

Технические науки. Строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.1-2026-04>

УДК: 693

МРНТИ: 67.23.15

Современные достижения в проектировании и строительстве автомобильных дорог с применением BIM и дополнительно интегрируемых технологий: систематический обзор

¹ Бенедетто А., ^{*2} Наймасов Б., ² Шогелова Н.

¹ Университет Рома Тре, Рим, Италия

² Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: Rashiduly96@gmail.com

<p>Поступила: 2 марта 2026 Рецензирование: 01 марта 2026 Принята в печать: 20 марта 2026</p>	<p>Аннотация</p> <p>В статье рассматриваются современные подходы к применению технологии информационного моделирования строительства (BIM) в дорожных инфраструктурных проектах. Целью исследования является систематизация BIM Uses, используемых на различных стадиях жизненного цикла автомобильных дорог, а также выявление сопутствующих цифровых технологий и анализ их взаимосвязи. Методологической основой работы выступает систематический обзор научных публикаций, выполненный с использованием баз данных Scopus и Web of Science за период 2010–2025 гг. В результате анализа 134 источников были идентифицированы 39 BIM Uses, сгруппированные в девять функциональных категорий. Установлено, что наиболее распространёнными являются 3D-моделирование существующих условий, подсчёт объёмов и оценка стоимости, геометрическое проектирование, планирование технического обслуживания и анализ коллизий. Показано, что внедрение BIM в дорожной отрасли преимущественно сосредоточено на стадиях проектирования и строительства, тогда как эксплуатационные и экологические аспекты остаются менее проработанными. Также выявлено, что интеграция BIM с технологиями, такими как GIS, лазерное сканирование, облачные вычисления и искусственный интеллект, способствует повышению эффективности управления дорожными проектами. Полученные результаты могут быть использованы при разработке стратегий цифровизации дорожной отрасли и внедрении BIM-технологий в практике проектирования и строительства.</p> <p>Ключевые слова: BIM, автомобильные дороги, информационное моделирование, цифровые технологии, дорожное строительство</p>
<p>Бенедетто А.</p>	<p>Информация об авторах: <i>PhD, профессор, Университет Рома Тре, Рим, Италия. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1006-8928 E-mail: andrea.benedetto@uniroma3.it</i></p>
<p>Наймасов Б.</p>	<p><i>Магистр технических наук, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-6086-8797 E-mail: Rashiduly96@gmail.com</i></p>
<p>Шогелова Н.</p>	<p><i>PhD, ассоциированный профессор, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан. ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-5220-1459 E-mail: nazymshogelova@gmail.com</i></p>

Техникалық ғылымдар. Құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.1-2026-04>

ЭОЖ: 693

FTAMP: 67.23.15

Автомобиль жолдарын жобалау мен салуда BIM және қосымша біріктірілетін технологияларды қолданудың заманауи жетістіктері: жүйелі шолу**¹ Бенедетто А., ² Наймасов Б., ² Шогелова Н.**¹ Рим Тре университеті, Рим қаласы, Италия² Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ, Қазақстан* Хат алмасу үшін автор (корреспондент-автор): Rashiduly96@gmail.com

<p>Қабылданды: 2026 жылғы 2 наурыз Рецензиялау: 2026 жылғы 1 наурыз Баспаға қабылданды: 2026 жылғы 20 наурыз</p>	<p>Түйіндеме Мақалада автомобиль жолдары инфрақұрылымы жобаларында құрылысты ақпараттық модельдеу (BIM) технологиясын қолданудың заманауи тәсілдері қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – автомобиль жолдарының өмірлік циклінің әртүрлі кезеңдерінде қолданылатын BIM Uses жүйелеу, сондай-ақ ілеспе цифрлық технологияларды анықтау және олардың өзара байланысын талдау. Зерттеудің әдіснамалық негізі ретінде 2010–2025 жылдар аралығында Scopus және Web of Science деректер базаларын пайдалана отырып жүргізілген ғылыми жарияланымдарға жүйелі шолу алынды. 134 дереккөзді талдау нәтижесінде тоғыз функционалдық санатқа топтастырылған 39 BIM Uses анықталды. Ең кең таралған қолданулар ретінде қолданыстағы жағдайларды 3D-модельдеу, көлемдерді есептеу және құнын бағалау, геометриялық жобалау, техникалық қызмет көрсету жоспарын әзірлеу және коллизияларды талдау белгіленді. Зерттеу нәтижелері BIM технологиясының жол саласында негізінен жобалау және құрылыс кезеңдерінде қолданылатынын, ал пайдалану және экологиялық аспектілердің жеткіліксіз зерттелгенін көрсетті. Сонымен қатар, BIM-ді GIS, лазерлік сканерлеу, бұлттық есептеулер және жасанды интеллект сияқты технологиялармен біріктіру жол жобаларын басқарудың тиімділігін арттыратыны анықталды. Алынған нәтижелер жол саласын цифрландыру стратегияларын әзірлеуде және BIM технологияларын жобалау мен құрылыс тәжірибесіне енгізуде қолданылуы мүмкін.</p> <p>Түйін сөздер: BIM, автомобиль жолдары, ақпараттық модельдеу, цифрлық технологиялар, жол құрылысы</p>
<p>Бенедетто А.</p>	<p>Авторлар туралы ақпарат: <i>PhD, профессор, Рим Тре университеті, Рим қаласы, Италия.</i> ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1006-8928 E-mail: andrea.benedetto@uniroma3.it</p>
<p>Наймасов Б.</p>	<p><i>Техника ғылымдарының магистрі, Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты Алматы қ., Қазақстан Республикасы.</i> ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-6086-8797 E-mail: Rashiduly96@gmail.com</p>
<p>Шогелова Н.</p>	<p><i>PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты Алматы қ., Қазақстан Республикасы.</i> ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-5220-1459 E-mail: nazymshogelova@gmail.com</p>

Technical sciences: Construction

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.1-2026-04>

UDC: 693

IRSTI: 67.23.15

Advances in Road Design and Construction Using BIM and Complementary Integrated Technologies: A Systematic Review¹ **Benedetto A.**, ^{*2} **Naimassov B.**, ^{*2} **Shogelova N.**¹ Roma Tre University, Rome, Italy² Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Republic of Kazakhstan*Corresponding author e-mail: Rashiduly96@gmail.com

<p>Received: March 2, 2026 Under review: March 1, 2026 Accepted for publication: March 20, 2026</p>	<p>Abstract This paper examines modern approaches to the application of Building Information Modeling (BIM) in road infrastructure projects. The aim of the study is to systematize BIM Uses applied at different stages of the road lifecycle, as well as to identify complementary digital technologies and analyze their interrelationships. The methodological basis of the research is a systematic review of scientific publications conducted using the Scopus and Web of Science databases for the period 2010–2025. As a result of analyzing 134 sources, 39 BIM Uses were identified and classified into nine functional categories. The most commonly applied uses include 3D modeling of existing conditions, quantity take-off and cost estimation, geometric design, maintenance planning, and clash detection. The findings indicate that BIM implementation in the road sector is mainly concentrated at the design and construction stages, while operation and environmental aspects remain less developed. It was also revealed that the integration of BIM with technologies such as GIS, laser scanning, cloud computing, and artificial intelligence enhances the efficiency of road project management. The results obtained can be applied in the development of digitalization strategies for the road sector and in the implementation of BIM technologies in design and construction practices.</p> <p>Keywords: BIM, road infrastructure, information modeling, digital technologies, road construction</p>
<p>Benedetto A.</p>	<p>Information about authors: PhD, Professor, Roma Tre University, Rome, Italy. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1006-8928 E-mail: andrea.benedetto@uniroma3.it</p>
<p>Naimassov B.</p>	<p>Master of Technical Sciences, Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-6086-8797 E-mail: yerdauletkyzy.antal@gmail.com</p>
<p>Shogelova N.</p>	<p>PhD, associate professor, Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Republic of Kazakhstan. ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-5220-1459 E-mail: nazymshogelova@gmail.com</p>

