



# مدل لایه‌ای برای ساخت قطعات سازه‌های هوایی با استفاده از فناوری نمونه‌سازی سریع

دکتر فرهاد جاویدراد<sup>۱\*</sup>، علیرضا پورموید<sup>۲</sup>

۱- دانشیار مهندسی هوا-فضا، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی

۲- دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی هوا-فضا، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی

\*تهران، صندوق پستی ۱۳۸۴۶-۶۳۱۱۳ f\_javidrad@yahoo.com

**چکیده-** در این مقاله، نخست برخی از روشهای موجود برای ساخت سریع قطعات هوا-فضایی که پیچیدگی بالایی دارند، معرفی شده و سپس شیوه جدیدی برای ایجاد منحنی‌های کانتور قطعه ارائه می‌شود که در آن مستقیم از داده‌های ابر نقاط استفاده شده است. شیوه ارائه شده برای محاسبه منحنی‌های کانتور شامل: قسمت‌بندی داده‌ها، کاهش داده‌های نقاط و برازش منحنی بی-اسپلاین است. الگوریتم ارائه شده در محیط نرم‌افزار ریاضی اجرا و از آن برای تولید منحنی‌های مرزی کانتور قطعه اتصال دهنده‌ای بین بال و بدنه هواپیما استفاده شده است. نتایج مقایسه سه‌بعدی بین ابر نقاط حاصل از اسکن نمونه و مدل لایه‌ای نشان می‌دهد که حدود ۹۵ درصد نقاط انحرافی کمتر از  $\pm 0.5$  میلی‌متر دارند که با توجه به ابعاد قطعه مورد نظر، قابل قبول است. با توجه به ساده بودن الگوریتم ارائه شده و نتایج تجربی حاصل، ادعا می‌شود که این روش برای ایجاد مدل لایه‌ای قطعات پیچیده کارایی لازم را داشته و ساخت قطعات را از طریق روش نمونه‌سازی سریع امکان‌پذیر می‌سازد و از آن می‌توان به‌طور موثری در ساخت مدل قطعات هواپیماها و سایر سامانه‌های هوایی استفاده کرد.

**کلیدواژگان:** نمونه‌سازی سریع، مهندسی معکوس، مدل لایه‌ای قطعات، منحنی بی-اسپلاین، ابر نقاط.

## A Sliced Model for Manufacturing Aeronautical Structural Components using Rapid Prototyping Technology

F. Javidrad<sup>1\*</sup>, A. R. Pourmoayed<sup>2</sup>

1. Associate professor of Aerospace Eng., Aeronautical University of Science and Technology

2. Graduate Student, Aeronautical University of Science and Technology

\*P.O.Box 14115-143, Tehran, Iran f\_javidrad@yahoo.com

**Abstract-** In this paper, first, a number of emerging technologies for rapid manufacturing of components are introduced and their application in manufacturing aeronautical structural components is discussed. Then, a novel method for generation of sectional contour curves directly from the cloud point data is presented. The proposed method computes contour curves for rapid prototyping model generation through adaptive slicing, data points reducing and B-spline curve fitting. The Proposed procedure was programmed in MATLAB software package to perform all computational effort in a single software system. The method has been applied to a wing-fuselage connector component of an existing fighter aircraft to create its layered model for rapid manufacturing. 3D comparison of the developed model and the digitized cloud point data reveals that 95% of the data points have a maximum deviation of 0.5 mm, which is a reasonable accuracy compared to the component size. The simplicity and effectiveness of the proposed method, as demonstrated by our experiments, confirms that the algorithm can be practically used for rapid prototype manufacturing of aeronautical structural components with an adequate accuracy.

**Keywords:** Rapid Prototyping; Reverse Engineering; Sliced Model; Interval B-Spline; Cloud Point Data.

## ۱- مقدمه

امروزه با گسترش علوم و فناوری‌های جدید، صنایع هوافضا در راستای کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت تولید حرکت می‌کنند. علاوه بر آن، به‌منظور موفقیت در رقابت‌های فشرده موجود در بازارهای جهانی، جلب رضایت‌مندی کاربران و ساخت سامانه‌های هوا-فضایی با قابلیت اطمینان مناسب، صنایع هوا-فضا به‌طور پویا و فعال در راستای گسترش فناوری‌های جدید و به روز آوری شیوه‌های طراحی و ساخت گام برمی‌دارند.

در صنایع رقابتی امروز (به ویژه صنایع هوا-فضا) لازم است خدمات و محصولات تولیدی، ضمن داشتن کیفیت لازم، با هزینه‌های پایین‌تر و در زمانهای کوتاه‌تری عرضه شوند. لذا بسیاری از شرکتها و کارخانه‌های پیشرفته در این صنایع باید بتوانند محصولات مورد نظر را به تعداد خواسته شده (حتی اندک) بر طبق سفارش و در زمانی کوتاه تولید کنند. برای مثال در طی عمر موتور هواپیماهای نظامی یا تجاری، به احتمال بسیار تعدادی از پره‌ها به علت ورود اجسام خارجی سخت آسیب خواهند دید. به علت بالا بودن سرعت جریان هوا در مجراهای موتور، ورود این اجسام خارجی می‌تواند صدمات شدیدی به پره‌ها و تیغه‌های توربین وارد سازد. همچنین به‌علت فشار، دما و سرعت چرخشی بالای گاز، این قطعات در معرض فرسایش، اعوجاج و ترک‌خوردگی قرار دارند. چنین قطعاتی که پرمصرف محسوب می‌شوند، باید به روشهای استاندارد و مشابه روش تولید اولیه، تهیه و انبار شوند؛ اما قطعاتی در موتور یا سازه هواپیما وجود دارد که به‌طور طبیعی نرخ مصرف آنها کم بوده و معمولاً در شرایط خاص یا بر اثر حادثه یا سانحه باید تعویض شوند. در چنین شرایطی، برای جلوگیری از ایجاد هزینه‌های سنگین تولید، می‌توان از روشهای مهندسی معکوس<sup>۱</sup> و نمونه‌سازی سریع<sup>۲</sup> استفاده کرد [۱] و [۲].

