

Digital modeling of road bridges in Iran utilizing the CityGML

Nasrin Mollae Kahnesara¹ , Hani Rezayan^{*2} , Javad Sadidi³

1- MSc in Geographic Information Systems, Faculty of geographical sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. Email: Mollae.nasrin@gmail.com

2- (*Corresponding author) Assistant professor of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of geographical sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. Email: hani.rezayan@khu.ac.ir

3- Associate professor of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of geographical sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. Email: j.sadidi@gmail.com

Article Info

Date of receive:

2024/08/09

Date of last review:

2025/02/09

Date of accept:

2025/02/11

Date of online publication:

2025/02/11

Keywords:

Digital models,
 Traffic infrastructure,
 3D modeling,
 CityGML standard,
 Levels of detail,
 Points cloud
 Engineering analyses,
 Bridges management

Extended Abstract

Introduction

This paper presents an approach for digitally modeling road bridges in Iran using the CityGML standard. The goal of this study is to spatially model bridge data by leveraging CityGML standards and GIS. The recommended method enabled modeling bridges with at least 4m length and 2m free height to be modeled with 5cm precision.

The demand for precise 3D modeling of urban infrastructure is rising due to its applications in urban planning, infrastructure management, and disaster mitigation. Bridges, as crucial components of transportation networks, play a significant role in facilitating traffic flow and connecting regions. However, their complex 3D structures and interactions with environmental features, such as rivers and road networks, pose challenges in modeling and analysis. Accurate 3D models are necessary for structural analysis, maintenance planning, and traffic management.

CityGML, an international standard for 3D urban modeling, enables the integration of semantic, geometric, and topological data into a unified framework. Unlike traditional modeling methods that often lack standardization and interoperability, CityGML, with its modular data structures, covers various urban features, including bridges. This study focuses on using CityGML to develop a precise 3D model of road bridges in Iran at Level of Detail 3 (LOD3). The objective is to create a semantically rich and geometrically accurate model that supports advanced analyses and decision-making in bridge management. ... ► Page 26

How to Cite:

Mollae Kahnesara, N. Rezayan, H. Sadidi, J. (2025). Digital modeling of road bridges in Iran utilizing the CityGM. Scientific - Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 34(133), 25-45.

Materials & Methods

Data Collection

The study was conducted on the Kheiroudkenar Bridge, located in Nowshahr, Iran, at geographic coordinates 36.62798°N and 51.58104°E. This bridge, with a length of 70 meters, width of 12 meters, and free height of 5 meters, serves as a critical transportation link. A UAV equipped with a high-resolution camera (focal length: 8.8 mm; spatial resolution: 0.0024 mm) was used to capture 810 overlapping images. Flights were conducted at four different altitudes (4–15 meters) and camera angles between 30° and 90° to ensure complete coverage of the bridge and its surroundings. To ensure precise georeferencing of the data, ground control points (GCPs) were collected using multi-frequency GPS devices with 3cm precision and located where they had high visibility in the images.

Data Processing

Images were processed using Agisoft Metashape and the Structure-from-Motion (SfM) algorithm. This technique automatically aligns overlapping images and generates a dense point cloud with over six million points. SfM's capability to estimate camera parameters, such as focal length and lens distortion, makes it suitable for creating accurate 3D models from aerial imagery.

The initial point clouds were de-noised to remove outliers and then segmented into distinct bridge components, including the deck, supports, railings, and ramps. This segmentation enabled the creation of separate models for each structural element.

Modeling

3D models of the bridge were developed at multiple Levels of Detail (LOD), ranging from LOD1 (basic geometry) to LOD3 (detailed geometry). Each LOD represents varying levels of precision and detail, catering to different analytical needs. At LOD1, an overview of the bridge structure is provided, while LOD2 and LOD3 offer more precise structural features. CityGML facilitated the classification of bridge components into groups such as BridgePart, BridgeInstallation, and Bridge Construction Element, each with specific geometric and

semantic attributes. This classification supports detailed analysis and management of bridge components, ensuring comprehensive coverage of the structural and functional aspects of the bridge.

Results & Discussion

This study produced a georeferenced 3D model based on the CityGML standard, suitable for integration into 3D modeling systems and Geographic Information Systems (GIS). The model includes detailed representations of bridge components classified under appropriate CityGML categories, enabling precise analysis and management. The parametric modeling process ensured high accuracy, with the generated point clouds having a mean error of approximately 0.040873 meters. The feasibility of using CityGML for precise bridge modeling was demonstrated, as was its ability to integrate bridge data with other urban elements. CityGML's multiple levels of detail provide flexibility in modeling, allowing for the presentation of varying levels of detail depending on the required analysis. LOD1 depicts the basic geometry of the bridge, suitable for general visualization and preliminary assessments. LOD2 includes more detailed geometries, ideal for structural analysis and more precise visualizations. LOD3 provides highly detailed features, including specific structural elements and components, essential for in-depth engineering analyses and maintenance planning.

Conclusion

The research concludes that CityGML's data structures are highly effective for bridge modeling, meeting the needs of 3D modeling systems and GIS applications. The developed models provide precise and detailed information about bridge structures, facilitating better management, maintenance, and analysis.

CityGML enables the integration of new bridge elements and their dynamic relationships, expanding the model's applicability for various use cases. Future studies should focus on extending the model to include different types of bridges and developing dynamic relationships among bridge components. This will enhance the usability and robustness of the model for detailed urban analyses and provide a comprehensive tool for urban planners, engineers, and emergency responders.



صفحات ۴۵ - ۲۵

فصلنامه علمی - پژوهشی

اطلاعات جغرافیایی (سپهر) دوره ۳۴، شماره ۱۳۳، بهار ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

doi <https://doi.org/10.22131/SEPEHR.2025.2034750.3085>

مدل سازی دیجیتال پل های جاده ای ایران با استفاده از CityGML

نسرین ملایی کهنه سرا^۱، هانی رضائیان*^۲، جواد سدیدي^۳۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سیستم های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران Mollae.nasrin@gmail.com۲- (*نویسنده مسئول) استادیار گروه سنجش از دور و سیستم های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران hani.rezayan@khu.ac.ir۳- دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران j.sadidi@gmail.com

چکیده

ایجاد مدل های دیجیتال با دقت و جزئیات مناسب از راه ها و جاده ها یکی از نیازهای روبه رشد در حوزه مدیریتی و اجرایی مرتبط با راه است. پل ها اجزای مهمی در زیرساخت های ترافیکی هستند که ماهیت سه بعدی آن ها در فرآیند برداشت، بازرسی و نگهداری نقش اساسی دارد. بر این اساس، مقاله حاضر با هدف مدل سازی سه بعدی مکانی و دیجیتالی پل های جاده ای، با استفاده از استاندارد CityGML و به وسیله تکنیک های نقشه برداری، فتوگرامتری و GIS انجام شده است. برای این منظور عناصر کلیدی ساختاری پل مانند پیلون ها و مهاربندها با برجسب BridgeConstructionElement و سایر اجزاء مانند رمپ ها، نرده ها و آنتن ها با برجسب BridgePart و BridgeInstallation در قالب ماژول Bridge در استاندارد CityGML تعریف شده اند. مدل سه بعدی پل در سطح جزئیات LOD3 اجرا شده است که برای مدل سازی رویه های خارجی سازه ها مانند ساختمان ها و پل استفاده می شود. به علاوه مدل سه بعدی عوارض مرتبط با پل شامل توپوگرافی، مبلمان شهری، کاربری زمین و عوارض آبی در سطح جزئیات مربوطه از سطح ۱ تا سطح ۳ تعریف و اجرا شده اند. به عنوان نمونه مطالعاتی یک پل جاده ای با نام خیرودکنار واقع در محور آمل-چالوس در شهرستان نوشهر عکسبرداری شده و سپس با استفاده از الگوریتم SfM ابر نقاط و به دنبال آن اجزای پل استخراج شده اند. به این ترتیب، مدل سه بعدی پل براساس مدل توسعه داده شده CityGML ایجاد شده است. نتایج نشان می دهند که استاندارد CityGML امکان ایجاد مدل های سه بعدی از پل ها را به صورت یکپارچه با سایر عوارض محیطی فراهم می آورد. مدل حاصله ویژگی های لازم برای نمایش سه بعدی و انجام تحلیل های هندسی و توپولوژیک برای کمک به مدیریت یکپارچه سازه، عارضه آبی و روند ترافیکی پل ها را دارد. روش پیشنهادی که مبتنی بر عکسبرداری است امکان مدل سازی با دقت ۵ سانتی متر برای پل های با طول دهانه بزرگ تر از ۴ متر و ارتفاع آزاد بالاتر از ۲ متر را فراهم می نماید.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۱۹

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۱۱/۲۳

واژه های کلیدی:

مدل های دیجیتال؛
زیرساخت های ترافیکی؛
مدل سازی سه بعدی؛
استاندارد CityGML؛
سطوح جزئیات؛
ابرنقاط؛
تحلیل مهندسی؛
مدیریت پل ها

استناد به این مقاله:

ملایی کهنه سرا، ن.؛ رضائیان، ه.؛ سدیدي، ج. (۱۴۰۴) مدل سازی دیجیتال پل های جاده ای ایران با استفاده از CityGML؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۴(۱۳۳)،

۲۵-۴۵

۱- مقدمه

LOD3^۳ است. به این ترتیب امکان یکپارچه‌سازی پل‌ها با سایر عوارض محیطی از جمله سایر پل‌ها، جاده، توپوگرافی، رودخانه‌ها و مبلمان شهری فراهم می‌شود. داده مزبور امکان نمایش و تحلیل یکپارچه عارضه پل را در محیط‌های نرم‌افزار از جمله نرم‌افزارهای GIS می‌دهد. علاوه بر مدل‌سازی، به منظور تأمین داده‌های مورد نیاز برای بررسی نمونه اجرایی پیاده‌سازی مدل مزبور، در این مقاله براساس تکنیک‌های نقشه‌برداری اعم از عکسبرداری، تولید ابر نقاط، استخراج عوارض، اقدام به برداشت یک پل جاده‌ای نمونه شده است.

براین اساس آنچه مقاله حاضر را از سایر تحقیقات مشابه که در ادامه معرفی شده‌اند متمایز می‌کند، عبارت است از تعریف اجزای پل در قالب برچسب‌های عمومی ارائه شده ذیل ماژول پل در CityGML. همچنین در این مقاله از نرم‌افزار FME Workstation به عنوان محیط نرم‌افزاری تخصصی برای مدل‌سازی استفاده شده است که قابلیت اتصال به محیط‌های تحلیل GIS را دارد و در سایر تحقیقات مرتبط کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، ملاحظات ویژه‌ای که در زمینه برداشت پل در این مقاله لحاظ شده، از جمله طراحی پرواز صورت گرفته در قالب ۴ سطح پروازی، از دیگر وجوه تمایز آن با تحقیقات مشابه به شمار می‌آید.