1. Введение

Автомобильные дороги как объекты инфраструктуры характеризуются множеством факторов и явлений, влияющих на прохождение всех стадий жизненного цикла проекта. Среди ключевых вызовов можно выделить высокую сложность проектных решений, необходимость изъятия земель и переноса инженерных сетей, управление транспортными потоками, влияние нормативно-правовых ограничений, значительные капитальные затраты, а также многоуровневое взаимодействие широкого круга заинтересованных сторон [1]. Часть этих задач может быть успешно решена традиционными методами, однако многие из них продолжают негативно воздействовать на сроки, бюджет, качество, безопасность, производительность и функциональность дорожных проектов. Эффективное управление разнообразными массивами данных, их обработка и использование становятся критически важными для принятия обоснованных инженерных решений и повышения качества управления проектом [2].

Поиск инструментов, способных повысить эффективность реализации дорожных проектов, остается актуальной задачей для исследователей и практиков. Одним из наиболее перспективных решений является технология информационного моделирования строительства (BIM), которая, применительно к линейным инфраструктурным объектам, всё чаще обозначается как Civil Information Modeling (CiM) [3].

BIM доказал свою высокую ценность прежде всего в крупных и сложных проектах. Singh, Gu и Wang [4] отмечают, что в таких условиях становятся необходимыми специализированные роли — менеджер информационной модели и администратор BIM-сервера. Особенно возрастает сложность, когда проектирование связано с использованием существующих данных: архивных чертежей, пространственных взаимосвязей инженерных систем и других характеристик объекта. Li [5] также подчёркивает, что в условиях Китая применение BIM в сложных проектах стало фактически обязательным из-за сжатых сроков строительства, сложной архитектурной формы объектов и высокой плотности инженерных коммуникаций. BIM используется прежде всего для повышения эффективности проектирования и выполнения проверок на коллизии, что снижает вероятность ошибок в рабочей документации. Несмотря на выявленные технологические барьеры и сложности внедрения, исследователи сходятся во мнении, что BIM становится важнейшим инструментом в инженерной практике, обеспечивая преимущества в области проектирования, координации и управления ресурсами.

В то время как в строительстве зданий BIM уже получил широкое распространение, его применение в дорожной отрасли по-прежнему остается ограниченным. Однако за последние годы отмечается быстрый рост интереса к BIM в дорожных проектах, что делает эту тему одной из наиболее развивающихся в научной среде [6]. Преимущества BIM — снижение количества ошибок, улучшение коммуникации, повышение точности проектирования и согласованности данных — хорошо подтверждены в строительных проектах, и эти же преимущества имеют высокий потенциал для дорожных проектов. Согласно опросу Jones и Laquidara [7], лишь 4 % профессионалов считают, что внедрение BIM в инфраструктурные проекты приводит к отрицательному ROI.

Эффективность применения BIM в дорожном строительстве во многом зависит от корректного определения сфер его использования. Первоначально BIM Uses были сформированы на основании опыта применения технологии в зданиях, однако дорожные проекты существенно отличаются по типу решений и требованиям [7,8]. Дороги представляют собой протяженные линейные объекты, требующие проработки рельефа, геологии, окружающей среды, транспортных потоков и воздействия природных факторов. В отличие от зданий, дороги более подвержены влиянию движения, климатических условий и природных процессов. Следовательно, дорожные проекты требуют углубленного анализа рельефа, геоусловий, экологии и трафика, тогда как в строительных проектах основной акцент делается на выявление коллизий. Также различаются процессы

проектирования, проверки нормативов, анализа безопасности, управления рисками и планирования строительства [9].

Эти различия обосновывают необходимость определения специфических BIM Uses, адаптированных именно под дорожные проекты. Для успешного внедрения технологии необходимо корректно распределять BIM-функции между стадиями жизненного цикла, что требует понимания их особенностей и возможностей. Несмотря на растущий интерес, большинство доступных источников всё ещё ориентированы на здания, что приводит к недостатку обобщающих исследований по BIM Uses в дорожной отрасли, а также отсутствию работ, рассматривающих перспективные BIM-функции, которые ещё не применяются, но имеют потенциал решения отраслевых проблем [10].

В этой связи данное исследование преследует три основные цели:

- выявить BIM Uses, применяемые на различных стадиях жизненного цикла дорожных проектов;
- определить технологии, которые используются совместно с BIM при реализации дорожных проектов;

Эти задачи решаются на основе анализа научных публикаций, нормативно-технических документов и практических примеров применения BIM в дорожном строительстве.

Научная новизна исследования заключается в систематизации BIM Uses, применяемых в дорожных проектах, с выделением их функциональной структуры и взаимосвязи с современными цифровыми технологиями. В отличие от существующих работ, в данном исследовании выполнен комплексный анализ BIM Uses с учётом стадий жизненного цикла дорожных объектов и проведена их классификация в контексте цифровизации строительной отрасли.

2. Литературный обзор

2.1. BIM Uses и основные документы

В рамках программы Computer Integrated Construction [11] в руководстве BIM Project Execution Planning Guide BIM-use трактуется как «отдельная задача или процедура в проекте, которая получает выгоду от интеграции BIM в соответствующий процесс». В BIM Guidelines of New York City BIM Uses определяются как «наиболее распространённые области применения BIM в проектах проектирования и строительства» [12].

В настоящем исследовании BIM Use рассматривается как совокупность операций, действий или процедур, которые выполняются с использованием BIM и обеспечивают пользу на определённом этапе жизненного цикла строительного проекта.

Существуют документы, в которых содержится описание BIM Uses и сопутствующая информация. Например, BIM Project Execution Planning Guide [13] детализирует двадцать пять BIM Uses и предлагает методологию внедрения BIM, основанную на четырёх ключевых шагах:

- (1) определение BIM Uses и целей проекта;
- (2) разработка процесса реализации BIM-модели;
- (3) разработка схем информационного обмена;
- (4) формирование инфраструктуры, обеспечивающей внедрение BIM.

Правильная идентификация BIM Uses рассматривается как первоочередной и принципиально важный этап внедрения BIM.

BIM Guidelines of New York City представляет руководство по применению BIM в различных типах зданий и подразделениях муниципальных ведомств, где подробно описаны пятнадцать BIM Uses [11].

Succar [14] предлагает расширенную классификацию, включающую семьдесят три BIM Uses, сгруппированных в семь категорий. В перечень включены современные методы и технологии — 3D-печать, лазерное сканирование, фотограмметрия, Lean-концепции и виртуальная реальность.

