

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

یازدهمین کنفرانس



مهندسی ساخت و تولید ایران

کد مقاله: A-10-728-1

کواشنامه ارائه مقاله

بدین وسیله گواهی می‌گردد مقاله با عنوان

هموارسازی منحنی‌های B-Spline با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه

بر اساس معیار انرژی کرنشی

که توسط

امین اسماعیل‌زاده، محمد صادقی،

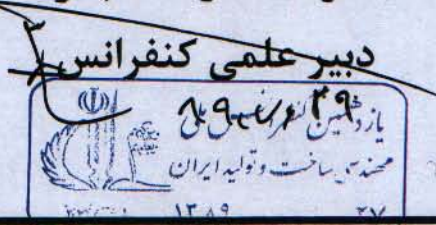
فرهاد کلاهان، بهنام معتکف ایمانی

نگارش شده، در یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران در

دانشگاه تبریز پذیرفته شده و به صورت شفاهی ارائه گردیده است.

با تشکر

دکتر محمدرضا شبگرد





یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران

۲۷-۲۹ مهرماه ۱۳۸۹

دانشگاه تبریز



هموارسازی منحنی‌های B-Spline با استفاده از الگوریتم

جستجوگر ممنوعه بر اساس معیار انرژی کرنشی

امین اسماعیل زاده^۱، محمد صادقی^۱، فرهاد کلاهان^{۲*}، بهنام معتکف ایمانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، kolahan@um.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

امروزه، مهندسی معکوس به طور گسترده در طراحی و ساخت قطعات استفاده می‌شود. در بسیاری از این کاربردها، برای تحلیل یا اصلاح یک قطعه، ابتدا با استفاده از سیستم ابر نقاط به جمع آوری داده از سطح قطعه پرداخته می‌شود. سپس یک منحنی از میان این نقاط تخمین زده می‌شود. معمولاً بدلیل وجود خطا در داده‌های خام، منحنی‌های استخراجی نیز دچار انحرافات ناخواسته هستند. در این مقاله با دو رویکرد به کاهش خطای موجود در داده‌ها و تعیین پارامترهای متناظر برای تخمین یک منحنی B-Spline هموار پرداخته شده است. در مرحله اول، با استفاده از هندسه گسسته، برای رسیدن به نقاط صاف، مکان داده‌ها کمی تغییر می‌کند. پس از آن برای رسیدن به منحنی هموار، پارامترهای مربوط به داده‌های اصلاح شده بهینه می‌شود. در هر دو مرحله، انرژی کرنشی به عنوان معیار هموار بودن در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای حل مسائل بهینه‌سازی از الگوریتم جستجوگر ممنوعه استفاده می‌گردد. در نهایت برای نشان دادن کاربرد الگوریتم پیشنهادی یک مثال بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: طراحی به کمک کامپیوتر - طراحی منحنی‌های هموار - الگوریتم جستجوگر

ممنوعه - انرژی کرنشی.



هموارسازی منحنی‌های B-Spline با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه بر اساس معیار انرژی کرنشی

امین اسماعیل زاده^۱، محمد صادقی^۱، فرهاد کلاهان^{۲*}، بهنام معتکف ایمانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، kolahan@um.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

امروزه، مهندسی معکوس به طور گسترده در طراحی و ساخت قطعات استفاده می‌شود. در بسیاری از این کاربردها، برای تحلیل یا اصلاح یک قطعه، ابتدا با استفاده از سیستم ابر نقاط به جمع آوری داده از سطح قطعه پرداخته می‌شود. سپس یک منحنی این نقاط را تخمین می‌زند. معمولاً بدلیل وجود خطا در داده‌های خام، منحنی‌های استخراجی نیز دچار انحرافات ناخواسته هستند. در این مقاله با دو رویکرد به کاهش خطای موجود در داده‌ها و تعیین پارامترهای متناظر برای تخمین یک منحنی B-Spline هموار پرداخته شده است. در مرحله اول، با استفاده از هندسه گسسته، برای رسیدن به نقاط صاف، مکان داده‌ها کمی تغییر می‌کند. پس از آن برای رسیدن به منحنی هموار، پارامترهای مربوط به داده‌های اصلاح شده بهینه می‌شود. در هر دو مرحله، انرژی کرنشی به عنوان معیار هموار بودن در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای حل مسائل بهینه‌سازی از الگوریتم جستجوگر ممنوعه استفاده می‌گردد. در نهایت برای نشان دادن کاربرد الگوریتم پیشنهادی یک مثال بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: طراحی به کمک کامپیوتر - طراحی منحنی‌های هموار - الگوریتم جستجوگر ممنوعه - انرژی کرنشی