این مقاله از پنج بخش اصلی تشکیل شده است: در بخش نخست، مقدمه‌ای بر مسئله و ضرورت انجام تحقیق ارائه شده و مطالعات پیشین مرتبط بررسی شده‌اند. بخش دوم مبانی نظری است و بخش سوم به جمع‌آوری داده‌ها و روش تحقیق اختصاص دارد که اجزای مورد استفاده در این فرآیند معرفی می‌شوند. در بخش چهارم، ارزیابی داده‌ها و نتایج حاصل از آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت، بخش پنجم به نتیجه‌گیری پژوهش و ارائه پیشنهادهایی برای مطالعات آتی اختصاص دارد.

پل‌های جاده‌ای به‌عنوان یکی از اجزای اصلی زیرساخت‌های راه‌سازی، دارای ماهیتی سه‌بعدی هستند. دسترسی به اطلاعات دقیق از تمامی اجزای پل، شامل سواره‌رو، رمپ‌ها، اجزای جانبی، ستون‌ها، تیرهای زیر پل و عوارض متقاطع مانند رودخانه، جاده و سایر پل‌ها برای مدیریت بهینه آن ضروری است. در این راستا، وجود ساختار داده‌ای استاندارد که بتواند اجزای پل و روابط میان آن‌ها و عوارض مرتبط را تعریف کند، مورد نیاز است. این ساختار باید قابلیت نمایش، ذخیره‌سازی، بازیابی و تحلیل داده‌های مربوطه را فراهم کند.

استفاده از ساختارهای داده استاندارد نظیر CityGML^۱ علاوه بر قابلیت تعریف داده‌های مرتبط با پل، امکان تعریف اجزای محیطی مرتبط با پل نظیر توپوگرافی، مبلمان شهری، رودخانه‌ها و کاربری زمین در قالب یک مدل یکپارچه را دارد. در حال حاضر نرم‌افزارهای اطلاعات مکانی (GIS) مطرح مانند ArcGIS Pro و QGIS قابلیت فراخوانی داده‌های CityGML و امکان استفاده از آن‌ها در فرآیندهای تحلیلی متریک و توپولوژیک را فراهم آورده‌اند. این امر منجر به گسترش استفاده از ساختار داده CityGML می‌شود.

این مقاله، با بررسی اجزای تشکیل‌دهنده پل و مشخصات مکانی و روابط بین آن‌ها، مدل داده پل را در قالب CityGML طراحی و ارائه می‌نماید. در این راستا، مشخصات استاندارد CityGML برای تعریف اجزای پل بررسی و برچسب‌های مرتبط برای هر جزء مشخص شده است. در این تحقیق، پل‌های جاده‌ای که برای عبور خودروها طراحی شده‌اند و دهانه‌ای بزرگ‌تر از ۴ متر دارند، به‌طور ویژه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش قابل تعمیم به سایر پل‌های مشابه است.

مسئله اصلی این مقاله، استفاده از استاندارد CityGML برای مدل‌سازی دیجیتال پل‌های جاده‌ای در سطح جزئیات

1- City Geographic Markup Language - CityGML

2- Geographic Information System - GIS

3- Level of Detail - LOD

سه بعدی نهایی. این روش قابلیت مدل سازی پل های دارای ویژگی های هندسی پیچیده از جمله پل های طبقاتی ارائه کرده است. دقت مکانی مدل حاصله حدود ۱ متر برآورد شده است.

همچنین تحقیق Wang et al (۲۰۱۸) الگوریتم هایی برای تبدیل ابر نقاط لیدار با قدرت تفکیک بالا به مدل های سه بعدی، به منظور مدل سازی اشیای شهری مانند ساختمان ها، گیاهان، جاده ها و خطوط برق با قدرت تفکیک حدود ۵۰ سانتی متر ارائه کرده است. این پژوهش قابلیت انطباق تکنیک های مدل سازی مبتنی بر رویه های متشکل از اجزای محدود^{۱۲} را با نیازهای مدیریت شهری بررسی می کند. برای این منظور، الگوریتم هایی برای کاربردهای مختلف از جمله اسکن لیزری هوایی^{۱۳}، اسکن لیزری زمینی^{۱۴} و اسکن لیزری متحرک^{۱۵} در تحقیق مزبور بررسی شده است.

در تحقیق انجام شده توسط Pepe et al (۲۰۲۰-۱)، با توجه به ماهیت چندمقیاسی CityGML، به مدیریت سه بعدی میراث فرهنگی شهری پرداخته شده است. مطالعه موردی این تحقیق مربوط به شهر تاران^{۱۶} در ایتالیا است که در قالب CityGML، مدلی سه بعدی از تغییرات شهر تاریخی تاران^{۱۷} را از قرن نوزدهم تا زمان حال تهیه و ارائه کرده است. در این راستا وضعیت فعلی پل با پردازش ابر نقاط حاصل از اسکن لیزری زمینی و مدل سازی پارامتریک اجزای پل با دقت مکانی حدود ۲۵ سانتی متر مدل سازی شد. وضعیت تاریخیچه ای پل نیز با مکان مرجع سازی اسناد نقشه ای به پل متصل شده اند. نتیجه حاصله در سطح جزئیات LOD3 در محیط نرم افزاری FME تعریف و ایجاد شده است. این مدل ها به صورت یکپارچه با داده های معنایی غنی، نظیر تاریخ ساخت، تغییرات بازسازی شده، و ارتباطات مکانی پل با محیط اطراف، ارائه شده اند.

به صورت مشابه در تحقیق Achutan et al (۲۰۲۱)، از

درخصوص پیشینه پژوهش باید گفت؛ تاکنون تحقیقاتی معدود برای مدل سازی پل های جاده ای با استفاده از CityGML انجام شده است. تحقیق انجام شده از سوی Sithole et al (۲۰۰۶) به استخراج مقاطع عرضی پل ها از ابر نقاط^۱ حاصل از داده های لیدار^۲ با قدرت تفکیک پایین پرداخته است. دقت مکانی پروفیل های حاصله حدود ۲ متر است که امکان استفاده از این پروفیل ها برای ایجاد شمایی سه بعدی از مدل سه بعدی دیجیتال^۳ پل با دقتی حدود ۲/۵ متر وجود دارد.

تحقیق Soergel et al (۲۰۰۸) از تلفیق عکس های ارتوفوتو و داده های راداری InSAR^۴ برای استخراج رویه دیجیتال زمین^۵ و سپس استخراج رویه هندسی^۶ پل ها و عوارض مرتبط از جمله سطح آب رودخانه های متقاطع با پل پرداخته است. خروجی حاصل از روش سرشکنی بلوکی^۷ استفاده شده در این تحقیق رویه ای سه بعدی با دقت مکانی حدود ۲/۵ متر بوده است.

در تحقیق Cheng et al (۲۰۱۵) نیز به استخراج مدل سه بعدی دیجیتال پل با استفاده از داده های لیدار با قدرت تفکیک متوسط پرداخته شده است. در این تحقیق پس از تعیین واحدهای ساختاری^۸ تشکیل دهنده پل فرآیندی شامل پنج مرحله ارائه شده است: (۱) استخراج نقاط پل از داده های لیدار با استفاده از روش مورفولوژی معکوس^۹، (۲) تقسیم بندی^{۱۰} بر اساس اتصال برای شناسایی بخش های مختلف پل، (۳) شناسایی واحدهای ساختاری پل با استفاده از خط مرکزی^{۱۱} و تکنیک های اسکن دوبعدی، (۴) شناسایی و بازسازی ساختارهای مسدود یا شکسته و (۵) تولید مدل

- 1- Point Cloud
- 2- Light Detection and Ranging (LiDAR)
- 3- Digital Elevation Model (DEM)
- 4- Interferometric Synthetic Aperture Radar - InSAR
- 5- Digital Surface Model - DSM
- 6- Geometric Surface
- 7- Block Adjustment
- 8- Structural Units
- 9- Inverse Morphological Mathematical Method
- 10- Segmentation
- 11- Defining Structural Units Using Central Line

12- Mesh

13- Airborne Laser Scanning (ALS)

14- Terrestrial Laser Scanning (TLS)

15- Mobile Laser Scanning (MLS)

16- Taranto

متفاوت بین BIM و GIS و بالاخص تبدیل مدل‌های سه‌بعدی صلب^۷ به مدل‌های داده مبتنی بر سطح^۸ و بالعکس مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تحقیق روشی مبتنی بر گراف^۹ را برای تسهیل ادغام داده‌های BIM و GIS با هدف به حداقل رساندن اطلاعات از دست رفته، پیشنهاد می‌دهد. به علاوه در این تحقیق به امکان بهبود مدیریت شهری و پروژه‌های ساخت‌وساز با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی CityGML اشاره شده است.

در تحقیق Yamane et al (۲۰۲۳) از روش SfM برای مدل‌سازی سه بعدی پل و از یادگیری عمیق مبتنی بر Mask R-CNN برای تشخیص موقعیت و هندسه آسیب‌های سازه‌ای مانند خوردگی در تصاویر پل استفاده شده است که با صحت ۹۴٪ استخراج شده‌اند. در مدل سه بعدی پل حاصل شده نواحی آسیب‌دیده، با محدوده‌های رنگی به همراه مشخصات توصیفی نمایش داده می‌شوند. به این ترتیب زمینه لازم برای اجرای بهینه انواع فرآیندهای نگهداری و بازرسی پل به وجود آمده است.

در تحقیق انجام شده توسط Chen et al (۲۰۲۴) از داده‌های اسکنر لیزری سه‌بعدی^{۱۰} برای مدل‌سازی پل‌های منحنی^{۱۱} استفاده شده که دارای ساختار و اجزای خاص پیچیده‌تری نسبت به سایر پل‌ها هستند. در این تحقیق پل منحنی تایزچینگ^{۱۲} با شعاع انحنای ۱۱۰۰ متری مدل‌سازی شده و مدل پارامتریک خمیده درجه ۳ به عرشه این پل با حداکثر اختلاف ۰/۱۷ درصد با پلان طراحی پل برازش داده شد. نتایج در قالب CityGML تعریف و ایجاد شده‌اند.

در تحقیق Biljecki et al (۲۰۱۴) موضوع افزودنی داده‌ها در ساختار CityGML مورد بررسی قرار گرفته و روشی برای شناسایی اجزای مشترک میان سطوح جزئیات CityGML ارائه شده است. این روش به کاهش ۲۰ درصدی حجم مدل‌های

ابرنقاط حاصل از لیدار برای مدل‌سازی سه‌بعدی یک پل در اسکس بریتانیا استفاده شده است و نتایج را در ساختار CityGML و در قالب محیط نرم‌افزاری تعاملی^۱ مدیریت پل دسکتاپ^۲ و تحت وب^۳ ساماندهی و ارائه شده‌اند. به این ترتیب امکان مشاهده، تحلیل وضعیت، و بهبود فرآیندهای نگهداری و بازرسی پل‌ها برای تصمیم‌گیرندگان و حتی کاربران عمومی فراهم شده است.