Massachusetts Port Authority [15] публикует руководство по реализации Lean BIM в строительных проектах, где описано пятьдесят один BIM Use, а также приведены данные о распределении ответственности, ожидаемых результатах и используемом программном обеспечении.

Rojas и соавторы [16] разработали инструмент для оценки BIM Uses на стадиях планирования и проектирования, в рамках которого идентифицировано и описано десять BIM Uses, характерных для строительных проектов.

Несмотря на наличие разнообразных документов, в которых представлено большое число BIM Uses, потребности дорожной инфраструктуры освещены недостаточно. Это объясняется тем, что большинство существующих BIM Uses формировались преимущественно на основе практики в сфере строительства зданий, а не линейных объектов.

2.2. Обзор литературы по применению BIM в инфраструктурных проектах

Исследования, посвящённые применению BIM в инфраструктурной сфере, представлены достаточно широко. Bradley и соавт. [17] выполнили систематический обзор научных работ по BIM в инфраструктуре с позиции подрядных организаций. Авторы проанализировали 259 источников, применив качественные и количественные методы для классификации публикаций по времени, странам, стадиям проекта, отраслевым секторам, организационным уровням и бизнес-аспектам. В результате были выделены четыре ключевые направления исследований:

- (1) BIM для инфраструктуры,
- (2) модели данных и процессов,
- (3) BIM в деятельности подрядчиков,
- (4) существующие исследовательские пробелы.

Costin и соавт. [18] представили обзор применения BIM в транспортной инфраструктуре в целом. Авторы изучили 189 материалов, включающих отчёты, материалы конференций и журнальные статьи. Рассматривались актуальные направления исследований, тенденции, области применения, BIM Uses, новые технологии, преимущества, ограничения, проблемы и нерешённые вопросы. Было показано, что в последние годы интерес к BIM в инфраструктуре существенно возрос, причем основное внимание уделяется автомобильным дорогам, магистралям и мостам.

Noor [19] провёл мета-анализ 3203 публикаций, связанных с внедрением BIM в строительной отрасли. Использовалась система мета-классификации, включающая девять категорий: область, предмет, процесс, уровень исследования, методология, вклад, инструменты BIM, страна и организация. На примере внедрения BIM на промежуточных железнодорожных станциях было выявлено, что большинство исследований выполняются в академической среде, тогда как научные центры и частный сектор проявляют относительно низкую активность.

Несмотря на наличие обзоров, посвящённых инфраструктурным объектам в целом, исследований, специально ориентированных на дорожные проекты, остаётся недостаточно. Обычно в анализ включаются все виды инфраструктуры — мосты, дороги, железные дороги, тоннели, аэропорты и порты, — что затрудняет формирование целостного понимания именно дорожной специфики.

Сера и соавт. [20] выполнили обзор использования BIM и технологий информационно-коммуникационных систем (ИКТ) в транспортных инфраструктурных проектах. Целью исследования было определить характер взаимосвязи между BIM, ИКТ и современными публикациями. Авторы отмечают, что интеграция BIM и ИКТ в управлении объектами позволяет применять методы анализа данных, повышать обоснованность принимаемых решений и оптимизировать использование ресурсов. Кроме того, комбинированное применение BIM и ИКТ способствует развитию современных систем управления.

В целом, существующие обзорные исследования в основном направлены на анализ внедрения BIM в транспортной инфраструктуре, применяя качественные и количественные методы для выявления основных тенденций. Это позволило углубиться в отдельные области — например, применение BIM на железнодорожных станциях или интеграцию BIM и ИКТ в реализации транспортных проектов. Однако остаётся значительный пробел, связанный с систематизацией сведений о BIM Uses и дополнительных технологиях, применяемых именно в дорожных проектах. Настоящее исследование направлено на устранение этой лакуны путём системного выявления BIM Uses и сопряженных технологий, используемых при реализации проектов дорожной инфраструктуры.

2.3. Внедрение BIM в смежные дорожные сооружения

Ряд исследований посвящен анализу применения BIM в структурах, которые являются составной частью дорожных проектов. Dayan и соавт. [21] рассмотрели различные аспекты использования информационного моделирования в управлении мостами. Авторы выявили области недостаточной изученности, существующие ограничения и перспективные направления исследований. На основе описательного и контент-анализа были определены ключевые тематические направления, тенденции по ключевым словам, ведущие журналы и регулярность публикаций в разных предметных категориях. Результаты показали, что специалисты в области Bridge Information Modeling (BrIM) в первую очередь сосредоточены на разработке новых методов инспекции и испытаний мостов, а также на совершенствовании процессов технического обслуживания, уделяя особое внимание бетонным сооружениям.

Wei и коллеги [22] проанализировали достижения в применении BIM и GIS в мостостроительных проектах за последние десять лет, отобрав 90 публикаций, соответствующих установленным критериям. Обзор выявил наиболее прогрессивные BIM- и GIS-технологии, применяемые на стадиях планирования, проектирования, строительства, эксплуатации и обслуживания мостов. Однако было отмечено, что использование BIM и GIS на различных стадиях чаще всего происходит независимо. Выводы исследования предлагают практикам ориентиры для выбора наиболее подходящих BIM- и GIS-инструментов в зависимости от задач мостового проекта.

Costin и коллеги [18] провели обновлённый и критический обзор направлений исследований в области применения BIM в транспортной инфраструктуре. Целью работы было стимулировать дальнейшие исследования и внедрение BIM. Результаты показали рост числа публикаций и практических внедрений, преимущественно в дорожных и мостовых проектах. Авторы подчеркивают важность тесного сотрудничества научного сообщества и отрасли для преодоления технологических барьеров и повышения эффективности применения BIM в инфраструктурных проектах.

Аналогично мостам, ряд исследований посвящён внедрению BIM в тоннелестроении. Zhou и соавт. [23] представили обзор потенциальных областей применения BIM в тоннельных проектах Китая на основе анализа двух реализованных объектов. Результаты показали, что основное внимание уделяется стадии проектирования, тогда как строительство и эксплуатация охватываются в меньшей степени. BIM способствует решению вопросов интеграции информации, стандартизации данных и взаимодействия разных программных продуктов, однако остаются проблемы организационного характера и сложности интеграции с геоинформационными системами (GIS).

Таким образом, значительная часть существующей литературы посвящена внедрению BIM в мосты и тоннели. Однако исследований, объединяющих достижения в BIM Uses и сопутствующих технологиях именно в дорожной сфере, по-прежнему недостаточно. Данное исследование направлено на заполнение этого пробела, систематизируя и выявляя ключевые особенности применения BIM Uses в дорожных инфраструктурных проектах.

2.4. Программные инструменты BIM для дорожных проектов

Разнообразие требований, предъявляемых к дорожным проектам, обусловило развитие широкого спектра программных решений, поддерживающих различные BIM-функции на всех стадиях жизненного цикла дороги. Одним из наиболее распространенных инструментов является Autodesk Civil 3D, предлагающий мощный набор средств для проектирования дорожной инфраструктуры: моделирование рельефа, геометрическое проектирование трасс, гидрологический анализ и формирование информационно насыщенных моделей, необходимых для принятия обоснованных инженерных решений [24].

