

مدلسازی پل‌ها با استفاده از قطعه‌بندی ابر نقاط حاصل از پهنپاد فتوگرامتری

منصور مهران‌فر^۱، حسین عارفی^{۲*}، فاطمه علی‌دوست^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دکترای فتوگرامتری، دانشگاه علوم کاربردی اشتونگارت

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

چکیده

در سال‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری جهت دستیابی به مدل‌های سه بعدی عوارض شهری در حوزه فتوگرامتری و سنجش از دور صورت پذیرفته است که در این میان، عنصر پل به عنوان یکی از مهمترین سازه‌های شهری، علیرغم اهمیت فراوان در زمینه حمل و نقل، به دلیل پیچیدگی هندسی و ساختاری از این امر مستثنی بوده است. با توجه به پیشرفت فناوری پهنپاد در اخذ داده‌های مکانی، در این مطالعه، از ابر نقاط حاصل از تصاویر پهنپاد برای مدلسازی سه بعدی چهار قطعه اصلی سازه پل شامل نرده، بدنه، پایه و کوله‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور، با بکارگیری دانش موجود در شکل و ساختار پل‌ها و روابط هندسی بین المان‌های تشکیل‌دهنده آنها، الگوریتمی دانش‌مبنای ارائه می‌شود که می‌تواند مدل سه بعدی انواع پل را با فرمت مناسب برای پایگاه داده‌های مکانی فراهم نماید. ابتدا، به منظور قطعه‌بندی ابرنقطه پل، از روش خوشه‌بندی فازی (*fuzzy c-means*) به همراه مقادیر ارتفاعی، طیفی و ویژگی‌های مستخرج از ابرنقاط نظیر چگالی سه بعدی، مقادیر بردار نرمال و قید هم‌صفحه‌ای (*planarity*) استفاده می‌شود. سپس از روش مدلسازی نگاشت مبنا که متناسب با ویژگی‌های هندسی و ساختاری هر قطعه از پل است، برای بازسازی مدل سه بعدی آن قطعه استفاده می‌گردد. روند مدلسازی شامل نگاشت ابرنقاط به فضای دو بعدی، برازش مدل‌های هندسی پایه به نقاط و تعیین موقعیت نقاط مبنا در فضای دوبعدی و سپس گسترش آنها به فضای سه بعدی می‌باشد. جهت ارزیابی روش پیشنهادی، ابعاد المان‌های سازه‌ای موجود در پلان‌های طراحی پل با ابعاد المان‌ها در مدل سه بعدی مقایسه می‌شوند. علیرغم وجود چالش‌های بسیار در مدلسازی، نتایج حاصله در این تحقیق، حاکی از دقت و توانایی بالای الگوریتم پیشنهادی در مدلسازی سه بعدی پل‌ها با هندسه و طراحی‌های مختلف می‌باشد، به طوری که برای داده‌های مطالعاتی، متوسط خطای میانگین و انحراف معیار برابر ۰/۰۳ و ۰/۰۱ متر است.

کلید واژه‌ها: فتوگرامتری، مدلسازی سه بعدی، پل، الگوریتم نگاشت مبنا، ابرنقاط پهنپاد.

* نویسنده مکاتبه کننده: گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۱- مقدمه

پل‌ها از جمله مهمترین زیرساخت‌های شهری هستند که به عنوان یک عنصر تاثیرگذار در پروژه‌های شهر هوشمند مطرح می‌شوند. این اهمیت ناشی از نقش بسیار حساس آنها در حمل و نقل و ارتباطات جاده‌ای و ریلی، مرتبط نمودن قسمت‌های مختلف شهرها به یکدیگر و همچنین عبور از موانع فیزیکی در شرایط توپوگرافی خاص می‌باشد. پایش و کنترل وضعیت پل‌ها از لحاظ کیفی و سازه‌ای به جهت وابستگی‌های شبکه ارتباطی و نظام حمل و نقل خصوصاً در موقعیت‌های بحرانی و همچنین هزینه‌های مالی ناشی از خارج شدن هر پل از این شبکه، سبب شده است تا بحث مدیریت و نگهداری اصولی از سازه‌های پل توسط سیستم مدیریت پل^۱ در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه از جنبه‌های متفاوتی قابل بررسی باشد [۱]. به روزرسانی پایگاه داده‌های مکانی به دلیل تغییر عوارض توپوگرافی و ساخت دست بشر در طی گذر زمان و همچنین نیاز کشورها و سازمان‌های مدیریت منابع به اطلاعات مکانی دقیق و آنی به لحاظ کاربرد این داده‌ها در حوزه‌های مختلف مدیریت، برنامه‌ریزی، نگهداری و توسعه سبب شده است تا امروزه مدلسازی خودکار و یا نیمه خودکار عوارض شهری و دست‌یابی به اطلاعات مکانی دقیق به یکی از مهم‌ترین موضوعات در جوامع فتوگرامتری و سنجش از دور تبدیل شود [۲ و ۳]. مدل‌های سه بعدی سازه‌های شهری همواره از مهمترین و پرکاربردترین ابزارها در جهت مدیریت، برنامه‌ریزی و نگهداری آنها بوده‌اند و ارائه یک مدل سه بعدی دقیق با فرمت مناسب در حوزه علوم مکانی، روند دست‌یابی به اهداف تعیین شده را تسهیل می‌نماید. در این راستا فرآیند مدلسازی جزئیات هندسی پل‌ها با توجه به پیچیدگی هندسی و ساختاری در المان‌های سازه‌ای طراحی شده در ساخت آنها و همچنین مشکلات

موجود در داده‌های مورد استفاده نظیر نویز و گپ، با چالش‌های بسیاری همراه بوده است که همین امر سبب عدم توجه مورد انتظار محققان و پژوهشگران حوزه مدلسازی به ارائه الگوریتم و راهکاری در این زمینه گردیده است. در این تحقیق، قصد داریم با استفاده از دانش موجود در هندسه پل‌های شهری، الگوریتمی را به منظور مدلسازی سه بعدی پل از داده ابرنقطه حاصل از تصاویر پهپاد فتوگرامتری ارائه دهیم. این دانش شامل بررسی هندسه هر یک از اجزاء پل بطور جداگانه و همچنین روابط هندسی موجود در زمان اتصال اجزاء مختلف به یکدیگر می‌باشد. اساس الگوریتم مدلسازی پیشنهادی، استفاده از روش مدلسازی نگاشت مبنا جهت تشکیل مدل‌های دو بعدی هریک از قطعات اصلی سازه پل از داده ابرنقطه حاصل از تصاویر پهپاد و سپس گسترش آنها به فضای سه بعدی می‌باشد. تولید ابرنقطه از تصاویر پهپاد بر مبنای روش‌های تناظریابی تصویری در مناطق هم‌پوشانی، یک روش مقرون به صرفه و در دسترس نسبت به سایر روش‌های جمع‌آوری و تولید ابرنقطه نظیر لیزر اسکن‌های زمینی و دستی می‌باشد [۴ و ۵]. همچنین در روش پیشنهادی، عمده پردازش‌ها در فضای دو بعدی بر روی نقاط هر قطعه صورت می‌پذیرد. تشکیل مدل دو بعدی سطح مقطع قطعات و سپس گسترش آن در فضای سه بعدی، علاوه بر ساده سازی فرآیند بازسازی مدل سه بعدی، منجر به افزایش دقت و سرعت پردازش‌ها می‌گردد [۶]. به دلیل وجود چالش‌هایی نظیر نویز و گپ در داده ابرنقطه تولید شده از تصاویر پهپاد، در فرآیند مدلسازی قطعات، از روش‌های مختلفی نظیر پیش پردازش، تصحیحات هندسی و بهینه‌سازی مدل به منظور کاهش حداکثری میزان تاثیر چالش‌های مذکور در کیفیت و دقت مدل سه بعدی نهایی استفاده می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

با وجود پیشرفت در حوزه مهندسی طراحی و مواد، بخش گسترده‌ای از سازه‌های پل با گذشت زمان و به

^۱ Bridge Managment System

نویز با استفاده از یک فیلتر مبتنی بر تراکم نقاط، شناسایی و حذف شدند. سپس، میزان دقت و توانایی دو الگوریتم قطعه‌بندی یادگیری بدون نظارت *k-means* و رشد ناحیه‌ای جهت استخراج نقاط مربوط به عرشه پل مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص گردید که روش قطعه‌بندی مبتنی بر رشد ناحیه‌ای با دقت ۹۵٪ در شناسایی نقاط عرشه پل، دارای سطح اطمینان و توانایی بالاتری نسبت به الگوریتم یادگیری بدون نظارت *k-means* است [۱۰]. در مطالعه دیگری توسط یو و همکاران (۲۰۱۹)، پس از تولید ابرنقطه از تصاویر پهپاد، اجزاء و المان‌های سازه‌ای پل بر اساس ویژگی‌های هندسی و با استفاده از یک روش قطعه‌بندی مبتنی بر ساختار سوپرپیکسل و بهینه‌سازی گراف‌مینا، شناسایی گردیدند. با استفاده از درخت طبقه‌بندی و هندسه پل، المان‌های ساختاری مختلف از قطعه‌های به دست آمده شناسایی و در نهایت، مدل‌های سطحی آنها تولید شدند. طبق نتایج بدست آمده در این مطالعه، فرآیندهای شناسایی و قطعه‌بندی المان‌های سازه‌ای پل با دقتی بیش از ۸۰٪ صورت پذیرفت. [۱۱]. لو و همکاران (۲۰۱۹) الگوریتمی به منظور شناسایی خودکار المان‌های سازه‌ای پل‌های بتن مسلح شهری از داده ابرنقطه لیزر اسکنر زمینی ارائه نمودند. در این پژوهش، چهار المان سازه‌ای نظیر دال بتنی، پایه پل، کلاhek پایه پل (سر ستون) و شاه تیر از ابر نقاط با استفاده از الگوریتمی تحت عنوان برش^۲، و همچنین مقادیر بردار نرمال بر سطح و هیستوگرام تراکم نقاط شناسایی شدند. ارزیابی نتایج حاصل از اجرا روش پیشنهادی بر روی مجموعه ابرنقاط ۱۰ پل بتن مسلح، نشان‌دهنده دقت ۱۰۰٪ و همچنین سطح اتوماسیون بالا الگوریتم ارائه شده در شناسایی المان‌های سازه‌ای پل می‌باشد [۱۲]. به جهت بررسی میزان جابه‌جایی و تخریب در بخش‌های مختلف یک پل، یه و همکاران

دلایل مختلفی از جمله عدم توجه به معیارهای هیدرولیکی در طراحی، شرایط محیطی نامطلوب و بار ترافیکی سنگین، دچار ضایعه و تخریب شده‌اند. در این رابطه، نگهداری اصولی و به‌هنگام ازسازه پل، علاوه بر افزایش طول عمر و سطح ایمنی سازه، سبب کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی می‌گردد [۷]. در سال‌های اخیر با پیشرفت چشمگیر فناوری‌هایی نظیر اسکنرهای لیزری، پرندهای بدون سرنشین (پهپاد) و همچنین آگاهی فعالان حوزه ایمنی و مهندسی با کاربردهای علم فتوگرامتری در زمینه بازرسی و ارزیابی میزان تخریب سازه‌های پل، تقاضاهای بسیاری برای جمع‌آوری داده‌های مکانی و مدلسازی سازه‌های پل توسط مدیران و برنامه‌ریزان شهری ارائه شده است. به همین جهت کاسمین و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد سه فناوری اخذ داده مختلف نظیر لیزر اسکنر زمینی، فتوگرامتری برد کوتاه و اسکنر مادون قرمز در مدلسازی هندسی ساختارهای سه بعدی پل‌های بتنی پرداختند [۸]. همچنین، پپه و همکاران (۲۰۱۹) با به کارگیری همزمان دو فناوری لیزر اسکنر زمینی و پهپاد فتوگرامتری به بررسی سه‌بعدی و پایش پل‌ها پرداختند. در این مطالعه از فناوری پهپاد جهت بررسی قسمت‌های فوقانی و جانبی پل که برداشت اطلاعات و جزئیات آن‌ها از طریق لیزر اسکنر زمینی میسر نبود، استفاده شده است [۹]. توسعه الگوریتم‌های دقیق و کارآمد به منظور قطعه‌بندی صحیح المان‌های سازه پل، ابزاری مناسب جهت استفاده در فرآیند مدلسازی هندسی قطعات آن می‌باشد. چن و همکاران (۲۰۱۸) روشی جهت تولید ابرنقطه متراکم از تصاویر پهپاد بر اساس روش ساختار ناشی از حرکت (*SFM*) و همچنین قطعه‌بندی آن، به منظور بازرسی و کنترل عرشه پل‌ها ارائه نمودند. در این روش، ابتدا داده‌های