در این مقاله نخست برخی از روشهای تولید سریع قطعات، مانند مهندسی معکوس، نمونه‌سازی و ساخت سریع، قالب‌سازی سریع<sup>۳</sup> معرفی می‌شود و سپس شیوه جدیدی برای تولید منحنی‌های کانتور قطعه ارائه می‌شود که به‌طور مستقیم از داده‌های ابر نقاط استفاده شده است. شیوه مزبور برای محاسبه منحنی‌های کانتور شامل: برش نقاط داده‌ها، کاهش داده‌های نقاط و برازش منحنی بی-اسپلاین<sup>۴</sup> است. با توجه به ساده بودن الگوریتم ارائه شده و نتایج تجربی حاصل، می‌توان ادعا کرد که این روش برای ساختن منحنی‌های مرزی کانتور قطعه، ایجاد مدل لایه‌ای نسبتاً دقیق کارایی لازم را داشته و ساخت قطعه از طریق نمونه‌سازی سریع را امکان‌پذیر می‌سازد و از آن می‌توان به‌طور موثری در صنایع مختلف مانند صنایع هوا-فضا استفاده کرد.

## ۲- فناوری‌های ساخت سریع

فناوری ساخت و نمونه‌سازی سریع، روش جدیدی است که برای تولید سریع قطعه از داده‌های دیجیتالی ابداع شده است. اگرچه هر یک از روش‌ها را می‌توان به‌طور مستقل استفاده کرد، اما معمولاً از آنها به شکل مجموعه‌ای (فرایندی جامع) برای ساخت سریع قطعات استفاده می‌شود. در ذیل به‌طور خلاصه این فناوری‌ها معرفی شده است.

## ۲-۱- نمونه‌سازی سریع

نمونه‌سازی سریع به روشی گفته می‌شود که در آن می‌توان مدلی فیزیکی را در زمان کوتاهی از روی مدلی کامپیوتری ایجاد کرد. با استفاده از این روش، طراح می‌تواند مدل فیزیکی واقعی از ایده خود یا کپی قطعه اسکن شده را در حداقل زمان بسازد و علاوه بر تصاویر دوبعدی، مدل سه‌بعدی واقعی را نیز برای بررسی‌های بیشتر در اختیار داشته باشد. با داشتن مدل فیزیکی واقعی

1. Reverse Engineering  
2. Rapid Prototyping

3. Rapid Tooling  
4. B-Spline

مختصات فضایی (سه بعدی) نقاط مختلف (توسط اسکنرها یا دیجیتایزرها) انجام می‌شود. البته گاهی تغییر در طراحی و تحلیل راندمان و کارایی مجموعه یا قطعه نیز جزو مراحل مهندسی معکوس شناخته می‌شود. اما هر گونه تغییر در طراحی و بهینه‌سازی، جزو فرایند مهندسی مجدد محسوب می‌شود که فراتر از مهندسی معکوس بوده و در این مقاله به آن پرداخته نشده است.

استفاده از روشهای مهندسی معکوس در صنایع هوا-فضا، از جنبه‌های مختلفی اهمیت دارد؛ مانند کاهش تعداد قطعات یدکی هواپیماها در انبارها؛ به دست آوردن اطلاعات و نقشه‌های قطعات هواپیماهایی که دیگر در کشور اصلی تولید نمی‌شوند؛ انجام اصلاحات بر روی قطعاتی که نقشه‌ای از آنها وجود ندارد [۵].

شرایط صنایع هوا-فضا با سایر صنایع متفاوت است. تنوع و پیچیدگی قطعات به کار رفته در صنایع هوا-فضا نسبت به سایر صنایع بیشتر است. با وجود این، در صنایع هوا-فضا می‌توان به خوبی از روشهای مهندسی معکوس استفاده کرد. نیاز به اطلاعات مربوط به قطعات قدیمی و یدکی نیز در صنایع هوا-فضا با دیگر صنایع متفاوت است. برای مثال قطعه یدکی خودروهایی قدیمی ممکن است فقط مورد نیاز کلکسیون‌داران باشد، اما بسیاری از هواپیماهای قدیمی تقریباً با همان طرح اولیه، هنوز در حال پرواز هستند. بنابراین تأمین قطعات یدکی برای هواپیماها، نیازی ویژه و با اهمیت محسوب می‌شود. بیشتر قطعات هواپیماهایی که در دهه‌های پیشین طراحی و ساخته شده‌اند، نقشه سه بعدی و اطلاعات دیجیتالی ندارند. بنابراین تولید قطعات یدکی و عملیاتی نگه داشتن این هواپیماها، از دید اقتصادی کاری دشوار و با اهمیت است. به طور کلی، سیستم‌های مهندسی معکوس دو بخش اصلی دارند:

الف- دستگاه‌های اندازه‌گیری مختصات برای دیجیتایز کردن مدل فیزیکی سطح به شکل ابر نقاط.  
ب- ایجاد سطح و مدل به شکل نرم‌افزاری از روی ابرنقاط.

