برای بیان کیفیت یک سطح روش استفاده از خطوط بازتابش بر روی سطح می‌باشد. "شکل 5" بازتابش خط  $AB$  به عنوان یک منبع نورانی خطی را بر روی یک سطح نشان می‌دهد. با فرض این-که  $A$  یک نقطه از خط نور و  $b$  بیانگر جهت آن خط باشد، این خط دارای معادله‌ای پارامتری به شکل  $L(t) = A + bt$  خواهد بود. همچنین اگر از هر نقطه دلخواه بر روی سطح مثل  $Q$  خطی در راستای عمود بر سطح رسم شود، این خط نیز معادله‌ای پارامتری به شکل  $E(s) = Q + ns$  دارد. در این معادله همان  $n$  بردار نرمال سطح است و از رابطه (3) محاسبه می‌شود. بدین ترتیب نقطه  $Q$  از سطح متعلق به خط بازتابش خواهد بود اگر دو خط  $L(t)$  و  $E(s)$  همانند "شکل 5" یکدیگر را قطع کنند یا به عبارت دیگر فاصله عمودی دو خط که از معادله زیر بدست می‌آید برابر صفر باشد [28].

$$d = \frac{|(b \times n) \cdot (A - Q)|}{\|b \times n\|} = 0 \quad (13)$$

حال اگر به جای یک خط نور از چند خط نور موازی استفاده شود، می‌توان کیفیت سطح موردنظر را به کمک خطوط بازتابش بررسی نمود. یکنواختی و توازی این خطوط نشانگر یک سطح صاف و با کمترین تغییرات است. روش بررسی کیفی یک سطح به کمک خطوط بازتابش نور در واقع همان روش سنتی تست مهتابی برای بررسی کیفیت سطح است که کاربرد زیادی نیز در خودروسازی دارد. اگر در "شکل 5" خط نورانی با یک استوانه نورانی (مثلاً یک مهتابی) به شعاع  $r$  جایگزین شود، در این صورت نقاطی از سطح که در رابطه  $d \leq r$  صدق کنند، بیانگر نقاط بازتابش خواهند بود. در این حالت به جای داشتن یک خط بازتابش یک باند یا نوار بازتابش روی سطح ایجاد می‌شود که در واقع همان بازتابش مهتابی خواهد بود. "شکل 6" باندهای بازتابش حاصل از 15 منبع نور یکسان و موازی را بر روی یک سطح فری‌فرم نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در بخش‌های میانی سطح که از همواری و کیفیت مناسبی برخوردار است، نوارهای بازتابش

سایر اجزای مرتبط در ایستگاه‌های متوالی بر روی شاسی مونتاژ شده و سپس در یک ایستگاه مجزا، فرآیند مونتاژ سقف صورت می‌گیرد. "شکل 7" نمای از بدنه خودرو قبل از مونتاژ سقف بر روی چهارچوب اصلی را نشان می‌دهد. در این تحقیق با توجه به پیچیدگی بدنه خودرو، چهارچوب اصلی فقط به وسیله دیواره‌های کناری و تقویت‌های سقف مدل شده که بیشترین تاثیر را در تغییرات سطح سقف دارند (شکل 8).

با توجه به چگونگی فرآیند مونتاژ سقف، اگر در ایستگاه‌های قبلی خطایی در مونتاژ چهارچوب اصلی صورت گرفته باشد، این خطا به عنوان تیرانس ناشی از فرآیند مونتاژ به ایستگاه سقف منتقل شده و بر کیفیت نهایی سطح سقف تاثیر می‌گذارد. بنا به مشاهدات صورت گرفته در واحد بدنه‌سازی، خطای جیگ اصلی در فرآیند مونتاژ دیواره‌های کناری در ایستگاه‌های قبلی باعث می‌شود که این دیواره‌ها همانند "شکل 9" کمی به سمت داخل کشیده شوند که این موضوع در حین مونتاژ سقف منجر به ایجاد تغییرشکل در آن (پدیده موج سقف) خواهد شد. در اینجا ذکر این نکته لازم است که سختی<sup>1</sup> چهارچوب اصلی به مراتب بیشتر از سختی سقف است و در نتیجه سقف در جهت پیروی از تغییرشکل چهارچوب دچار اعوجاج می‌شود.

با توجه به نکات گفته شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت که تغییرشکل (تیرانس) دیواره‌های کناری باید به عنوان متغیر ورودی در فرآیند تحلیل تیرانسی لحاظ گردد. در این مسئله فرض شده است که هر یک از دو دیواره کناری به صورت یکپارچه و به یک اندازه مشخص از موقعیت ایده‌آل خود منحرف شده‌اند. مشخصه کلیدی مجموعه در این تحلیل تیرانسی را نیز می‌توان در قالب یکی از فاکتورهای ارزیابی کیفیت سطح (به عنوان مثال فاکتور همواری) تعریف نمود که با اندازه‌گیری تغییرات سطح سقف به عنوان پارامتری برای بیان کیفیت ظاهری مجموعه مورد استفاده قرار گیرد. مسئله مورد بررسی در این مقاله را می‌توان در سه بخش کلی تحلیل اجزای محدود غیرخطی فرآیند مونتاژ بدنه، بررسی کیفیت سطح تغییرشکل یافته سقف با بهره‌گیری از روش‌های ارزیابی کیفیت سطح و محاسبه محدوده تغییرات مشخصه کلیدی به کمک تحلیل‌های آماری دسته‌بندی نمود که این مراحل در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. ضمناً نتایج بدست آمده در این تحقیق با داده‌های عملی حاصل از اندازه‌گیری تغییرات سقف 30 خودرو به کمک سی‌ام‌ام<sup>2</sup>، صحنه‌گذاری شده است.

#### 4-2- تحلیل اجزای محدود

در این مرحله به کمک تحلیل اجزای محدود غیرخطی، فرآیند مونتاژ سقف بر روی بدنه مدل می‌شود. در این فرآیند بدلیل تماس متقابل بین اجزای بدنه و همچنین تماس بین این اجزا و فک‌های دستگاه جوش نقطه‌ای، به یک تحلیل اجزای محدود غیرخطی نیاز است. در این تحلیل، تیرانس دیواره‌های کناری به عنوان داده ورودی در نظر گرفته شده و به کمک تحلیل صریح-ضمنی در محیط انسیس‌آل‌اس‌داینما تغییرشکل نهایی سقف پس از مونتاژ محاسبه می‌شود. سپس در مرحله بعد بر اساس نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود، مدل پارامتری سقف تغییرشکل یافته برای بررسی تغییرات سطح در قالب معیارهای کیفی و کمی ارزیابی کیفیت سطح ایجاد می‌گردد.