^۱ Structure from Motion^۲ Slicing Algorithm

(۲۰۱۸) راهکاری ساده و در عین حال کاربردی ارائه نمودند. در این روش، ابتدا ابرنقطه پل قطعه‌بندی گردیده و نقاط مربوط به هر یک از اجزاء المان‌های سازه‌ای شناسایی و تفکیک می‌شوند. سپس به نقاط مربوط به هر یک از قطعات اشکال هندسی پایه نظیر صفحه، استوانه، خط و کمان برازش داده می‌شود. در ادامه با بررسی اختلاف میان اشکال هندسی برازش داده شده و نقاط هر یک از قطعات، موقعیت و میزان تخریب هر یک از بخش‌های پل شناسایی می‌گردد. این الگوریتم امکان محاسبه میزان جابجایی‌های نسبی افقی و عمودی المان‌های سازه‌ای را با دقتی در محدوده سانتی متر فراهم می‌سازد [۱۳]. یان و همکاران (۲۰۱۷) الگوریتمی خودکار جهت ساخت مدل‌های المان‌های پل با استفاده از داده لیزر اسکنر سه‌بعدی و تکنیک‌های بینایی ماشین ارائه دادند. در این روش، ابتدا ابرنقطه با استفاده از روش قطعه‌بندی مبتنی بر رشد ناحیه‌ای به سطوح مختلف قطعه‌بندی می‌گردد. سپس برای هر یک از قطعات، ویژگی‌هایی نظیر مقادیر بردار نرمال و پارامترهای بهترین صفحه درجه دو، محاسبه می‌شود. برای شناسایی نوع المان هر قطعه، ویژگی‌های محاسبه شده برای هر قطعه با مجموعه ویژگی‌های موجود در یک کتابخانه از پیش تعریف شده، مقایسه می‌گردند. سپس با مشخص شدن قطعات مربوط به اجزاء پل، برای هر قطعه، مدل مش سه‌بعدی تشکیل می‌شود. در این مطالعه دقت تولید مدل‌های مش سه‌بعدی با استفاده از روش‌های وکسل‌مبنا دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب برابر با ۹۶٪ و ۹۴٪ عنوان گردید [۱۴]. در پژوهشی دیگر سانچز رودریگز و همکاران (۲۰۲۰)، الگوریتمی خودکار به منظور مدلسازی سه‌بعدی پل از داده لیزر اسکنر زمینی ارائه نمودند. الگوریتم ارائه شده شامل سه بخش کلی طبقه‌بندی ابرنقطه با استفاده از اطلاعات هندسی و تجزیه و

تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تولید مدل مش سه‌بعدی از نقاط هرکلاس و در نهایت تولید مدل براساس طبقه‌بندی‌های بنیاد صنعت (IFC^۱) می‌باشد. بررسی نتایج بدست آمده نشان دهنده دقتی برابر با ۸۲٪ در روش طبقه‌بندی ابرنقاط مورد استفاده در این الگوریتم می‌باشد [۱۵].

با بررسی مطالعات پیشین مشخص گردید که مدلسازی سازه پل با استفاده از داده ابرنقاط، اصولاً شامل دو بخش قطعه‌بندی ابرنقطه و مدلسازی هر قطعه و سپس تجمع مدل‌های قطعات برای تولید مدل یکپارچه نهایی است. با اینحال به دلیل پیچیدگی و تنوع شکل هندسی اجزای تشکیل دهنده پل به خصوص بدنه یا عرشه پل و همچنین مشکلات موجود در داده‌های مورد استفاده، روش منحصر به فردی برای مدلسازی که قابل استفاده برای انواع سازه‌های پل باشد، ارائه نشده است. لذا در این تحقیق، یک روش دانش‌مبنا ارائه می‌شود که:

- بر اساس مدلسازی نگاشت‌مبنا جهت کاهش پیچیدگی‌های هندسی پل در فضای سه‌بعدی است،
- برای انواع سازه‌های پل قابل تعمیم و پیاده‌سازی است،
- دارای دقت بهینه در داده‌هایی با نویز و نقص^۲ است،
- مدل نهایی را با فرمت مناسب برای نرم‌افزارهای داده‌های مکانی نظیر سیستم اطلاعات مکانی (GIS^۳) و کد (CAD^۴) فراهم می‌نماید.

۳- روش پیشنهادی

بر اساس آیین نامه‌ها و ضوابط طراحی پل، المان‌های

^۱ Industry Foundation Classes

^۲ gap

^۳ Geospatial Information System

^۴ Computer-Aided Design

ارتفاعی المان‌های پل در فضا، به منظور قطعه‌بندی ابر نقاط، روش خوشه‌بندی فازی *c-means* به کار گرفته می‌شود. الگوریتم فازی *c-means* جهت خوشه‌بندی غیرقطعی مجموعه‌ای از داده‌ها براساس کمینه نمودن یک تابع هزینه از معیار عدم تشابه می‌باشد. در این الگوریتم هر نقطه با ماهیت فازی می‌تواند با درجات عضویت متفاوت به بیش از یک گروه تعلق یابد [۱۶ و ۱۷]. رابطه (۱) تابع هزینه مورد استفاده در این الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$J = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n \sum_{ik}^m u_{ik} D(x_k, v_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$

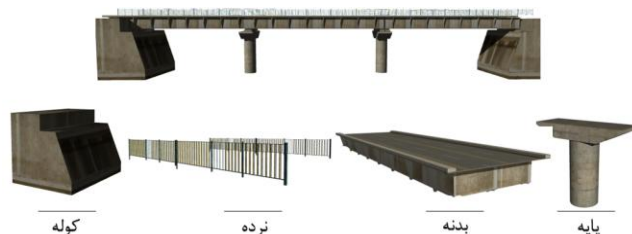
در این رابطه u_{ik} درجه عضویت نقطه k ام در خوشه i ، m درجه فازی و D اختلاف میان مقدار داده و مرکز خوشه می‌باشد. درجه عضویت هر نقطه عددی بین صفر و یک بوده و لزوماً جمع درجات عضویت هر نقطه باید برابر با یک شود. هدف در این الگوریتم، گروه‌بندی مجموعه داده بصورت n بردار p بعدی در داخل c خوشه می‌باشد. با توجه به عملکرد مناسب الگوریتم خوشه‌بندی فازی در مواجهه با داده‌های نویز، میزان دقت و انطباق پذیری بالا، استفاده از این الگوریتم برای قطعه‌بندی ابرنقطه، روشی مناسب و کارآمد به حساب می‌آید [۱۸ و ۱۹].

تشکیل‌دهنده سازه پل عبارتند از: عرشه شامل بدنه اصلی، دال، تیرها و شاه تیرها؛ یاتاقن‌های عرشه؛ کوله پل؛ فونداسیون و پایه‌ها؛ نرده‌ها، گاردریل و جان پناه-های طرفین پل؛ و کابل‌ها. تمرکز اصلی در این پژوهش بر بازسازی سه بعدی چهار جزء اصلی تشکیل‌دهنده سازه پل‌ها شامل قطعات نرده، بدنه (عرشه، پیاده‌رو ها، شاه‌تیرها)، کوله‌ها و پایه‌های پل می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است. اگرچه مدلسازی سایر اجزاء مانند خرپاها و کابل‌ها نیز امکان پذیراست اما با توجه به اینکه هندسه این اجزاء براساس ضوابط طراحی سازه در پل‌های مختلف متفاوت است، این امر سبب کاهش سطح اتوماسیون الگوریتم پیشنهادی می‌گردد. لذا در این تحقیق، از مدلسازی این اجزاء صرف نظرشده است.

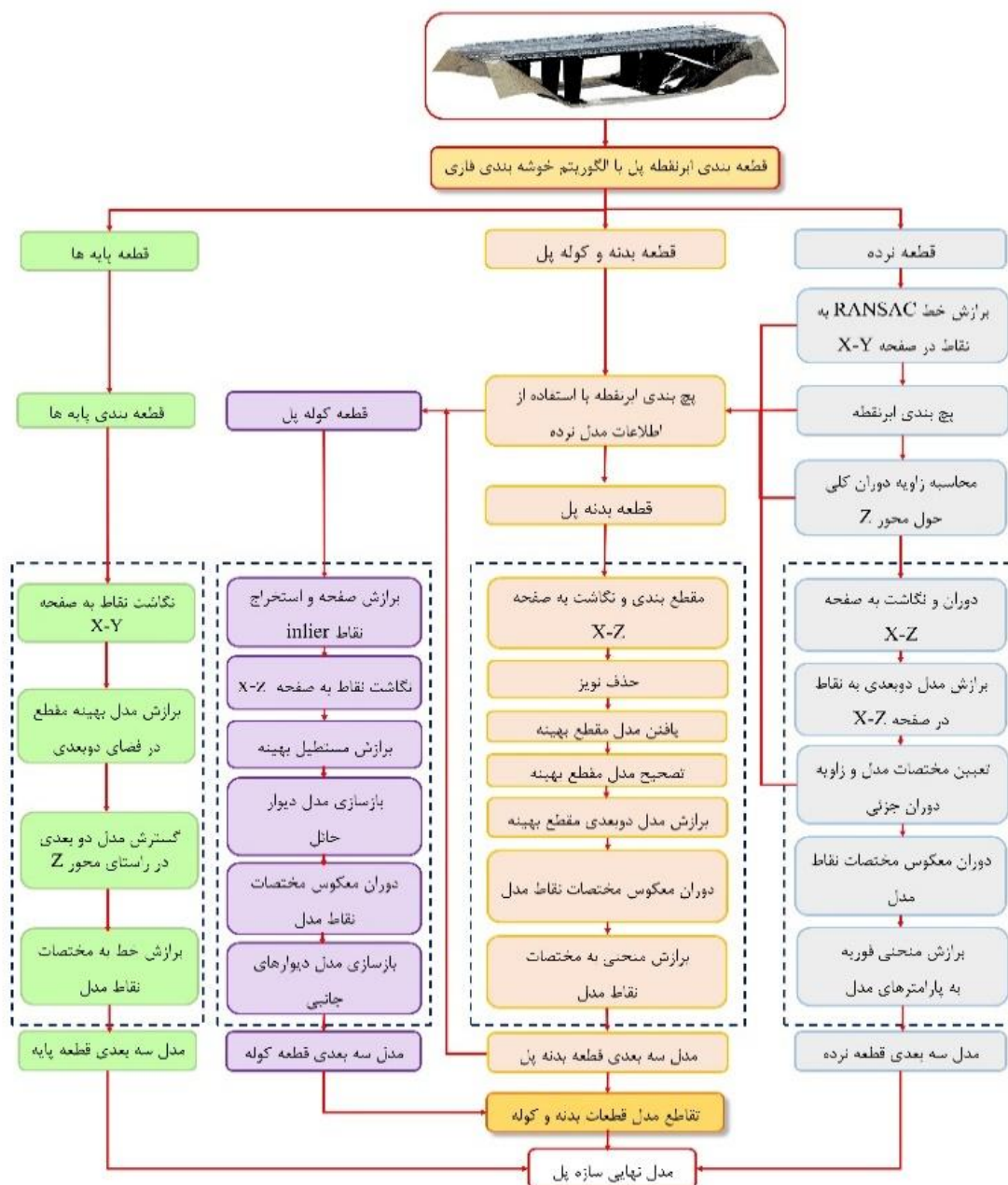
در شکل (۲)، روند کار روش دانش‌مبنا پیشنهادی به منظور مدلسازی سه‌بعدی پل با استفاده از ابر نقاط پهمپاد و الگوریتم نگاشت مبنا ارائه شده است که شامل دو بخش قطعه‌بندی ابر نقاط و سپس مدلسازی هر قطعه به صورت جداگانه و در نهایت، اتصال مدل‌های هر قطعه به یکدیگر است. در ادامه، جزئیات هر بخش ارائه می‌شود.