تحقیق Goebels (۲۰۲۱) به مدل‌سازی سه‌بعدی پل‌هایی پرداخته است که علاوه بر اجزای پل دارای ابنیه مانند سازه‌های ساختمانی هستند. برای این منظور به استخراج اجزای کاداستری از ابرنقاط حاصل از لیدار در کنار اجزای پل پرداخته شده است. در این تحقیق برای تشخیص اجزای ساختمانی که اغلب از سطوح صاف تشکیل شده‌اند (مانند سقف‌ها) از روش RANSAC^۴ استفاده شده است. اجزای کاداستری شناسایی شده در سطح جزئیات LOD2 تعریف می‌شوند و سپس اجزای پل با توجه به اجزای کاداستری مدل‌سازی در سطح جزئیات LOD3 ساختار CityGML تعریف شده‌اند.

تحقیق Poku-Agyemang and Reiterer (۲۰۲۳) روشی نیمه‌خودکار برای مدل‌سازی سه‌بعدی پل‌ها با استفاده از نقشه‌های دوبعدی و ابرنقاط ارائه کرده است. نتایج نشان داده‌اند که ترکیب نقشه‌های دوبعدی با روش‌های مدرن امکان تشخیص، قطعه بندی و استخراج اجزای پل را با صحت و دقت بالاتری فراهم می‌سازند. در این تحقیق نیز مدل‌های حاصله در قالب CityGML ایجاد شده‌اند.

تحقیق Tan et al (۲۰۲۳) به بررسی ادغام BIM^۵ و GIS با استفاده از استاندارد CityGML به عنوان فرمتی واسطه^۶ می‌پردازد. در این راستا ملاحظاتی مانند چگونگی تبدیل داده‌های دارای سطح جزئیات و ماهیت معنایی و هندسی

7- Solid 3D Models

8- Surface

9- Graph

10- 3D Laser Scanner

11- Curved Bridges

12- Taizicheng

1- Interactive

2- Desktop

3- Web-Based

4- Random sample consensus (RANSAC)

5- Building Information Model - BIM

6- Model Interface/Exchange Format

استاندارد CityGML به عنوان یک استاندارد بین المللی مدل سازی سه بعدی، امکان مدل سازی سه بعدی یکپارچه عوارض شهری را فراهم می نماید (OGC, 2012). این مدل ها با اطلاعات اضافی مانند طبقه بندی و روابط اجزاء غنی سازی می شوند و درک بهتری از ویژگی های فضایی شهرها فراهم می کنند که علاوه بر ارائه دید بصری، در پروژه های شبیه سازی نیز مورد استفاده قرار می گیرند (Sadidi et al., 2015).

در مدل مفهومی CityGML، تمام اشیاء سه بعدی می توانند با داده های موضوعی ادغام شوند. به عنوان مثال، اشیاء خیابانی می توانند با اطلاعاتی نظیر تراکم ترافیک، محدودیت سرعت و تعداد خطوط ادغام شوند، یا ساختمان ها با داده هایی مانند میزان انرژی مصرفی، تعداد خانوارها، و ارزش تخمینی ترکیب شوند. اجزای داخلی ساختمان نیز مانند سطوح سقف یا دیوارها می توانند با اطلاعاتی مانند تشعشع خورشید و پارامترهای عایق حرارتی ادغام شوند (Biljecki et al., 2018). استاندارد CityGML هندسه، روابط توپولوژیک و مشخصات توصیفی را ادغام و به صورت یکپارچه مدیریت می کند (نگاره ۱) (McDonnell et al., 1995; Haeyoung et al., 2009; Xie et al., 2013; Giovanella et al., 2019).

نگاره (۱)، شمایی از مدل مفهومی CityGML را نمایش می دهد (Salleh et al., 2018) که پنج بخش اصلی دارد:

۱- هندسه سه بعدی^۳ که به مدل سازی دیجیتال عوارض به صورت سه بعدی اشاره دارد.

۲- توپولوژی^۴ که شامل روابط مکان/زمانی میان اجزای عوارض است.

۳- معانی/مفاهیم^۵ که مربوط به اطلاعات توصیفی اجزای عوارض هستند.

۴- نمایش بصری^۶ که مربوط به جنبه های نمایشی و گرافیکی مانند بافت، رنگ، نورپردازی و مشخصات دوربین در محیط سه بعدی است.

سه بعدی مبتنی بر CityGML منجر می شود. در این راستا در تحقیق Kasprzyk et al. (۲۰۲۴)، مدیریت مدل های داده سه بعدی حجیم شهری با استفاده از CityGML، با ترکیب مدل داده ساختاریافته رابطه ای^۱ 3DCityDB و پایگاه های داده فاقد ساختار^۲ MongoDB را بررسی کرده است. ساختار داده ارائه شده علاوه بر امکان نگهداری مدل های داده سه بعدی حجیم امکان به روزرسانی داده ها و اعمال تغییرات جدید را به طور کارآمد در مدل های CityGML فراهم می نماید.

۲- مبانی نظری پژوهش

تقاضا برای مدل سازی شهری سه بعدی به طور مداوم در حال رشد است و کاربردهای متعددی را پوشش می دهد. یکی از اصلی ترین کاربردهای این مدل ها، نمایش و تجزیه و تحلیل سه بعدی است که به اطلاعات هندسی و توپولوژیک سه بعدی اشیاء نیاز دارد. مدل های سه بعدی شهری اطلاعات مهمی برای مدیریت بلایای طبیعی و غیرطبیعی ارائه می دهند. به عنوان مثال، در صورت تخریب زیرساخت ها به دلیل زلزله؛ دسترسی سریع به داده های مکانی مرجع، ارزیابی خسارات، بازسازی و یا راهنمایی امدادگران را ممکن می کند. امروزه شهرداری ها و سایر سازمان های دولتی به طور فزاینده ای از مدل های سه بعدی شهر و منظر برای حفظ و برنامه ریزی محیط استفاده می کنند. این مدل ها شامل داده های سه بعدی اشیاء شهری مانند ساختمان ها، جاده ها، پل ها و آبراه ها هستند که جمع آوری، نگهداری و در برنامه های کاربردی برای برنامه ریزی شهری و شبیه سازی محیطی استفاده می شوند (Oho et al., 2018).

پل ها به عنوان یکی از اجزای اصلی در شبکه جاده ای، ترافیک را از فضای دوبعدی به فضای سه بعدی منتقل می کنند و نقش حیاتی در کنترل ترافیک و ناوبری دارند. به علاوه پل ها عوارضی با ماهیت سه بعدی هستند که نقش منحصر به فرد در میان عوارض جاده ای دارند (Wang et al., 2018; Traffic3D, 2024; Vissim, 2024)

3- 3D Geometry

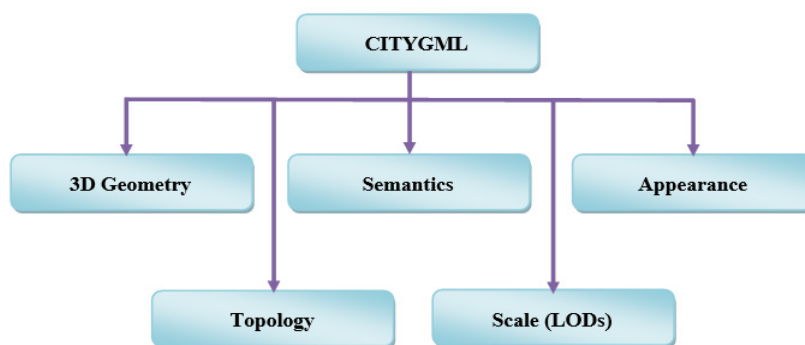
4- Topology

5- Semantics

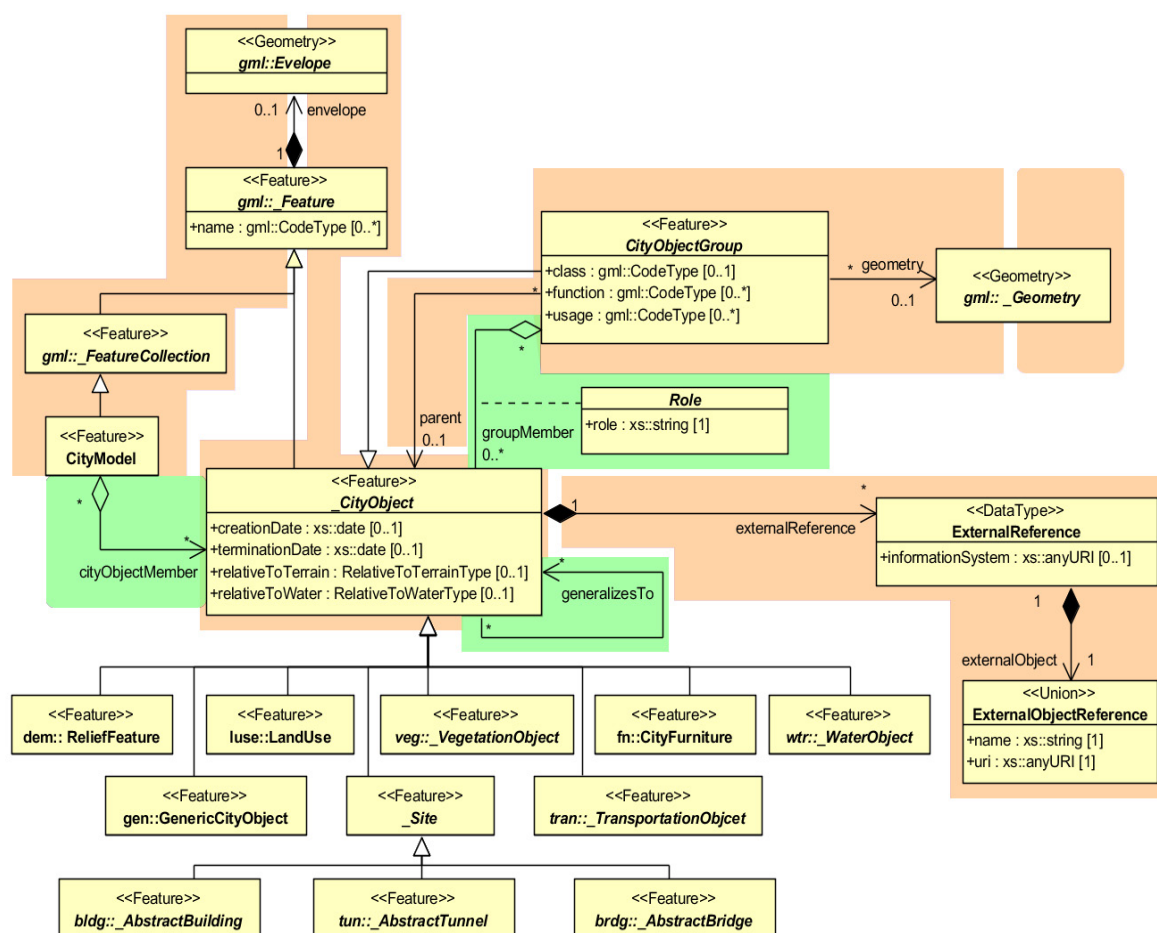
6- Appearance

1- Structured Relational Database

2- NoSQL



نگاره ۱: عناصر کلیدی CityGML (Salleh et al., 2018)



نگاره ۲: مدل داده کلی CityGML در فرمت *UML (3DCityDatabase., 2024)

* Unified Modeling Language - UML

نگاره (۲)، جزئیات مدل مفهومی استاندارد CityGML را نمایش داده است.