در این تحقیق، حرکت دیواره‌های کناری چهارچوب بدنه به سمت داخل (شکل 9) به عنوان متغیر ورودی مسئله تعریف شده است. این تغییرشکل در دیواره‌های قبلی ایجاد شده، بر روی کل چهارچوب اصلی نیز تاثیر

تقریباً موازی و دارای عرض یکسان هستند. اما در بقیه نواحی که دارای برآمدگی یا فرورفتگی بوده و همواری کمتری دارند، یکنواختی نوارهای بازتابش برهم خورده و بعضاً یکدیگر را نیز قطع نموده‌اند.

#### 4- بررسی کیفیت ظاهری سطوح بدنه خودرو

در این بخش به کمک نکات گفته شده در بخش‌های قبل، به بررسی کیفیت ظاهری بدنه خودرو به عنوان تابعی از تیرانس‌های ورودی مجموعه پرداخته می‌شود. پس از تحقیق‌های انجام شده در یکی از شرکت‌های خودروسازی مشاهده شد که یکی از مسائل مهم در فرآیند مونتاژ بدنه، پدیده‌ای به نام موج سقف است که در اثر تیرانس‌های ناشی از فرآیند مونتاژ ایجاد می‌گردد. بنا به گزارش کارشناسان واحد بدنه‌سازی این شرکت، خطاهای برجای مانده از مونتاژ چهارچوب اصلی بدنه در ایستگاه‌های قبل باعث می‌شود که سقف در موقعیت ایده‌آل خود مونتاژ نگردد. این امر در نهایت منجر به تغییرشکل موضعی و ایجاد اعوجاج در سقف خودرو خواهد شد. در این تحقیق، تغییرات سطح سقف به عنوان پارامتری برای اندازه‌گیری کیفیت ظاهری خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد. به وسیله اندازه‌گیری کیفی و کمی این پارامتر بر اساس روش‌های ارزیابی سطح می‌توان این مشخصه کلیدی مجموعه را به عنوان تابعی از تیرانس متغیرهای ورودی تحلیل نمود.

#### 4-1- معرفی مسئله

معمولاً در واحد بدنه‌سازی، ابتدا چهارچوب اصلی بدنه شامل دیواره‌های کناری، تقویت‌های سقف، ورق‌های حائل بین اتاق، محفظه موتور و صندوق و

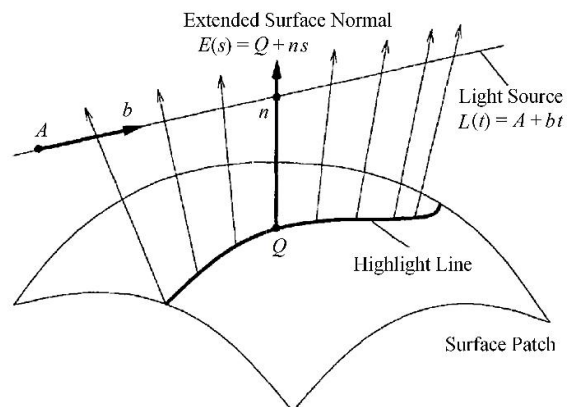


Fig. 5 Representation of the highlight line on a surface [28]

شکل 5 نمایش خط بازتابش نور بر روی یک سطح [28]

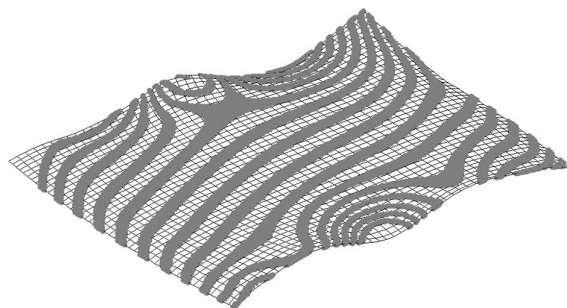


Fig. 6 Representation of highlight bands on a free-form surface

شکل 6 نمایش نوارهای بازتابش بر روی یک سطح فری‌فرم

<sup>1</sup> Stiffness

<sup>2</sup> Coordinate Measurement Machine (CMM)

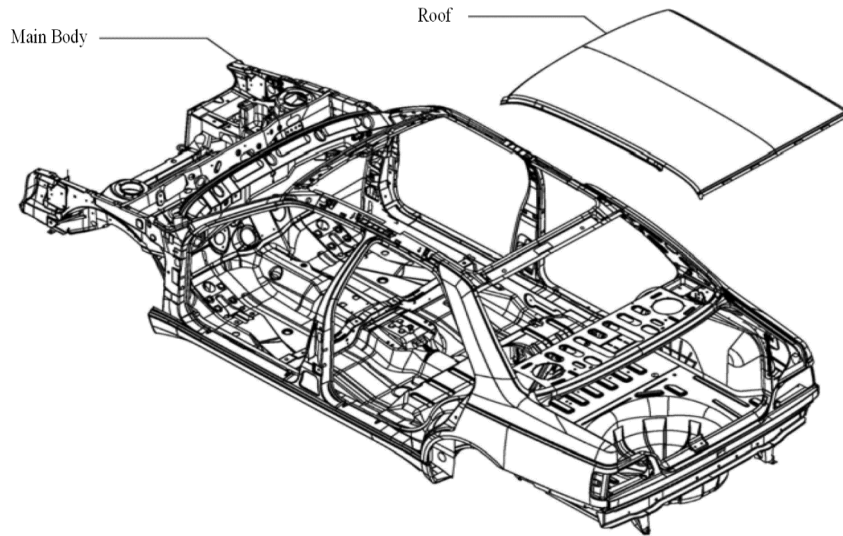


Fig. 7 Main body components and roof before assembly [29]

شکل 7 نمایی از چهارچوب اصلی بدنه و سقف پیش از مونتاژ [29]