۱- مقدمه

در بسیاری از سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر، برای تحلیل، اصلاح و ماشینکاری قطعات به منحنی‌های مختلف نیاز است. یکی از روش‌های ایجاد منحنی، استفاده از سیستم ابر نقاط است. معمولاً منحنی‌های ساخته شده با این روش، به دلیل وجود خطا در داده‌ها، دارای اعوجاج هستند. این خطاها نتایج طراحی و اصلاح یک قطعه را غیر قابل قبول می‌کند. فرآیند کاهش خطای منحنی‌ها، به هموارسازی منحنی^۱ معروف است که در این زمینه تحقیقات زیادی انجام می‌شود [۱]. قابلیت هموار کردن منحنی تا حد زیادی به چگونگی تخمین منحنی از میان نقاط بستگی دارد. یکی از منحنی‌های معروف و پرکاربرد در صنعت، منحنی پارامتریک B-Spline است. چهار روش برای هموار کردن این نوع منحنی وجود دارد که عبارتند از تغییر نقاط کنترل، تغییر وزن نقاط کنترل در منحنی‌های B-Spline کسری^۲، تغییر مکان داده‌ها و اصلاح پارامترهای متناظر [۲]. هر

^۱ . Curve fairing

^۲ . Rational B-Spline



یک از این روش‌ها مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. در این تحقیق، دو روش آخر برای رسیدن به منحنی هموار استفاده شده است.

ساختار سیستم طراحی منحنی به یک معیار احتیاج دارد تا بتوان هموار بودن منحنی را با آن تشخیص داد. بطور کلی هموار بودن یک منحنی رابطه نزدیکی با تغییرات انحنا در طول منحنی دارد [۳]. بطوریکه انحنای زیاد با نوسانات شدید بیانگر وجود ناصافی در منحنی است. در واقع هرگاه انحنا یکنواخت باشد منحنی صافتر است و نتایج قابل قبول‌تری حاصل می‌شود. سایپدیس [۴] یک معیار مناسب برای هموار بودن منحنی پیشنهاد نموده است: در صورتی که نمودار انحنا یک منحنی پیوسته یا حداقل امکان بصورت یک تابع چند تکه با کمترین تغییرات باشد آنگاه منحنی هموار است.

برای رسیدن به بهترین منحنی بایستی مکان داده‌ها و پارامترهای منحنی بهینه شود. به دلیل وسعت فضای جواب‌ها در هموارسازی منحنی‌ها، برای حل مسائل بهینه‌سازی در این تحقیق از الگوریتم جستجوگر ممنوعه استفاده می‌شود. جستجوگر ممنوعه یک الگوریتم جستجوگر تکرار شونده است که با ایجاد همسایگی و مقایسه شایستگی‌ها، در فضای جواب‌های وسیع، یک مسیر را به سمت حالت بهینه طی می‌نماید [۵]. الگوریتم‌های جستجوگر ماهیتی مقایسه‌ای دارند. بنابراین بایستی از معیارهای کمی در هموارسازی منحنی‌ها استفاده شود. بدین منظور اگر فرض شود منحنی B-Spline یک تیر نازک الاستیک با یک سری نیرو و قید مکانی است، آنگاه منحنی تیر طوری شکل می‌گیرد که انرژی کرنشی ذخیره شده در آن کمینه شود. در این حالت منحنی بوجود آمده هموار خواهد بود [۱]. در این مقاله الگوریتم جستجوگر ممنوعه برای یافتن یک منحنی با کمترین مقدار انرژی کرنشی بکار گرفته می‌شود.