۳-۱- قطعه بندی ابرنقطه پل

با توجه به نحوه اتصال و قرارگیری سلسله مراتبی -



شکل ۱: اجزاء اصلی تشکیل دهنده سازه پل



شکل ۲: روش پیشنهادی به منظور بازسازی مدل های سه بعدی پل ها با استفاده از الگوریتم نگاشت مبنا

فرآیند قطعه بندی برابر با چهار می باشد که عبارت اند از قطعه نرده، بدنه، پایه ها و سایر بخش های پل (زمین طبیعی و خاکریز). ویژگی های مورد استفاده در فرآیند

برای تشکیل مدل سه بعدی پل، قطعات نرده، بدنه و پایه ها از ابر نقطه و با استفاده از الگوریتم فازی استخراج می شوند. قطعه مربوط به کوله پل پس از اتمام مرحله مدلسازی بدنه پل، از ابر نقطه اصلی استخراج می گردد. لذا تعداد خوشه های مورد نیاز در

باشد. باتوجه به اینکه هدف این تحقیق، ارائه الگوریتمی خودکار جهت مدلسازی انواع پل‌های شهری می‌باشد، برای بازسازی سه‌بعدی مدل نرده در تمامی انواع پل‌ها، از روش برازش مدل مکعب مستطیل به ابرنقطه قطعه نرده بر مبنای الگوریتم نگاشت مبنا^۲ استفاده می‌نماییم. مدلسازی نگاشت مبنا المان‌های خطی نخستین بار توسط صاحب‌دیوانی و همکاران (۲۰۲۰) در بحث بازسازی هندسی مدل سه‌بعدی خطوط ریلی راه‌آهن از داده ابرنقطه رنگی حاصل از تصاویر پهپاد ارائه گردید [۶]. در این تحقیق، با الهام از مقاله [۶]، بازسازی مدل سه‌بعدی قطعات نرده طرفین پل که هر کدام یک المان خطی مجزا می‌باشند؛ انجام خواهد شد. بدین منظور، ابتدا با استفاده از برازش خط بر اساس الگوریتم رنسک^۳، نقاط هر یک از نرده‌های طرفین پل در فضا قطعه نرده شناسایی و استخراج می‌گردند. سپس با هدف افزایش دقت در مرحله برازش مدل نرده و همچنین نمایش بهتر انحنا افقی و عمودی در مدل نهایی نرده، نقاط هر یک از نرده‌ها، پیچ‌بندی گردیده و به بخش‌های کوچکتر تفکیک می‌گردند. برای برازش دقیق و صحیح مدل دو بعدی بر مبنای الگوریتم نگاشت مبنا، پیچ‌های استخراج شده بایستی دوران داده شوند تا بهترین نگاشت را در صفحه $X-Z$ داشته باشند. بنابراین در هر پیچ با محاسبه زاویه بین خطوط RANSAC برازش داده شده به نقاط و محور Y ، زاویه کلی دوران نقاط حول محور Z به دست می‌آید. پس از پیچ‌بندی ابرنقطه نرده و محاسبه زوایای دوران کلی، نقاط هر پیچ دوران داده شده و سپس به صفحه $X-Z$ نگاشت داده می‌شوند. سپس صفحه ای دو بعدی به عنوان مدل مقطع نرده به نقاط موجود در صفحه $X-Z$ برازش داده می‌شود. شکل (۳) دوران نقاط هر پیچ حول محور Z با استفاده از زاویه کلی دوران مربوطه را نشان

قطعه‌بندی شامل مقادیر ارتفاعی و طیفی، چگالی سه-بعدی، مقادیر بردار نرمال و قید هم‌صفحه‌ای^۱ می‌باشد. این ویژگی‌ها با استفاده از نقاط همسایگی موجود در یک فضا کروی یا استوانه‌ای، برای هر نقطه موجود در ابرنقطه بطور جداگانه محاسبه می‌شوند. پارامتر چگالی سه‌بعدی بیان‌کننده میزان تراکم در همسایگی هر نقطه می‌باشد. همچنین محاسبه مقادیر بردار نرمال در یک نقطه از سطح در فضای ابرنقطه، به کمک محاسبه و تجزیه بردارهای ویژه و مقادیر ویژه ماتریس کواریانس نزدیک‌ترین نقاط همسایه، صورت می‌پذیرد [۲۰]. ماتریس کواریانس C برای نقطه‌ای مانند p از طریق رابطه (۲) تعیین می‌گردد:

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \bar{p}) \cdot (p_i - \bar{p})^T \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)، k تعداد نقاط در نظر گرفته شده در همسایگی p_i و p مختصات سه‌بعدی نقاط همسایه می‌باشد.

همچنین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شوند.

$$C \cdot \vec{v}_j = \lambda_j \cdot \vec{v}_j, j \in \{0, 1, 2\} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)، λ مقادیر ویژه و V_j بردارهای ویژه می‌باشند. با استفاده از مقادیر ویژه ماتریس کواریانس و به کارگیری رابطه (۴)، ویژگی هندسی قید هم‌صفحه‌ای که اهمیت بالایی در خوشه‌بندی نقاط یک صفحه مسطح یا نقاط با تغییرات ارتفاعی اندک می‌باشد، قابل محاسبه است.

$$\text{planarity} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1} \quad \text{رابطه (۴)}$$

۳-۲- مدلسازی قطعه نرده

عضو سازه‌ای نرده یا ریل دارای انحنا افقی و عمودی در طول پل می‌باشد و بدلیل اتصال آن به بدنه از طریق پیاده‌روها، هرگونه تغییر در مؤلفه‌های انحنا افقی و عمودی آن، نشان‌دهنده تغییرات انحنا بدنه پل می‌

^۲ Projection-based

^۳ RANSAC

^۱ Planarity

۳-۳- مدل سازی قطعه بدنه

از آنجا که در فرآیند مدل سازی بدنه پل نیز از الگوریتم نگاشت مبنا استفاده می شود، پچ بندی ابر نقاط قطعه بدنه و نگاشت پچ ها به فضای دوبعدی، به عنوان گام اولیه در این فرآیند مطرح می شود. با دانستن این دانش که قطعه نرده از طریق پیاده روها به قطعه بدنه پل متصل بوده و انحنا افقی و عمودی نرده در طول پل نشان دهنده تغییرات انحنا بدنه پل است، می توان از اطلاعات مدل نرده جهت پچ بندی ابرنقطه قطعه بدنه پل استفاده کرد. این اطلاعات شامل مختصات نقاط ابتدا و انتها خطوط هر پچ به همراه مقادیر زوایای دوران کلی و جزئی هر پچ می باشد. پس از پچ بندی ابرنقطه قطعه بدنه، لازم است که ابتدا پچ ها مقطع بندی شوند و سپس به فضای $X-Z$ نگاشت یابند. این کار به منظور بالا بردن میزان دقت برازش مدل های جزئی در هر پچ و همچنین مدل سازی صحیح بخش هایی از پل مانند قسمت قوس در پل های قوسی که شعاع انحنا ثابتی در طول پل دارند، صورت می گیرد. همچنین به منظور حذف نقاط نویز موجود در ابرنقطه ورودی، پس از نگاشت نقاط هر مقطع، شبکه ای مربعی با ابعاد m برای هر سلول، بر روی نقاط مقطع در نظر گرفته می شود. برای هر نقطه که در هر پنجره ای از شبکه قرار گرفته است، تعداد نقاط همسایه آن نقطه در پنجره مورد نظر شمارش می شود. نقطه ای که تعداد نقاط همسایه آن از یک مقدار آستانه کمتر باشد به عنوان نویز شناخته شده و از فضای ابرنقطه حذف می گردد. تعیین مقدار صحیح و کارآمد آستانه مورد نظر و همچنین مقدار پارامتر m وابسته به تراکم و فاصله بین نقاط در ابرنقطه می باشد و معمولاً مقادیری به ترتیب برابر با (۱۰ نقطه) در هر (۵-۲ سانتی متر) در نظر گرفته می شوند. در شکل (۴) نقاط نویز موجود در ابرنقطه ورودی قطعه بدنه یک پل را نشان داده شده است.

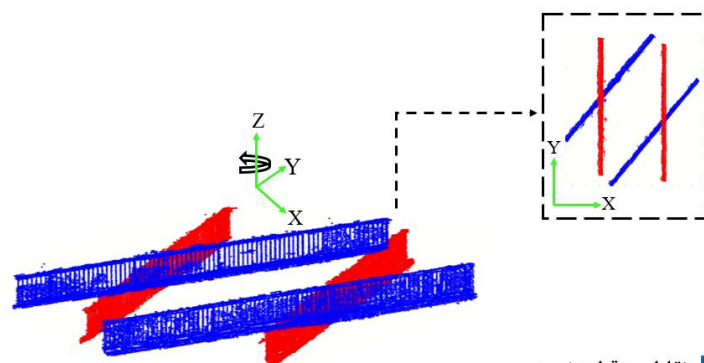
می دهد.

علاوه بر دوران کلی نقاط، به علت انحنای موجود در خطوط المان نرده، هر پچ نیز به طور جزئی در بازه ای مشخص دوران داده می شود. بدین منظور، بهترین مقدار دوران هر پچ با توجه به بیشترین تعداد نقاط موجود در اطراف مدل مقطع، انتخاب می گردد. بنابراین در هر پچ سه زاویه دوران محاسبه می شود که عبارتند از زاویه دوران کلی حول محور Z ، زاویه دوران جزئی حول محور Z (Δaz)، و زاویه دوران جزئی حول محور X (Δax). پس از برازش مدل دوبعدی، با اضافه کردن مؤلفه Y به مختصات نقاط مدل برازش داده شده، مدل سه بعدی نرده هر پچ بازسازی می شود. سپس مدل های سه بعدی از طریق دوران معکوس حول محورهای X و Z ، به فضای اولیه ابرنقطه بازگردانی می شوند.

با توجه به اینکه مدل نهایی نرده از اتصال مدل های جزئی هر پچ تشکیل می شود، در محل اتصال مدل ها به یکدیگر تضاریس مشاهده می شود. به منظور تصحیح مدل سه بعدی نهایی، برای هر مدل جزئی، پنج پارامتر $Z, Y, X, \Delta ax$ و Δaz با استفاده از درون یابی با تابع فوریه محاسبه می شود (رابطه (۵) [۶]).

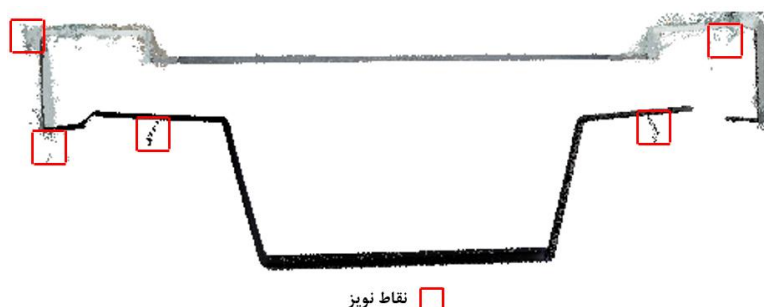
$$P_j(i) = \sum_{k=0}^n (a_k \cos kwi + b_k \sin kwi) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در تابع رابطه (۵)، $P_j: j=[1 \dots 5]$ پنج پارامتر $Z, Y, X, \Delta ax$ و Δaz از قطعات مدل نرده هستند. i شماره قطعات مدل نرده و ak و bk و w ضرایب مجهول تابع درون یابی و n نیز درجه تابع فوریه می باشند. با برازش یک منحنی به هر یک از این پنج پارامتر به صورت مجزا، یک مقدار جدید برای دوران های جزئی، کلی و مؤلفه های مختصاتی Z, Y, X درونیابی می شود که باعث نرم شدن و بهبود مدل در طول مسیر نرده می شود. مدل سه بعدی نهایی پس از برازش منحنی، دارای سطحی نرم و یکنواخت می باشد که در آن انحنا افقی و عمودی در طول مسیر به خوبی اعمال شده است.



نقاط پل قطعه نرده
نقاط پل قطعه نرده پس از دوران با استفاده از زوایای دوران کلی

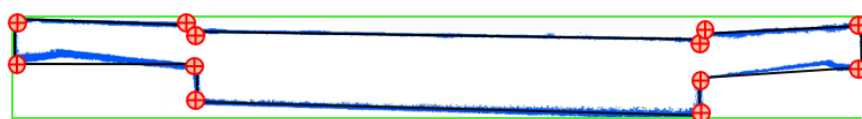
شکل ۳: دوران نقاط هر پل با محاسبه زاویه بین خطوط RANSAC برازش داده شده به نقاط و محور Y



نقاط نویز
شکل ۴: نقاط نویز موجود در ابرنقطه ورودی

باشد. اما در واقعیت به دلایل متعدد از جمله نویز موجود در ابرنقطه، گپ و نقصان داده، امکان دست‌یابی به مدل دو بعدی صحیح در کلیه پل‌ها وجود ندارد. برای حل این مشکل، از میان تمامی مقاطع مدلسازی شده، یک مقطع به عنوان مقطع بهینه انتخاب می‌شود. مقطع بهینه به مقطعی اطلاق می‌گردد که دارای دو شرط باشد: الف) تعداد نقاط مبنا بدست آمده از مقطع با تعداد صحیح نقاط مبنای موجود در تیپ مقطع (مدل هندسی مقطع عرضی با توجه به المان‌های سازه-ای طراحی شده) برابر باشد. ب) خطای ناشی از اختلاف طول اضلاع متناظر مقطع حداقل باشد.