۵- سطح جزئیات/مقیاس^۱ که مربوط به میزان دقت مکانی و جزئیات عارضه مدل‌سازی شده است.



نگاره ۳: پل خیرودکنار واقع در شهرستان نوشهر، مازندران (GoogleMaps, 2024)

عوارض شهری تعریف شده اند. کلاس های ذیل کلاس Site- نیز شامل کلاس AbstractBuilding، AbstractTunnel و AbstractBridge به ترتیب برای تعریف محوطه های ساختمانی، تونل و پل استفاده می شوند. در بخش ۲-۲-۳ جزئیات مربوط به کلاس داده AbstractBridge و نحوه استفاده از آن در تحقیق حاضر ارائه شده است.

۳- مواد و روش ها

۳-۱- محدوده مورد مطالعه

پل خیرودکنار در شهرستان نوشهر مازندران، در عرض جغرافیایی ۳۶,۶۲۷۹۸ درجه و طول جغرافیایی ۵۱,۵۸۱۰۴ درجه ساخته شده است (نگاره ۳). این پل در فاصله ۹ کیلومتری از مرکز شهر نوشهر و در جاده آمل-چالوس واقع شده و با طول ۷۰ متر، عرض ۱۲ متر و ارتفاع آزاد ۵ متر دارای دو دهانه ۳۵ متری است. پل خیرودکنار به عنوان یک پل جاده ای کمّانی شناخته می شود و طی هشت دهه گذشته به عنوان یک مسیر ارتباطی مهم مورد توجه بوده است. یکی از کاربردهای مهم این پل، عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین به منظور بارگیری از بندر نوشهر به مقاصد دیگر است.

پس از آنکه این پل به نقطه ی پایان در ادوار خود به لحاظ فرسودگی در بافت و ریسک پذیری ریزش پل برای

این مدل شامل کلاس ها و روابط آن ها برای نمایش عوارضی مانند پل ها، ساختمان ها، تونل ها و سایر اجزای زیرساختی شهری است. در نگاره (۲)، ویژگی ها به صورت سلسله مراتبی و با روابط مختلف به هم متصل شده اند تا تمام اطلاعات مرتبط با یک شهر را پوشش دهند.

کلاس CityModel در مدل نمایش داده شده در نگاره (۲) یکی از کلاس های اصلی است که مجموعه ای از اشیاء کلاس CityObject را شامل می شود. یکی از کلاس های داده ذیل کلاس CityObject، کلاس ExternalReference است که به منظور ارجاع به منابع خارج از مدل تعریف شده و می تواند برای افزودن داده از سایر منابع و یا سیستم های اطلاعاتی استفاده شود.

در مدل نگاره (۲)، کلاس های داده خاص از کلاس CityObject حاصل می شوند از جمله کلاس ReliefFeaure برای تعریف توپوگرافی، کلاس LandUse برای تعریف کاربری اراضی، کلاس VegetationObject برای تعریف پوشش گیاهی و کاربری اراضی، کلاس CityFurniture برای تعریف اجزای مبلمان شهری، کلاس TransportationObject برای تعریف زیرساخت های حمل و نقل، کلاس WaterObject برای تعریف حوزه های آبی، کلاس Site- برای تعریف محدوده/محوطه های خاص و کلاس GenericCityObject برای تعریف سایر



نگاره ۵: فرآیند اخذ، پردازش و مدل سازی سه بعدی داده

۳-۲-۱-۱- عکسبرداری

روش مورد استفاده در این مقاله برای ایجاد مدل سه بعدی دقیق از پل (با دقت زیرمتر)، شامل عکسبرداری با پهپاد و استخراج عوارض با استفاده از روش های فتوگرامتری است. تصاویر پهبادی با همپوشانی ۷۰ تا ۸۰ درصد و با دوربینی دارای فاصله کانونی ۸۸ میلی متر و قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۲۴ میلی متری در قالب چهار برداشت از پل جمع آوری شده اند. چرخش ۱۸۰ درجه دوربین، از زوایای مختلف بین ۹۰- درجه (نادیر) تا ۹۰+ درجه (زنیت)، برای پوشش

عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین رسید، در سال ۱۳۷۸ شهرداری نوشهر اقدام به ساخت پل جدید در همجواری پل خیرودکنار نمود که در سال ۱۳۸۵، با عرض ۲۶ متر و طول ۳۲ متر، به همراه زیرگذر ۶ متر که متصل به محور اصلی جاده است، مورد بهره برداری قرار گرفت.

۳-۲- روش تحقیق

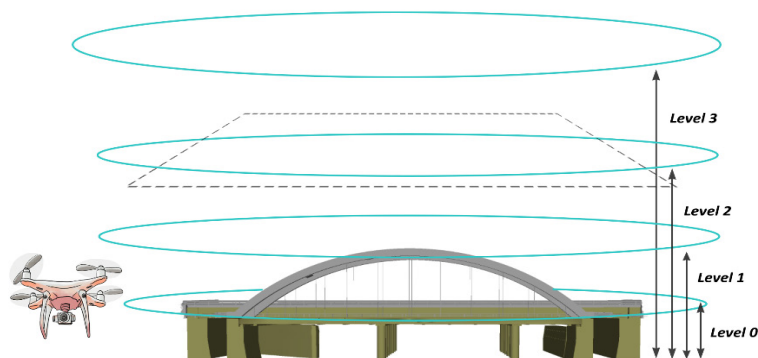
در این مطالعه، به طور ویژه عارضه پل و سایر عوارض مرتبط با آن شامل رودخانه، جاده، مبلمان شهری، توپوگرافی و کاربری های زمین مورد بررسی قرار گرفته است. نگاره (۴) روند کلی مراحل روش تحقیق مورد استفاده در این مقاله را نمایش می دهد. در ادامه، این مراحل به صورت دقیق تشریح شده اند.



نگاره ۴: روند کلی روش تحقیق استفاده شده در این مقاله

۳-۲-۱- اخذ، پردازش و مدل سازی سه بعدی داده

نگاره (۵) نمایی کلی از مراحل اخذ، پردازش و مدل سازی سه بعدی داده ها را نمایش می دهد. این مراحل در ادامه به صورت تفصیلی تشریح شده اند.



نگاره ۶: الگوریتم عکسبرداری از پل از سه زاویه مختلف



ب

الف

نگاره ۷: نمونه ای از نقطه کنترل زمینی در پل خیرودکنار، نوشهر

این روش به ویژه برای پل هایی که امکان تصویربرداری هوایی وجود دارد، مناسب تر است. در این راستا، پل هایی با طول دهانه بزرگ تر از ۴ متر و ارتفاع آزاد بیش از ۲ متر برای استفاده از این روش ایده آل هستند.

۲-۱-۲-۳- استخراج ابر نقاط

در این مقاله، روش SfM^۲ برای ایجاد مدل عکسبرداری و استخراج ابر نقاط از عکس های اخذ شده، مورد استفاده قرار گرفته است (Pepe et al., 2019; Pepe et al., 2020-2). این روش با قابلیت توجیه و تناظر یابی اتوماتیک نقاط عکس ها با استفاده از روش SIFT^۳، انعطاف پذیری بالایی در ایجاد مدل از عکس های برداشت شده از زوایای مختلف بدون نیاز به پارامترهای دقیق دوربین (فاصله کانونی، اعوجاج

کامل داده ها ضروری بوده است. مراحل برداشت به شرح زیر هستند (نگاره ۶):

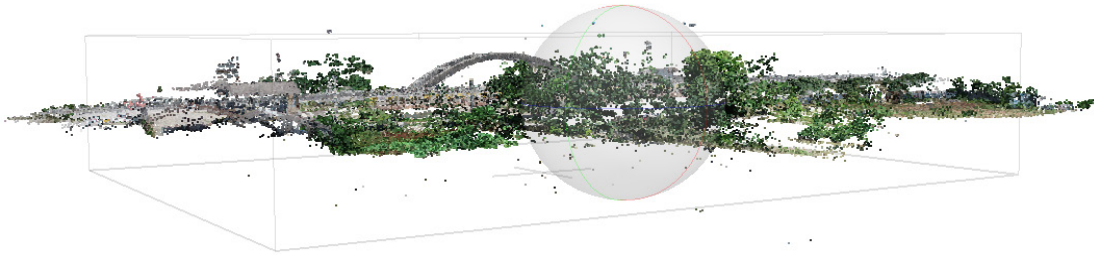
- ۱- ارتفاع ۴-۵ متر با زاویه ی ۹۰ درجه نسبت به نادیر
- ۲- ارتفاع حدود ۸-۱۰ متر با زاویه ی ۷۰ درجه نسبت به نادیر
- ۳- ارتفاع ۱۲ متر با زاویه ی ۴۵ درجه نسبت به نادیر
- ۴- ارتفاع ۱۵ متر با زاویه ی ۳۰ درجه نسبت به نادیر

برای توجیه هندسی و مکان مرجع سازی عکس ها، مدل و خروجی داده، نقاط کنترل زمینی^۱ با استفاده از دستگاه GPS چند فرکانسه برداشت می شوند. این نقاط در مکان های قابل مشاهده در عکس ها و فضای مدل حاصل از همپوشانی عکس ها انتخاب می شوند (نگاره ۷). موقعیت نقاط کنترل در عکس ها به صورت دستی وارد شده و برای استخراج ابر نقاط وارد مرحله بعد می شوند.