می‌توان ایده خود را به صورت مستقیم و واقعی به کاربران و تولیدکنندگان نشان داد یا می‌توان مدل ساخته شده را آزمایش و از نظر ابعادی مطالعه کرد. امروزه قابلیت این روش از حد نمونه‌سازی فراتر رفته و می‌توان آن را، روش ساخت قطعات پیچیده، به روش لایه به لایه نامید [۳].

در این روش از مواد مختلفی برای ساخت مدل‌ها استفاده می‌شود، برای نمونه می‌توان از مواد پلیمری و فلزی نام برد. با پیشرفت‌های صورت گرفته در این فناوری، نمونه‌سازی سریع به عنوان نوعی فرایند استاندارد صنعتی پذیرفته شده است [۴]. تاکنون بیش از ۳۰ روش مختلف برای نمونه‌سازی سریع ابداع شده که در میان این روش‌ها می‌توان به استریولیتوگرافی<sup>۱</sup>، مدل‌سازی لیزری انتخابی، مدل‌سازی رشته‌ای، چاپ سه بعدی، ساخت مدل‌های لایه‌ای<sup>۲</sup>، مدل‌سازی مولتی-جت و مدل‌سازی دقیق لیزری را نام برد.

هر چند به کارگیری فناوری‌های نمونه‌سازی سریع، سرمایه‌گذاری اولیه زیادی را می‌طلبد، اما کاربرد این فناوری‌ها، فواید و مزایای گوناگونی دارد و می‌توان از آنها در صنایع با ارزش افزوده بالا (مانند صنایع هوا-فضا) استفاده نمود.

## ۲-۲- قالب‌سازی سریع

یکی از کاربردهای رو به رشد فناوری نمونه‌سازی سریع، قالب‌سازی سریع است که ترکیبی از روشهای نمونه‌سازی سریع با روشهای قالب‌سازی مرسوم است. این روش برای تولید قطعات فیزیکی از روی داده‌های دیجیتالی در زمان کوتاه و با هزینه کمتر (نسبت به شیوه‌های براده برداری مرسوم) به کار می‌رود.

## ۲-۳- مهندسی معکوس

مهندسی معکوس عبارت است از ایجاد مدل هندسی کامپیوتری، از روی قطعه واقعی، که با اندازه‌گیری

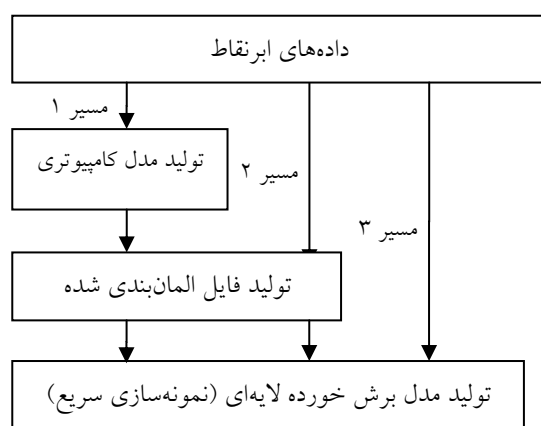
1. Stereolithography
2. Laminated object manufacturing

شرایط مختلف استفاده می‌شود.

### ۳- ارتباط بین فرایندهای مهندسی معکوس و ساخت نمونه سریع

معمولاً سه مسیر برای رسیدن از مهندسی معکوس به ساخت نمونه سریع وجود دارد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

در مسیر اول نخست از روی داده‌های ابرنقاط، مدل کامپیوتری تهیه شده و سپس این مدل برای تهیه فایل المان‌بندی شده<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. (مدل المان‌بندی شده برای تولید سطوح با استفاده از المان‌های مثلثی به کار می‌رود). سپس این فایل، برش خورده و برای ساخت قطعه در سیستم نمونه‌سازی سریع استفاده قرار می‌شود. ساخت مدل کامپیوتری از روی داده‌های ابرنقاط اغلب کار ساده‌ای نیست و به طی مراحل مانند پیش‌پردازش داده‌های ابرنقطه، تقسیم‌بندی داده‌ها و... نیاز است [۶].



شکل ۱ شیوه‌های ارتباط مهندسی معکوس و ساخت سریع نمونه

در مسیر دوم، فایل المان‌بندی شده مستقیماً از روی داده‌های ابرنقطه تولید می‌شود؛ سپس برش خورده و به دستگاه نمونه‌سازی سریع برای ساخت نمونه منتقل می‌شود [۸] و [۷]. در این مسیر، فرایند ساخت مدل