پس از نگاشت نقاط و حذف نویز، مدلسازی دو بعدی هر مقطع از طریق یافتن تعدادی نقطه محدود تحت عنوان "نقاط مبنا" انجام می‌شود. نقاط مبنا، توسط روش‌هایی نظیر یافتن یک مستطیل بهینه برای کل نقاط، برازش خط به نقاط با استفاده از الگوریتم RANSAC، دوران خطوط در فضای دو بعدی و سپس اتصال منظم آن‌ها به یکدیگر صورت می‌پذیرد. شکل (۵) خروجی مدلسازی دوبعدی مقطع قطعه بدنه یک پل از طریق یافتن موقعیت ۱۲ نقطه مبنا را نشان می‌دهد. در شرایط ایده آل، باید امکان استخراج مدل دوبعدی مقاطع عرضی بدنه پل در تمامی پل‌ها وجود داشته



نقاط مقطع پل قطعه بدنه
مستطیل بهینه
نقاط مبنا مقطع عرضی قطعه بدنه
شکل ۵: مدلسازی دوبعدی مقطع قطعه بدنه از طریق یافتن نقاط مبنا

برای تولید مدل سه بعدی مقاطع هر پیچ از قطعه بدنه پل، مدل دوبعدی مقطع بهینه به مقاطع هرپیچ برازش داده شده و سپس از طریق اضافه کردن مقادیر Y به مختصات نقاط مبنا، مدل مربوطه به فضای سه بعدی برگردانده می شوند. به منظور برازش مدل مقطع بهینه به مقاطع هر پیچ، از روش محاسبه پارامترهای انتقال میان دو مقطع (AX و AZ) به کمک نقاط کنترل استفاده می شود. نقاط کنترل از میان نقاط مبنا انتخاب شده و بیشترین پایداری را نسبت به نویز و گپ موجود در ابرنقطه دارا می باشند. با پایان فرآیند بازسازی مدل سه بعدی مقاطع، نقاط مبنا هر پیچ از طریق اعمال دوران معکوس با استفاده از زوایای دوران کلی و جزئی پیچ مربوطه، به مختصات اولیه بازگردانده می شوند. پس از آن با اتصال نقاط بازگردانی شده مقاطع تمامی پیچ ها به یکدیگر، مدل سه بعدی نهایی قطعه بدنه پل تشکیل می گردد. قطعه بدنه پل نیز مشابه قطعه نرده دارای انحناء افقی و عمودی در طول مسیر پل می باشد. انحناء افقی از طریق پیچ بندی ابرنقطه قطعه بدنه پل با استفاده از اطلاعات مدل نرده و انحناء عمودی نیز در طی فرآیند مدلسازی نگاشت مبنا با برازش مدل به نقاط هرپیچ در صفحه $X-Z$ و سپس اتصال آن ها در فضای سه بعدی قابل بررسی و مدلسازی است. جهت نرم شدن مدل بازسازی شده، اعمال بهتر انحناء افقی و عمودی در طول مسیر قطعه بدنه پل و همچنین کاهش اثرات ناشی از پیچ بندی ابرنقطه در محل اتصال مقاطع پیچ ها به یکدیگر، از روش برازش منحنی به نقاط مدل استفاده می شود. درجه منحنی متناسب با طول دهنه پل برازش داده شده است.

۳-۴- مدلسازی قطعه کوله

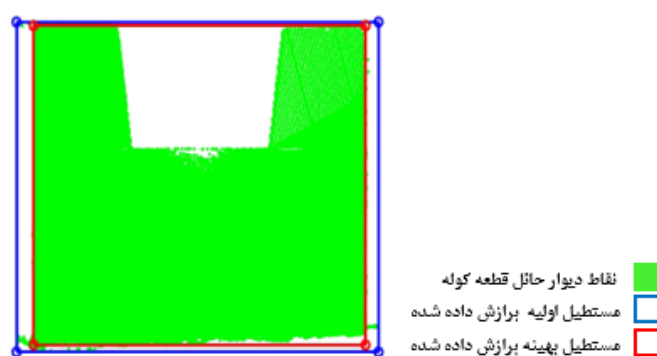
هر یک از قطعات کوله پل، از سه بخش تشکیل شده است که در شکل (۶) نشان داده شده است. این بخش ها شامل یک دیوار حائل و دو دیوار جانبی متصل به آن می باشند. با بررسی طراحی سازه های پل های متفاوت

مشاهده گردید که مدل سه بعدی بدنه پل به دیوارهای حائل کوله پل متصل بوده و عرض مقطع دیوار حائل مقداری حداقل برابر با عرض مقطع مدل سه بعدی بدنه پل را دارد. با تکیه بر این دانش، برای جداسازی قطعات کوله از فضای ابرنقطه اصلی، از اطلاعات پیچ بندی ابرنقطه بدنه پل و همچنین مدل سه بعدی بازسازی شده آن استفاده می گردد.

جهت مدلسازی سه بعدی دیوار حائل قطعه کوله به روش نگاشت مبنا، ابتدا لازم است نقاط مربوط به بخش دیوارحائل از میان ابرنقطه قطعه کوله استخراج گردند. بدین منظور با استفاده از الگوریتم RANSAC، به ابرنقطه هرکدام از قطعات کوله یک صفحه برازش داده می شود. نقاط داخل (*inlier*) صفحه برازش داده شده به عنوان نقاط دیوار حائل از قطعات کوله استخراج می گردند. پس از استخراج نقاط دیوار حائل، این نقاط به صفحه $X-Z$ نگاشت داده شده و سپس یک مستطیل بهینه به آنها برازش داده می شود. با استفاده از روش برازش مستطیل بهینه، موقعیت نقاط مبنای چهار گوشه دیوار حائل تعیین می گردد که در شکل (۷) نشان داده شده است. سپس برای تعیین مؤلفه Y نقاط مبنا و بازگردانی مدل دوبعدی به فضای سه بعدی، از مقادیر مؤلفه Y نقاط *inlier* صفحات برازش داده شده، استفاده می گردد. بدین منظور، با مطالعه و بررسی طراحی المان سازه کوله در پل های متفاوت، مشخص گردید که دیوار حائل المان سازه ای قطعه کوله پل، نسبت به زمین مجاور عموماً در دو وضعیت کاملاً قائم و یا مایل قرار دارد. بر اساس این دانش، در وضعیت قائم، مقدار متوسط مؤلفه Y نقاط *inlier* صفحات برازش داده شده، به عنوان مؤلفه Y نقاط مبنا در نظر گرفته می شود. در وضعیت مایل، از مقادیر بیشترین و کمترین مؤلفه Y نقاط *inlier* صفحات برازش داده شده، جهت تعیین مؤلفه Y نقاط مبنا و بازگردانی مدل دو بعدی به فضای سه بعدی استفاده می شود.



شکل ۶: بخش‌های اصلی قطعه کوله پل

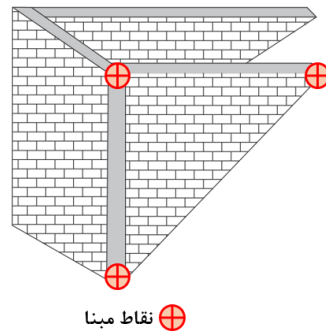


شکل ۷: برازش مستطیل بهینه به نقاط دیوار حائل قطعه کوله

تعیین موقعیت آن، از موقعیت مؤلفه‌های مختصاتی نقاط ابتدا و انتها مدل سه‌بعدی نرده‌های چپ و راست استفاده می‌شود. بدین ترتیب بر اساس فرض در نظر گرفته شده مدل سه‌بعدی هریک از دیوارهای جانبی قطعات کوله ابتدا و انتها پل بازسازی می‌گردد. قطعه بدنه باید به دیوارهای حائل ابتدا و انتها قطعه کوله متصل شود. بدین منظور، لازم است مقاطع ابتدا و انتها قطعه بدنه با صفحه دیوار حائل ابتدا و انتها قطعه کوله تلاقی یابند. لذا معادله خط هر یک از نقاط مبنای مشترک مقاطع تشکیل دهنده قطعه بدنه پل تعیین گردیده و سپس با محاسبه مختصات محل برخورد هر یک از خطوط با صفحات دیوار حائل ابتدا و انتها قطعه کوله پل در فضای سه‌بعدی، مختصات نقاط محل تلاقی و برخورد دو قطعه تعیین گردیده و مدل های سه‌بعدی بدنه و کوله به یکدیگر متصل می‌شوند.

دیوارهای جانبی قطعه کوله پل که اصطلاحاً به آنها بال‌های کوله گفته می‌شود، به دیوار حائل قطعه کوله پل متصل بوده و نسبت به زمین مجاور در وضعیتی قائم و یا مایل قرار دارند. با توجه به قرارگیری این دیوار در بخش‌های ابتدا و انتها پل و در مجاورت زمین‌های اطراف پل، هندسه این دیوارها در فضای ابرنقطه بیشتر بصورت مثلث مشاهده می‌گردد. از این شرایط به عنوان یک فرض برای مدلسازی دیوارهای جانبی استفاده می‌شود. بدین منظور، برای هر کدام از دیوارهای جانبی قطعه کوله پل، سه نقطه مبنا در نظر گرفته می‌شود که موقعیت این نقاط مبنا در شکل (۸) نشان داده شده است.

با توجه به اتصال دیوارهای جانبی به دیوار حائل، از موقعیت نقاط مبنا اضلاع چپ و راست دیوار حائل به عنوان دو نقطه مبنا از مدل سه‌بعدی دیوارهای جانبی قطعه کوله پل استفاده می‌شود. از آنجایی که نقطه مبنای سوم در موقعیت ابتدا و انتها پل قرار دارد، برای

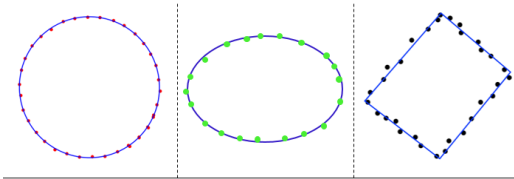


شکل ۸: نقاط مبنا مدل سه بعدی دیوار جانبی قطعه کوله پل

۳-۵- مدل سازی قطعه پایه ها

پایه های پل بر اساس هندسه مورد استفاده در طراحی آن ها به سه دسته پایه مربعی یا مستطیلی، پایه دایره ای و پایه ترکیبی دسته بندی می شوند. جهت مدل سازی سه بعدی پایه های پل با استفاده از الگوریتم نگاشت مبنا، در ابتدا لازم است که نقاط مربوط به هر پایه از ابرنقطه حاوی کل پایه ها تفکیک و سپس مدل سه بعدی هر کدام از پایه ها بطور جداگانه بازسازی گردد. بدین منظور، از یک روش قطعه بندی مبتنی بر رشد ناحیه ای با استفاده از ویژگی فاصله نقاط، برای جداسازی و تفکیک نقاط مربوط به هر پایه استفاده می شود [۲۱ و ۲۲]. جهت مدل سازی سه بعدی دقیق پایه ها، تعیین شکل هندسی صحیح سطح مقطع در راستای قائم و سپس برازش مدل دوبعدی متناسب با آن امری ضروری است. با توجه به وضعیت کاملاً عمودی پایه های پل نسبت به المان های دیگر پل نظیر قطعه بدنه و همچنین زمین مجاور، نقاط مربوط به هر پایه متناسب با ارتفاع آن، در راستای محور Z به پیچ هایی با طول L تفکیک می گردند. مقدار طول L متناسب با دقت مورد نظر در فرآیند مدل سازی و همچنین ساختار هندسی پایه ها تعیین می شود. سپس مدل مربوط به هر پیچ بطور جداگانه بازسازی گردیده و در انتها به یکدیگر متصل می گردند. این امر با هدف مدل سازی صحیح پایه ها با سطح مقطع ترکیبی صورت می گیرد. پس از پیچ بندی نقاط هر پایه، نقاط هر پیچ به صفحه $X-Y$ نگاشت داده می شود. سپس متناسب با شکل هندسی مقطع هر

پیچ که از طریق برازش مدل های هندسی پایه نظیر دایره، بیضی، چهارضلعی و سپس شمارش تعداد نقاط اطراف مدل تعیین می شوند، یک مدل هندسی دو بعدی بهینه به نقاط برازش داده می شود و بدین ترتیب موقعیت دوبعدی نقاط مبنای سطح مقطع هر پیچ تعیین می گردد. شکل (۹) برازش مدل هندسی دو بعدی بهینه به نقاط را نشان می دهد. برای بازگشت به فضای سه بعدی، از مقادیر مؤلفه Z ابتدا و انتها هر پیچ استفاده گردیده و مدل دوبعدی سطح مقطع هر پیچ به مدل سه بعدی تبدیل می شود. سپس با اتصال مدل سه بعدی پیچ های هر پایه به یکدیگر، مدل سه بعدی نهایی پایه پل تشکیل می گردد. در انتها مشابه تصحیح صورت پذیرفته در مدل سه بعدی قطعه بدنه پل، از روش برازش خط به نقاط مدل به منظور کاهش اثرات ناشی از پیچ بندی ابرنقطه در محل اتصال مقاطع پیچ ها به یکدیگر استفاده می شود.



شکل ۹: برازش مدل های هندسی به نقاط قطعه پایه

۴- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

نتایج پیاده سازی هر یک از مراحل روند پیشنهادی در ادامه ارائه می گردد.