Autodesk InfraWorks служит эффективным дополнением к Civil 3D и используется для концептуального моделирования и цифровизации дорожных проектов в рамках BIM-подхода. Программный комплекс известен своей способностью создавать реалистичные 3D-визуализации, выполнять предварительный анализ и интегрировать инструменты для транспортного моделирования, гидрологических расчётов, оптимизации геометрии, предварительного анализа мостов, оценки воздействия на окружающую среду и расчёта объёмов работ [25].

Компания Bentley Systems предлагает платформу OpenRoads — комплексное решение для моделирования, симуляции и анализа автомобильных дорог и магистралей. Продукт содержит развитый функционал для проектирования трасс и позволяет учитывать транспортные, экологические и инженерные параметры, что делает его востребованным в сложных инфраструктурных проектах [26].

Для моделирования транспортных потоков широко применяется VISSIM от PTV Group. Этот инструмент обеспечивает детализированное моделирование поведения транспортных средств при различных условиях, что особенно важно на этапе планирования и проектирования сложных дорожных узлов и развязок [27].

Помимо указанных решений, на рынке появляются и другие инструменты, ориентированные на поддержку BIM в дорожной отрасли, включая Tekla [28], Vectorworks Landmark [29], Allplan Engineering Civil [30], RoadEng Civil Engineer [31] и ряд специализированных платформ.

3. Материалы и методы

Систематический обзор представляет собой строгий, научно обоснованный и прозрачный метод исследования [9], направленный на формирование актуального знания по определенному научному вопросу или тематике. Такой подход предусматривает всесторонний анализ литературы и различных источников, что позволяет выявить, какие аспекты изучены достаточным образом, а какие остаются недостаточно освещенными [19].

3.1. Этапы систематического обзора и исследовательские вопросы

В данном исследовании применён систематический обзор, основанный на этапах, предложенных Briner и Denyer [32], Saieg и соавт. [33], а также Costin и коллегами [18], с учетом методологических рекомендаций Института Джоанны Бриггс (JBI), представленных в работе Lockwood и др. [34]. Указанные источники сформировали целостную и надежную методологическую основу, обеспечив строгий и последовательный анализ доступной литературы в соответствии с принципами метода PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [34].

Следование данным протоколам позволило обеспечить прозрачность, воспроизводимость и устойчивость результатов. Такой подход способствовал последовательной идентификации, оценке и интеграции релевантных исследований, что повысило достоверность и полноту итоговых выводов. На основе рассмотренных руководств были выделены пять основных этапов:

- (1) формулирование исследовательских вопросов;
- (2) поиск релевантных документов;

- (3) отбор документов;
- (4) сбор, анализ и синтез доказательств;
- (5) представление результатов.

3.2. Поиск релевантных документов

Поиск научных публикаций проводился за период 2010–2025 гг. с использованием баз данных Scopus и Web of Science. Последний поиск был выполнен в марте 2024 года.

На первом этапе поисковой процедуры были определены ключевые слова, логические операторы и поисковые формулы. Подбор ключевых слов осуществлялся на основе анализа исследовательских вопросов и предварительного обзора литературы. Затем были сформированы поисковые запросы, включающие различные комбинации ключевых слов, объединенных логическими операторами «AND» и «OR» (табл.1).

Поиск выполнялся в крупных научных базах данных Scopus и Web of Science (WoS), включающих электронные коллекции American Society of Civil Engineers (ASCE), Elsevier, Emerald Insight, Springer, Taylor & Francis и других издательств. Дополнительно использовался Google Scholar — прежде всего для поиска технических отчетов и руководств по внедрению BIM, содержащих информацию о BIM Uses в строительных проектах, которые затем сопоставлялись с найденными публикациями.

Всего было выявлено 564 документа. После первичного отбора, основанного на анализе названия, ключевых слов и аннотации, для дальнейшей работы были выбраны 384 источника. Затем они были закодированы и классифицированы с использованием интеллектуальной карты, созданной в программе XMind (версия 2020).

Таблица 1. Поисковые запросы, включающие различные комбинации ключевых слов, объединенных логическими операторами «AND» и «OR»

Ключевые слова	Логические операторы	Ключевые слова	Логические операторы	Ключевые слова	Логические операторы	Ключевые слова
Дорога Шоссе Автомагистраль Полотно дороги Горизонтальный Тяжелый Транспорт Инфраструктура Линейный	“И” “ИЛИ”	Моделирование информации о зданиях (BIM) Моделирование информации о гражданском строительстве (CiM) 4D, 5D и nD	“И” “ИЛИ”	Преимущества Использование Внедрение Применение Принятие Пример из практики Оценка Исследование Возможности Использование	“И” “ИЛИ”	Проектирование Планирование Строительство Эксплуатация Техническое обслуживание

3.3. Отбор документов

Отбор документов осуществлялся на основе трех критериев включения и исключения:

- (1) в публикации рассматриваются вопросы BIM или CiM;
- (2) исследование относится к дорожным проектам;
- (3) в документе содержится информация о BIM Uses, применяемых в дорожных проектах.

Дополнительно из анализа были исключены работы, посвященные исключительно мостам, тоннелям или другим специализированным инженерным сооружениям дорожной инфраструктуры. Такое решение обусловлено тем, что для данных объектов уже

существуют отдельные систематические исследования, и их включение могло бы сместить фокус текущей работы за пределы её задач. Вместе с тем публикации, в которых мосты, тоннели или иные сооружения рассматривались как элементы комплексных дорожных проектов, признавались значимыми и включались в анализ. Это позволило сохранить целостность и направленность исследования, концентрируясь на проектах автомобильных дорог в широком смысле.

Для систематизации материалов была создана таблица в Microsoft Excel, куда заносились сведения о каждом документе: код, название, авторы, база данных, год публикации, тип проекта и соответствие критериям включения/исключения. Оценка проводилась на основании анализа названия, аннотации, ключевых слов и выводов публикации, а затем уточнялась в ходе общего просмотра.

Если документ удовлетворял всем критериям включения/исключения, он отмечался как «Yes»; при несоответствии — как «No». Публикации, отвечающие всем трем критериям, были отнесены к категории «evidence», а работы, соответствующие только критериям (1) и (2), но не удовлетворяющие критерию (3), классифицировались как «background» (см. рисунок 2).

Тематический анализ позволил определить роль BIM Uses в области знаний и специфику их внедрения в дорожную инфраструктуру. Метод тематических карт особенно полезен при изучении структуры и эволюции исследовательской области: он позволяет визуализировать ключевые направления, оценить степень их зрелости и относительную значимость.

Сравнение проводилось качественно, на основе анализа названий и определений BIM Uses. Такой подход позволил определить, какие BIM-применения являются спецификой дорожных объектов и не встречаются в проектировании зданий. Было установлено, что дорожные проекты требуют использования отдельных BIM-инструментов и процедур, ориентированных на особенности проектирования, строительства и эксплуатации линейной инфраструктуры.