دستگاه‌های اندازه‌گیری مختصات به دو دسته تماسی و غیرتماسی طبقه‌بندی می‌شوند. دستگاه‌های اندازه‌گیری تماسی، حسگرهایی<sup>۱</sup> تماسی دارند که با عبور از روی سطوح قطعه کار، به صورت خودکار، پستی و بلندی‌های آن را حس کرده و مختصات نقاط را اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند. اسکنرهای تماسی را گاهی دستگاه اندازه‌گیری مختصات<sup>۲</sup> نیز می‌نامند. تله‌رانس نقاط اندازه‌گیری شده حاصل از این ماشین‌ها معمولاً در حد ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ میلی‌متر است. دستگاه‌های اندازه‌گیری غیرتماسی معمولاً دارای اسکنر لیزری (نقطه‌ای یا خطی) یا دوربین سه‌بعدی هستند. در روشهای غیرتماسی، که در آنها معمولاً از اسکنر لیزری و یا دوربین سه‌بعدی استفاده می‌شود، با تابانیدن پرتوی نور، صوت یا ایجاد میدان مغناطیسی بر روی سطح قطعه کار، تصاویری دوبعدی از مقاطع مختلف قطعه یا توده‌ای از مختصات نقاط مربوط به سطوح آن اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. بسته به نوع ماده تشکیل‌دهنده قطعه، نوع رنگ و صافی سطح آن، پرتوهای تابانده شده به قطعه کار ممکن است از روی آن منعکس شده یا از آن عبور کنند و این موضوع می‌تواند خطای قابل توجهی را در فرایند ایجاد کند. دستگاه‌های اسکن غیرتماسی، با استفاده از روشهای از نوع مثلث‌بندی، اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت پرتو، تحلیل اطلاعات حاصل از تداخل امواج و الگوریتم‌های پردازش تصویر، می‌توانند داده‌های لازم را درباره شکل هندسی قطعه کار جمع‌آوری کنند. در این روش هیچگونه تماسی بین سخت‌افزار و نمونه فیزیکی وجود ندارد.

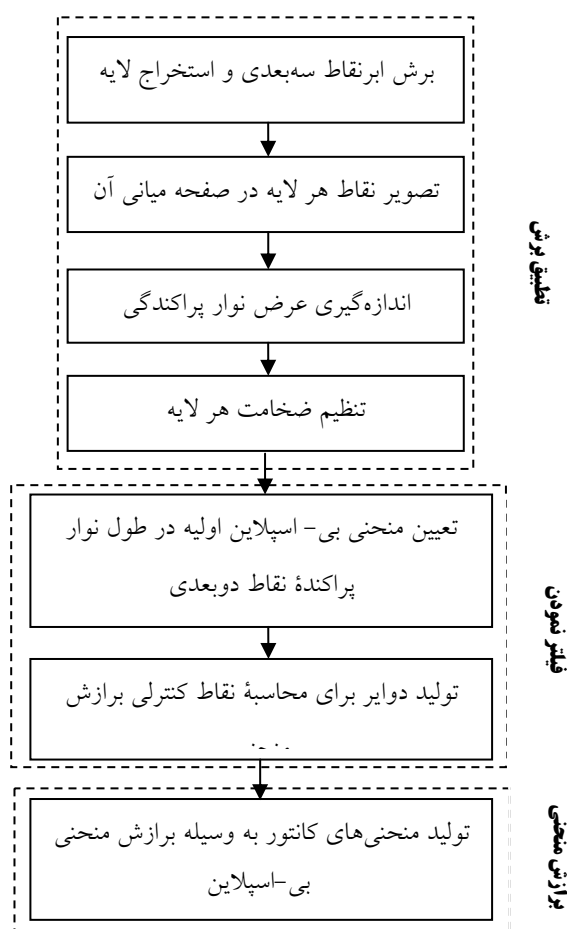
نرم‌افزارهای متعددی برای مدل‌سازی مهندسی معکوس وجود دارد که از مهمترین آنها نرم‌افزارهای Rapidform، Copy CAD، pro Engineer، Geomagics، Rhino و Imageware است. این نرم‌افزارها برای قطعات و

1. Probe

2. CMM(Coordinate Measuring Machine)

#### ۴- شیوه پیشنهادی برای استخراج منحنی‌های کانتور

در این مقاله، شیوه‌ای جدیدی برای تولید منحنی‌های کانتور به‌طور مستقیم از داده‌های ابر نقاط ارائه شده است. نمودار بلوکی این روش که بر مبنای مسیر ۳ (شکل ۱) بنا نهاده شده، در شکل (۲) ترسیم شده است.



شکل ۲ شیوه پیشنهادی برای تولید منحنی‌های کانتور

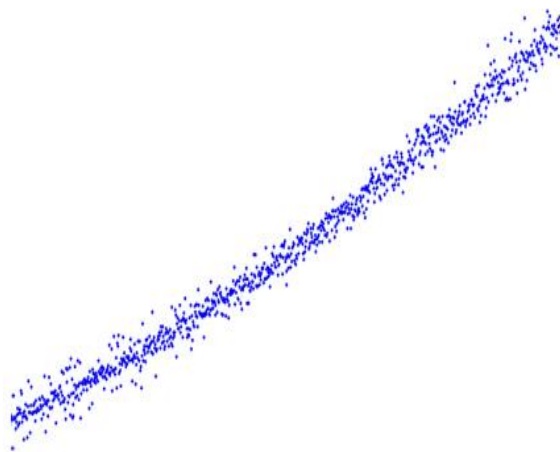
در شیوه پیشنهادی، نخست دسته داده‌های ابر نقاط داخل تعدادی لایه در جهتی پیش‌فرض (جهت ساخت نمونه سریع)، برش زده می‌شود. برای قطعاتی که یک محور تقارن دارند، راستای عمود بر محور تقارن

دیجیتالی از روی داده‌های ابرنقطه حذف می‌شود؛ اما معمولاً خط‌هایی به دلیل المان‌بندی از روی داده‌های ابر نقاط ایجاد می‌شود که به اصلاح نیاز دارد. در بسیاری از موارد، صحت داده‌های المان‌ها قابل بررسی نیست [۹].