۴-۱- مورد مطالعاتی

در این پژوهش از دو داده ابرنقطه متراکم حاصل از تصاویر پهپاد به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی استفاده می گردد. این داده ها مربوط به دو سازه پل قوسی و تیری در آلمان با طول دهانه های متوسط و بلند می باشند که در جدول (۱) نمایش داده شده اند با استفاده از پهپاد *Mavic 2 pro* مجهز به دوربینی با توانایی اخذ تصاویر با رزولوشن ۲۰ مگاپیکسل، اخذ شده اند. کلیه تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۰/۳۶ سانتیمتر، توسط نرم افزار *Pix4Dmapper* پردازش

روش پیشنهادی نشان داده شده است.

شده و ابر نقطه رنگی هر پل تولید شده است. در شکل (۱۰)، داده‌های پل مطالعاتی جهت پیاده‌سازی



(ب)

(الف)

شکل ۱۰: نمای کلی داده مطالعاتی پل شماره یک (الف) و پل شماره دو (ب)

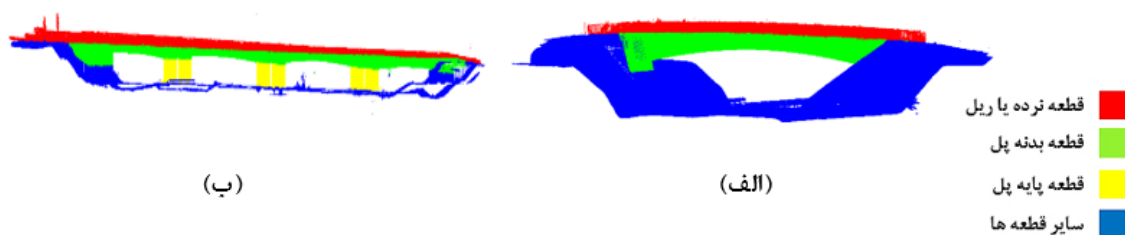
جدول ۱: مشخصات داده مطالعاتی

داده مطالعاتی	تعداد نقاط	فاصله نقاط (متر)	طول سازه (متر)	طول دهانه عرضی (متر)	تعداد پایه	نوع سازه
پل شماره (۱)	۶۱۸۹۴۳۲	۰٫۰۱۶	۴۸	۵	-	قوسی
پل شماره (۲)	۴۰۳۸۸۰۸۲	۰٫۰۱۶	۱۵۲	۲۸٫۲۰	۱۲	قوسی

لحاظ عدم وجود پایه در طراحی هندسی و ساختاری پل، تعداد خوشه‌های مورد نظر در فرآیند قطعه‌بندی برابر با ۳ در نظر گرفته شد. این خوشه‌ها متعلق به قطعات نرده، بدنه و سایر بخش‌های پل (زمین طبیعی و خاکریز) می‌باشد. در داده پل شماره دو با توجه به طراحی و حضور المان‌های پایه در سازه، تعداد خوشه‌ها برابر با ۴ در نظر گرفته شد که خوشه اضافه شده متعلق به قطعه پایه‌های پل می‌باشد. شکل (۱۱) نتایج قطعه‌بندی ابرنقطه داده‌های پل مطالعاتی را نشان می‌دهد.

۴-۲- پیاده‌سازی الگوریتم قطعه بندی ابر نقطه

نخستین گام در الگوریتم پیشنهادی، قطعه‌بندی ابرنقطه پل و تفکیک چهار جزء اصلی تشکیل‌دهنده آن می‌باشد. بدین منظور ویژگی‌هایی ذکر شده در بخش ۳-۱، با در نظر گرفتن شعاع همسایگی برابر با یک متر، برای هر یک از نقاط موجود در ابرنقطه، محاسبه و استخراج گردید. سپس با استفاده از ویژگی‌های تولید شده و مقادیر ارتفاعی و طیفی نقاط، خوشه بندی فازی *c-means* بر روی نقاط اعمال شده و قطعات اجزاء اصلی پل استخراج گردیدند. در داده پل شماره یک به



(ب)

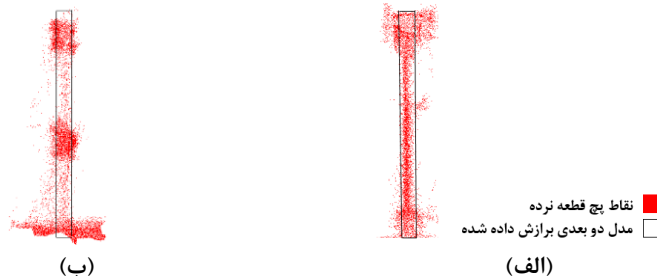
(الف)

شکل ۱۱: خروجی قطعه‌بندی داده مطالعاتی پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

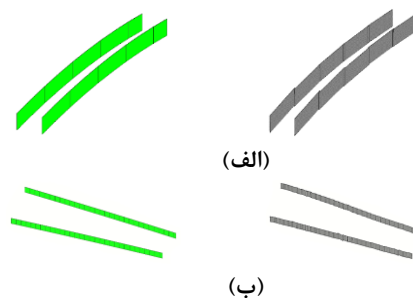
۴-۳- مدل سازی قطعه نرده

برای جدا کردن نقاط مربوط به هر کدام از خطوط نرده طرفین پل ها و همچنین تعیین میزان انحناء افقی هریک از آن ها در ابرنقطه اصلی، پس از نگاشت نقاط به صفحه $X-Y$ ، یک خط $RANSAC$ به کل نقاط برازش داده شد. سپس نقاط موجود در بافر 0.5 متری اطراف این خط حذف گردیده و سپس خط دیگری به نقاط باقیمانده برازش داده شد. به منظور افزایش دقت در مرحله برازش مدل نرده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و همچنین اعمال و نمایش بهتر انحناء افقی و عمودی به مدل نهایی، هر یک از خطوط $RANSAC$ برازش داده شده به بند بند گردیده و سپس با استفاده از نقاط ابتدا و انتها هر پچ و در نظر گرفتن یک بافر 0.5 متری اطراف آن ها، نقاط هر یک از پچ ها شناسایی و استخراج شدند. در ادامه پس از دوران نقاط هر پچ با استفاده از مقادیر زوایای دوران کلی و جزئی، مدل دو بعدی قطعه نرده به نقاط در صفحه $X-Z$ برازش داده شد. این مدل دوبعدی در هر دو داده پل مطالعاتی، یک مستطیل با ابعاد 1.10×0.05 متر است که در

شکل (۱۲) نشان داده شده است. انتخاب ابعاد این مستطیل بر اساس ابعاد متوسط نرده های پل در ابر نقطه هر دو داده مطالعاتی است. در مرحله نهایی، با اضافه کردن مؤلفه Y ابتدا و انتها هر پچ به مختصات نقاط مدل دوبعدی، مدل سه بعدی نرده هر پچ بازسازی گردید. شکل (۱۳) مدل سه بعدی بازسازی شده قطعه نرده داده های پل مطالعاتی نشان می دهد. پس از تشکیل مدل سه بعدی قطعه نرده در هر پچ، برای اتصال مدل ها به یکدیگر و همچنین بازگردانی موقعیت نقاط هر مدل به فضای ابرنقطه اصلی، نقاط مدل هر پچ با اعمال معکوس زوایای دوران کلی و جزئی، دوران داده شدند. همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می گردد، در محل اتصال مدل های هر پچ با یکدیگر، تضاریس وجود دارد که با استفاده از درونیایی به کمک تابع فوریه درجه دو و برازش منحنی به هریک از پنج پارامتر $Z, Y, X, \Delta ax$ و Δaz در مدل های بازسازی شده، این نقص برطرف و مدل نهایی تصحیح گردید.



شکل ۱۲: برازش مدل قطعه نرده به ابر نقاط پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

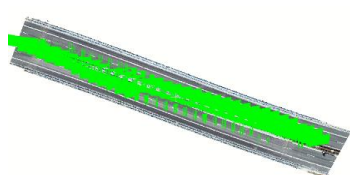


شکل ۱۳: مدل سه بعدی قطعه نرده پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب) قبل (تصویر راست) و بعد (تصویر چپ) از تصحیح اتصال ها

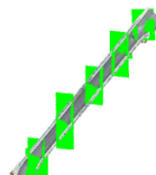
۴-۴- مدلسازی قطعه بدنه

ابرنقطه قطعه بدنه پل با استفاده از اطلاعات مدل نرده پچ بندی و سپس دوران داده شدند که خروجی این فرآیند در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به هندسه پل‌های مورد مطالعه و همچنین المان‌های سازه‌ای طراحی شده در آن‌ها، طول هر پچ برابر با یک متر در نظر گرفته شد. این مقدار علاوه بر اینکه حداکثر فاصله میان مقاطع جهت مدلسازی صحیح و دقیق

انحناء موجود در بخش المان شاه‌تیر پل‌های قوسی است، از خطاهای ناشی از وجود گپ در بخش‌ها و المان‌های مختلف مقطع نیز جلوگیری می‌نماید. پس از نگاشت نقاط بدنه به صفحه $X-Z$ ، طبق توضیحات بخش ۳-۳، شبکه‌ای مربعی با طول ضلع برابر با پنج سانتیمتر بر روی نقاط هر مقطع در نظر گرفته شد و نقاط نویز حذف گردید. شکل (۱۵) خروجی مرحله حذف نویز از نقاط را نشان می‌دهد.

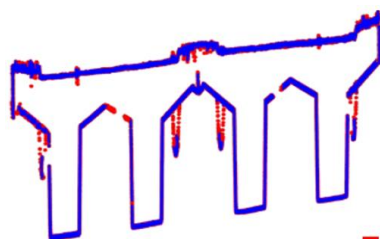


(ب)

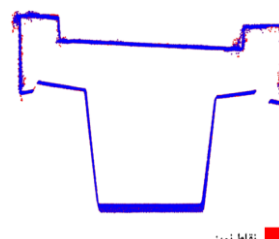


(الف)

شکل ۱۴: خروجی پچ‌بندی قطعه بدنه پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: مرحله حذف نویز از نقاط مقاطع نگاشت شده پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

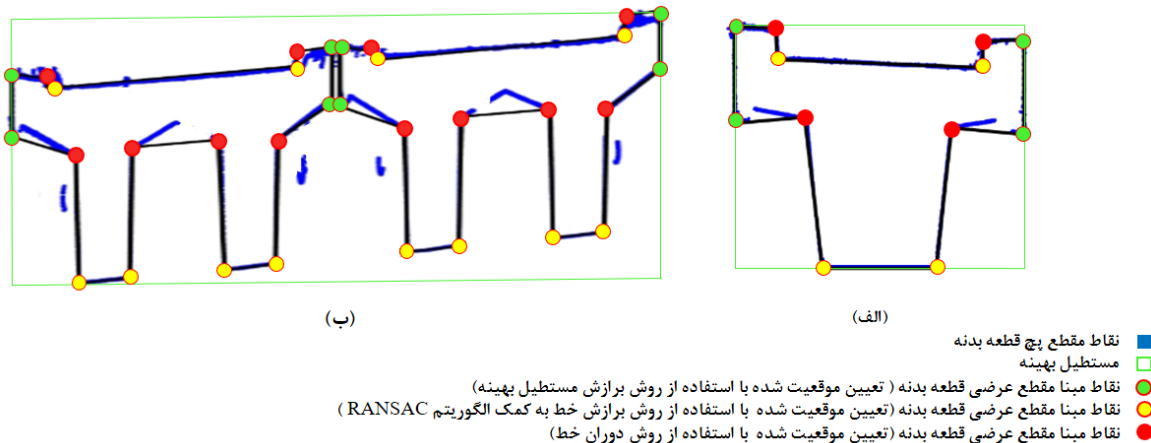
بهینه، موقعیت ۴ نقطه مبنا تعیین می‌گردد. پس از حذف نقاط درون همسایگی این اضلاع، دو خط با استفاده از الگوریتم $RANSAC$ به نقاط باقی مانده مقطع برازش داده می‌شود. از آنجا که در مقطع عرضی قطعه بدنه پل، المان جاده و صفحه تحتانی المان شاه تیر به ترتیب دارای بزرگترین طول در میان المان‌های مقطع عرضی قطعه بدنه هستند، با استفاده از برازش خط $RANSAC$ می‌توان موقعیت ۴ نقطه مبنا دیگر از مدل دوبعدی قطعه بدنه پل را مشخص تعیین نمود. این نقاط مبنا مربوط به ابتدا و انتها المان جاده و همچنین ابتدا و انتها صفحه تحتانی المان شاه تیر

با توجه به تیپ هندسی مقاطع قطعه بدنه پل در داده‌های مطالعاتی، تعداد صحیح نقاط مبنا جهت مدلسازی دوبعدی مقطع قطعه بدنه در داده مطالعاتی پل شماره یک برابر با ۱۲ و در داده پل مطالعاتی شماره دو برابر با ۳۲ می‌باشد. موقعیت این نقاط در هر مقطع با استفاده از روش برازش مستطیل بهینه مطابق شکل (۱۶)، برازش خط با استفاده از الگوریتم $RANSAC$ ، دوران خطوط در فضا دوبعدی و سپس اتصال منظم آن‌ها به یکدیگر تعیین می‌شوند. بدین منظور ابتدا یک مستطیل بهینه به نقاط مقطع برازش داده می‌شود. با استفاده از نقاط موجود در همسایگی اضلاع مستطیل

هستند.