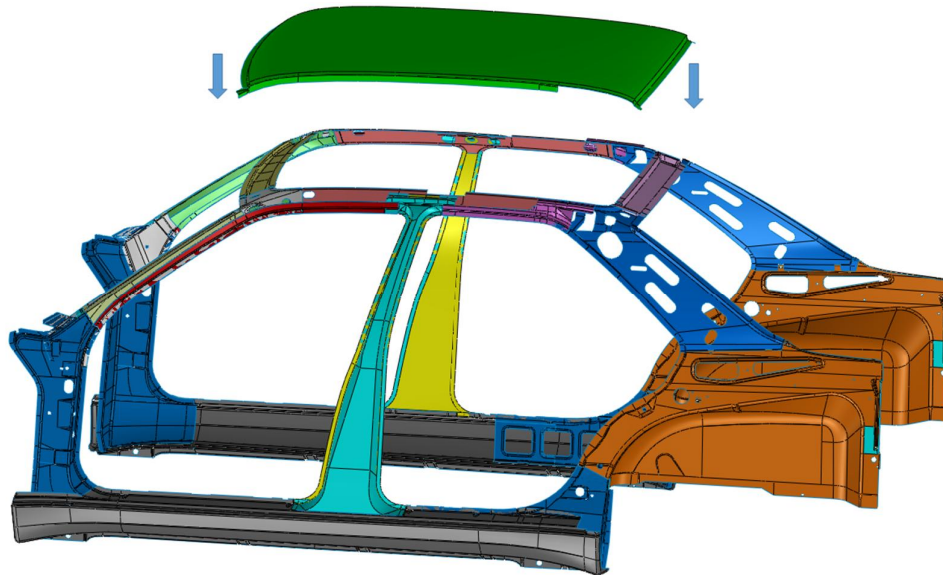


Fig. 8 The simplified model for simulating assembly process

شکل 8 مدل ساده شده برای شبیه‌سازی فرآیند مونتاژ سقف

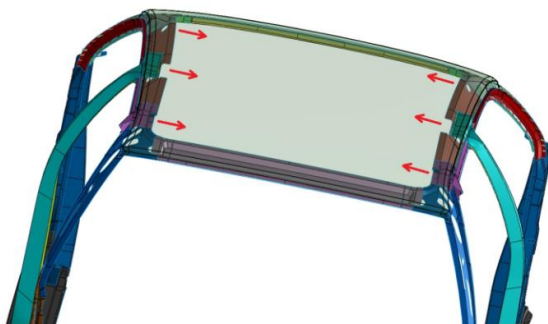


Fig. 9 Deviation of side bodies from nominal position

شکل 9 تغییرشکل دیواره‌های کناری بدنه از موقعیت ایده‌آل

می‌گذارد (به عنوان مثال تقویت‌های عرضی ممکن است کمی به سمت بالا شکم بدهند) و در نهایت، مجموعه این تغییرشکل‌ها باعث می‌شود که سقف در حالت ایده‌آل مونتاژ نشده و دچار اعوجاج گردد. برای انجام تحلیل، ابتدا لازم است تغییرشکل اولیه‌ای به عنوان تلرانس ورودی در تحلیل در دیواره‌های کناری ایجاد و بر اساس آن تغییرشکل ایجاد شده در کل چهارچوب اصلی (ناشی از تغییرشکل دیواره‌های کناری) را بدست آورد. ادامه تحلیل مربوط به فرآیند بستن کلمپ‌ها و حرکت فک‌های جوش با در نظر گرفتن تماس متقابل بین قطعات و ابزارهاست. این بخش که نیازمند مدل‌سازی حرکت تعدادی از اجزاست، مطابق گراف شکل 4 به شکل صریح مدل می‌شود. در انتها به کمک یک حل ضمنی، به محاسبه برگشت فتری در مجموعه پرداخته شده و تغییرشکل ایجاد شده در سقف اندازه‌گیری می‌شود. مراحل فوق‌الذکر بر

اساس جزئیات هر مرحله به صورت دسته‌بندی می‌شود:

1. فراخوانی اجزای چهارچوب اصلی به صورت فایل‌های جداگانه، تعریف المان پوسته برای هر یک از اجزا و المان‌بندی آن‌ها.
  2. مونتاژ اجزای چهارچوب اصلی به کمک جوش نقطه‌ای.
  3. تعریف تغییرشکل اولیه برای دیواره‌های کناری بدنه مطابق "شکل 9"
  4. حل مدل به روش ضمنی (پس از حل، تقویت‌های سقف نیز تغییرشکل خواهند داد به این دلیل که به دیواره‌های کناری جوش شده‌اند).
  5. به‌روزرسانی نمودن هندسه بر اساس تغییرشکل‌های بدست آمده از مرحله قبل تبدیل المان‌های ضمنی به المان‌های صریح.
  6. اضافه کردن سقف به مدل که در این حالت برای جلوگیری از تداخل احتمالی سقف با چهارچوب تغییرشکل یافته از مرحله قبل، سقف کمی بالاتر از موقعیت ایده‌آل خود مدل می‌شود و بعداً باید به سمت پایین جابجا خواهد شد.
  7. حرکت دادن سقف به سمت پایین در جهت نشستن در موقعیت اصلی در قالب یک تحلیل صریح؛ در این حالت باید تماس بین تمام قطعات مرتبط در حل لحاظ گردد.
  8. تعریف چهار کلمپ در چهار گوشه سقف برای ثابت نگاهداشتن آن.
  9. مدل کردن الکترودها برای فرآیند نقطه جوش؛ در این مرحله به دلیل اینکه حرکت الکترودها در جهت بستن فاصله موجود بین سقف، دیواره‌های کناری و تقویت‌ها نقشی مهم در فرآیند مونتاژ دارد باید تمام الکترودها مدل شوند الکترودها به کمک المان‌های سالیید به شکل قطعات صلبی تعریف می‌گردند که فقط می‌توانند جابجا شوند ولی تغییرشکل ندارند.
  10. حرکت الکترودها و بستن فاصله بین ورق‌ها که این قسمت نیز به صورت صریح تحلیل می‌شود.
  11. تعریف المان جوش نقطه‌ای در محل‌های تعیین شده برای اتصال سقف به چهارچوب اصلی (قطر المان‌های جوش برابر 5 میلی‌متر). لازم به ذکر است که فرآیند جوشکاری، موقعیت و ترتیب نقاط جوش بر اساس دستورالعمل فنی واحد بدنه‌سازی می‌باشد.
  12. تبدیل المان‌های صریح به ضمنی، حذف الکترودها و کلمپ‌ها و محاسبه برگشت فنری در مجموعه به کمک تحلیل ضمنی.
- "شکل 10" مدل المان‌بندی شده بدنه متشکل از چهارچوب اصلی و سقف را نشان می‌دهد. اگر به عنوان مثال تغییرشکل اولیه‌ای به مقدار 5 میلی‌متر به دیواره‌های کناری بدنه داده شود، کانتور تغییرشکلی مطابق "شکل 11" در سقف ایجاد خواهد شد. در این مدل ضخامت تمام ورق‌های بدنه برابر 0.7 میلی‌متر انتخاب شده و جنس سقف از فولاد اس‌تی 14 و جنس سایر اعضای بدنه از فولاد اس‌تی 13 در نظر گرفته شده که خواص مکانیکی آنها در [30] آمده است.