4. Результаты

Анализ 134 отобранных публикаций показывает, что основная научная активность в области внедрения BIM в дорожную инфраструктуру сосредоточена в странах с развитой экономикой. Наибольшее количество исследований приходится на Китай ($n = 129$; 96,3%), Италию ($n = 102$; 76,1%), Южную Корею ($n = 39$; 29,1%), Испанию ($n = 37$; 27,6%) и Великобританию ($n = 31$; 23,1%) (рисунок 1).

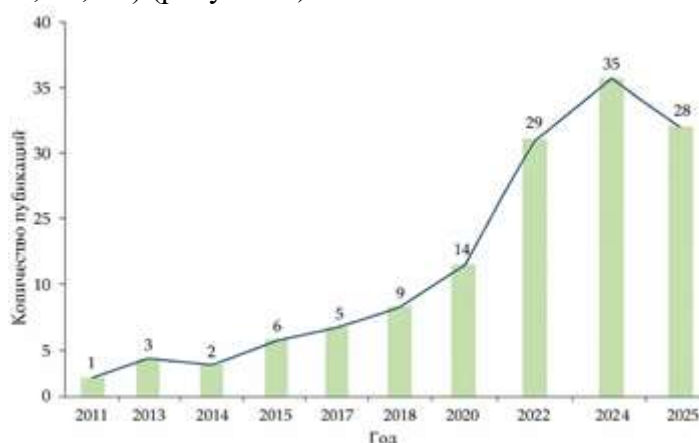


Рисунок 1. Годовая научная продукция по применению BIM в дорожных проектах [материал автора]

Указанные страны характеризуются не только высоким уровнем валового внутреннего продукта, но и занимают лидирующие позиции в международных рейтингах конкурентоспособности, таких как индекс Всемирного экономического форума. Активное

В результате анализа 134 публикаций, отнесённых к категории «evidence», было выявлено 39 BIM Uses, применяемых в дорожных проектах. Систематизация полученных данных позволила сгруппировать их в девять категорий в соответствии с их функциональной ролью и этапами жизненного цикла проекта.

Анализ показал, что наибольшее распространение получили следующие виды применения:

- (1) моделирование существующих условий в 3D — 65 упоминаний;
- (2) подсчёт объёмов и оценка стоимости — 43;
- (3) геометрическое проектирование — 34;
- (4) разработка планов технического обслуживания — 27;
- (5) анализ коллизий — 26.

Следует отметить, что многие из наиболее часто используемых BIM-функций в дорожных проектах широко применяются и в строительстве зданий. Это указывает на возможность адаптации методов и подходов, разработанных в рамках вертикального строительства, для решения задач дорожной инфраструктуры.

Проектирование автомобильных дорог является сложным и многоэтапным процессом, включающим участие различных заинтересованных сторон, выполнение множества операций и интенсивный обмен информацией [6,8]. При разработке проектных решений специалисты учитывают математические зависимости, нормативные требования и проектные критерии, определяющие такие параметры, как расчётные скорости, длина трассы, радиусы кривых и продольные уклоны [13].

Применение технологии информационного моделирования (BIM) позволяет существенно упростить процесс проектирования за счёт параметризации элементов дороги в цифровой модели. Изменение одного элемента автоматически приводит к обновлению связанных компонентов, а также обеспечивает автоматическую проверку соответствия проектным нормам и стандартам [7].

Таблица 2. Описание BIM Uses в категории «Проектирование дорог»

BIM Use	Описание
Моделирование существующих условий (3D)	Формирование трёхмерной модели территории проекта с учётом существующих условий: элементов съёмки, транспортной инфраструктуры, дорог, тротуаров, велосипедных дорожек, городской застройки, дорожных знаков, освещения, зданий, растительности, водных объектов и других элементов.
Оптимизация трассировки	Оптимизация продольного и поперечного профиля дороги с использованием BIM-инструментов с учётом экономических, экологических факторов, времени в пути, объёмов земляных работ, дренажа, освещения и энергопотребления.
Анализ коллизий	Выявление и устранение конфликтов между элементами проекта на основе сопоставления 3D-моделей различных разделов, выполняемое на разных стадиях проекта в зависимости от его сложности.
Проектирование и оценка придорожной инфраструктуры	Разработка и оценка элементов придорожной инфраструктуры (знаки, разметка, освещение, ограждения, барьеры и др.) с использованием цифрового моделирования для обеспечения безопасности и эффективности.
Подготовка проектной документации	Автоматизированное формирование проектной документации из BIM-модели, включая планы, профили, разрезы, расчёты, технические спецификации, сметы и другие материалы.
Проверка проектных решений	Мультидисциплинарная проверка проектных решений с использованием BIM-модели, выполняемая автоматически (алгоритмы, ИИ) или в процессе взаимодействия участников проекта, с учётом нормативов и качества проектирования.
Геометрическое проектирование	Проектирование геометрических параметров дороги: трассировки, кривых, уклонов, поперечных профилей, пересечений и других элементов с использованием специализированных BIM-инструментов и автоматической проверки нормативов.
Модульное проектирование и префабрикация	Разделение модели на модули для использования сборных элементов, что повышает эффективность строительства. Может быть связано с технологиями 3D-печати. Включает элементы, такие как бордюры, плиты покрытия, водоотводные системы, колодцы и др.

Функциональные возможности BIM, включая визуализацию, моделирование, координацию, оптимизацию и графическое представление, способствуют более эффективной оценке проектных альтернатив, повышению качества проектирования, выявлению и устранению ошибок, формированию проектной документации, внедрению сборных решений и решению других задач в области дорожного проектирования (табл. 2).

Анализ распределения BIM Uses по функциональным категориям показал, что наибольшее количество применений сосредоточено в области проектирования дорог, инженерного анализа и планирования строительства. В то же время категории, связанные с экологическими аспектами и транспортным анализом, представлены в меньшей степени. Это свидетельствует о том, что внедрение BIM в дорожной отрасли в настоящее время ориентировано преимущественно на стадии проектирования и строительства, тогда как эксплуатационные и экологические аспекты остаются недостаточно проработанными.

Анализ литературы также подтверждает общий тренд цифровизации строительной отрасли. Всё более широкое распространение получают такие BIM Uses, как анализ коллизий, планирование технического обслуживания и анализ земляных работ, направленные на предотвращение проектных ошибок, обеспечение долговечности инфраструктуры и повышение эффективности строительных процессов.

Дополнительно, внедрение инструментов 4D-моделирования, включая планирование строительства и анализ влияния строительных процессов, свидетельствует о переходе отрасли к более глубокой интеграции цифровых технологий. Это позволяет учитывать воздействие строительных работ на окружающую среду и пользователей дорожной инфраструктуры.

Особое внимание уделяется таким аспектам, как экологическое воздействие и безопасность строительства, что подчёркивает комплексный характер применения BIM. Совместное использование различных BIM Uses способствует формированию интегрированного подхода к принятию решений, позволяя учитывать широкий спектр факторов и альтернатив.

Таким образом, комбинированное применение BIM-инструментов является ключевым фактором повышения эффективности и устойчивости дорожных проектов на всех стадиях их жизненного цикла. В целом, выявленная тенденция к активному внедрению цифровых технологий подтверждает, что BIM будет играть определяющую роль в дальнейшем развитии дорожной отрасли, обеспечивая адаптацию к новым вызовам и требованиям.