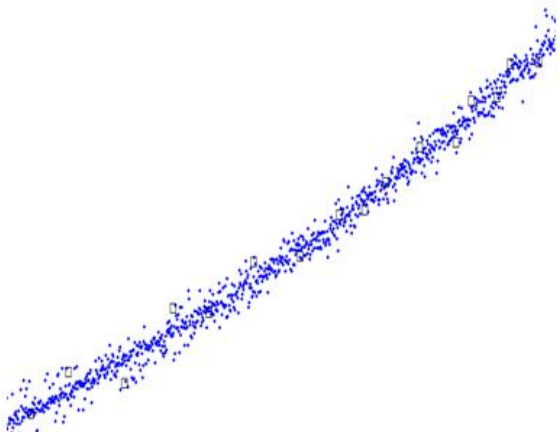
در مسیر سوم، داده‌های برش خورده و منحنی‌های کانتور که برای فرایند نمونه‌سازی سریع لازم است به‌طور مستقیم از روی ابر نقاط استخراج می‌شوند. این مسیر، نوعی ارتباط مستقیم را بین مهندسی معکوس و ساخت سریع نمونه ایجاد کرده و مراحل میانی مانند ایجاد سطوح از روی داده‌های ابرنقاط و تولید المان‌ها را حذف می‌کند. این فرایند همچنین خط‌های ساخت ناشی از احداث سطوح و مثلث‌بندی نامناسب را از میان برداشته و به استفاده از نرم‌افزار برای اصلاح فایل مدل نیازی ندارد. لذا نتیجه‌گیری می‌شود که ترکیب مهندسی معکوس و ساخت سریع نمونه در مسیر سوم روش خوبی است و می‌تواند بیشترین بازدهی را در کاربردهای نمونه‌سازی سریع داشته باشد.

برای گسترش روشهایی که به‌طور مستقیم از روی داده‌های ابر نقاط به ساخت سریع نمونه برسند، پژوهش‌هایی در گذشته انجام شده است. در [۱۰] ارتباط مهندسی معکوس و ساخت سریع نمونه به وسیله کاهش داده‌های ابرنقاط ایجاد شده است. در [۱۱] روشی برای ترکیب مهندسی معکوس و ساخت سریع نمونه بر اساس خواص سطوح ایجاد شده بر روی داده‌های نقاط ارائه شده است.

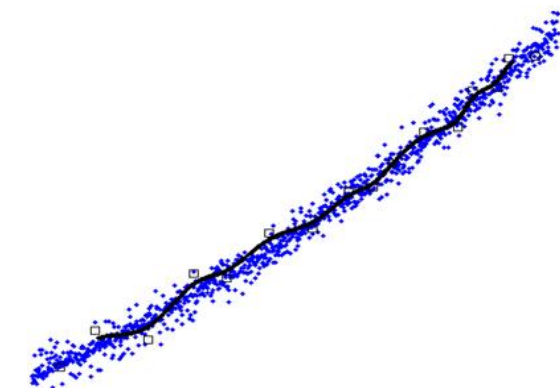
در [۱۲] مشکل اصلی در مهندسی معکوس یعنی برازش منحنی بی-اسپلاین در جاهایی که نقاط اندازه‌گیری شده نامنظم و توزیع نامساوی دارند، مطالعه شده است. در این مقاله پیشنهاد شده که داده‌های نقاط را قبل از برازش منحنی بی-اسپلاین، پیش‌پردازش کرده و دوباره برای برازش منحنی ایجاد شوند. در اجرای این روش همچنین از شیوه‌های فیلتر کردن، تحلیل انحنای تقسیم‌بندی و برازش استفاده شده است.



شکل ۳ نمایی از پهنای نوار نقاط پراکنده



شکل ۴ نمایی از انتخاب نقاط بر روی پهنای نوار نقاط پراکنده



شکل ۵ نمایی از برازش منحنی بی-اسپلاین اولیه از نقاط انتخابی

معمولاً به عنوان جهت برش قطعه انتخاب می‌گردد. لایه اول از یک انتها با ضخامتی به اندازه کافی کوچک بوجود آمده است. نقاط در این لایه در مسیری که قصد ساخت آن با روش لایه به لایه را داریم، به لبه شروع قطعه تصویر شده است.

بنابراین در روش پیشنهاد شده، اولین لایه به‌وسیله استخراج صفحه در راستای تعریف شده، ایجاد می‌شود. ایجاد لایه‌های بعدی شبیه به لایه اول است، جز آنکه نقاط بین لایه‌های آنها بر روی صفحه میانی هر لایه تصویر می‌شوند. برای ایجاد لایه آخر باید مشابه لایه اول عمل شود، بدین صورت که داده‌های لایه میانی لایه آخر به لبه انتهایی قطعه تصویر می‌شود. سپس داده‌های نقاط هر لایه در داخل صفحه میانی لایه تصویر می‌شود تا نواری از نقاط پراکنده (همانند شکل ۳) تشکیل شود. نقاط دوبعدی تصویر شده برای ساخت منحنی مرز استفاده می‌شود. از شیوه‌ای شهودی برای استفاده از عرض این نوار به‌عنوان اندازه‌گیری تطبیق برش استفاده شده است؛ بدین صورت که اگر عرض نوار نقاط پراکنده حاصل زیاد باشد، عرض لایه کوچکتر می‌شود.