### 3-3-4- ارزیابی کیفیت سطح سقف

پیش از بررسی معیارهای سنجش کیفیت سطح در این بخش، لازم به توضیح است که سقف خودروی مورد بررسی در این مقاله از دو سطح بزیر<sup>1</sup> از درجه (4,6) تشکیل شده که مطابق "شکل 12" به هم متصل شده‌اند. یک سطح بزیر از درجه  $(p, q)$ ، شکل ساده‌تری از سطح بی‌اسپلین است با این تفاوت که تعداد نقاط کنترل محدود به  $(p + 1, q + 1)$  می‌باشد. پیوستگی محل اتصال دو سطح مورد بحث در مدل سقف از درجه  $C^3$  می‌باشد بدین معنی که در محل اتصال، مقادیر سطوح و مشتقات اول تا سوم هر دو سطح با هم یکسان

هستند. در این تحقیق به کمک جعبه‌ابزار آی‌جی‌ای‌اس<sup>2</sup> نرم‌افزار متلب<sup>3</sup> اطلاعات لازم برای مدل‌سازی سقف از فایل بدنه اصلی استخراج شده است.

### 4-3-1- بررسی توزیع انحنا

توزیع مقادیر انحنای گوسی سقف خودرو در "شکل 13" در فضای پارامتری  $(0 \leq u, v \leq 1)$  نشان داده شده است. این مقادیر برای مدل اصلی سقف یعنی دو سطح بزیر از درجه (4,6) بدست آمده است. مشاهده می‌شود که مقادیر انحنا در بیشتر قسمت‌های سقف به استثنای کناره‌ها برابر صفر است. حال اگر توزیع انحنا برای سقف تغییرشکل یافته که کانتور تغییرشکل آن در بخش قبل (شکل 11) نمایش داده شده رسم گردد، تغییرات انحنا در سقف به خوبی قابل مشاهده خواهد بود. در این‌جا باید در نظر داشت که سقف پس از تغییرشکل کمی دچار اعوجاج می‌شود و در این صورت برای مدل‌سازی آن با سطوح بزیر به بالا بردن درجه سطح نیاز خواهد بود. حال آن‌که اگر به جای دو سطح بزیر از یک سطح بی‌اسپلین با همان درجه (4,6) استفاده شود، با بالا بردن تعداد نقاط کنترل می‌توان به دقت مناسبی در مدل‌سازی سقف رسید. "شکل 14" توزیع انحنای سقف تغییرشکل یافته را با مدل یک سطح بی‌اسپلین از درجه (4,6) و شبکه کنترل  $18 \times 16$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این تغییرات تقریباً متناسب با کانتور تغییرشکل سقف می‌باشد.

### 4-3-2- بررسی فاکتور همواری

مقدار فاکتور همواری در یک سطح ارتباط مستقیمی با تغییرات انحنای سطح دارد به دلیل آن‌که طبق رابطه (8)، این فاکتور به‌کمک انتگرال‌گیری از مجموع مجدورات تغییرات انحنای اصلی سطح بدست می‌آید. براساس این رابطه مقدار فاکتور همواری برای سقف خودروی مورد بررسی در این تحقیق در حالت ایده‌آل (قبل از تغییرشکل) براساس معیار ام‌وی‌اس برابر  $10^{-6} \times 4.2$  محاسبه شده است. با توجه به این‌که سقف خودرو یک سطح نسبتاً صاف محسوب می‌شود، مقدار فاکتور همواری در آن بسیار به صفر نزدیک است. همچنین اگر مقدار این فاکتور برای سقف تغییرشکل یافته بررسی شود، عددی برابر  $10^{-3} \times 6.5$  بدست می‌آید که کاملاً نشان دهنده بهم‌ریختگی در سطح سقف می‌باشد. البته لازم به یادآوریست که مقادیر فوق‌الذکر برای کل سطح محاسبه شده‌اند یعنی این صورت کران‌های انتگرال در رابطه (8) از صفر تا یک  $(0 \leq u, v \leq 1)$  و معادل کل فضای پارامتری تعریف می‌شوند. اما اگر بررسی فاکتور همواری فقط در نواحی خاصی از سطح سقف مدنظر باشد (مثلاً بخشی که تغییرات انحنا در آن بیشتر مورد توجه است و یا بخشی که بیشترین تغییرشکل را دارد)، کران‌های انتگرال در این حالت همانند "شکل 15" باید به صورت موضعی و متناظر با مقادیر پارامترهای سطح در آن محدوده تعیین شوند.

برای سقف تغییرشکل یافته که به وسیله یک سطح بی‌اسپلین از درجه (4,6) و شبکه کنترل  $18 \times 16$  مدل شده است، تعداد تقسیمات سطح در هر دو جهت  $u$  و  $v$  یکسان و برابر 12 خواهد بود. در نتیجه کل سطح را می‌توان همانند "شکل 16" به تعداد  $144 = 12^2$  تکه سطح که هر یک از آن‌ها یک سطح بزیر از درجه (4,6) است، تقسیم‌بندی نمود. حال می‌توان مقدار فاکتور همواری در سطح تغییرشکل یافته را به صورت موضعی در هر یک از تکه سطح‌ها محاسبه و با مقدار آن در سطح ایده‌آل مقایسه نمود. بدین ترتیب