2- Structure-from-Motion - SfM

3- Scale-Invariant Feature Transform - SIFT

1- Ground Control Point - GCP



نگاره ۸: شمایی از نقاط پرت پس از تشکیل ابرنقاط در نرم افزار AgisoftMetashape

لنز و موقعیت دوربین) دارد و می تواند این پارامترها را تخمین بزند. علاوه بر ابر نقاط، الگوریتم SfM نقاط را براساس رنگ نقاط متناظر در عکسها تخصیص می دهد و خروجی حاصله، تصویری قابل فهم و نسبتاً منطبق بر واقعیت ابر نقطه ارائه می دهد. به این ترتیب این داده ها، امکان تفکیک اجزای مختلف پل را بر اساس موقعیت هندسی و ویژگی های رنگی فراهم می آورند. به عنوان مثال، سطوح مختلف پل مانند عرشه، ستون ها، نرده ها و کابل ها اغلب رنگ های متفاوتی دارند که با استفاده از RGB می توان به راحتی آن ها را شناسایی و دسته بندی کرد. علاوه بر این، داده های RGB می توانند به تشخیص مواد و پوشش های مختلف سازه کمک کنند. برای مثال، بتن معمولاً رنگ خاکستری دارد، در حالی که فلزات ممکن است براق یا تیره باشند. با استفاده از این کانال ها می توان اجزا و سایر عوامل محیطی مانند درخت، رودخانه و مبلمان شهری را از هم تفکیک و مدل کرد. ابر نقطه حاصله با استفاده از نقاط کنترل زمینی که با دستگاه GPS برداشت می شوند، زمین مرجع می شوند.

نقاط می توان صحت و دقت مدل را افزایش داد.

۳-۲-۱-۴- قطع بندی^۱

در این مرحله ابرنقاط به اجزای کوچک تر تقسیم می شوند. در این مقاله اجزای پل مانند عرشه پل، نرده، تیر و پایه ها در ابرنقاط شناسایی، قطع بندی و ذخیره می شوند. این روش مبتنی بر یافتن شکل هندسی مناسب برای یک مجموعه از نقاط و استفاده از الگوریتم هایی است که فاصله بین نقاط و سطح شکل مزبور و ابر نقاط نظیر را کمینه می کنند. برای این منظور اشکال هندسی پایه مانند مکعب، کره، استوانه و هرم استفاده می شود.

۳-۲-۱-۵- مدل سازی پارامتریک^۲

برای هر قسمت از اجزای قطع بندی شده، یک مدل پارامتریک تعریف می شود. این مدل ها بر اساس پارامترهای هندسی مانند طول، عرض، ضخامت، انحنا، و زاویه ساخته می شوند. به عنوان مثال، عرشه پل ممکن است به عنوان یک سطح مستطیلی با انحنا تعریف شود و یا ستون ها به عنوان اجسام استوانه ای یا منشوری مدل سازی می شوند.

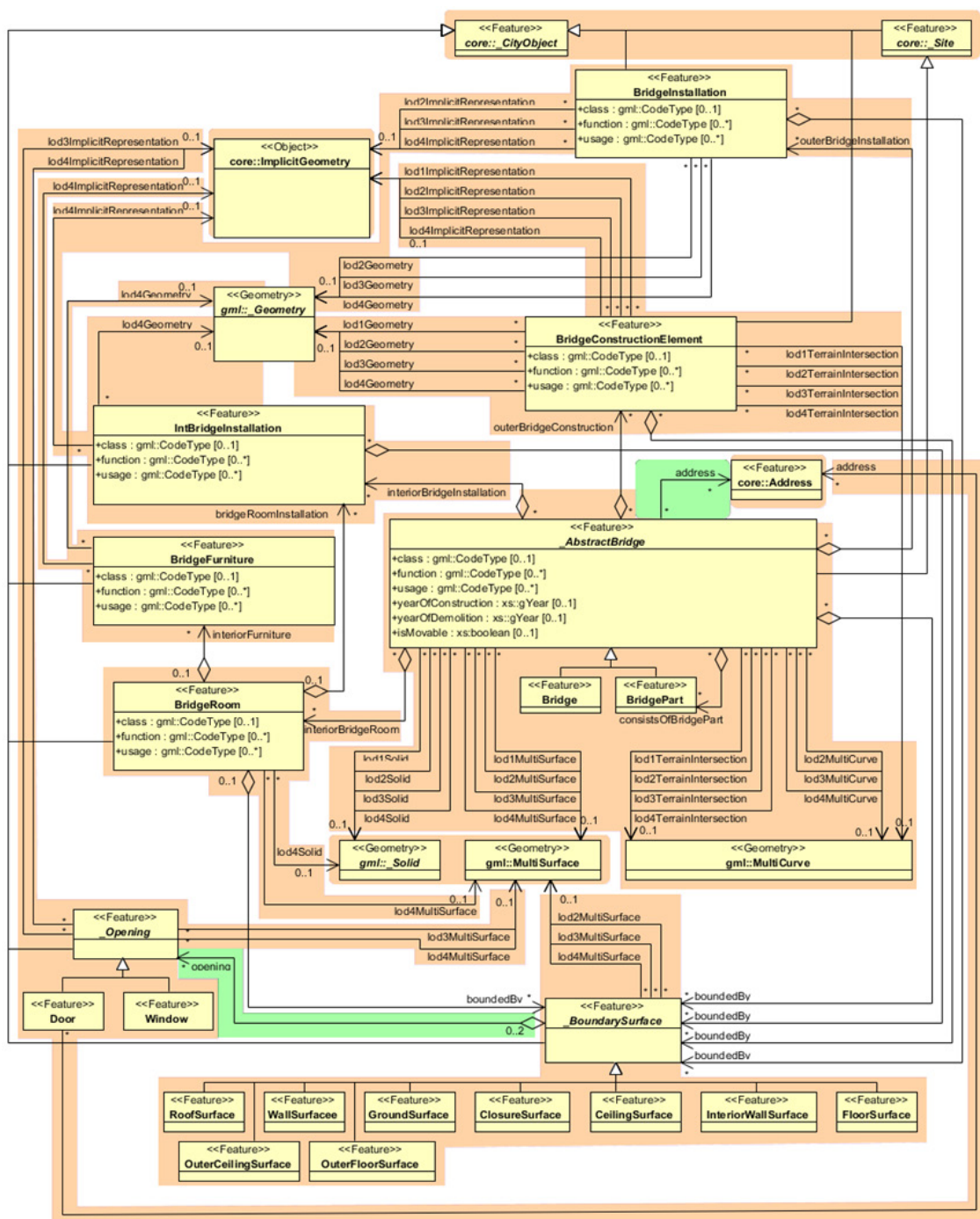
۳-۲-۱-۶- اتصال مدل ها

مدل های پارامتریک ایجاد شده برای بخش های مختلف پل با استفاده از الگوریتم های متامورفیک^۳ بهینه سازی و به یکدیگر متصل می شوند. این الگوریتم ها بر اساس معیارهایی

1- Segmentation
2- Parametric Modeling
3- Metamorphic Algorithms

۳-۲-۱-۳- کاهش نویز

کاهش نویز در ابر نقاط با حذف نقاط پرت صورت می گیرد. این نقاط از توزیع فضایی مورد انتظار مدل فاصله دارند و به عنوان نویز شناسایی شده و به صورت دستی انتخاب و حذف می شوند. کاهش نویز می تواند دقت و صحت مدل سه بعدی نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. نگاره (۸)، نمونه ای از نقاط پرت را نشان می دهد. با حذف این



نگاره ۹: مدل داده کلاس AbstractBridge در CityGML در فرمت UML (OGC, 2012)

مانند حداقل کردن اختلافات هندسی و حداکثر کردن انطباق بخش ها عمل می کنند. بهینه سازی این امکان را می دهد که مدل ها به یکدیگر متصل شوند و ساختار کلی پل بازسازی شود. به این ترتیب مدل یکپارچه سه بعدی از پل ایجاد می شود.

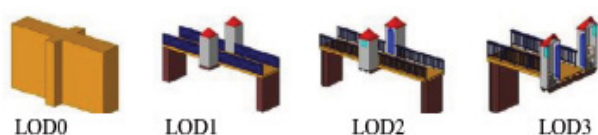
۲-۲-۳- مدل سازی پل در CityGML در نگاره (۹)، جزئیات مدل داده کلاس AbstractBridge به نمایش درآمده (نگاره ۲) که شامل کلاس های داده و مشخصات تعریف پل در مدل داده CityGML است.

• **BridgePart**: شامل سایر اجزای پل، مانند رمپ‌ها است که می‌توانند به صورت جداگانه شناسایی و به عنوان **BridgePart** نمایش داده شوند. **BridgePart** یک زیرکلاس از **AbstractBridge** است و بنابراین دارای همان نوع ویژگی‌ها و روابط است. یک پل می‌تواند از چندین **BridgePart** تشکیل شده باشد. همچنین، پل شامل تعداد زیادی عناصر ساختاری است که **BridgePart** نیستند و می‌توانند با ویژگی‌های **BridgeInstallation** و **BridgeConstructionElement** نمایش داده شوند که بخش‌های مختلف پل را شامل می‌شوند. هر **BridgePart** می‌تواند دارای هندسه، سطوح مرزی، و اجزای ساختاری باشد.

• **BoundarySurface**: شامل سطوح رویه پل مانند سقف، دیوار، کف و غیره می‌شود.

• **Geometry**: هندسه سه‌بعدی پل که شامل چند سطحی‌ها^۵ و اجسام سه‌بعدی (Solid) است.

ماژول پل از نظر معنایی مشابه ماژول ساختمان است و جزئیات هندسی آن از LOD0 به LOD3 افزایش می‌یابند. مدل پل جنبه‌های معنایی، هندسی و بصری پل‌ها و اجزای آن‌ها را در چهار سطح جزئیات (LOD0 تا LOD3) نمایش می‌دهد (نگاره ۱۰).



نگاره ۱۰: سطوح جزئیات پل در CityGML

(Ujang et al., 2014)

در مورد کاربری زمین^۶ و پوشش زمین^۷ در CityGML امکان توصیف مناطقی از سطح زمین که به یک کاربری خاص اختصاص داده شده‌اند تعریف شده است (OGC, 2012). در این مقاله، کاربری زمین برای توصیف مناطقی از سطح زمین استفاده شده که شامل بخش‌هایی با پوشش

عارضه پل در CityGML در ماژول **Bridge** تعریف شده و به وسیله‌ی کلاس **Bridge** نمایش داده می‌شود. این کلاس ویژگی‌ها و روابط خود را از کلاس پایه انتزاعی **AbstractBridge** به ارث می‌برد (نگاره ۹). نوع هندسه ماژول پل می‌تواند، در صورتی که پیش‌نیازهای نمایش به صورت جسم صلب^۱ فراهم نباشند، به صورت چند سطحی^۲ نمایش داده شود (**lod1MultiSurface** تا **lod4MultiSurface**). (Floros et al, 2016)

کلاس‌های داده اصلی در این ماژول که در نگاره (۹) تعریف شده است، عبارتند از (OGC, 2012):

• **Site**: مشخصات کننده موقعیت مکانی پل است.

• **AbstractBridge**: یک کلاس عمومی برای پل است که ویژگی‌های اساسی پل مانند سال ساخت، کلاس و عملکرد را شامل می‌شود. ویژگی‌های معنایی کلاس **AbstractBridge** شامل کلاس، عملکرد^۳، استفاده^۴ و قابلیت جابه‌جایی است. مقادیر ممکن برای این ویژگی‌ها می‌تواند پل راه‌آهن، پل جاده‌ای، پل عابر پیاده، قنات و غیره باشد.