5. Обсуждение

Полученные результаты согласуются с ранее проведёнными исследованиями в области BIM для транспортной инфраструктуры, в частности с работами Costin et al. [18] и Bradley et al., [17] где также отмечается преобладание применения BIM на стадиях проектирования и строительства. Однако в отличие от указанных исследований, в данной работе выполнена детализированная классификация BIM Uses, ориентированная непосредственно на дорожные проекты.

Проведённый обзор литературы выявил существенный пробел в исследованиях, направленных на систематизацию BIM Uses для дорожных проектов, а также технологий, способствующих их внедрению. Настоящее исследование восполняет данный пробел, предлагая обобщённый анализ существующих подходов, а также выявляя ключевые тенденции и направления развития BIM в дорожной отрасли.

Полученные результаты имеют высокую практическую и научную значимость, поскольку формируют основу для разработки инновационных решений, направленных на преодоление существующих проблем в дорожных инфраструктурных проектах. Анализ показал, что на текущем этапе BIM в дорожной отрасли используется преимущественно для

традиционных задач, таких как моделирование существующих условий и подсчёт объёмов и оценка стоимости. В то же время внедрение более специализированных BIM Uses остаётся ограниченным, что указывает на необходимость разработки новых инструментов и методологий, адаптированных к специфике линейной инфраструктуры.

К таким перспективным направлениям относятся: планирование управления транспортными потоками, мониторинг движения, моделирование движения, анализ освещения, оценка устойчивости, анализ подземных коммуникаций, а также анализ влияния строительных процессов. Ожидается, что в ближайшие годы именно эти направления станут ключевыми драйверами развития BIM в дорожных проектах.

Особое значение приобретает развитие BIM в контексте устойчивого строительства. Усиление внимания к экологическим аспектам предполагает активное внедрение инструментов, позволяющих оценивать проекты с точки зрения воздействия на окружающую среду и климатические изменения. Это создаёт предпосылки для формирования экологически ориентированной дорожной инфраструктуры [35].

Одним из наиболее перспективных направлений является интеграция BIM с технологиями искусственного интеллекта (AI). Такое объединение позволяет значительно повысить эффективность всех стадий жизненного цикла проекта — от проектирования до эксплуатации. Использование алгоритмов машинного обучения и интеллектуального анализа данных обеспечивает автоматизацию выбора проектных решений, оптимизацию трассировки и более точное моделирование альтернативных сценариев [36].

В области проектирования дорог ожидается переход к более широкому использованию BIM-инструментов для автоматизации геопространственного анализа и оптимизации проектных решений. Особую роль при этом будут играть коллаборативные подходы, обеспечивающие участие специалистов различных дисциплин в едином информационном пространстве. Внедрение методов прогнозного моделирования и цифровых симуляций на ранних этапах позволит более точно оценивать воздействие проектов на окружающую среду и эффективность использования ресурсов [6].

Существенные изменения происходят и в управлении строительством. Несмотря на существующие ограничения в применении BIM для мониторинга строительных процессов, наблюдается тенденция к расширению его функционала. В частности, внедрение технологий дополненной реальности и систем отслеживания в реальном времени позволяет повысить точность контроля и оперативность принятия решений на строительной площадке.

Дополнительным фактором повышения эффективности является интеграция систем управления данными и инструментов совместной работы, что способствует улучшению взаимодействия между проектными и строительными командами. Это, в свою очередь, обеспечивает более точную реализацию проектных решений.

Перспективным направлением также является развитие префабрикации и модульного строительства с использованием BIM. Несмотря на очевидные преимущества, такие как снижение отходов, повышение точности и оптимизация ресурсов, данные подходы пока применяются ограниченно. В дальнейшем возможно активное внедрение технологий 3D-печати и роботизации, что позволит существенно повысить эффективность строительных процессов.

Отдельного внимания заслуживает применение технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальности в сочетании с BIM. Несмотря на высокий потенциал, их использование в дорожной отрасли остаётся ограниченным. В то же время их интеграция может существенно улучшить визуализацию, обучение и управление проектами.

В целом, результаты исследования подтверждают, что сочетание BIM с современными цифровыми технологиями формирует основу для трансформации дорожной отрасли. Разработка специализированных BIM Uses и их интеграция с технологиями

Индустрии 4.0 позволит преодолеть существующие ограничения и создать новые подходы к управлению сложными инфраструктурными проектами.

В условиях Республики Казахстан внедрение BIM в дорожной отрасли находится на стадии активного развития. Полученные результаты могут быть использованы для формирования национальных подходов к цифровизации дорожной инфраструктуры, а также при разработке нормативных документов и методических рекомендаций по применению BIM-технологий.

6. Заключение

В результате проведённого исследования была выполнена систематизация BIM Uses, применяемых в дорожных проектах, а также выявлены ключевые тенденции их развития и взаимосвязь с современными цифровыми технологиями.

Настоящее исследование вносит значимый вклад в развитие научных представлений о применении BIM в дорожной инфраструктуре, решая три ключевые задачи: выявление BIM Uses на различных стадиях жизненного цикла дорожных проектов, определение сопутствующих технологий, а также анализ их взаимосвязи и эволюции.

Методологической основой работы стал систематический обзор 134 научных источников, выполненный в соответствии с пятиэтапным подходом, включающим формулирование исследовательских вопросов, поиск и отбор литературы, сбор и анализ данных, а также обобщение результатов. Такой подход обеспечил достоверность и полноту полученных выводов.

В рамках исследования были идентифицированы и систематизированы 39 BIM Uses, сгруппированные в девять функциональных направлений: проектирование дорог, анализ транспортных потоков, геотехнические аспекты, безопасность дорожного движения, экологические факторы, инженерный анализ, планирование и управление строительством, анализ стоимости, а также мониторинг и контроль реализации проектов. Полученные результаты подтверждают универсальность и высокую адаптивность BIM в контексте дорожного строительства.

Дополнительно выявлено 26 технологий, эффективно дополняющих BIM, включая геоинформационные системы (GIS), лазерное сканирование, облачные вычисления, фотограмметрию, дроны и сенсорные системы. Интеграция этих технологий значительно расширяет функциональные возможности BIM, способствуя повышению точности моделирования, автоматизации процессов и улучшению качества принимаемых решений.

Анализ взаимосвязей между BIM Uses и сопутствующими технологиями показал наличие устойчивых функциональных связей, обеспечивающих решение различных задач на всех стадиях жизненного цикла проекта. Установлено, что комплексное применение BIM-инструментов и цифровых технологий позволяет эффективно решать ключевые проблемы дорожных проектов, включая задержки сроков, перерасход бюджета, конфликты и низкую эффективность управления.

Результаты исследования также показали, что внедрение BIM в дорожных проектах в настоящее время сосредоточено преимущественно на традиционных применениях, таких как 3D-моделирование существующих условий, 4D-планирование строительства, подсчёт объёмов и оценка стоимости, а также анализ коллизий. Вместе с тем наблюдается формирование специализированных BIM Uses, ориентированных на особенности дорожной инфраструктуры, включая оптимизацию трассировки, анализ транспортных потоков, моделирование движения, анализ безопасности и анализ дорожного покрытия.