<sup>2</sup> IGES Toolbox

<sup>3</sup> MATLAB

<sup>1</sup> Bézier

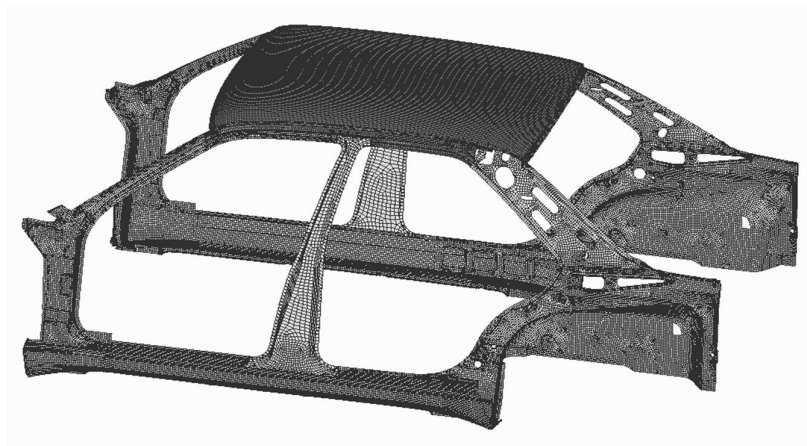


Fig. 10 Example assembly of car body in ANSYS environment

شکل 10 مجموعه بدنه خودروی مورد مثال در محیط آنسیس

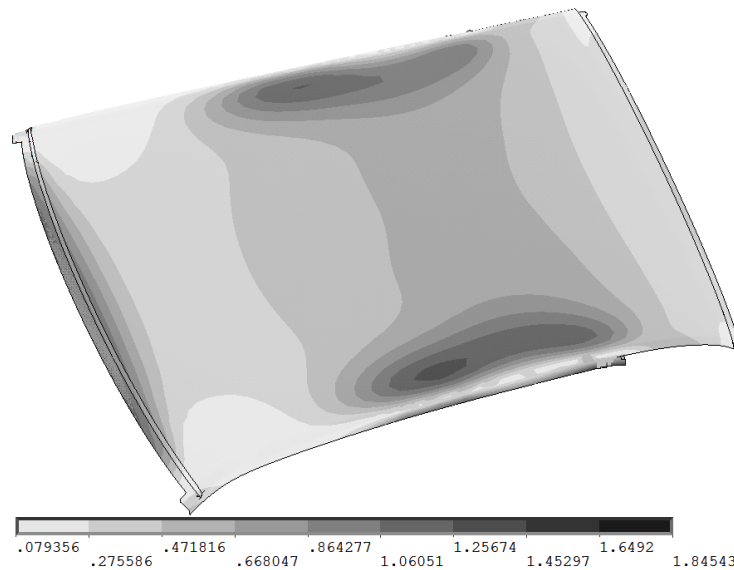


Fig. 11 Roof's deformation contour as a result of side bodies' initial deviation (deformations are in millimeters)

شکل 11 کانتور تغییر شکل ایجاد شده در سقف در نتیجه وجود تغییر شکل اولیه در دیواره‌های کناری (تغییر شکل‌ها به میلی‌متر)

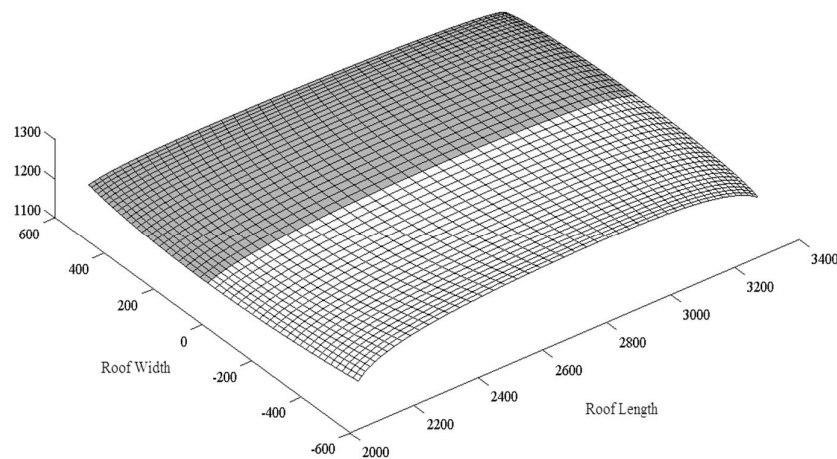


Fig. 12 Original roof model consists of two Bézier patches (dimensions are in millimetres and the origin is the same as manufacturer's CAD data).

شکل 12 مدل اصلی سقف خودرو متشکل از دو سطح بیزیر (ابعاد به میلی‌متر بوده و مبدأ مختصات بر اساس داده‌های سازنده می‌باشد)



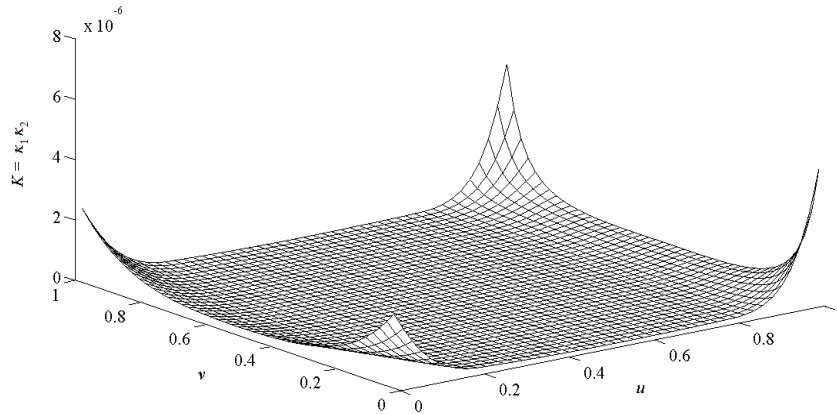


Fig. 13 Gaussian curvature distribution of ideal roof in parameter domain

شکل 13 توزیع انحنای سقف ایده‌آل در فضای پارامتری

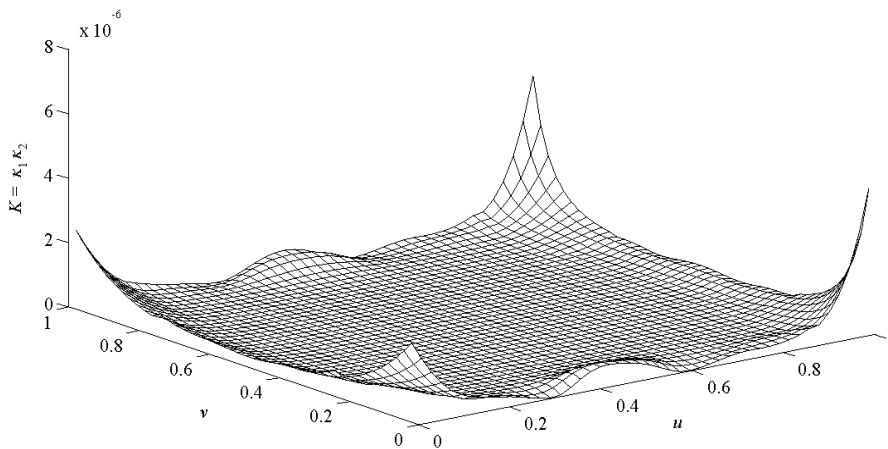


Fig. 14 Gaussian curvature distribution of deformed roof in parameter domain

شکل 14 توزیع انحنای سقف تغییرشکل یافته در فضای پارامتری

آمده است؛ حال آن‌که مقدار متناظر آن در سقف ایده‌آل برابر  $2.92 \times 10^{-8}$  می‌باشد.