از طرح کاهش داده‌های نقاط برای تعیین نقاط کنترلی مناسب برای برازش منحنی بی-اسپلاین استفاده می‌شود. در این طرح، ابتدا نقاط دلخواهی در طول نوار (مانند شکل ۴) برای برازش منحنی بی-اسپلاین اولیه انتخاب می‌شود. نقطه شروع نقاط انتخابی باید نزدیک به نقاط شروع نوار و نقطه انتخاب نهایی باید نزدیک نقاط انتهایی نوار باشد. منحنی بی-اسپلاین گذرنده از این نقاط انتخابی (شکل ۵) در حقیقت تقریبی از مسیر نوار نقاط پراکنده است که آن را منحنی بی-اسپلاین اولیه می‌نامیم.

#### 1. Scattered Data Band-Width



شکل ۷ نمایی از قطعه اتصال دهنده بین بال و بدنه هواپیما

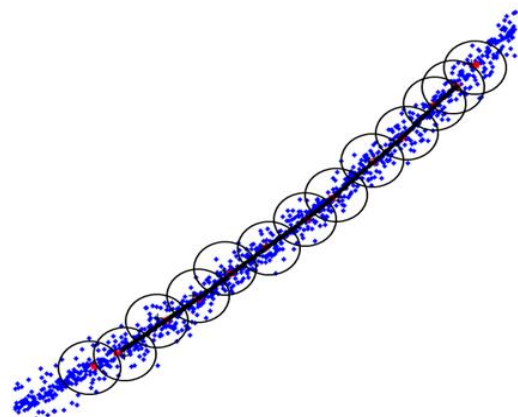
این نمونه به علت آنکه از هواپیمای در حال خدمت جدا شده، در قسمت‌هایی دارای سائیدگی و رنگ غیریکنواخت است که این موجب بروز خطا در هنگام اسکن می‌شود. برای از بین بردن این معایب و ایجاد شرایط سطحی یکنواخت، از روش پوشش‌دهی الکتریکی<sup>۲</sup> استفاده شده است. در این فرایند که یکی از انواع روش‌های رنگ‌آمیزی فلزها با رنگ‌های آلی است، از جریان الکتریکی برای رسوب دهی رنگ بر روی سطح فلز استفاده می‌شود. اساس این روش، اصل جذب بار مخالف است. مطابق این اصل، در فرایند پوشش‌دهی الکتریکی، مواد با بارهای الکتریکی مخالف به سوی یکدیگر جذب می‌شوند. نمونه، پس از انجام فرایند مزبور دارای پوشش سطحی یکنواخت می‌شود که در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸ قطعه پس از فرایند پوشش‌دهی الکتریکی

2. Electro-plating deposit

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، منحنی بی-اسپلاین اولیه، به علت انتخابی بودن نقاط کنترلی ممکن است دارای اعوجاج باشد. از این منحنی به عنوان راهنمای انتخابی نقاط برای تولید دوایر روی نوار پراکنده استفاده می‌شود و بدین ترتیب، اعوجاج آن تأثیری در دقت کانتورهای به دست آمده ندارد. برای ترسیم دوایر بر روی منحنی بی-اسپلاین اولیه، ابتدا تعدادی نقاط در فواصل دلخواهی در طول منحنی بی-اسپلاین اولیه انتخاب می‌شود و پس از آن، به مرکز این نقاط و شعاعی که به عرض نوار پراکنده وابسته است، دوایری در طول منحنی بی-اسپلاین ایجاد می‌شود (شکل ۶). سرانجام، پس از محاسبه مرکز هندسی سطح نقاط داخل هر یک از این دوایر، از آنها به عنوان نقاط کنترلی برای برازش منحنی بی-اسپلاین نهایی استفاده می‌شود.



شکل ۶ نمایی از دوایر ترسیم شده، مراکز هندسی نقاط و منحنی بی-اسپلاین نهایی

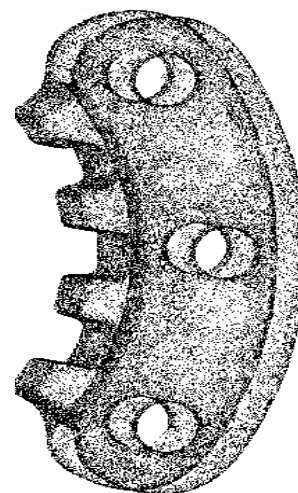
## ۵- نمونه مطالعه شده

الگوریتم پیشنهاد شده (در شکل ۲) در نرم‌افزار ریاضی مطلب<sup>۱</sup> نسخه ۷/۵ اجرا شده است. برای اثبات کارایی روش ارائه شده در ساختن منحنی‌های مرزی کانتور، قطعه اتصال دهنده بین بال و بدنه یک هواپیمای نظامی، مطابق شکل (۷) به عنوان نمونه آزمایشی بررسی شده است.