• **BridgeInstallation**: شامل اجزایی از پل است که می‌تواند بدون از بین رفتن یکپارچگی شیء پل، حذف شود مانند پله، آنتن، نرده، تجهیزات و لوازم اضافی. **BridgeInstallations** تنها در سطوح جزئیات LOD1 تا LOD3 رخ می‌دهند و از نظر هندسی به عنوان **lod2-4Geometry** نمایش داده می‌شوند. مفهوم **ImplicitGeometry** می‌تواند به **BridgeInstallations** اعمال شود. کلاس **BridgeInstallation** شامل ویژگی‌های معنایی کلاس، عملکرد و استفاده است.

• **BridgeConstructionElement**: شامل عناصری است که برای پایداری ساختاری پل ضروری هستند. مانند پایلونها، مهاربنده، تیرها، ستون‌ها و عرشه. نوع هندسه این ویژگی‌ها با **lodXGeometry** نمایش داده می‌شود و ویژگی‌های معنایی شامل کلاس، عملکرد و استفاده هستند.

5- MultiSurface

6- LandUse

7- LandCover

1- Solid

2- MultiSurface

3- Function

4- Usage

جدول ۱: جمع بندی ویژگی های نوع داده پل

نوع داده	کاربرد	تعداد	حجم	دقت	فرمت
عکس هوایی	بازسازی سه بعدی	۸۱۰ عکس	۵-۱ گیگابایت	۰/۰۰۲۴ میلی متر	JPEG
نقاط کنترل زمینی	توجیه کردن تصاویر	۶ نقطه کنترل	چند کیلو بایت	۳ سانتی متر	متن/جدول
ابرنقاط	ایجاد مدل سه بعدی اولیه	۶,۰۳۸,۲۳۹ نقطه	۱-۱۰ گیگابایت	۵ سانتی متر	las/rcp.
مدل پارامتریک	شبیه سازی اجزای پل	۹ قطعه	چند مگابایت	زیر ۵ سانتی متر	3DS Max
داده های CityGML	استاندارد سازی اجزای پل	۵ کلاس داده	وابسته به مدل	LOD0-LOD3	GML

خاص مانند شن، سنگ، گل و لای، جنگل و مرتع است. برای این منظور از lod3MultiSurface در تعریف کاربری زمین برای تمامی سطوح جزئیات استفاده شده است. برای کلاس مبلمان شهری از ماژول CityFurniture در CityGML استفاده شده است که در آن عوارض غیر قابل جابجایی مانند تیر چراغ برق، چراغ های راهنمایی، علائم راهنمایی، سطل زباله، ستون های تبلیغاتی و نیمکت ها تعریف می شوند (OGC, 2012). در حالی که هر عارضه مبلمان شهری می تواند با هندسه مختص خود در قالب lodXGeometry تعریف شود، اغلب این عوارض با هندسه یکسان در قالب ImplicitGeometry تعریف می شوند. این عوارض می توانند دارای ویژگی های کلاس، عملکرد و استفاده نیز باشند.

WaterGroundSurface برای سطح زیرین آب و کلاس WaterClosureSurfaces برای مرزهای مجازی بین بخش های مختلف آب استفاده می شوند.

۳-۲-۳- ایجاد خروجی CityGML

خروجی CityGML در قالب فرمت GML^۵ اجرا می شود که مبتنی بر XML^۶ است. فرمت مزبور اطلاعات هندسی مکان مرجع شده و اطلاعات توصیفی متصل به هر عارضه را دربر می گیرد. در حال حاضر قابلیت نمایش داده ها در فرمت GML در قالب برخی نرم افزارهای حوزه اطلاعات مکانی توسعه داده شده اند.

در مورد توپوگرافی زمین در CityGML از ماژول Relief استفاده می شود (Gröger et al., 2012). براین اساس عارضه توپوگرافی در کلاس ReliefFeature تعریف می شود که شامل یک یا چند موجودیت از کلاس ReliefComponent است. توپوگرافی می تواند در قالب DEM^۱، TIN^۲، منحنی میزان^۳ یا مجموعه نقاط ارتفاعی^۴ تعریف شود.

۴- ارزیابی و نتایج پژوهش

روش تحقیق عنوان شده در محدوده مطالعاتی مورد نظر، برای پل خیرودکنار نوشهر اجرا شد. مشخصات داده های مورد استفاده و ایجاد شده در این مقاله در جدول ۱ نمایش داده شده اند.

در مورد توپوگرافی زمین در CityGML از ماژول Relief استفاده می شود (Gröger et al., 2012). براین اساس عارضه توپوگرافی در کلاس ReliefFeature تعریف می شود که شامل یک یا چند موجودیت از کلاس ReliefComponent است. توپوگرافی می تواند در قالب DEM^۱، TIN^۲، منحنی میزان^۳ یا مجموعه نقاط ارتفاعی^۴ تعریف شود.

پردازش عکس های هوایی و استخراج ابر نقاط و مدل سه بعدی در این مقاله با استفاده از نرم افزار Agisoft Metashape انجام شده (نگاره ۱۱) که دارای امکانات لازم برای پردازش فتوگرامتریک تصاویر دیجیتال^۷ از جمله روش SfM است. میانگین خطای پردازش عکس ها با نقاط کنترل زمینی برای تشکیل مدل عکسی معادل ۰/۰۴۰۸۷۳ متر محاسبه شده

کلاس WaterBody در CityGML برای تعریف عوارض آبی مانند رودخانه ها، کانال ها، دریاچه ها و حوضه های آبریز استفاده شده است که در سطح جزئیات ۲ تعریف می شود. کلاس WaterSurface برای سطح آب، کلاس

5- Geography Markup Language-GML

6- Extended Markup Language - XML

7- Photogrammetric Digital Images

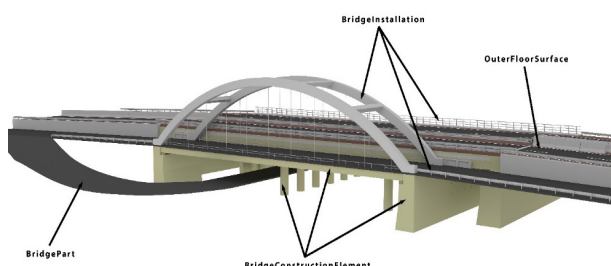
1- Digital Elevation Model - DEM

2- Triangular Irregular Network - TIN

3- Contour Line

4- Mass Points

Workbench نیاز به ایجاد ترانسفورمرهای مناسب برای پل دارد. پل مورد مطالعه در این مقاله با سطح جزئیات LOD3 مدل سازی شده و شامل کلاس های داده، BridgeInstallation و BridgePart است (نگاره ۱۳).



نگاره ۱۳: تفکیک اجزای پل به کلاس های تشکیل دهنده

در CityGML در نرم افزار FME Data Inspector

در نگاره (۱۴)، شمایی از مدل تبدیل طراحی شده در FME Workbench نمایش داده شده است. مدل مزبور اجزای پل را براساس عناصر ماژول پل در استاندارد CityGML برچسب گذاری می کند. در این فرآیند، ابتدا هندسه های پیچیده تفکیک^۱ می شوند تا ساختاری ساده تر و سلسله مراتبی ایجاد شود. سپس، هندسه های مرتبط به هر جزء پل به صورت جداگانه تجمیع^۲ شده و به مدلی یکپارچه تبدیل می شوند که به کلاس مربوطه مانند، BridgeConstructionElement، BridgeInstallation و BridgePart متصل شوند. در این راستا ابزار GeometryPropertySetter برای تعریف مشخصات مدل های ایجاد شده شامل موقعیت^۳، ابعاد^۴، شکل^۵، و هندسه فضایی^۶ شیء مورد استفاده قرار می گیرد. نگاره (۱۵)، بخشی از فایل CityGML پل خیرودکنار را نشان می دهد که مبتنی بر ساختار XML است. در نگاره مزبور داده های مربوط به اجزای نصب شده بر روی پل با برچسب BridgeInstallation، اجزای سازه ای پل با برچسب

- 1- Deaggregate
- 2- Aggregate
- 3- Location
- 4- Dimensions
- 5- Shape
- 6- Spatial Geometry

است. به این ترتیب دقت ابر نقطه حاصله معادل ۵ سانتی متر برآورد می شود.



نگاره ۱۱: ابرنقاط تشکیل شده پس از پردازش اولیه

داده های اخذ شده در نرم افزار AgisoftMetashape

ابرنقطه حاصله با فرمت rcp در نرم افزار Autodesk Recap فراخوانی شده و فرآیند کاهش نویز با حذف نقاط پرت به صورت دستی انجام شد (نگاره ۸). نتیجه حاصل شده با فرمت obj و fbx برای مرحله ایجاد مدل سه بعدی در نرم افزار مدل سازی 3Ds Max ایجاد شد (نگاره ۱۲).



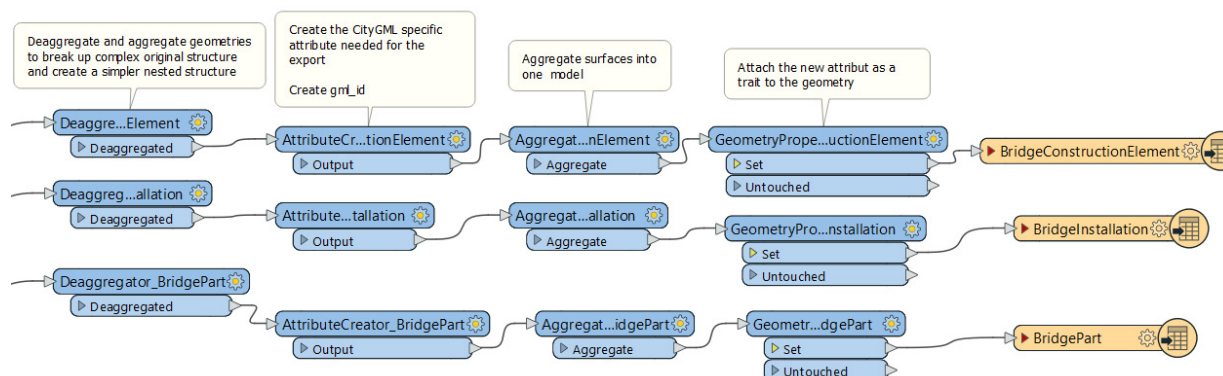
نگاره ۱۲: فرآیند مدل سازی با استفاده از ابرنقاط

در نرم افزار 3Ds Max

سپس، اجزا و المان های مدل سازی شده، در لایه های مختص به خود قرار گرفتند تا در مرحله بعد برای تبدیل داده ها به فرمت داده های CityGML در محیط نرم افزاری FME Workbench پردازش شوند. این نرم افزار قابلیت فراخوانی فایل های سه بعدی و تولید نتایج به فرمت داده های CityGML با پسوند gml را دارد. تبدیل با استفاده از FME