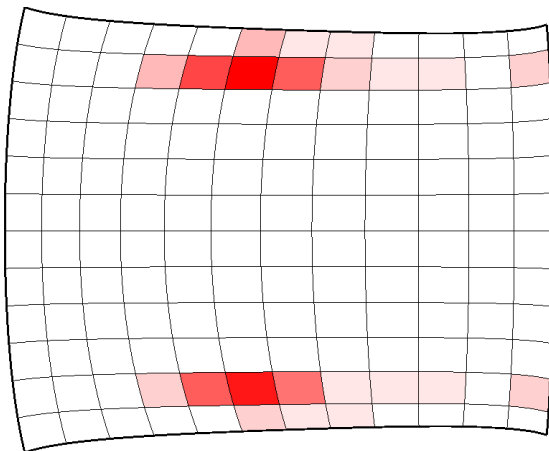


Fig. 16 Areas of deformed roof with higher fairness values

شکل 16 نمایش نواحی از سقف تغییرشکل یافته که دارای مقادیر فاکتور همواری بیشتری هستند

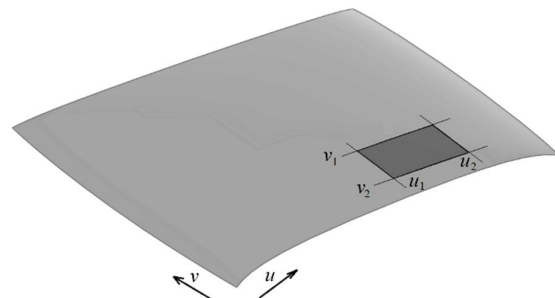


Fig. 15 Local integration intervals based on surface parameters

شکل 15 تعیین موضعی کران‌های انتگرال متناظر با مقادیر پارامترهای سطح

بخشی از سقف خودرو که دارای بیشترین اعوجاج است مشخص خواهد شد. در "شکل 16 نواحی از سطح سقف تغییرشکل یافته که دارای مقادیر فاکتور همواری بیشتری هستند مشخص شده‌اند. مشاهده می‌شود که این نواحی به خوبی با نواحی از سطح که براساس نتایج تحلیل اجزای محدود (شکل 11) دارای بیشترین تغییرشکل هستند همخوانی دارند. بیشترین مقدار فاکتور همواری محاسبه شده در این نواحی برابر  $1.68 \times 10^{-6}$  بدست

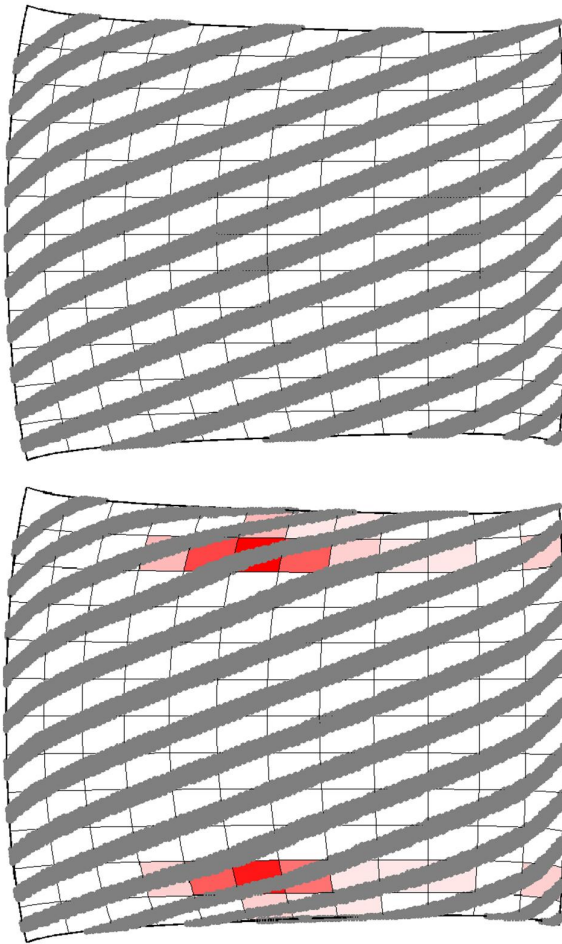


Fig. 17 Highlight bands of nominal (top) and deformed (down) roof

شکل 17 باندهای بازتابش سطح ایده‌آل (بالا) و تغییرشکل یافته (پایین) سقف

به‌عبارت دیگر برای یافتن ضابطه تابع  $u(v)$  نیز از روش برازش منحنی براساس داده‌های مستخرج از تحلیل اجزای محدود کمک گرفته می‌شود.

#### 5-4- مقایسه نتایج با داده‌های عملی

در این بخش، صحت و دقت تئوری ارائه شده در این مقاله به وسیله داده‌های عملی برگرفته از اندازه‌گیری تغییرات سقف 30 خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد. "شکل 18 بدنه یک خودرو را در حین انجام عملیات داده‌برداری از سطح سقف نشان می‌دهد. این فرآیند به وسیله یک دستگاه سی‌ام‌ام مدل پروسیلکت<sup>3</sup> ساخت شرکت زایس<sup>4</sup> صورت گرفته است.

در آزمایش انجام شده، پس از داده‌برداری از هر سقف، مدل ریاضی سطح آن به وسیله یک سطح بی-اسپلاین از درجه (4,6) و شبکه کنترل  $18 \times 16$  (مانند آنچه در بخش مدل‌سازی تئوری بیان شد) ایجاد و فاکتور همواری آن به‌عنوان مشخصه کلیدی مجموعه اندازه‌گیری شده است. در جدول 1 شاخصه‌های آماری توزیع این مشخصه به همراه مقادیر حاصل از شبیه‌سازی فرآیند مونتاژ 10,000 خودرو به روش مونت‌کارلو با نتایج حاصل از داده‌های عملی مقایسه شده است. خطایی که در مقایسه برخی از شاخصه‌ها از آماری مشاهده می‌شود، احتمالاً به دلیل کم بودن جامعه آماری داده‌های

#### 3-3-4- بررسی بازتابش سطح

"شکل 17" بازتابش سطوح ایده‌آل و تغییرشکل یافته سقف خودرو را با هم مقایسه نموده است. برای سنجش کیفیت سطوح، 15 عدد منبع نور (مهتابی) موازی به شعاع 20 میلی‌متر که همگی در ارتفاع 700 میلی‌متر از سطح سقف قرار دارند، شبیه‌سازی شده‌اند. ضمناً فرض بر این است که تمامی این مهتابی‌ها به صورت مورب تحت زاویه  $20^\circ$  نسبت به راستای طولی قرار دارند. مشاهده می‌شود که برای سطح ایده‌آل تمام خطوط بازتابش موازی و دارای پهنای تقریباً یکسان هستند که نشان می‌دهد این خطوط مربوط به بازتابش یک سطح هموار می‌باشند. از سوی مقابل در بازتابش سطح تغییرشکل یافته به خوبی مشخص است در نواحی که سقف دارای اعوجاج می‌باشد، توازی خطوط برهم خورده و پهنای آنها نیز تغییر کرده است. در این شکل همچنین مقادیر فاکتور همواری سطوح نیز نمایش داده شده‌اند که همخوانی روش‌های کمی و کیفی ارزیابی سطح را به خوبی نشان می‌دهد.