1. MATLAB

## ۵-۱ داده‌برداری

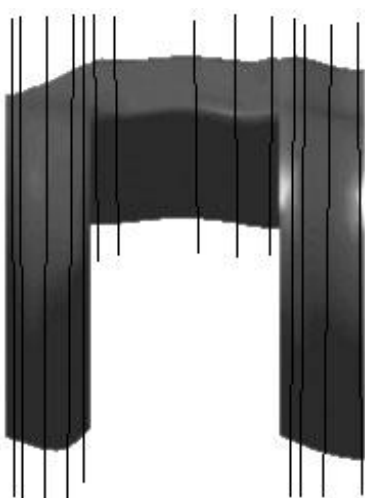
پس از انجام فرایند پوشش‌دهی الکتریکی، تصویربرداری از قطعه با استفاده از دوربین دیجیتال (handyscan-3D) فوتوگرامتری مدل REV، به طور دستی و از زوایای مختلف از جسم مورد نظر انجام شده که نتیجه آن، داده‌های ابرنقاط مطابق شکل (۹) است. داده‌های خروجی این دوربین دیجیتال، فرمت‌های مختلفی از جمله فرمت متنی<sup>۱</sup> و فرمت المان‌بندی شده می‌باشد. برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی، از خروجی دوربین با فرمت متنی استفاده شده که شامل ۲۰۴۰۹۰ مختصه ابرنقاط است. پس از ثبت داده‌های متنی برای تنظیم با محورهای سیستم مختصات جهانی، داده‌ها به نرم افزار Geomagic انتقال داده شده و سپس برای کاهش خطاهای ایجاد شده اصلاح می‌شود. معمولاً خطا در اسکن‌های غیرتماسی، ناشی از عواملی مانند لرزش دوربین، کالیبره نبودن و مانند آن رخ می‌دهد. به علت ناتوانی نرم‌افزار Geomagic در ذخیره سازی اطلاعات با فرمت متنی، داده‌های ابرنقاط به نرم‌افزار Imageware انتقال داده شده تا مجدداً با فرمت متن ذخیره شوند.



شکل ۹ خروجی ابرنقاط به دست آمده پس از انجام فرایند پوشش‌دهی الکتریکی و اصلاح آن در نرم‌افزار Geomagic

## ۵-۲ استخراج لایه‌ها

معمولاً محور تقارن، در حکم راستای ساخت نمونه سریع است. بنابراین مدل تشکیل شده از ابر نقاط، معمولاً در جهت عمود بر محور تقارن برش خورده و سپس داده‌های نقاط در هر لایه، به صفحه میانی لایه تصویر می‌شود (دقت شود که دو لایه تصویر شده در انتهای نمونه به سطوح خارجی جسم تصویر می‌شوند).



شکل ۱۰ نمایش مقاطع میانی لایه قطعه اتصال دهنده بین بال و بدنه هواپیما

همچنین از شیوه‌ای شهودی برای استفاده از عرض این نوار برای اندازه‌گیری تطبیق برش استفاده شده است. بدین صورت که در قسمت‌هایی که کانتور در عمق ثابت است، عرض لایه ضخیم، و در قسمت‌هایی که منحنی کانتور در عمق متغیر است، عرض لایه تا حد امکان نازک در نظر گرفته شده است. لایه‌های در نظر گرفته شده برای این قطعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

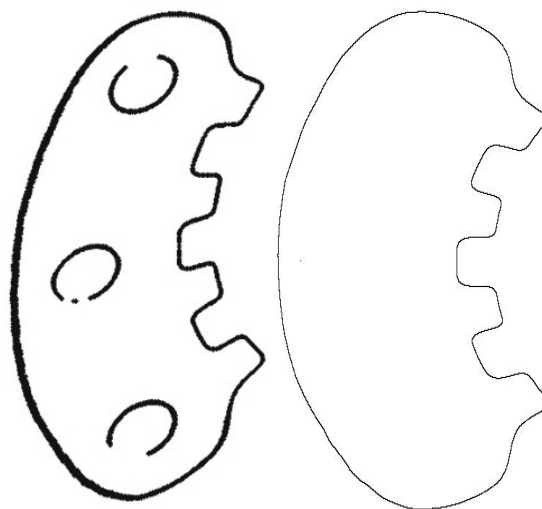
در این مرحله پس از تصویر کردن نقاط هر لایه در صفحه میانی آن لایه، نوار پراکندگی نقاط تشکیل شده و پس از طی مراحل قسمت ۴، نهایتاً منحنی‌های کانتور به دست می‌آید. یک نمونه از نقاط پراکنده و منحنی کانتور به دست آمده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

1. TXT format



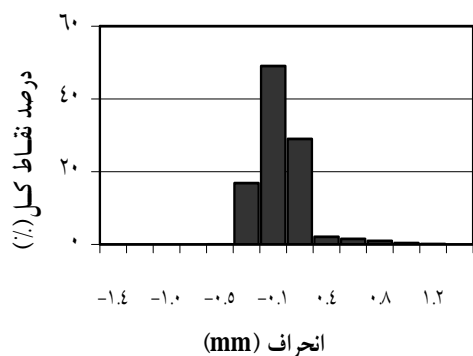


شکل ۱۳ نمونه قطعه مورد نظر



شکل ۱۱ نمونه‌ای از نقاط پراکنده در صفحه میانی و منحنی کانتور تولید شده

در پایان برای بررسی دقت مدل به دست آمده، تحلیل خطا بر روی آن با استفاده از قابلیت مقایسه سه بعدی موجود در نرم افزار Geomagic انجام شده است. مقایسه سه بعدی این نقاط و مدل ایجاد شده، همان طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده، نشان می دهد که حدود ۹۵ درصد از نقاط انحرافی کمتر از  $\pm 0.5$  میلی متر دارند که کمتر از ۰/۲۵ درصد طول قطعه است.