Несмотря на расширение области применения BIM, его внедрение остаётся ограниченным на стадиях эксплуатации и технического обслуживания, что указывает на значительный потенциал дальнейших исследований и практического развития в этом направлении.

Интеграция BIM с технологиями Индустрии 4.0, включая искусственный интеллект, интернет вещей и большие данные, открывает перспективы формирования

интеллектуальной дорожной инфраструктуры и концепции «умных городов». Ожидается, что дальнейшее развитие этих направлений приведёт к существенным изменениям в подходах к проектированию, строительству и управлению дорожными объектами.

К ограничениям исследования следует отнести недостаточную представленность работ из стран Африки, фокус исключительно на дорожных проектах, а также исключение мостов и тоннелей из анализа.

Перспективные направления дальнейших исследований включают:

- развитие и внедрение новых BIM Uses, ориентированных на специфику дорожных проектов;
- комплексное использование BIM и технологий Индустрии 4.0;
- расширение анализа на другие виды транспортной инфраструктуры;
- исследование интеграции BIM с концепцией «умных городов»;
- анализ барьеров и факторов успешного внедрения BIM в дорожной отрасли.

В целом результаты исследования подтверждают, что BIM и сопутствующие цифровые технологии играют ключевую роль в трансформации дорожного строительства, обеспечивая повышение эффективности, устойчивости и качества инфраструктурных проектов.

Таким образом, внедрение BIM в дорожной отрасли является важным фактором повышения эффективности и устойчивости инфраструктурных проектов, а его дальнейшее развитие будет связано с интеграцией технологий Индустрии 4.0 и переходом к интеллектуальным транспортным системам.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Бенедетто А., Наймасов Б, Шогелова Н. Современные достижения в проектировании и строительстве автомобильных дорог с применением BIM и дополнительно интегрируемых технологий: систематический обзор // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyryn Khabarshysy. 2026; 1 (13): 44-64. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.1-2026-04>

Cite this article as: Benedetto A., Naimassov B., Shogelova N. Advances in Road Design and Construction Using BIM and Complementary Integrated Technologies: A Systematic Review // Vestnik Kazhskogo avtomobil'no-dorozhnogo institute = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutyryn Khabarshysy. 2026; 1 (13): 44-64. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.1-2026-04>

Литература

1. Deep, S., Banerjee, S., Dixit, S., & Vatin, N. (2022). Critical factors influencing the performance of highway projects: Empirical evaluation of Indian projects. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings12060849>
2. Zhou, D., Pei, B., Li, X., Jiang, D., & Wen, L. (2024). Innovative BIM technology application in the construction management of highway. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66232-5>
3. Sulistyowati, S., & Handayani, I. (2023). Implementation of building information modelling (BIM) for road infrastructure in the design phase. *Teknika*. <https://doi.org/10.26623/teknika.v18i1.5601>
4. Singh, V., Gu, N., & Wang, X. (2011). A theoretical framework of a BIM-based multi-disciplinary collaboration platform. *Automation in Construction*, 20, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.011>
5. Li, Y. (2020). Brief analysis of the application and limitation of BIM in project life cycle management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 780. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/780/5/052001>
6. Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R., Gómez-Cabrera, A., & Mejía, G. (2024). Building information modeling uses and complementary technologies in road projects: A systematic review. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14030563>

7. Jones, S., Laquidara-Carr, D., Lorenz, A., Buckley, B., & Barnett, S. (2017). *The business value of BIM for infrastructure 2017*. SmartMarket Report.
8. Juszczak, A. (2023). BIM in the construction process: Selected problems at the stage of implementation in Polish road engineering. *Archives of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.140190>
9. Nielsen, O., Miceli, G., Filho, A., & Pellanda, P. (2024). A review of global efforts in BIM adoption for road infrastructure. *Infrastructures*. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9080126>
10. Belcher, E., & Abraham, Y. (2023). Lifecycle applications of building information modeling for transportation infrastructure projects. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings13092300>
11. Computer Integrated Construction Research Program. (2010). *Building information modeling execution planning guide (Version 2.0)*. The Pennsylvania State University.
12. Bloomberg, M., Burney, D., & Resnick, D. (2012). *BIM guidelines*. Department of Design + Construction. <https://www.nyc.gov/assets/ddc/downloads/publications/guides-manuals/bim-guide.pdf>
13. Messner, J., Anumba, C., Dubler, C., Goodman, S., Kasprzak, C., Kreider, R., Leicht, R., Saluja, C., & Zikic, N. (2015). *BIM project execution planning guide (Version 2.2)*. The Pennsylvania State University. <http://bim.psu.edu>
14. Succar, B. (n.d.). *BIME initiative: Model uses table*. <https://bimexcellence.org/files/211in-Model-Uses-Table.pdf>
15. Massport. (2016). *BIM guidelines for vertical and horizontal construction*. The Massachusetts Port Authority.
16. Rojas, M. J., Herrera, R. F., Mourgues, C., Ponz-Tienda, J. L., Alarcón, L. F., & Pellicer, E. (2019). BIM use assessment (BUA) tool for characterizing the application levels of BIM uses for the planning and design of construction projects. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 9094254. <https://doi.org/10.1155/2019/9094254>
17. Bradley, A., Li, H., Lark, R., & Dunn, S. (2016). BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*, 71, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>
18. Costin, A., Adibfar, A., Hu, H., & Chen, S. S. (2018). Building information modeling (BIM) for transportation infrastructure—Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, 94, 257–281. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>
19. Noor, B. A., & Yi, S. (2018). Review of BIM literature in construction industry and transportation: Meta-analysis. *Construction Innovation*, 18(4), 433–452. <https://doi.org/10.1108/CI-05-2017-0040>
20. Cepa, J. J., Pavón, R. M., Alberti, M. G., Ciccone, A., & Asprone, D. (2023). A review on the implementation of the BIM methodology in operation, maintenance, and transport infrastructure. *Applied Sciences*, 13(5), 3176. <https://doi.org/10.3390/app13053176>
21. Dayan, V., Chileshe, N., & Hassanli, R. (2022). A scoping review of information-modeling development in bridge management systems. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148, 03122006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.000234](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000234)
22. Wei, J., Chen, G., Huang, J., Xu, L., Yang, Y., Wang, J., & Sadick, A.-M. (2021). BIM and GIS applications in bridge projects: A critical review. *Applied Sciences*, 11(13), 6207. <https://doi.org/10.3390/app11136207>
23. Zhou, W., Qin, H., Qiu, J., Fan, H., Lai, J., Wang, K., & Wang, L. (2017). Building information modelling review with potential applications in tunnel engineering of China. *Royal Society Open Science*, 4(8), 170174. <https://doi.org/10.1098/rsos.170174>
24. Autodesk. (2024). *Civil 3D 2024 software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://latinoamerica.autodesk.com/products/civil-3d/overview>