۲- تخمین منحنی B-Spline

به دلیل انعطاف‌پذیری، شرایط پیوستگی مطلوب و کنترل‌پذیری هندسی، B-Spline به عنوان یک منحنی مهم در کاربردهای صنعتی شناخته شده است. این منحنی به صورت پارامتری تعریف می‌شود که شکل کلی آن را یک سری نقطه کنترل می‌کند. نقاط روی منحنی B-Spline از معادله ۱ بدست می‌آید:

$$C(u) = \sum_{i=0}^h N_{i,p}(u) P_i \quad (1)$$

که در آن C نقطه روی منحنی، u پارامتر منحنی، $N_{i,p}(u)$ تابع پایه i ام، p درجه منحنی و P_i نقاط کنترل هستند. تخمین داده‌ها بر اساس حداقل مربع خطاها انجام می‌شود. در این جا خطا بصورت فاصله بین یک نقطه از داده‌ها و نقطه متناظر روی منحنی تعریف می‌شود. اگر مجموع این خطاها کمینه شود، شکل منحنی از داده‌ها پیروی می‌کند. در واقع در فرآیند تخمین، رابطه ۲ که مجموع مربع خطاها است کمینه می‌شود.

$$MLS = \sum_{i=1}^{n-1} |D_k - C(t_k)|^2 \quad (2)$$

در معادله فوق D_k داده k ام و پارامتر متناظر با آن t_k است. با مینیمم کردن MLS یک دستگاه معادلات تشکیل می‌شود که با حل همزمان آن، نقاط کنترل مربوط به منحنی را می‌توان محاسبه نمود. همواره شکل منحنی B-Spline از نقاط کنترل پیروی می‌کند. با توجه به رابطه ۲ در فرآیند تخمین منحنی، مکان نقاط کنترل به داده‌ها و پارامترهای متناظر وابسته است. از این رو شکل نهایی منحنی از داده‌ها و پارامترهای مربوطه تبعیت خواهد کرد.

۳- معیار هموار بودن منحنی

به گفته سایپدیس [۴] در یک منحنی هموار، تغییرات انحنا یکنواخت و پیوسته است. از این رو می‌توان با رسم نمودار انحنا،



هموار بودن یک منحنی را بصورت چشمی بررسی نمود. برای اصلاح داده‌ها و پارامترهای مربوطه، به بررسی فضای بزرگی از جواب‌ها نیاز است؛ بنابراین زمان مورد نیاز برای تعیین پارامترهای بهینه زیاد خواهد بود. از اینرو استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی امری ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله برای یافتن هموارترین منحنی از الگوریتم جستجوگر ممنوعه (TS) استفاده می‌شود. الگوریتم‌های جستجوگر با مقایسه مقدار شایستگی هر جواب به سمت بهترین حالت حرکت می‌کنند. از این رو برای استفاده از TS بایستی یک معیار کمی برای هموار بودن منحنی در نظر گرفته شود.

هموارسازی منحنی‌ها قبل از آنکه بصورت ریاضی تعریف شود می‌تواند تعبیر فیزیکی داشته باشد. فرض می‌شود، منحنی B-Spline یک تیر نازک الاستیک است که تحت تاثیر یک سری نیرو از میان چند وزنه عبور می‌کند. در این صورت منحنی خیز تیر با حداقل انرژی کرنشی هموار خواهد بود [۱]. انرژی کرنشی معیاری مناسب برای تشخیص هموار بودن منحنی‌ها بشمار می‌رود. از این رو اگر انرژی کرنشی کمینه شود، می‌توان انتظار داشت منحنی هموار است. انرژی کرنشی یک منحنی را می‌توان از رابطه ۳ محاسبه نمود:

$$U = \int_0^l (k(s))^2 ds \quad (3)$$

که در آن l طول منحنی و $k(s)$ مقدار انحنا در طول s از منحنی است. در این مقاله، انرژی کرنشی به عنوان معیار هموار بودن، در هر دو مرحله‌ی اصلاح داده‌ها و پارامترهای متناظر بکار گرفته شده است. در مرحله اول هموارسازی، با استفاده از هندسه گسسته [۲]، انرژی کرنشی داده‌ها محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، پس از هر تخمین، انرژی کرنشی مربوط به منحنی B-Spline به صورت عددی محاسبه و به عنوان معیار شایستگی پارامتر داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. اگر داده‌ها و پارامترهای متناظر با آن‌ها دارای حداقل انرژی کرنشی باشد، منحنی بدست آمده به نحو مطلوبی هموار است.