#### 4-4- مدل‌سازی آماری مشخصه کلیدی مجموعه

آخرین بخش از فرآیند ارزیابی کیفیت سطوح بدنه به عنوان تابعی از تیرانس ورودی قطعات، محاسبه محدوده تغییرات مشخصه کلیدی مجموعه می‌باشد. در مسئله سقف خودرو، مشخصه کلیدی مجموعه را می‌توان در قالب یکی از فاکتورهای کمی ارزیابی کیفیت سطح که پیش از این مورد بررسی قرار گرفت بیان نمود. فاکتور همواری در سطح به دلیل این‌که می‌تواند برای هر ناحیه از سطح یک عدد را به‌عنوان شاخص سنجش کیفیت سطح تعیین کند، به خوبی با تعریف مشخصه کلیدی مجموعه همخوانی دارد. بنابراین در این تحقیق بیشترین مقدار فاکتور همواری در سقف که براساس معیار ام‌وی‌اس و به‌صورت موضعی محاسبه می‌شود به‌عنوان مشخصه کلیدی مجموعه ( $u$ ) تعیین و تغییرشکل (تیرانس) دیواره‌های کناری بدنه نیز به‌عنوان متغیر ورودی ( $v$ ) در فرآیند تحلیل تیرانسی لحاظ می‌گردد.

براساس اطلاعات برگرفته از خط مونتاژ بدنه، دیواره‌های کناری بدنه پیش از مونتاژ سقف، ممکن است انحرافی بین 2 تا 5 میلی‌متر داشته باشند که این مقدار را می‌توان به‌عنوان بازه تغییرات تیرانس ورودی در تحلیل لحاظ نمود. با توجه به این‌که تغییرشکل ایجاد شده در سقف به کمک تحلیل اجزای محدود غیرخطی مبتنی بر تماس متقابل سطوح تعیین شده و همچنین فاکتور همواری به وسیله انتگرال‌گیری از مجذور انحنای بر روی سطح محاسبه شده است، لذا رابطه‌ای غیرخطی بین مشخصه کلیدی و تیرانس ورودی وجود دارد و در نتیجه برای مدل‌سازی آماری تغییرات مشخصه کلیدی مجموعه باید از تحلیل آماری غیرخطی [2] بهره گرفته شود. برای این منظور باید ابتدا گشتاورهای آماری مشخصه کلیدی مجموعه به شکل زیر محاسبه گردد [31].

$$m_r = E[u^r(v)] = \int_{-\infty}^{\infty} u^r(v) f(v) dv \quad (14)$$

در این رابطه،  $m_r$  بیانگر گشتاور  $r$ -ام مشخصه کلیدی توزیع می‌باشد که شاخصه‌های آماری توزیع این مشخصه (مقادیر میانگین، انحراف استاندارد، عدم تقارن<sup>1</sup> و کشیدگی<sup>2</sup>) به کمک آن تعیین خواهند شد [32]. در رابطه (14) تابع  $f(v)$  بیانگر توزیع متغیر  $v$  می‌باشد که نرمال فرض شده است. مقدار میانگین و انحراف استاندارد این توزیع نیز با توجه به بازه تیرانسی اندازه‌گیری شده در خط تولید به ترتیب برابر 3.5 و 0.5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای یافتن ارتباط ریاضی مشخصه کلیدی و تیرانس قطعات یا

<sup>3</sup> PROSELECT

<sup>4</sup> ZEISS

<sup>1</sup> Skewness

<sup>2</sup> Kurtosis

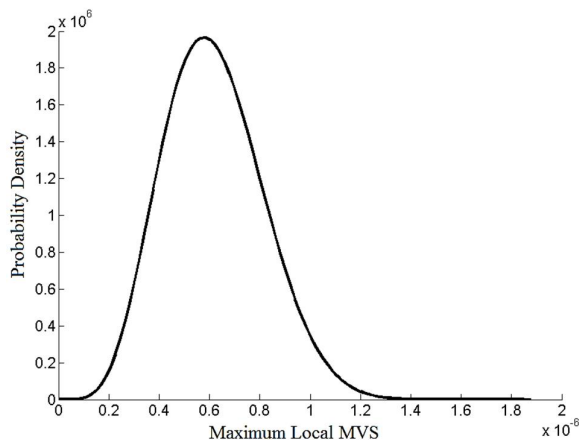


Fig. 19 Statistical distribution of roof's fairness factor: proposed method vs. experimental data

شکل 19 توزیع آماری فاکتور ارزیابی کیفیت سطح سقف خودرو؛ مقایسه نتایج تئوری و عملی

شده است. در پایان با اندازه‌گیری عملی تغییرات سقف تعدادی خودرو، همخوانی نتایج مدل‌سازی ارائه شده در این تحقیق با داده‌های آزمایشگاهی و تست‌های آدیت بدنه تایید شده است.

#### 6-مراجع

- [1] B. W. Shiu, D. Ceglarek, J. Shi, Flexible beam-based modeling of sheet metal assembly for dimensional control, *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 25, No. 1, pp. 49-54, 1997.
- [2] S. A. Hashemian, B. M. 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 فارسی)
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] S. J. Hu, Stream-of-variation theory for automotive body assembly, *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-6, 1997.
- [6] D. Ceglarek, J. Shi, Dimensional variation reduction for automotive body assembly, *Manufacturing Review*, Vol. 8, No. 2, pp. 139-154, 1995.
- [7] D. Ceglarek, J. Shi, Fixture failure diagnosis for the autobody assembly using pattern recognition, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, No. 1, pp. 55-66, 1996.
- [8] D. Ceglarek, J. Shi, Design evaluation of sheet metal joints for dimensional integrity, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, No. 2, pp. 452-460, 1998.
- [9] M. Fitchie, N. Juster, *Presenting automotive tolerance analysis data within a virtual prototype environment*, PhD Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 2004.
- [10] J. Maxfield, P. M. Dew, J. Zhao, N. P. Juster, S. Taylor, M. Fitchie, W. J. Ion, Predicting product cosmetic quality in the automobile industry, *Proceedings of the 33rd International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA 2000)*, Dublin, Ireland, 2000.
- [11] C. G. Wickman, R. Söderberg, L. Lindkvist, Toward non-nominal virtual geometric verification by combining VR and CAT technologies, *Proceedings of The 7th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing*, Cachan, France, 2001.
- [12] C. G. Wickman, R. Söderberg, Increased concurrency between industrial and engineering design using CAT technology combined with virtual reality, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 11, No. 1, pp. 7-15, 2003.



