XIV Международна научна конференция
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 10-12 септември 2026 г, Варна
XIV International Scientific Conference
„Civil Engineering Design and Construction“, Sept. 10 - 12, 2026, Varna, Bulgaria
ISSN 2683-071X (online) ISSN 2738-7879 (CD)

СЪВРЕМЕННИ ДИГИТАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛСТВОТО

Росица Петкова-Слипец[1]

ADVANCED DIGITAL TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

Rositsa Petkova-Slipets

Abstract:
The paper examines the current state of digital technologies in construction within the Construction 4.0 framework, which brings together Building Information Modeling (BIM), the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), digital twins and 3D concrete printing. A technological review of each of the discussed technologies is presented - their essence, architecture, implemented applications worldwide, in Europe and in Bulgaria, regulatory readiness and Technology Readiness Level (TRL). Particular attention is paid to digital twins and 3D concrete printing as the technologies showing the greatest contrast between technological potential and actual industrial deployment. A comparative TRL analysis of all considered technologies is provided, together with specific recommendations to the scientific community, industry and regulators.

Keywords: *Construction 4.0, BIM, digital twin, 3D printing, artificial intelligence, IoT, TRL, sustainable construction*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на цифровизацията в строителството е част от по-широката трансформация, свързана с Четвъртата индустриална революция [1]. Индустрия 4.0 въвежда принципите на взаимосвързани кибер-физични системи, автоматизирани производствени процеси, обмен на данни в реално време и интелигентно управление на ресурсите. В строителната сфера тези идеи се проявяват чрез *Construction 4.0* - концепция, която обединява BIM, изкуствен интелект, роботика, IoT, облачни платформи, дигитални двойници и адитивно производство [1, 2]. За разлика от традиционния строителен процес, който често е фрагментиран, зависим от ръчен труд и последователни дейности, дигитализираният подход се стреми към интеграция на проектантски, производствени, изпълнителски и експлоатационни данни.

Необходимостта от автоматизация се обуславя от няколко основни фактора: недостиг на квалифицирана работна сила; повишени изисквания за безопасност; нужда от по-бързо изпълнение; контрол върху разходите; ограничаване на строителните отпадъци; намаляване на въглеродния отпечатък. Дигиталните технологии позволяват

[1] Доц. д-р инж. Росица Петкова-Слипец – катедра „Строителство на сгради и съоръжения“, Архитектурен факултет, ВСУ „Черноризец Храбър“, e-mail: rositsa.petkova@vfu.bg
Assoc. Prof. Eng. Rositsa Petkova-Slipets, PhD – Department of Building Construction and Facilities, Faculty of Architecture, Varna Free University “Chernorizets Hrabar”, e-mail: rositsa.petkova@vfu.bg

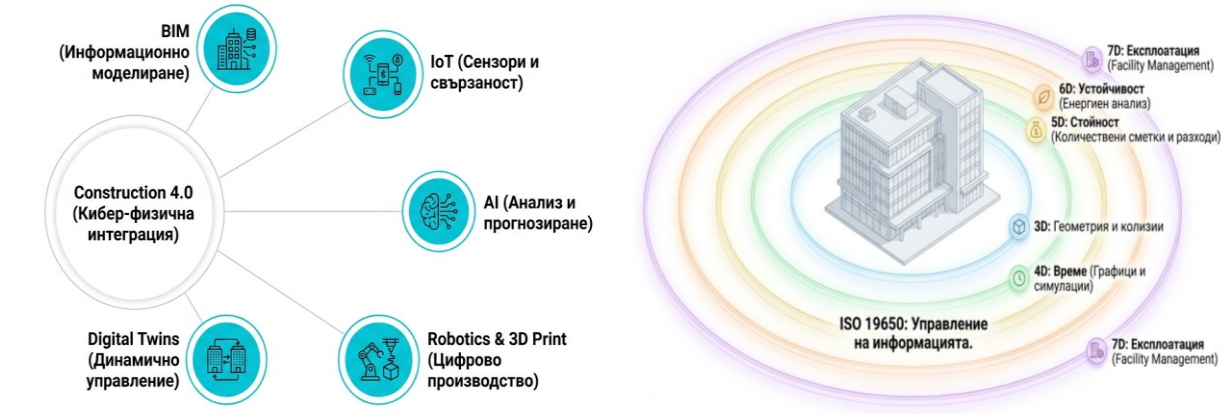
предварително симулиране на строителни процеси, оптимизиране на материали, намаляване на грешки при координацията и по-точен контрол върху жизнения цикъл на сградите и инфраструктурата.