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سمر)

مدل سازی دیجیتال پل های جاده های ایران با استفاده از CityGML ... / ۴۱

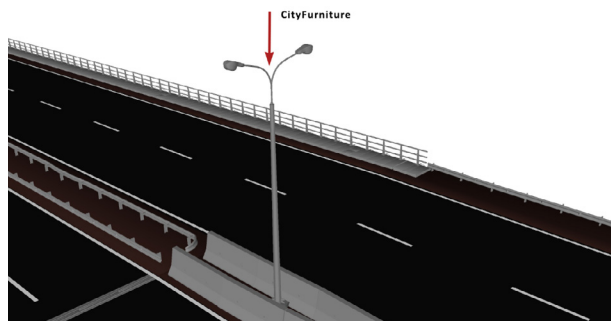


نگاره ۱۴: تبدیل مدل سه بعدی به ماژول های CityGML در نرم افزار FME Workbench

```
This XML file does not appear to have any style information associated with it. The document tree is shown below
<?xml-stylesheet type="text/css" href="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:fme="http://www.safe.com/fme/2.0.0" />
<fme:xml-tables xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:fme="http://www.safe.com/fme/2.0.0" />
  <fme:gml_id>BridgeInstallation_26f5e135-8f2e-4d66-9b01-9451747d2a7c</fme:gml_id>
  <fme:gml_parent_id>fme-gen-09b93420-526d-4380-beb4-bcace8749b12</fme:gml_parent_id>
  <fme:citygml_target_uri>http://www.opengis.net/citygml/bridge/2.0</fme:citygml_target_uri>
  <fme:citygml_feature_role>cityObjectMember</fme:citygml_feature_role>
  </fme:BridgeInstallation>
</fme:BridgeInstallation-table>
  <fme:BridgeConstructionElement-table>
  <fme:BridgeConstructionElement>
    <fme:gml_id>BridgeConstructionElement_496f99ae-19f4-4ca8-a4ca-233671c6434f</fme:gml_id>
    <fme:gml_parent_id>fme-gen-09b93420-526d-4380-beb4-bcace8749b12</fme:gml_parent_id>
    <fme:citygml_target_uri>http://www.opengis.net/citygml/bridge/2.0</fme:citygml_target_uri>
    <fme:citygml_feature_role>cityObjectMember</fme:citygml_feature_role>
    </fme:BridgeConstructionElement>
  </fme:BridgeConstructionElement-table>
  <fme:BridgePart-table>
  <fme:BridgePart>
    <fme:gml_id>BridgePart_ccb47829-d2a4-429e-b77f-6e3d89b404a6</fme:gml_id>
    <fme:gml_parent_id>fme-gen-09b93420-526d-4380-beb4-bcace8749b12</fme:gml_parent_id>
    <fme:citygml_target_uri>http://www.opengis.net/citygml/bridge/2.0</fme:citygml_target_uri>
    <fme:citygml_feature_role>cityObjectMember</fme:citygml_feature_role>
    </fme:BridgePart>
  </fme:BridgePart-table>
</fme:xml-tables>
```

نگاره ۱۵: فایل XML از ماژول های پل در نرم افزار FME Workbench

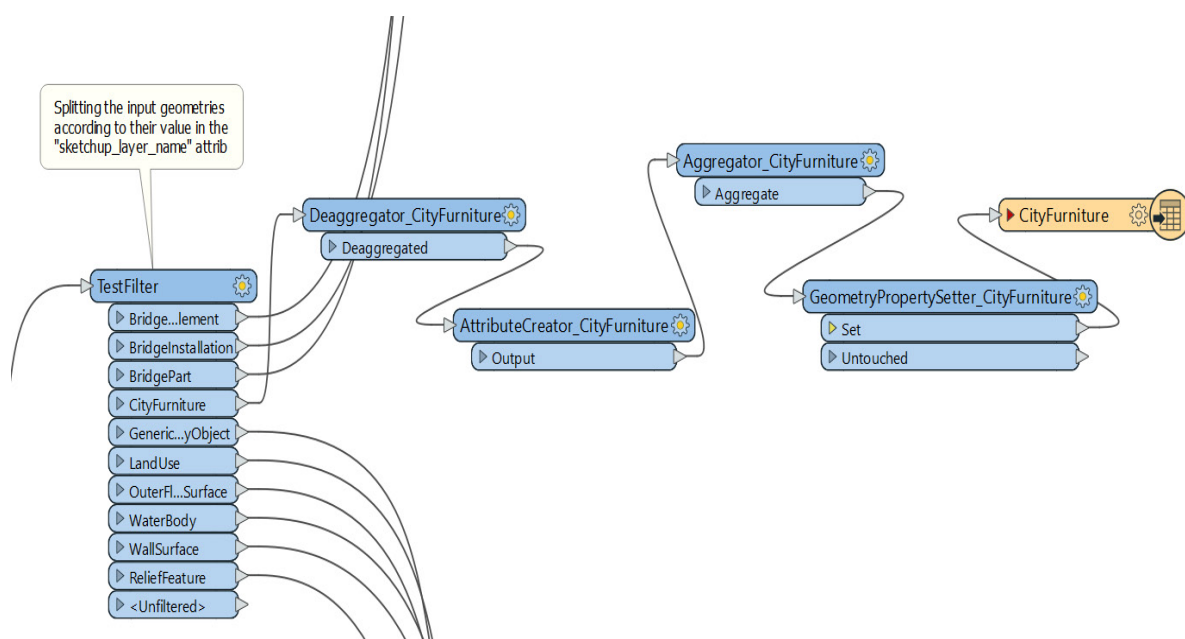
اجزای مبلمان شهری تجمیع می شوند و مشخصات آن ها تخصیص داده می شود. به همین ترتیب، سطح جزئیات ۲ (LOD2Geometry) و کلاس CityObject انتخاب و به کار گرفته شده اند (نگاره ۱۷).



نگاره ۱۶: نمونه از مبلمان شهری در پل خیرودکنار

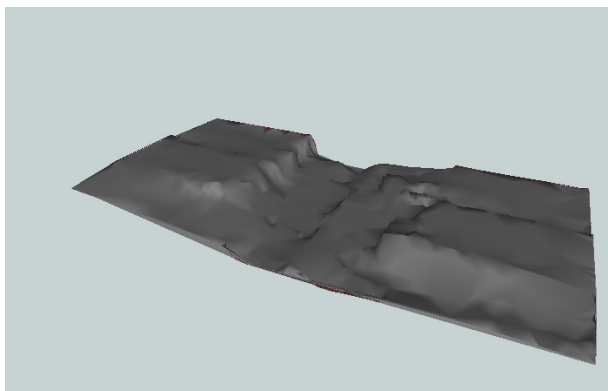
در نرم افزار FME Data Inspector

BridgeConstructionElement و سایر اجزای پل با برچسب BridgePart نمایش داده شده اند. همچنین شناسه های منحصر به فرد اجزا با برچسب gml_id، شناسه اجزای والد با برچسب gml_parent_id و لینک های خارجی با برچسب citygml_target_uri مشخص شده اند. در مدل سه بعدی پل خیرودکنار، مبلمان شهری شامل علائم راهنمایی، چراغ ها، و سطل زباله به گونه ای طراحی شده اند که به واقعیت نزدیک تر باشند (نگاره ۱۶). از این رو، طبق روش تحقیق ارائه شده، از کلاس CityFurniture در نرم افزار FME Workbench استفاده شده است. برای این منظور به صورت مشابه برای اجزای پل (نگاره ۱۴)، هندسه ها به صورت تفکیک شده و جداگانه تعریف و سپس در قالب مدل



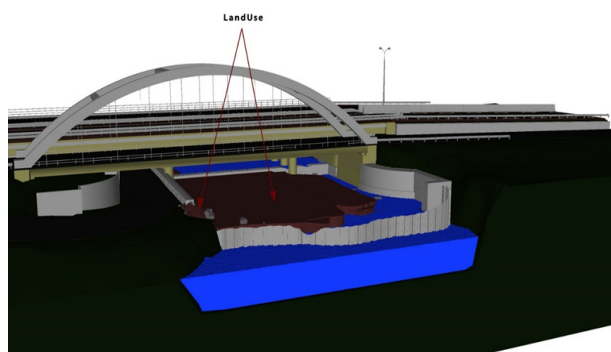
نگاره ۱۷: تبدیل مدل سه بعدی از اشیا شهری به کلاس CityFurniture در نرم افزار FME Workbench

داده‌های برداشت شده به شکل نقاط ارتفاعی (نگاره ۱۹) با ابزار TIN Generator در نرم افزار FME Workbench پردازش و به داده‌های هندسی مورد نیاز برای کلاس TINRelief در CityGML تبدیل شده‌اند (نگاره ۲۰). در این مقاله، داده‌های توپوگرافی در سطح جزئیات ۱ (LoD1) تعریف شده‌اند.



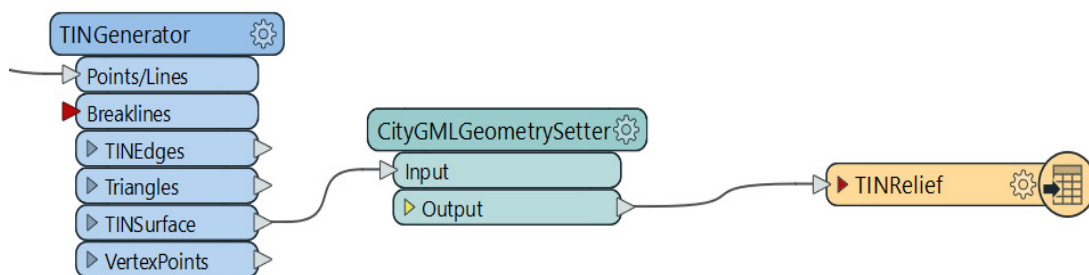
نگاره ۱۹: توپوگرافی سطح زمین در پل خیرودکنار در نرم افزار FME Data Inspector

برای تعریف کاربری زمین در مدل سه بعدی پل خیرودکنار، از lod3MultiSurface استفاده شده است (نگاره ۱۸). در این راستا، از کلاس LandUse بهره گرفته شده که بخش‌هایی از زمین با پوشش‌های خاص نظیر شن، سنگ، و گل‌ولای را شامل می‌شود.