Fig. 18 Surface scanning of a car's roof using CMM

شکل 18 داده برداری از سطح سقف خودرو به کمک سی‌ام‌ام

جدول 1 شاخصه‌های آماری توزیع مشخصه کلیدی مجموعه

Table 1 Statistical specifications of assembly's key characteristics

کشفیدگی	عدم تقارن	انحراف استاندارد	مقدار میانگین	
3.3140	0.4839	$0.1982 \times 10^{-6}$	$0.6174 \times 10^{-6}$	تحلیل آماری غیرخطی
3.3136	0.4846	$0.1980 \times 10^{-6}$	$0.6172 \times 10^{-6}$	شبیه‌سازی مونت‌کارلو
2.7836	0.4099	$0.1791 \times 10^{-6}$	$0.6275 \times 10^{-6}$	نتایج عملی
16 %	15.3 %	9.6 %	1.7 %	خطای نتایج عملی و تحلیل تئوری

عملی بوده است. براساس این نتایج، مقادیر عدم تقارن و کشفیدگی فاکتور ارزیابی کیفیت سطح سقف خودرو نشان می‌دهد که توزیع آماری مشخصه کلیدی مجموعه در این مسئله تا حدی از توزیع نرمال فاصله گرفته (در یک توزیع نرمال، عدم تقارن برابر صفر و کشفیدگی برابر 3 می‌باشد) و به شکل توزیع بتا متمایل شده است که با توجه به ارتباط غیرخطی متغیرها چنین امری قابل پیش‌بینی است. توزیع آماری فاکتور ارزیابی کیفیت سطح سقف خودرو حاصل از نتایج تئوری و عملی در "شکل 19 با هم مقایسه شده‌اند.

#### 5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به عنوان یکی از کاربردهای مهم تحلیل تلرانسی در صنعت، به ارزیابی کیفیت ظاهری بدنه خودرو به عنوان تابعی از تلرانس‌های ورودی مجموعه پرداخته شده است. در مقایسه با مطالعات قبلی صورت گرفته در زمینه ارزیابی کیفیت ظاهری بدنه خودرو که بر فرض صلب بودن اجزای بدنه استوار هستند، در این تحقیق اثر انعطاف‌پذیری ورق‌های تشکیل دهنده بدنه نیز در تحلیل لحاظ شده است.

در تئوری ارائه شده با ترکیب تحلیل اجزای محدود غیرخطی، روش‌های ارزیابی کیفیت سطوح و تحلیل آماری غیرخطی، روشی کاملاً نظام‌مند برای سنجش کیفیت ظاهری بدنه خودرو ارائه شده است. برای این منظور سه بخش اصلی تشکیل شده است: 1) تحلیل اجزای محدود غیرخطی فرآیند مونتاژ بدنه؛ 2) ارزیابی کیفیت سطوح تغییرشکل یافته بدنه؛ و 3) محاسبه توزیع آماری فاکتور ارزیابی کیفیت بدنه. در پایان، در قالب مثالی کاربردی برگرفته از مسئله موجود در خط مونتاژ بدنه یک شرکت خودروسازی، فرآیند تحلیل تلرانسی بروی بدنه یک خودرو پیاده‌سازی و کیفیت سطح سقف در مجموعه نهایی پس از مونتاژ به عنوان تابعی از تلرانس ورودی قطعات ارزیابی

- [22] R. Klass, Correction of local surface irregularities using reflection lines, *Computer-Aided Design*, Vol. 12, No. 2, pp. 73-77, 1980.
- [23] G. Sußner, G. Greiner, S. Augustiniack, Interactive examination of surface quality on car bodies, *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 5, pp. 425-436, 2004.
- [24] L. Piegl, W. Tiller, *The nurbs book*, 2nd Edition, pp. 361-452, New York, NY: Springer-Verlag, 1997.
- [25] G. Farin, *Curves and surfaces for CAGD*, 5th Edition, pp. 349-367, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2002.
- [26] G. Farin, J. Hoschek, M.-S. Kim, *Handbook of computer aided geometric design*, pp. 165-188, Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 2002.
- [27] H. P. Moreton, C. H. Séquin, Functional optimization for fair surface design, *SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 167-176, 1992.
- [28] N. S. Sapidis, *Designing fair curves and surfaces: Shape quality in geometric modeling and computer-aided design*, pp. 213-230, Philadelphia, PA: SIAM, 1994.
- [29] IKKCO. *Iran khodro khorasan company*, Accessed 21 June, 2014; <http://www.ikkco.info/en>.
- [30] J. Eube, *Standards for steel, a handbook of tables from din standards*, pp. 128-133, Berlin, Germany: Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [31] J. Zhou, A. S. Nowak, Integration formulas to evaluate functions of random variables, *Structural Safety*, Vol. 5, No. 4, pp. 267-284, 1988.
- [32] A. Papoulis, S. U. Pillai, *Probability, random variables and stochastic processes*, 4th Edition, pp. 153-179, Boston, MA: McGraw-Hill, 2002.
- [13] D. E. Whitney, *Mechanical assemblies : Their design, manufacture, and role in product development*, pp. 27-29, New York, NY: Oxford University Press, 2004.
- [14] R. Söderberg, L. Lindkvist, Stability and seam variation analysis for automotive body design, *Journal of Engineering Design*, Vol. 13, No. 2, pp. 173-187, 2002.
- [15] C. Döring, A. Eichhorn, D. Girimonte, R. Kruse, Improving surface defect detection for quality assessment of car body panels, *Mathware & Soft Computing*, Vol. 11, No. 3, pp. 163-177, 2004.
- [16] G. Farin, N. Sapidis, Curvature and the fairness of curves and surfaces, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 9, No. 1, pp. 52-57, 1989.
- [17] H. Hagen, S. Hahmann, T. Schreiber, E. Gschwind, E. Nakajima, B. Ordenweber, *Curve and surface interrogation*, H. Hagen, H. Müeller, G. Nielson (Eds.), *Focus on scientific visualization*, pp. 243-258, Berlin, Germany: Springer, 1992.
- [18] H. Hagen, G. Schulze, Automatic smoothing with geometric surface patches, *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 4, No. 3, pp. 231-236, 1987.
- [19] S. Hahmann, *Visualization techniques for surface analysis*, C. Bajaj (Eds.), *Data visualization techniques*, pp. 49-74, New York, NY: John Wiley & Sons, 1999.
- [20] N. J. Lott, D. L. Pullin, Method for fairing b-spline surfaces, *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 10, pp. 597-604, 1988.
- [21] K.-P. Beier, Y. Chen, *The highlight band, a simplified reflection model for interactive smoothness evaluation*, N. S. Sapidis (Eds.), *Designing fair curves and surfaces: Shape quality in geometric modeling and computer-aided design*, pp. 213-230, Philadelphia, PA: SIAM, 1994.