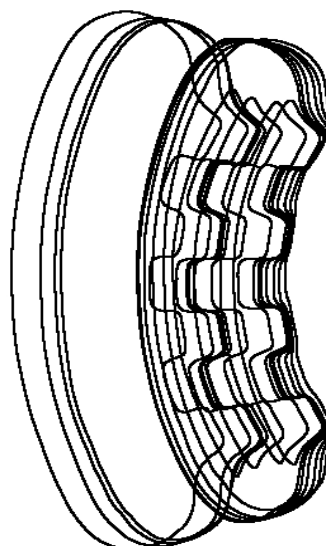


شکل ۱۴ توزیع خطای مدل ایجاد شده نسبت به ابر نقاط

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن بیان اهمیت استفاده از روش نمونه سازی برای ساخت قطعات سامانه های هوایی، یک شیوه جدید و ساده برای مدل سازی لایه های قطعات پیشنهاد و اجرا شده است. الگوریتم پیشنهاد شده می تواند

اکنون پس از قرار دادن منحنی های کانتور تمامی لایه ها در کنار یکدیگر، منحنی های کانتور کل قطعه اتصال دهنده بین بال و بدنه هواپیما به صورت شکل (۱۲) در می آید و پس از انتقال این لایه ها به نرم افزار مدل سازی CATIA، سرانجام مدل فیزیکی آن مطابق شکل (۱۳) تولید می شود.



شکل ۱۲ منحنی های کانتور قطعه

- [6] Vukasinovin, N., Kolsek, T. and Duhovnik, J., "Case Study – surface reconstruction from point clouds for prosthesis production", *Journal of Engineering Design*, Vol. 18, 2007, pp. 475–488.
- [7] Varady, T., Martin, R.R. and Cox, J.; "Reverse engineering of geometric models: an introduction", *Comput Aided Des*, Vol. 29, 1997, pp. 255–268.
- [8] Park, H.T., Chang, M.H., Park, S.C.; "A slicing algorithm of point cloud for rapid prototyping", In: *Proceedings of the 2007 summer computer simulation conference*, San Diego, California, USA, 2007.
- [9] Liu, G.H., Wong, Y.S. and Zhang, Y.F.; "Modelling cloud data for prototype manufacturing", *J. Mat. Process. Technol.*; Vol. 138, 2003, pp. 53-57.
- [10] Lee, K.H., Woo, H.; "Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping", *Comput. & Industrial Eng.*; Vol. 38, 2000, pp. 21–38.
- [11] Zhongwei, Y., "Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping based on properties of NURBS or B-spline", *Precision Eng.*, Vol. 28, 2004, pp. 293–301.
- [12] Huang, M.-C., and Tai, C.C., "The Pre-Processing of Data Points for Curve Fitting in Reverse Engineering", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 16, 2000, pp. 635–642 .

به‌طور مستقیم از روی ابرنقاط، مدل لایه‌ای را برای نمونه‌سازی سریع تولید کند. مراحل مدل‌سازی در این روش شامل تطبیق برش، کاهش داده‌های نقاط و برآزش منحنی بی-اسپلاین می‌باشد.

در این روش، ساخت منحنی به شیوه پیشنهادی بر روی یک قطعه اتصال دهنده بال هواپیما به بدنه، اجرا شده است. سپس برای بررسی دقت روش، داده‌های اصلی قطعه با سطح مدل ایجاد شده، مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که دقت روش در ایجاد منحنی حتی برای قطعاتی با مرزهای پیچیده در حد بسیار خوبی است. نتایج تجربی همچنین نشان می‌دهد که پیاده‌سازی الگوریتم نسبتاً ساده و کارایی آن قابل قبول است.

## ۷- منابع

- [1] Gao., X., Harrison, D.K. and Davies, B.J.; "An approach to the low cost computer aided manufacture of components embodying free form surfaces", In: *Proceedings of IMechE, J Eng Manuf*; Vol. 203, NO. B2, 1989, pp. 119–126.
- [2] Gao, J., Chen, X., Yilmaz, O, Gindy, N.; "An Integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*; Vol. 36, NO. 11, 2008, pp. 1170–1179.
- [۳] صادق رحمتی، مجتبی سلیمی و محمد ایلدارزاده، "فناوری نمونه‌سازی سریع"، موسسه انتشارات جهان جام جم، ۱۳۸۴.
- [4] Colombo, G., Bertetti, M., Bonacini, D. and G. Magrassi; "Reverse engineering and rapid prototyping techniques", in: *Three dimensional image capture and applications VII*, Edited by: B.D. Corner, P. Li and M. Tocheri, *Proceedings of SPIE-IS&T*; Vol. 6056 6056P-1, USA (2006).
- [5] Chia, L.S., "Reverse engineering of high-integrity aerospace Components", Ph.D. Dissertation, University of Warwick, UK, 2001.