نگاره ۱۸: مدل‌سازی کاربری زمین در پل خیرودکنار در نرم افزار FME Data Inspector

در مدل سه بعدی پل خیرودکنار، توپوگرافی زمین به صورت TIN و با استفاده از کلاس TINRelief در ReliefComponent تعریف شده است. برای این منظور،



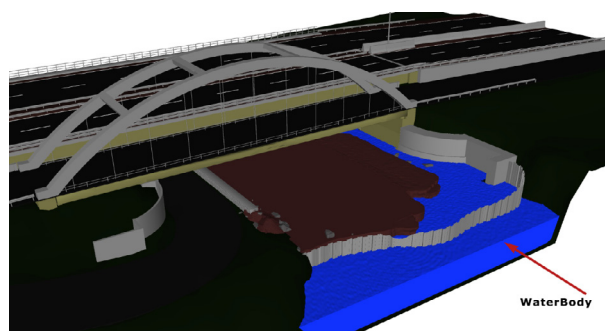
نگاره ۲۰: فرآیند ایجاد TINRelief در نرم‌افزار FME Workbench

فرآیند پیشنهاد شده در این مقاله برای ایجاد مدل دیجیتال یک پل جاده‌ای که مبتنی بر عکسبرداری، تولید ابرنقاط، استخراج اجزای مدل و تعریف آن‌ها در قالب ساختار CityGML است که برای نمونه پل خیرودکنار در نوشهر اجرا شده است. در این راستا مراحل پردازش و ایجاد مدل سه‌بعدی در محیط نرم‌افزاری Agisoft Metashape و تعریف مدل در قالب استاندارد CityGML در محیط نرم‌افزاری FME Workbench اجرا شده است. خروجی حاصله ترکیبی از ماژول پل، ابنیه شهری، توپوگرافی، کاربری زمین و عوارض آبی CityGML در سطح جزئیات ۱ تا ۳ است. در تعریف عارضه پل از کلاس‌های BridgeConstructionElement، BridgePart و BridgeInstallation در CityGML استفاده شده که در سطح جزئیات LOD3 تعریف شده‌اند. خروجی حاصله مدل سه‌بعدی مکان مرجع با فرمت gml است که در نرم‌افزارهای دارای قابلیت فراخوانی و تحلیل CityGML قابل استفاده هستند.

با توجه به اینکه روش پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر مدل‌سازی با استفاده از داده‌های ابرنقطه استخراج شده از عکس‌های تهیه شده با پهپاد از پل است، این روش برای مدل‌سازی عوارضی با اجزای هندسی قابل تفکیک، مانند تونل‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها و سازه‌های مشابه، مناسب است. دقت مکانی ابرنقاط حاصل شده از این روش ۵ سانتی‌متر برآورد شده است.

برای بهره‌برداری از روش استفاده شده در این مقاله برای سایر پل‌ها لازم است تا پل‌های مزبور دارای ویژگی‌هایی مانند سازگاری با سیستم مختصات زمین و امکان دستیابی

رودخانه پل خیرودکنار در این مقاله در سطح جزئیات ۲ و در کلاس WaterBody تعریف شده است. در نگاره (۲۱) برای این منظور، ارتفاع سطح آب به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.



نگاره ۲۱: مدل‌سازی اجزای آبی (رودخانه) در پل خیرودکنار در نرم‌افزار FME Data Inspector

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به ضرورت ایجاد مدل‌های سه‌بعدی دقیق از عوارض طبیعی و انسانی برای پاسخگویی به نیازهای مدیریتی و اجرایی، هدف این تحقیق استفاده از استاندارد CityGML و استفاده از تکنیک‌های GIS و فتوگرامتری برای مدل‌سازی پل‌های جاده‌ای تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از CityGML، امکان تعریف یک محیط سه‌بعدی یکپارچه شامل پل و سایر عوارض مرتبط از جمله توپوگرافی، جاده، مبلمان شهری، حوزه‌های آبی (رودخانه) و کاربری اراضی فراهم می‌شود که می‌تواند به تبع نیازهای نمایشی و تحلیل سامانه‌های مدل‌سازی و GIS را برآورده نماید.

CityGML Modules. the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences/International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W2, 3-9. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxlii-2-w2-3-2016>

8- Giovanella, A., Bradley, P. E., & Wursthorn, S. (2019). Evaluation of topological consistency in CityGML. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 8(6), 278. <https://doi.org/10.3390/ijgi8060278>

9- Goebbels, S. (2021). 3D Reconstruction of Bridges from Airborne Laser Scanning Data and Cadastral Footprints. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s41651-021-00076-9>

10- GoogleMaps, 2024, KehiroudKenar, Mazandaran, Iran, Available from: URL

11- Gröger, G., & Plümer, L. (2012). CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12–33. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004>

12- Gröger, G., Kolbe, T. H., Czerwinski, A., & Henning, P. A. (2008). Open GIS city geography markup language (City GML) encoding standard. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/258255672_Open_GIS_city_geography_markup_language_City_GML_encoding_standard

13- Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K. (2012). OGC City Geography Markup Language (CITYGML) Encoding Standard. [https://www.semanticscholar.org/paper/OGC-City-Geography-Markup-Language-\(CityGML\)-Gr%C3%B6ger-Kolbe/d6d8a32f01fd2066c1fb75f705eb2e525a234ca9](https://www.semanticscholar.org/paper/OGC-City-Geography-Markup-Language-(CityGML)-Gr%C3%B6ger-Kolbe/d6d8a32f01fd2066c1fb75f705eb2e525a234ca9)

14- Kasprzyk, Jean-Paul & Nys, Gilles-Antoine & Billen, Roland. (2024). Towards a multi-database CityGML environment adapted to big geodata issues of urban digital twins. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLVIII-4/W10-2024. 101-106. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W10-2024-101-2024>

15- McDonnell, R., & Kemp, K. (1996). *International GIS Dictionary*. <https://doi.org/10.1002/9780470173213>

16- Ogori, K. A., Biljecki, F., Kumar, K., Ledoux, H., & Stoter, J. (2018). Modeling Cities and Landscapes in 3D with CityGML. In *Springer eBooks* (pp. 199–215). https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_11

تصویربرداری با همپوشانی مناسب را داشته باشند. براین اساس این روش برای پل‌هایی با طول دهانه بیش از ۴ متر و ارتفاع آزاد بالاتر از ۲ متر قابل استفاده است.

با توجه به قابلیت اجرایی نتایج تحقیق در تهیه مدل‌های سه‌بعدی پل‌های جاده‌ای، در تحقیقات آتی می‌توان به بررسی نحوه بهره‌گیری از این مدل‌ها در بهبود فرآیندهای نگهداری پل‌ها، مانند افزایش عمر سازه، احیا و نگهداری پل، و کاهش خسارات جانی و مالی مرتبط با پل‌ها پرداخت.

تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

References

1- 3DCityDB, 2024, Bridge Model: 3D City Database Model, <https://3dcitydb-docs.readthedocs.io/en/version-2024.0>.

2- Achutan, K.; Hay, N.; Aliyari, M.; Ayele, Y.Z. A Digital Information Model Framework for UAS-Enabled Bridge Inspection. *Energies* 2021, 14, 6017. <https://doi.org/10.3390/en14196017>

3- Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018). CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>

4- Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2014). Improving the consistency of multi-LOD CityGML datasets by removing redundancy. In *Lecture notes in geoinformation and cartography* (pp. 1–17). https://doi.org/10.1007/978-3-319-12181-9_1

5- Chen, X., Chen, L., Dong, L. (2024) Reverse Model for Curved Bridge Measurement Based on 3D Laser Scanning Technology, *Advances in Civil Engineering*, 1(5594519), 6 pages. <https://doi.org/10.1155/2024/5594519>

6- Cheng, L., Wu, Y., Wang, Y., Zhong, L., Chen Y. & Li, M. (2015), Three-Dimensional Reconstruction of Large Multilayer Interchange Bridge Using Airborne LiDAR Data, in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 2, pp. 691-708, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2363463>

7- Floros, G., & Dimopoulou, E. (2016). Investigating the Enrichment of a 3D City Model with various

U., Feature Extraction and Visualization of Bridges Over Water from High-Resolution InSAR Data and One Orthophoto, in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 1, no. 2, pp. 147-153, June 2008, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2008.2001156>.

25- Tan, Y., Liang, Y., & Zhu, J. (2023). CityGML in the Integration of BIM and the GIS: Challenges and Opportunities. Buildings, 13(7), 1758. <https://doi.org/10.3390/buildings13071758>

26- Traffic3D, 2024, A Rich 3D-Traffic Environment to Train Intelligent Agents, <https://traffic3d.org>

27- Ujang, U., Anton, F., Azri, S., Rahman, A. A., & Mioc, D. (2014). 3D Hilbert Space Filling Curves in 3D City Modeling for Faster Spatial Queries. International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM), 3(2), 1-18. <https://doi.org/10.4018/ij3dim.2014040101>

28- Vissim, 2024, Multimodal Traffic Simulation Software, <https://ptvGroup.com>

29- Wang, R., P., J., & Chen, D. (2018). LiDAR Point Clouds to 3-D urban models\$: \$ a review. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(2), 606-627. <https://doi.org/10.1109/jstars.2017.2781132>

30- Xie, X., Zhu, Q., Du, Z., Xu, W., & Zhang, Y. (2013). A semantics-constrained profiling approach to complex 3D city models. Computers, Environment and Urban Systems, 41, 309-317. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.07.003>

31- Yamane, Tatsuro & Chun, Pang-jo & Dang, Ji & Honda, Riki. (2023). Recording of bridge damage areas by 3D integration of multiple images and reduction of the variability in detected results. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 10.1111/mice.12971. <http://dx.doi.org/10.1111/mice.12971>

17- Pepe, M., Costantino, D., Alfio, V. S., Angelini, M. G., & Garofalo, A. R. (2020). A CityGML multiscale approach for the conservation and management of cultural heritage: the case study of the Old Town of Taranto (Italy). ISPRS International Journal of Geo-information, 9(7), 449. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070449>

18- Pepe, M., Costantino, D., & Garofalo, A. R. (2020). An Efficient Pipeline to Obtain 3D Model for HBIM and Structural Analysis Purposes from 3D Point Clouds. Applied Sciences, 10(4), 1235. <https://doi.org/10.3390/app10041235>

19- Pepe, M., Fregonese, L., & Crocetto, N. (2019). Use of SfM-MVS approach to nadir and oblique images generated through aerial cameras to build 2.5D map and 3D models in urban areas. Geocarto International, 37(1), 120-141. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1700558>

20- Poku-Agyemang, K. N., & Reiterer, A. (2023). 3D Reconstruction from 2D Plans Exemplified by Bridge Structures. Remote Sensing, 15(3), 677. <https://doi.org/10.3390/rs15030677>

21- Sadidi, J., Talebzadeh, M., Rezaian, H., & Firouzabadi, P. Z. (2015). Designing 3D semantic model in LOD4 to simulate building utility network. Indian Journal of Science and Technology, 8(16). <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i16/58276>

22- Salleh, S., & Ujang, U. (2018). Topological information extraction from buildings in CityGML. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science, 169, 012088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012088>

23- Sithole, G., Vosselman, G., Bridge detection in airborne laser scanner data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 61, Issue 1, 2006, Pages 33-46, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.07.004>.

24- Soergel, U., Cadario, E., Thiele, A. and Thoennessen,

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)