جهت تعیین موقعیت سایر نقاط مبنا باقی مانده، از نقاط مبنا استخراج شده در مراحل قبل استفاده می-شود. در این روش، به مبدا نقاط مبنا مذکور و به شعاعی برابر با عرض مقطع قطعه بدنه، خطی در زوایا ۰-۳۶۰ دران داده می-شود و در هر مرحله نقاط موجود در همسایگی اطراف خط شمارش و ذخیره می-گردند. با مشخص شدن زاویه ای که تحت آن بیشترین تعداد نقطه در همسایگی اطراف خط قرار داشته‌اند، نقاط انتهایی پاره خط که همان نقاط مبنا مدل دوبعدی مقطع عرضی قطعه بدنه پل هستند،

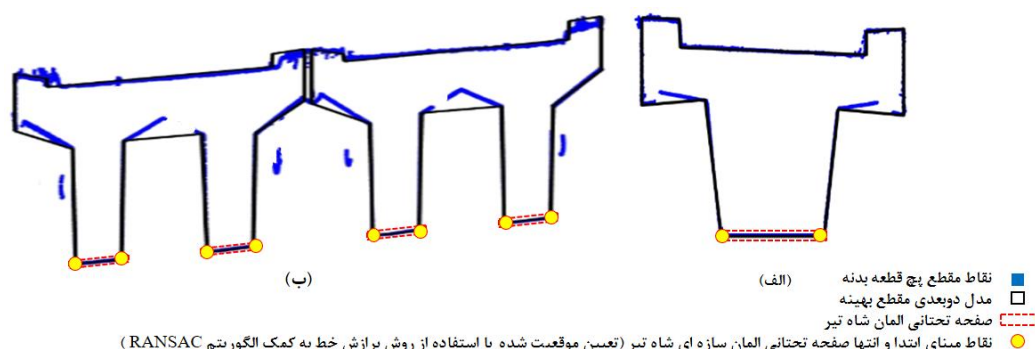
استخراج می-شوند. سرانجام مدل دو بعدی مقطع با اتصال منظم نقاط مبنا به یکدیگر براساس دانش موجود در ارتباط با تعداد نقاط مبنا مورد نیاز جهت مدلسازی دوبعدی مقطع عرضی قطعه بدنه هرپل و شماره اختصاص یافته به هر نقطه مبنا در زمان استخراج مدل تعیین موقعیت صورت می-پذیرد. پس از استخراج مدل دوبعدی هر یک از مقاطع پچ‌های قطعه بدنه، مدل مقطع بهینه قطعه بدنه پل با استفاده از شروط بیان شده در بخش ۳-۳ شناسایی و تصحیح گردید که نتایج تصحیح در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۱۶: مدل مقطع بهینه قطعه بدنه پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

اگر چه میزان جابجایی و تغییر موقعیت نقاط مبنا پس از اعمال تصحیحات، اندک بود، اما جهت دستیابی به دقت حداکثری در مدل سه بعدی نهایی، تصحیح جزئی مدل مقطع بهینه امری ضروری است. در مرحله بعد، با توجه به قوسی بودن پل‌های مطالعاتی، موقعیت صحیح تمامی نقاط مبنا به استثناء نقاط مبنای ابتدا و انتها

صفحه تحتانی در المان سازه ای شاه تیر که در شکل (۱۷) نشان داده شده است، از طریق محاسبه پارامترهای انتقال (AZ و AX) میان نقاط کنترل مدل مقطع بهینه و مدل هر مقطع تعیین گردید. برای تعیین موقعیت نقاط مبنای ابتدا و انتها صفحه تحتانی نیز از روش برازش خط RANSAC استفاده گردید.

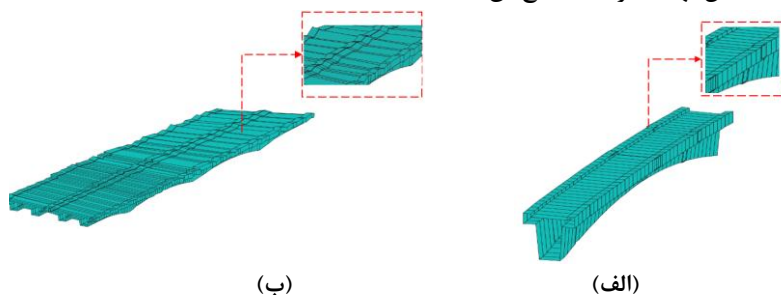


شکل ۱۷: صفحه تختانی المان شاه تیر پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

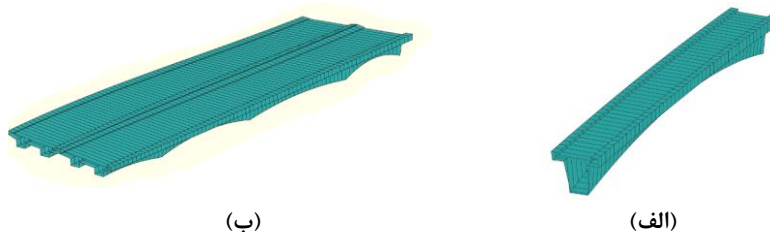
موقعیت یابی نادرست نقاط مبنا می‌گردد. نادرست بودن موقعیت نقاط مبنا و استفاده از آن‌ها به عنوان نقاط کنترل در فرآیند گسترش مدل مقطع بهینه در طول تمامی پل‌ها، سبب ایجاد تضاریس و اعوجاج در بخش‌هایی از مدل نهایی می‌گردد.

به منظور رفع اعوجاجات و تضاریس موجود، کاهش اثرات ناشی از پل بندی ابرنقطه و همچنین اعمال بهتر انحنا افقی و عمودی در طول مسیر قطعه بدنه، به مؤلفه‌های $X-Y-Z$ هر گروه از نقاط مبنای مشترک در مقاطع مدل‌های سه بعدی، یک منحنی درجه دو برازش داده شد. شکل (۱۹) مدل سه بعدی نهایی قطعه بدنه پل را پس از برازش منحنی نشان می‌دهد.

در ادامه پس از استخراج مدل دوبعدی صحیح تمامی مقاطع در هر پل در صفحه $X-Z$ ، با استفاده از مقادیر موقعیت Y ابتدا و انتها هر مقطع، مدل‌های دوبعدی به فضای سه بعدی بازگردانی شدند. جهت تشکیل مدل سه بعدی یکپارچه برای قطعه بدنه پل و همچنین بازگردانی موقعیت مدل‌ها به فضای اولیه، نقاط مدل‌های بازسازی شده مقاطع هر پل با استفاده از زوایای دورانی کلی و جزئی پل مربوطه دوران معکوس داده شده و در انتها مطابق شکل (۱۸) به یکدیگر متصل گردیدند. همانطور که در مدل‌های خروجی مشاهده می‌شود، بخش‌هایی از مدل دارای اعوجاج و تضاریس می‌باشد که علت آن، وجود گپ در ابرنقطه می‌باشد. وجود گپ در ابرنقطه مقاطع سبب تعیین موقعیت اشتباه نقاط و اضلاع مستطیل بهینه و به طبع آن



شکل ۱۸: تضاریس موجود در مدل سه بعدی قطعه بدنه پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

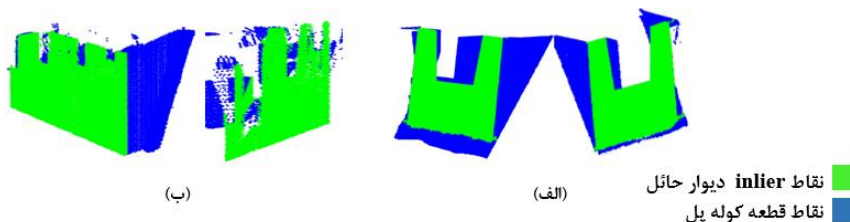


شکل ۱۹: مدل سه بعدی نهایی قطعه بدنه پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

۴-۵- مدل سازی قطعه کوله

با تشکیل مدل سه بعدی نهایی قطعه بدنه، نقاط هر یک از قطعات کوله از طریق روش بیان شده در بخش ۳-۴ و با استفاده از اطلاعات پیچ بندی قطعه بدنه پل و مدل سه بعدی آن استخراج گردید که نتایج استخراج این نقاط در شکل (۲۰) نشان داده شده است. این مجموعه نقاط متشکل از نقاط دیوار حائل، دو دیوار جانبی، بخشی از نقاط قطعه بدنه پل و نقاطی از زمین اطراف پل می باشد. جهت مدل سازی دیوار حائل کوله، لازم است که نقاط آن بطور جداگانه استخراج گردند. به

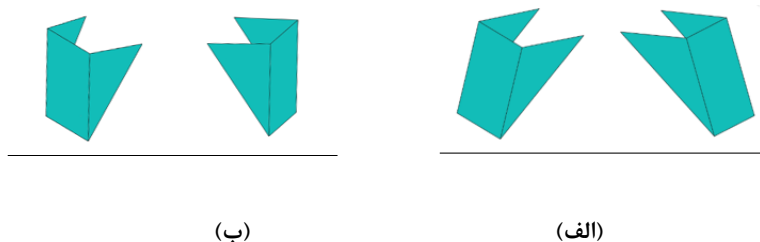
همین منظور به هریک از ابر نقاط قطعه کوله، یک صفحه با استفاده از الگوریتم RANSAC برازش داده شد. مقدار پارامتر حداکثر فاصله برای استخراج نقاط *inlier* برابر ۰/۰۲ متر در نظر گرفته شد. با توجه به گستردگی ابعاد دیوار حائل و همچنین بالا بودن تراکم نقاط آن نسبت به مابقی بخش های قطعه کوله، با استفاده از روش بیان شده نقاط دیوار حائل به راحتی استخراج گردیدند شکل (۲۰) نتایج استخراج نقاط نقاط دیوار حائل قطعات کوله ابتدا و انتها داده های پل مطالعاتی را نشان می دهد.



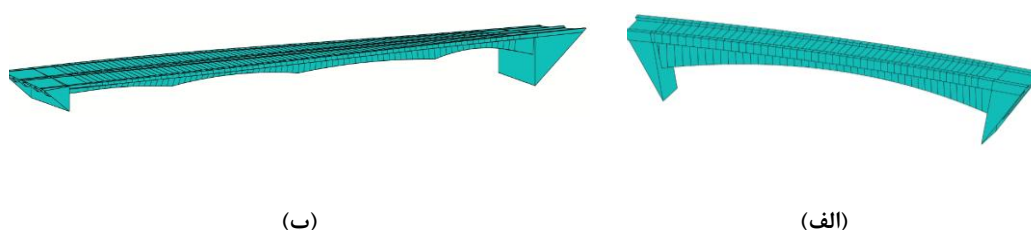
شکل ۲۰: قطعات کوله ابتدا و انتها پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

پس از نگاشت نقاط دیوارهای حائل به صفحه $X-Z$ ، یک مستطیل بهینه به هریک از نقاط دیوار حائل قطعه کوله برازش داده شد که به عنوان مدل دوبعدی دیوار حائل است. سپس با استفاده از مقادیر مؤلفه Y نقاط *inlier*، مدل سه بعدی دیوار حائل بازسازی گردید. جهت تشکیل مدل سه بعدی دیوارهای مایل قطعه کوله نیز براساس فرض بیان شده در بخش ۳-۴ از موقعیت نقاط مبنای مدل سه بعدی دیوار حائل و همچنین نقاط پیچ های ابتدا و انتها مدل سه بعدی قطعه نرده پل، استفاده

گردید. در شکل (۲۱) مدل سه بعدی قطعات کوله پل داده های پل مطالعاتی را نشان داده شده است. پس از تشکیل مدل سه بعدی نهایی قطعه کوله، جهت اتصال صحیح آن به بدنه، موقعیت نقاط محل تقاطع صفحات دیوار حائل ابتدا و انتها پل با خطوط هر یک از نقاط مبنای مشترک مقاطع تشکیل دهنده قطعه بدنه تعیین گردید و سپس مطابق شکل (۲۲) مدل های بازسازی شده دو قطعه در موقعیت نقاط محل تقاطع به یکدیگر متصل گردیدند.