۴- فرآیند بهینه‌سازی

الگوریتم جستجوگر ممنوعه^۱ یکی از روش‌های مناسب در حل مسائل بهینه‌سازی است. این الگوریتم اولین بار توسط گلوور [۵] ارائه شد. الگوریتم TS قادر است به خوبی فضای جواب‌ها را بدون توقف در بهینه‌های محلی جستجو کند. فرآیند جستجو از یک جواب تصادفی شروع می‌شود و با استفاده از مکانیزم تولید همسایگی به جلو حرکت می‌کند. بعد از تعدادی حرکت، یک جواب بهینه یا نزدیک به بهینه بدست خواهد آمد. در هر حرکت، یک سری همسایه در اطراف جواب مبدا تولید می‌شود. مقصد حرکت همسایه‌ای است که مقدار تابع شایستگی آن بهترین باشد. مزیت اصلی الگوریتم جستجوگر ممنوعه فرار از جواب‌های بهینه محلی با استفاده از مکانیزم قبول جواب‌های غیر بهبود دهنده است. مشخصه مهم دیگر این الگوریتم استفاده از یک لیست ممنوعه^۲ به عنوان یک حافظه کوتاه مدت است. لیست ممنوعه شامل تعدادی از حرکت‌های قبلی الگوریتم است که انتخاب مجدد آن‌ها تا چند تکرار بعدی مجاز نیست. استفاده از لیست ممنوعه سیکل مسئله را کوتاه می‌کند؛ چون با استفاده از لیست ممنوعه از برگشت به جواب‌های قبلی موجود در لیست جلوگیری می‌شود. لیست ممنوعه، در هر حرکت از الگوریتم، با اضافه کردن جواب جدید و حذف جواب آخر به روز می‌شود. جزئیات بیشتر مربوط به الگوریتم و نسخه‌های بهبود یافته آن را در ادبیات موضع می‌توان یافت [۶].

یکی از مسائل مهم در بسیاری از کاربردهای مهندسی، تعیین مقدار پارامترهای طراحی برای رسیدن به یک خروجی مطلوب است. در کاربردهای وابسته به طراحی به کمک کامپیوتر، برای رسیدن به یک منحنی B-Spline مناسب، داده‌های خام

¹ . Tabu Search

² . Tabu list



استخراج شده از ابر نقاط بایستی اصلاح شوند. همچنین پارامترهای مربوط به هر داده باید بدرستی تعیین گردند. در تحقیق حاضر، الگوریتم جستجوگر ممنوعه ابتدا برای اصلاح مکان داده‌ها بکار گرفته شده است. برای ایجاد یک همسایه، تعدادی از نقاط به طور تصادفی انتخاب و موقعیت آن‌ها کمی تغییر داده می‌شود. این عمل برای تولید چند همسایگی تکرار می‌شود. سپس انرژی کرنشی تمام همسایگی‌های ایجاد شده محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شود. حرکت به بهترین همسایگی با شرط وجود نداشتن در لیست ممنوعه صورت می‌گیرد. تکرار حلقه الگوریتم با برقراری شرط توقف (تعداد تکرار بدون بهبود) پایان می‌یابد. برای مرحله بعدی بهینه‌سازی و تعیین پارامتر داده‌های اصلاح شده نیز یک منطق مشابه بکار گرفته شده است. در این مرحله نیز تعدادی پارامتر بطور تصادفی انتخاب می‌شود تا مقدار آن‌ها برای ایجاد یک همسایگی، کمی تغییر کند. به منظور ارزیابی همسایه‌ها ابتدا یک منحنی با توجه به داده‌های اصلاح شده و پارامترهای مورد بررسی تخمین زده می‌شود. سپس انرژی کرنشی آن محاسبه می‌شود. همسایه‌ای بهتر است که انرژی کرنشی منحنی مربوط به آن کمتر باشد.

۵- نتایج و بحث

در این بخش به منظور نشان دادن عملکرد بهینه‌سازی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده در این تحقیق، منحنی B-Spline حرف انگلیسی S طراحی می‌شود. برای این کار ۱۰۰ نقطه به عنوان داده‌های خام استخراج شده از ابر نقاط در نظر گرفته می‌شود. منحنی‌ها در چهار حالت مختلف ایجاد می‌شود. انرژی کرنش منحنی حاصل از بهینه‌سازی در هر حالت با استفاده از رابطه ۳ محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است. همچنین به منظور بررسی معیار سایدیس، در شکل ۱ برای هر حالت، نمودار انحنا (خط چین‌ها) در امتداد منحنی (خطوط پررنگ ممتد) رسم شده است. مقدار انحنا در هر نقطه از منحنی، برابر فاصله عمودی آن تا خط چین است. شرایط بررسی شده بدین صورت است:

حالت الف: در این حالت، داده‌های خام برای تخمین منحنی استفاده شده و و پارامترسازی بصورت طول وتر^۱ انجام گرفته است. در این حالت انرژی کرنشی بیشترین مقدار را دارد. به دلیل وجود خطا در داده‌های خام و انتخاب غیر بهینه پارامترها، تغییرات بزرگی در انحنا رخ داده است که نشان دهنده عدم کیفیت منحنی B-Spline ایجاد شده می‌باشد.

حالت ب و ج: در حالت ب، داده‌ها اصلاح نشده‌اند، اما پارامترهای متناظر با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه بهینه شده‌اند. بالعکس در حالت ج، داده‌ها با الگوریتم TS هموار شده است، ولی پارامترهای متناظر بصورت غیر بهینه انتخاب شده‌اند. اگرچه این دو منحنی نسبت به مورد الف هموارتر هستند و انرژی کرنشی کمتری دارند، اما هنوز هم انحرافات نامطلوبی در آنها وجود دارد.

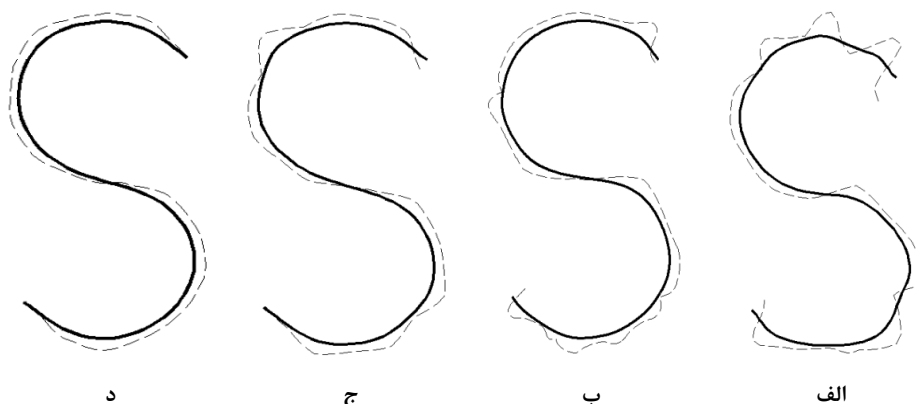
حالت د: در این مورد، هر دو رویکرد بهینه‌سازی روی مسئله اجرا شده است. در مرحله اول داده‌های استخراجی از ابر نقاط هموار شده و پس از آن پارامترهای مربوطه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بهینه شده‌اند. انرژی کرنشی این منحنی کمترین از تمام حالت‌های دیگر کمتر است. همچنین مشاهده می‌شود که انحنا مانند یک تابع یک تکه کمترین تغییر و نوسان را دارد. از این رو می‌توان گفت در این حالت منحنی ایجاد شده بسیار هموارتر از حالت‌های قبل است.

همانطور که ملاحظه می‌شود با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده یک منحنی B-Spline با کمترین انرژی کرنشی طراحی شد که دارای تغییرات انحنای کم و نمودار انحنای یک تکه و یکنواخت است. روند نزولی انرژی کرنشی در جدول ۱ و بهبود منحنی‌ها در شکل ۱ نشان می‌دهد انرژی کرنشی به عنوان یک معیار هموارسازی، مطابقت خوبی با معیار ارائه شده توسط سایدیس دارد. از این رو می‌توان گفت الگوریتم پیشنهاد شده در این تحقیق معیار وی را نیز ارضا می‌کند.