25. Autodesk. (2024). *InfraWorks 2024 software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.autodesk.com/products/infracworks/overview>
26. Bentley Systems. (2024). *OpenRoads Designer software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://es-la.bentley.com/software/openroads-designer/>
27. PTV Group. (2024). *PTV Vissim traffic simulation software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>
28. Trimble. (2024). *Tekla structures software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.tekla.com>
29. Vectorworks. (2024). *Vectorworks Landmark software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.vectorworks.net>
30. ALLPLAN. (2024). *Allplan civil engineering software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.allplan.com>
31. Softree Technical Systems. (2024). *RoadEng civil engineer software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.softree.com>
32. Briner, R., & Denyer, D. (2012). Systematic review and evidence synthesis as a practice and scholarship tool. In *The Oxford handbook of evidence-based management* (pp. 112–129). Oxford University Press.
33. Saieg, P., Dominguez, E., Nascimento, D., & Goyannes, R. (2018). Interactions of building information modeling, lean and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 174, 788–806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>
34. Lockwood, C., Porritt, K., Munn, Z., et al. (2020). *JBIM manual for evidence synthesis*. JBI.
35. Zubair, M., Ali, M., Khan, M., Khan, A., Hassan, M., & Tanoli, W. (2024). BIM- and GIS-based life-cycle assessment framework. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14020360>
36. Yang, L. (2025). A comprehensive review of BIM and deep learning integration. *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*. <https://doi.org/10.70393/6a69656173.333030>

References

1. Deep, S., Banerjee, S., Dixit, S., & Vatin, N. (2022). Critical factors influencing the performance of highway projects: Empirical evaluation of Indian projects. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings12060849>
2. Zhou, D., Pei, B., Li, X., Jiang, D., & Wen, L. (2024). Innovative BIM technology application in the construction management of highway. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66232-5>
3. Sulistyowati, S., & Handayani, I. (2023). Implementation of building information modelling (BIM) for road infrastructure in the design phase. *Teknika*. <https://doi.org/10.26623/teknika.v18i1.5601>
4. Singh, V., Gu, N., & Wang, X. (2011). A theoretical framework of a BIM-based multi-disciplinary collaboration platform. *Automation in Construction*, 20, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.011>
5. Li, Y. (2020). Brief analysis of the application and limitation of BIM in project life cycle management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 780. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/780/5/052001>
6. Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R., Gómez-Cabrera, A., & Mejía, G. (2024). Building information modeling uses and complementary technologies in road projects: A systematic review. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14030563>
7. Jones, S., Laquidara-Carr, D., Lorenz, A., Buckley, B., & Barnett, S. (2017). *The business value of BIM for infrastructure 2017*. SmartMarket Report.

8. Juszczak, A. (2023). BIM in the construction process: Selected problems at the stage of implementation in Polish road engineering. *Archives of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.140190>
9. Nielsen, O., Miceli, G., Filho, A., & Pellanda, P. (2024). A review of global efforts in BIM adoption for road infrastructure. *Infrastructures*. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9080126>
10. Belcher, E., & Abraham, Y. (2023). Lifecycle applications of building information modeling for transportation infrastructure projects. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings13092300>
11. Computer Integrated Construction Research Program. (2010). *Building information modeling execution planning guide (Version 2.0)*. The Pennsylvania State University.
12. Bloomberg, M., Burney, D., & Resnick, D. (2012). *BIM guidelines*. Department of Design + Construction. <https://www.nyc.gov/assets/ddc/downloads/publications/guides-manuals/bim-guide.pdf>
13. Messner, J., Anumba, C., Dubler, C., Goodman, S., Kasprzak, C., Kreider, R., Leicht, R., Saluja, C., & Zikic, N. (2015). *BIM project execution planning guide (Version 2.2)*. The Pennsylvania State University. <http://bim.psu.edu>
14. Succar, B. (n.d.). *BIMe initiative: Model uses table*. <https://bimexcellence.org/files/211in-Model-Uses-Table.pdf>
15. Massport. (2016). *BIM guidelines for vertical and horizontal construction*. The Massachusetts Port Authority.
16. Rojas, M. J., Herrera, R. F., Mourgues, C., Ponz-Tienda, J. L., Alarcón, L. F., & Pellicer, E. (2019). BIM use assessment (BUA) tool for characterizing the application levels of BIM uses for the planning and design of construction projects. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 9094254. <https://doi.org/10.1155/2019/9094254>
17. Bradley, A., Li, H., Lark, R., & Dunn, S. (2016). BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*, 71, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>
18. Costin, A., Adibfar, A., Hu, H., & Chen, S. S. (2018). Building information modeling (BIM) for transportation infrastructure—Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, 94, 257–281. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>
19. Noor, B. A., & Yi, S. (2018). Review of BIM literature in construction industry and transportation: Meta-analysis. *Construction Innovation*, 18(4), 433–452. <https://doi.org/10.1108/CI-05-2017-0040>
20. Cepa, J. J., Pavón, R. M., Alberti, M. G., Ciccone, A., & Asprone, D. (2023). A review on the implementation of the BIM methodology in operation, maintenance, and transport infrastructure. *Applied Sciences*, 13(5), 3176. <https://doi.org/10.3390/app13053176>
21. Dayan, V., Chileshe, N., & Hassanli, R. (2022). A scoping review of information-modeling development in bridge management systems. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148, 03122006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.000234](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000234)
22. Wei, J., Chen, G., Huang, J., Xu, L., Yang, Y., Wang, J., & Sadick, A.-M. (2021). BIM and GIS applications in bridge projects: A critical review. *Applied Sciences*, 11(13), 6207. <https://doi.org/10.3390/app11136207>
23. Zhou, W., Qin, H., Qiu, J., Fan, H., Lai, J., Wang, K., & Wang, L. (2017). Building information modelling review with potential applications in tunnel engineering of China. *Royal Society Open Science*, 4(8), 170174. <https://doi.org/10.1098/rsos.170174>

24. Autodesk. (2024). *Civil 3D 2024 software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://latinoamerica.autodesk.com/products/civil-3d/overview>
25. Autodesk. (2024). *InfraWorks 2024 software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.autodesk.com/products/infraworks/overview>
26. Bentley Systems. (2024). *OpenRoads Designer software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://es-la.bentley.com/software/openroads-designer/>
27. PTV Group. (2024). *PTV Vissim traffic simulation software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>
28. Trimble. (2024). *Tekla structures software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.tekla.com>
29. Vectorworks. (2024). *Vectorworks Landmark software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.vectorworks.net>
30. ALLPLAN. (2024). *Allplan civil engineering software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.allplan.com>
31. Softree Technical Systems. (2024). *RoadEng civil engineer software*. Retrieved December 31, 2025, from <https://www.softree.com>
32. Briner, R., & Denyer, D. (2012). Systematic review and evidence synthesis as a practice and scholarship tool. In *The Oxford handbook of evidence-based management* (pp. 112–129). Oxford University Press.
33. Saieg, P., Dominguez, E., Nascimento, D., & Goyannes, R. (2018). Interactions of building information modeling, lean and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 174, 788–806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>
34. Lockwood, C., Porritt, K., Munn, Z., et al. (2020). *JBIM manual for evidence synthesis*. JBI.
35. Zubair, M., Ali, M., Khan, M., Khan, A., Hassan, M., & Tanoli, W. (2024). BIM- and GIS-based life-cycle assessment framework. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14020360>
36. Yang, L. (2025). A comprehensive review of BIM and deep learning integration. *Journal of Industrial Engineering and Applied Science*. <https://doi.org/10.70393/6a69656173.333030>