شکل ۲۱: مدل سه‌بعدی قطعات کوله پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)



شکل ۲۲: تقاطع مدل‌های سه‌بعدی قطعات بدنه و کوله پل شماره یک (الف) و شماره دو (ب)

۴-۶- مدلسازی قطعه پایه

جهت ساخت مدل سه‌بعدی هریک از پایه‌ها در داده پل شماره دو، با استفاده از روش بیان شده در بخش ۳-۵، از یک روش قطعه‌بندی مبتنی بر رشد ناحیه، برای استخراج نقاط هر پایه بطور جداگانه استفاده گردید. با توجه به فاصله حداقل ۱ متر میان پایه‌ها پل در طراحی، میزان شعاع جست‌وجو در الگوریتم قطعه‌بندی مبتنی بر رشد ناحیه برابر ۱ متر در نظر گرفته شد. نتیجه قطعه‌بندی پایه پل شماره دو در شکل (۲۳) نشان داده شده است.

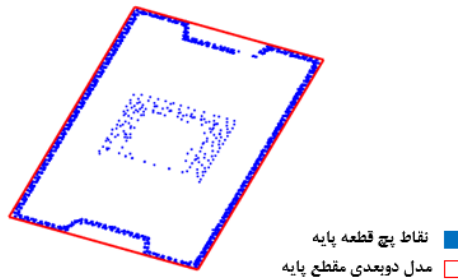
جهت ساخت مدل سه‌بعدی هر پایه، نقاط هر پایه پس از تفکیک، به پچ‌هایی به طول ۱ متر در راستای Z تفکیک گردیده و سپس به صفحه X-Z نگاشت داده شدند. جهت بازسازی مدل دوبعدی مقطع هر پایه،

مطابق شکل (۲۴) یک مستطیل بهینه به نقاط نگاشت شده برازش داده شد.

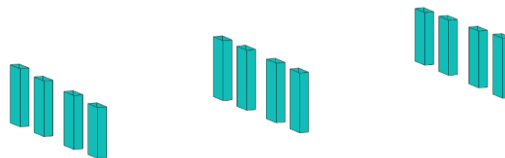
در ادامه پس از تعیین موقعیت دوبعدی نقاط مبنا سطح مقطع هر پچ، از مقادیر مؤلفه Z نقاط ابتدا و انتها هر پچ، جهت بازگشت به فضا ابرنقطه اصلی و بازسازی مدل سه‌بعدی پایه، و مدل دوبعدی سطح مقطع هر پایه به مدل سه‌بعدی تبدیل شد. همچنین به منظور رفع اعوجاجات و تضاریس موجود و همچنین کاهش اثرات ناشی از پچ‌بندی نقاط هر پایه، به مؤلفه‌های X-Y-Z هر گروه از نقاط مبنای مشترک در مقاطع مدل‌های سه‌بعدی، یک خط برازش داده شد. شکل (۲۵) مدل سه‌بعدی نهایی قطعه پایه داده شماره دو را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳: نقاط قطعه پایه پل شماره دو (الف) پیش از قطعه‌بندی و تفکیک و (ب) پس از قطعه‌بندی و تفکیک



شکل ۲۴: برازش مستطیل بهینه در صفحه $X-Z$ به نقاط پایه داده پل شماره دو



شکل ۲۵: مدل سه بعدی قطعه پایه داده پل شماره دو

بخش قطعه بندی داده مطالعاتی را نشان می دهد. برای هر مجموعه داده، ماتریس درهم ریختگی^۱ و همچنین متریک استاندارد کیفیت کامل بودن^۲ با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شده است.

در رابطه (۶)، پارامتر TP نمونه مثبت و صحیح (قطعاتی که به درستی شناسایی شده اند) و FN نمونه منفی و اشتباه (قطعاتی که شناسایی نشده اند) می باشد.

$$Completeness = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{رابطه (۶)}$$

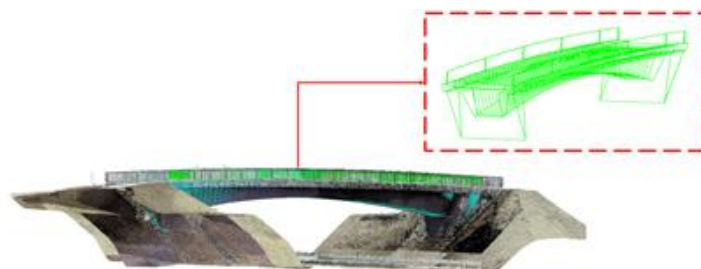
در پایان مدل سه بعدی نهایی سازه پل، با اتصال مدل های هر یک از قطعات به یکدیگر با استفاده از روش شرح داده شده در بخش ۳-۴، تشکیل می گردد. در شکل (۲۶ و ۲۷) مدل سه بعدی سازه داده های پل مطالعاتی نمایش داده شده است. از آنجا که در این امر از مختصات نقاط مبنا مدل سه بعدی قطعات استفاده می گردد، دقت و صحت مؤلفه های مختصاتی این نقاط تاثیر بسزایی در تعیین موقعیت نقاط محل اتصال قطعات خواهد داشت. در پایان خروجی مدل سه بعدی نهایی سازه پل در فرمت برداری $CAD(dx)$ ارائه می گردد.

۴-۷- ارزیابی نتایج

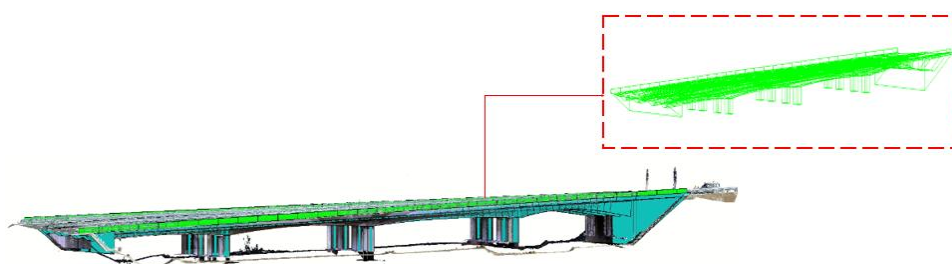
جهت ارزیابی دقت الگوریتم پیشنهادی در بخش قطعه بندی از مقایسه بین قطعات خروجی از فرآیند قطعه بندی پیشنهادی و قطعاتی که بصورت دستی از داده های مطالعاتی تولید شدند، استفاده گردید. جداول (۳ و ۲) به ترتیب نتایج ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در

^۱ Confusion Matrix

^۲ completeness



شکل ۲۶: مدل سه‌بعدی سازه پل شماره یک



شکل ۲۷: مدل سه‌بعدی سازه پل شماره دو

جدول ۲: ارزیابی دقت قطعه‌بندی داده پل مطالعاتی شماره یک

درصد کامل بودن	سایر	بدنه	نرده	قطعه	داده مطالعاتی پل شماره (۱)
۹۶٫۸۱	۱۵۲۲	۷۹۰۶	۲۸۶۹۵۶	نرده	
۹۶٫۵۳	۸۳۸۶	۱۴۴۵۰۰۰	۴۳۵۵۰	بدنه	
۹۷٫۲۱	۴۲۷۳۶۲۱	۱۱۳۸۸۲	۸۶۰۹	سایر	
۹۶٫۸۵	۴۲۸۳۵۲۹	۱۵۶۶۷۸۸	۳۳۹۱۱۵	مجموع	

جدول ۳: ارزیابی دقت قطعه‌بندی داده پل مطالعاتی شماره دو

درصد کامل بودن	سایر	پایه	بدنه	نرده	قطعه	داده مطالعاتی پل شماره (۲)
۹۲٫۹۸	۱۴۸۳۵	۱۱۴۰	۶۷۵۱۷	۱۱۰۶۱۳۳	نرده	
۹۶٫۳۴	۳۰۲۲۲۶	۴۸۹۴۴	۲۳۰۰۱۷۸۶	۵۲۰۶۴۷	بدنه	
۸۶٫۸۴	۳۶۳۸۳	۱۷۱۶۴۵۹	۲۲۱۶۵۹	۱۹۹۲	پایه	
۸۰٫۵۰	۱۰۷۴۶۲۲۹	۶۶۳۴۸	۲۴۱۸۶۵۶	۱۱۷۱۲۸	سایر	
۸۹٫۱۶	۱۱۰۹۹۶۷۳	۱۸۳۲۸۹۱	۲۵۷۰۹۶۱۸	۱۷۴۵۹۰۰	مجموع	

دستیابی به متوسط دقت ۹۲/۴۶٪ در تفکیک قطعات سازه پل، برای هر دو داده مطالعاتی، باعث افزایش دقت در مدلسازی قطعات می‌شود. با توجه به نتایج، در هر دو داده مطالعاتی قطعه بدنه پل نسبت به سایر قطعات به خوبی استخراج شده است. این امر به دلیل یکپارچگی این المان و همچنین متفاوت بودن ویژگی‌های تولید شده نقاط این قطعه در مقابل ویژگی‌های نقاط قطعات متصل به آن شامل نرده و پایه با توجه به طراحی هندسی آن می‌باشد. در داده مطالعاتی پل شماره دو به جهت قرارگیری و اتصال بخشی از پایه‌ها در میان المان‌های قوسی بدنه پل، دقت استخراج نقاط این المان و همچنین نقاط قطعه بدنه متصل به آن کاهش یافته است. همچنین یکی از دلایل کاهش دقت در شناسایی و تفکیک نقاط قطعه نرده در داده مطالعاتی پل شماره دو، وجود نقاط مربوط به علائم راهنمایی و همچنین وسایل نقلیه در مجاورت بخشی از المان نرده در طول مسیر پل می‌باشد اشتباهاً به عنوان نقاط نرده استخراج گردیدند. جهت ارزیابی دقت

الگوریتم پیشنهادی در بخش مدلسازی، از مقایسه فواصل و طول‌های المان‌های موجود در پلان‌های طراحی (مدل مرجع) و مدل سه‌بعدی تولید شده استفاده گردید. در جدول (۴) نتایج این مقایسه برای المان‌های مختلف ارائه شده است. متوسط خطای میانگین و انحراف معیار برای هر دو پل به ترتیب برابر ۰/۰۳ متر و ۰/۰۱۱ متر است. این مقادیر، نشان دهنده کیفیت بالای مدل سه‌بعدی بازسازی شده با استفاده از الگوریتم دانش‌مبنای پیشنهادی می‌باشد. در این میان بیشترین مقدار اختلاف بین مقادیر مدل سه‌بعدی و مقادیر حقیقی مربوط به بخش جاده و برابر با ۴/۵ سانتیمتر است که دلیل آن، وجود نقاط نویز متراکم در انتهای طرفین جاده در ابرنقطه قطعه بدنه پل می‌باشد. به دلیل عدم وجود معیار و روش مشترک در ارزیابی مدل‌های نهایی در این مقاله و سایر مطالعات، به منظور مقایسه عملکرد روش پیشنهادی، تنها دقت نهایی در مراحل قطعه‌بندی و مدلسازی برای روش پیشنهادی و تحقیقات پیشین [۱۴ و ۱۵] در جدول (۵) ارائه شده‌اند.

جدول ۴: ارزیابی دقت مدلسازی هندسی داده مطالعاتی پل

المان سازه ای مجموعه داده		صفحه تحتانی المان بدنه		المان تیری		آبرو		جاده		پیاده رو	
		مدل بازسازی شده (متر)	مدل مرجع (متر)	مدل بازسازی شده (متر)	مدل مرجع (متر)	مدل بازسازی شده (متر)	مدل مرجع (متر)	مدل بازسازی شده (متر)	مدل مرجع (متر)	مدل بازسازی شده (متر)	مدل مرجع (متر)
داده مطالعاتی پل (۱)		۱/۹۸	۲	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۱۹	۰/۲۰	۳/۵۵	۳/۵۰	۰/۷۳	۰/۷۵
داده مطالعاتی پل (۲)		۲/۱۹	۲/۲۰	۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۱۶	۰/۲۰	۱۰/۴۶	۱۰/۵۰	۱/۷۱	۱/۷۵
میانگین خطا (متر)		۰/۰۱۵		۰/۰۳۵		۰/۰۲۵		۰/۰۴۵		۰/۰۳	
انحراف معیار (متر)		۰/۰۰۷		۰/۰۰۷		۰/۰۲۱		۰/۰۰۷		۰/۰۱۴	

جدول ۵: مقایسه دقت فرآیند قطعه‌بندی و مدلسازی

درصد کامل بودن قطعه‌بندی ابرنقطه		درصد دقت نسبی مدلسازی	
راهکار ارائه شده در مطالعه [۱۵]	راهکار پیشنهادی	راهکار ارائه شده در مطالعه [۱۴]	راهکار پیشنهادی
۸۲/۹۰	۹۲/۴۶	۹۵/۲۵	۹۵/۶

RANSAC، پارامترهای مربوط به مدلسازی مقاطع قطعه بدنه و کوله پل، مقدار بهینه پارامترها با استفاده از روش‌های بهینه‌یابی در تمامی قطعات مربوط به پل-های مختلف و متنوع تعیین گردیدند که این امر علاوه بر افزایش سطح اتوماسیون الگوریتم پیشنهادی، باعث انعطاف بیشتر آن در مواجهه با پل‌هایی با طراحی هندسی خاص و پیچیده می‌گردد.