^۱ . Chord length

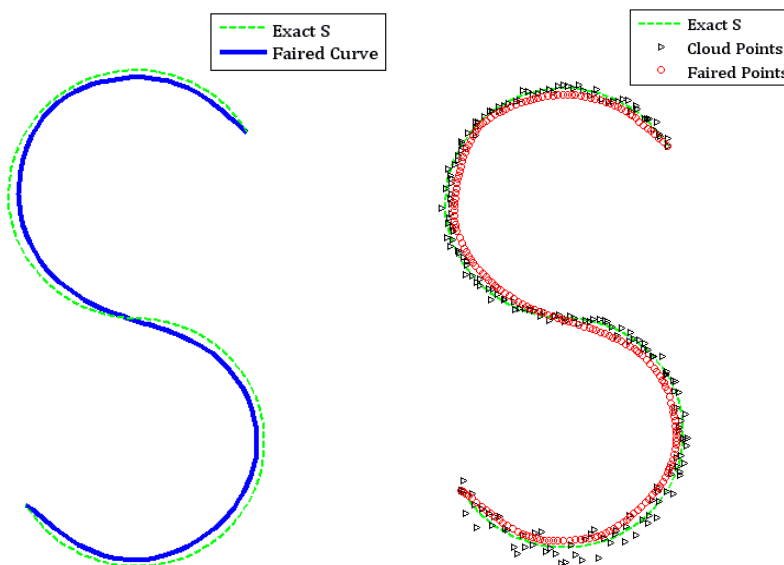
جدول ۱- انرژی کرنشی منحنی‌های مربوط به چهار حالت بررسی شده

انرژی کرنش منحنی	حالت بررسی شده
۵/۳۴	الف) داده‌های خام و پارامترهای غیر بهینه
۲/۶۳	ب) داده‌های خام و پارامترهای بهینه
۲/۲۱	ج) داده‌های هموار شده و پارامترهای غیر بهینه
۰/۷۶	د) داده‌ها و پارامترهای بهینه



شکل ۱- نمودار تغییرات انحنا برای حالت‌های بررسی شده

شکل ۲، توانایی الگوریتم در تخمین منحنی دقیق را نشان می‌دهد. از این‌رو با اصلاح نقاط خام و پارامترهای مربوطه، می‌توان منحنی دقیق را به شکل مطلوبی تخمین زد.



شکل ۲- تخمین منحنی دقیق با بهینه سازی داده‌ها و پارامترهای متناظر



۶- نتیجه گیری

طراحی یک منحنی صاف، همواره به عنوان یکی از موضوعات مهم و مورد توجه در مهندسی معکوس قطعات صنعتی بوده است. دقت یک منحنی B-Spline بستگی به دقت داده‌ها و پارامترهای مربوط به آن‌ها دارد. به دلیل وسعت فضای جواب‌ها در این مسئله، نمی‌توان با روش‌های مبتنی بر سعی و خطا، یک منحنی مناسب طراحی نمود. در این راستا، الگوریتم‌های هوشمند نظیر الگوریتم جستجوگر ممنوعه می‌توانند در یک زمان محاسباتی قابل قبول، یک جواب مناسب و نزدیک به بهینه را ارائه دهند. در این تحقیق، بر اساس انرژی کرنشی و با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه، دو رویکرد برای هموارسازی منحنی ارائه شد. در مرحله اول، خطای موجود در داده‌های خام استخراج شده از ابر نقاط، با تغییر موقعیت نقاط کاهش یافت. سپس، پارامترهای مربوط به داده‌های اصلاح شده بهینه شد تا یک منحنی هموار طراحی شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هموارسازی منحنی‌ها بر اساس معیار انرژی کرنشی می‌تواند معیار تغییرات انحنای پیشنهاد شده توسط سایدیس را نیز ارضا کند.

مراجع

- 1- S. Sapidis, Designing Fair Curves and Surfaces, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, (1994).
- 2- J. H. C. Lee, S. Y. Hong, C. S. Hong, K. Park, D. Kim, "Analytic and discrete fairing of three-dimensional B-spline curves using nonlinear programming", Journal of Computers & Industrial Engineering, Vol. 53, pp. 263-269, 2007.
- 3- J. F. Poliakoff, Y. K. Wong, P. D. Thomas, "An automated curve fairing algorithm for cubic B-spline curves", Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 102, pp. 73-85, 1999.
- 4- N. S. Sapidis, G. Farin, "Automatic fairing algorithm for B-spline curves", Journal of Computer-Aided Design, vol. 22, no. 2, pp. 121-129, 1990.
- 5- NF. Glover, "Tabu search - Part I", ORSA Journal of computing, vol. 1, no. 3, pp. 190-206, 1989.
- 6- F. Kolahan, M. Liang, "An adaptive TS approach to JIT sequencing with variable processing times and sequence-dependent setups", European Journal of Operational Research, vol. 109, pp. 142-159, 1998.