مدت زمان لازم جهت اجرای فرآیند بازسازی مدل سه بعدی پل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، وابسته به مواردی نظیر طول و گستردگی دهانه پل، حجم ابرنقطه ورودی و سطح جزئیات مطلوب در روند بازسازی مدل‌های سه بعدی است. در این میان بیشترین مدت زمان مختص به بازسازی سه بعدی قطعه بدنه پل است. استفاده از پیش پردازش حذف نقاط نویز مقاطع، انتخاب طول مقطع کوتاه جهت مدلسازی صحیح بخش انحنا در پل‌های قوسی و همچنین تعیین موقعیت نقاط مبنا با استفاده از روش‌های شرح داده شده در بخش ۳-۳، از جمله عوامل موثر در کاهش یا افزایش مدت زمان در روند دست‌یابی به مدل سه بعدی قطعه بدنه به شمار می‌روند. در بحث مدلسازی قطعه نرده، مدت زمان لازم جهت تشکیل مدل سه بعدی، متناسب با حجم ابرنقطه ورودی و تراکم نقاط در هر پچ و همچنین تلورانس در نظر گرفته شده در تعیین زوایای دوران جزئی حول محورهای X و Z می‌باشد. در ارتباط با سایر موارد شامل مدلسازی قطعه کوله و پایه، به دلیل استفاده از روش‌های بهینه و برآزش اشکال هندسی پایه در بازسازی مدل سه بعدی، مدت زمان اجرای الگوریتم و دست‌یابی به مدل‌های سه بعدی بسیار کوتاه می‌باشد.

بطور کلی مدت زمان فرآیند قطعه بندی (شامل تولید ویژگی‌های ذکر شده در بخش ۳-۱ و اجرای فرآیند خوشه بندی فازی) برای داده پل شماره ۱ برابر ۲۵ دقیقه و داده پل شماره ۲ برابر با ۷۰ دقیقه بوده است. همچنین، مدت زمان لازم جهت مدلسازی سه بعدی هر یک از داده‌های پل مطالعاتی شماره یک و دو به

بطور کلی از جمله چالش‌های موجود در زمینه بازسازی مدل سه‌بعدی پل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی که تاثیر قابل توجهی در کیفیت و دقت مدل نهایی دارند، می‌توان به دو دسته کلی چالش‌های موجود در ابرنقطه و چالش‌های موجود در تعیین برخی از پارامترهای الگوریتم اشاره کرد. چالش‌های موجود در ابرنقطه که شامل وجود نقاط نویز و نقصان ابرنقطه می‌باشند، از جمله موارد اجتناب ناپذیر در ابرنقاط حاصل از تصاویر پهپاد است. جهت کاهش تاثیر این چالش‌ها در میزان کیفیت و دقت مدل سه‌بعدی نهایی، از تکنیک‌های مختلفی نظیر پیش پردازش و حذف نویز مقاطع، برآزش مستطیل بهینه و یافتن مدل مقطع بهینه در روند مدلسازی سه‌بعدی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی استفاده گردید. شدت وجود این موانع رابطه مستقیم با وسعت و نوع طراحی المان سازه ای پل، کیفیت تصویر برداری و پردازش‌های موجود در فرآیند تولید ابرنقطه دارد، بگونه ای که به عنوان مثال در داده پل شماره ۲ به دلیل گستردگی المان‌های سازه ای و بالا بودن طول دهانه پل، در بخش‌هایی از پل به دلیل مشکلاتی در پرواز پهپاد و عدم اخذ تصویر در زوایای مناسب با مشکلات گپ بسیاری مواجه شدیم. این امر در بخش مدل سازی قطعه بدنه پل، سبب کاهش تعداد مدل‌های دوبعدی مقاطع مورد نظر در یک پچ به دلیل کمبود نقاط موجود در بخش‌های یک مقطع گردید. گاهی میزان و شدت وجود موانع موجود در فضا ابرنقطه به حدی است که پس از انجام پیش پردازش‌ها و موارد بیان شده نیز همچنان مانعی نظیر نویز در بخش‌هایی از فضای ابرنقطه باقی می‌ماند که سبب مشکلاتی نظیر کاهش دقت در مدل سازی دو بعدی مقاطع پچ‌های مختلف پل می‌گردد. کاهش دقت در مدل سازی دو بعدی مقاطع نیز سبب کاهش کیفیت مدل مقطع بهینه گردیده و گسترش آن در طول پچ‌های قطعه بدنه، تاثیر بسزایی در دقت مدل سه بعدی نهایی دارد. در رابطه با چالش‌های موجود در تعیین برخی پارامترهای الگوریتم نظیر طول پچ‌های خطوط

ترتیب برابر ۱۱۵ دقیقه و ۲۹۵ دقیقه بوده است.

۵- نتایج و پیشنهادها

مدلسازی سه بعدی سازه پل از ابر نقاط، یک موضوع جدید در حوزه فتوگرامتری است. بدین منظور، استفاده از الگوریتم نگاشت مبنا در فرآیند مدلسازی سه بعدی، باعث افزایش سطح اتوماسیون و دستیابی به دقت و کیفیت بالا در مدل نهایی سازه‌های پل می‌شود. روش پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق، شامل دو مرحله قطعه‌بندی و مدلسازی سلسله مراتبی (جز به کل) است و قادر است انواع مختلف پل نظیر پل‌های ساده و یا قوسی را بازسازی نماید. در روش پیشنهادی، به دلیل بکارگیری روند نگاشت مبنا، پیچیدگی مدلسازی سه بعدی کاهش یافته و مدل اجزای پل به صورت جداگانه و همچنین در اتصال به یکدیگر مورد کنترل و ارزیابی قرار گرفتند تا مدل یکپارچه پل دارای حداکثر دقت

مراجع

- [1] M. Gholami, A. R. M. Sam, and J. M. Yatim, "Assessment of Bridge Management System in Iran", 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering, Indonesia, 2012.
- [2] A. Nyaruhuma, M. Gerke, G. Vosselman, and E. Mitalo, "Verification of 2D building outlines using oblique airborne images", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 71, pp. 62-75, 2012.
- [3] A. Turlapaty, B. Gokaraju, Q. Du, N. Younan, and J. Aanstoos, "A Hybrid Approach for Building Extraction from Spaceborne Multi-Angular Optical Imagery", Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 5, pp. 89-100, 2012.
- [4] Ch. Torresan, A. Berton, F. Carotenuto, S. F. Di. Gennaro, B. Gioli, A. Matese, F. Miglietta, C. Vagnoli, A. Zaldei, and L. Wallace, "Forestry applications of UAVs in Europe: a review", International Journal of Remote Sensing, Vol. 38, pp. 2427-2447, 2016.
- [5] W. Gruszczyński, W. Matwij, and P. Ćwiakała, "Comparison of low-altitude UAV photogrammetry with terrestrial laser scanning as data-source methods for terrain covered in low vegetation", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 126, pp. 168-179, 2017.
- [6] Sh. Sahebdivani, H. Arefi, and M. Maboudi, "Rail Track Detection and Projection-Based 3D Modeling from UAV Point Cloud", Sensors, Vol. 20, 2020.
- [7] Lu. Deng, Wei. Wang, and Yang. Yu, "State-of-The-Art Review on the Causes and Mechanisms of Bridge Collapse", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 30, 2016.
- [8] P. Cosmin, B. Täljsten, T. Blanksvärd, and L. Elfgrén, "3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods", Journal of Structure and Infrastructure Engineering, pp. 912-924, 2019.
- [9] M. Pepe, D. Costantino, N. Crocetto, and A. R. Garofalo, "3D Modeling of Roman Bridge by The Integration of Terrestrial and UAV Photogrammetric Survey for Structural

باشد، به طوری که برای دو داده مطالعاتی، متوسط خطای میانگین و انحراف معیار برای هر دو پل به ترتیب برابر ۰/۰۳ متر و ۰/۰۱۱ متر است. همچنین به منظور کاهش خطا به دلیل وجود چالش‌هایی نظیر کیفیت داده ورودی و یا تعیین پارامترهای بهینه، راهکارهایی در این تحقیق ارائه شد که در مطالعات آتی می‌توانند مورد بررسی بیشتری قرار گیرند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های شرکت Viscan Solutions GmbH (www.viscan.de) برای در اختیار قرار دادن داده‌های مطالعاتی مورد نیاز جهت انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی نمایند.

Analysis Purpose", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W17, pp. 249-255, 2019.

- [10] S. Chen, L. Truong-Hong, D. Laefer, and E. Mangina, "Automated Bridge Deck Evaluation through UAV Derived Point Cloud", *2018 Civil Engineering Research Conference*, Ireland, 2018.
- [11] P. Yue, Y. Dong, D. Wang, A. Chen, and Z. Ye, "Three-Dimensional Reconstruction of Structural Surface Model of Heritage Bridges Using UAV-Based Photogrammetric Point Clouds", *Journal of Remote Sensing*, 2019.
- [12] R. Lu, L. Brilakis, and C. R. Middleton, "Detection of Structural Components in Point Clouds of Existing RC Bridges", *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 34, pp. 191-212, 2019.
- [13] C. Ye, S. Acikgoz, S. Pendrigh, E. Riley, and M. J. DeJong, "Mapping deformations and inferring movements of masonry arch bridges using point cloud data", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 173, pp. 530-545, 2018.
- [14] Y. Yan, B. Guldur, and J. F. Hajjar, "Automated Structural Modelling of Bridges from Laser Scanning", *Structures Congress*, Colorado, 2017.
- [15] A. Sánchez Rodríguez, S. Esser, J. Abualdenien, A. Borrmann, and B. Riveiro, "From point cloud to IFC: A masonry arch bridge case study", *27th international workshop on intelligent computing in engineering Conference*, Berlin, 2020.
- [16] J. C. Dunn, "A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in detecting Compact Well-Separated Clusters", *Journal of Cybernetics*, Vol. 3, pp. 32-57, 1973.
- [17] J. C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Utah State: publication of Springer, 1981.
- [18] J. Zhuang, X. Liu and X. Hou, "The Fuzzy Clustering Algorithm Based on Weighted Distance Measures for Point Cloud Segmentation", *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, Shanghai, 2008.
- [19] J. Zhao, D. Li, and Y. Wang, "Ancient Architecture Point Cloud Data Segmentation Based on Modified Fuzzy C-Means Clustering Algorithm", *International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis*, Wuhan, 2008.
- [20] H. Amini Amirkolaei, and H. Arefi, "3D Semantic Labeling using Region Growing Segmentation Based on Structural and Geometric Attributes", *JGST*, Vol. 7(2), pp. 1-16, 2017.
- [21] T. Rabbani, F. Van Den Heuvel, and G. Vosselmann, "Segmentation of point clouds using smoothness constraint", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36(5), 2006.
- [22] A. Jagannathan, and E. L. Miller, "Three-dimensional surface mesh segmentation using curvedness-based region growing approach", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 29(12), pp. 2195-2204, 2007.



Bridge Modeling using Segmentation of Point Cloud Captured from Photogrammetric UAV

Mansour Mehranfar¹, Hossein Arefi^{2*}, Fatemeh Alidoost³

1- Ms.c student of Photogrammetry, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Assistant Professor in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- Research Associate, University of Applied Science (HFT), Stuttgart

Abstract

In recent years, great efforts have been made to generate 3D models of urban structures in photogrammetry and remote sensing. 3D reconstruction of the bridge, as one of the most important urban structures in transportation systems, has been neglected because of its geometric and structural complexity. Due to the UAV technology development in spatial data acquisition, in this study, the point clouds generated from UAV-based images are used for 3D modeling of the four main elements of a bridge structure, including the railing, body, base and abutment elements. For this, a knowledge-based algorithm is proposed to provide 3D models of different types of bridge structures in GIS-based data format using the knowledge in the shape, structure and geometric relationships between the bridge's elements. First, the fuzzy c-means clustering method including height and spectral values as well as point-based features such as the 3D density, normal vectors and planarity is used to segment the point cloud. Next, a projection-based reconstruction technique, which is developed based on the geometric and structural features of each bridge element, is proposed to generate a 3D model for that element. The proposed reconstruction workflow includes the projection of point clouds to a 2D space, fitting the primitive geometric models to 2D points, locating the primitive coordinates of the models in the 2D space, and then developing 2D models into 3D space. To evaluate the proposed method, the dimensions of the structural elements in the bridge design plans are compared with the dimensions of the elements in the generated 3D model. Despite the many challenges in modeling steps, the results of this study indicate a high accuracy and ability for the proposed algorithm in 3D modeling of bridges with different geometry and designs, with a mean error and a standard deviation of about 3 cm and 1cm, respectively.

Key words : Photogrammetry, 3D Modelling, Bridge, Projection-based Algorithm, UAV Point Cloud.

Correspondence Address: School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: : +98 21 61114523.

Email : hossein.arefi@ut.ac.ir