В българския контекст тези процеси се вписват пряко в целите на *Националната стратегия за цифрова трансформация на строителния сектор до 2030 г.*, която поставя акцент върху модернизирането на строителната индустрия чрез въвеждане на цифрови технологии, стандартизирано управление на информацията и повишаване на производителността, прозрачността и устойчивостта на инвестиционния процес.

2. ПРЕГЛЕД НА ДИГИТАЛНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛСТВОТО

2.1. Construction 4.0

Construction 4.0 е цифровата трансформация на строителството, която е подчинена на концепцията за кибер-физична интеграция (фиг. 1а) [1, 2]. Основните принципи са интегрирано управление на информацията, автоматизирано изпълнение, проследимост на процесите и жизнен цикъл, основан на данни. Предимствата включват по-добра координация, по-малко грешки и по-висока безопасност; ограниченията са висока начална инвестиция, недостиг на кадри, фрагментирана нормативна среда и трудна интеграция със съществуващи практики.



а б

Фигура 1. Концепция Construction 4.0 (а) и управление на информацията чрез BIM (б).

В Европа развитието на Construction 4.0 се стимулира от политики за дигитализация и изисквания за BIM при обществени поръчки. В България внедряването е по-бавно и по-скоро се концентрира в големи проектантски организации и университетски изследвания [3-9].

2.2. Строително-информационно моделиране (Building Information Modeling, BIM)

Строително-информационното моделиране е методология за създаване, управление и обмен на цифрова информация за сгради и инфраструктура (фиг. 1б) [10]. BIM освен триизмерен модел е и процес на управление на информацията [11], обединяващ геометрични и негеометрични данни - материали, количества, графици, разходи, технически и експлоатационни характеристики.

Международната рамка за управление на информацията чрез BIM е ISO 19650:2018 (в България - БДС EN ISO 19650-1:2019) [12]. Този стандарт въвежда принципи за организация на информацията, обща среда за данни, роли, отговорности, информационни бази и процеси за обмен на данни, което е особено важно при големи инфраструктурни и обществени проекти.

Градският информационен модел (City Information Modeling, CIM) се описва като мащабна еволюция на BIM - от рамките на една сграда до мащаба на целия град [13, 14]. CIM се фокусира върху градски квартали, инфраструктурни мрежи и цели градове. Използва комбинация от статични (геопространствени) и динамични данни (трафик, сензори в реално време). BIM и CIM използват споделена среда от данни (CDE), базират се на обектно-ориентирано 3D моделиране и целят оптимизация на жизнения цикъл на активите чрез интелигентна семантична информация.

CIM е в основата на изграждането на дигиталните близнаци на съвременните *умни градове* (Smart Cities). Неговите основни приложения включват:

- устойчиво градско планиране - симулиране на градското развитие, анализ на топлинни острови, тестване на сценарии преди реалното строителство;
- управление на критична инфраструктура - мониторинг и поддръжка на подземни ВиК мрежи, електропреносни системи и интелигентно улично осветление;
- управление на трафик и мобилност - анализ на транспортните потоци в реално време, оптимизация на градския транспорт и планиране на пешеходни зони;
- екологичен мониторинг и енергийна ефективност - проследява замърсяването на въздуха, нива на шум, симулация на соларен потенциал за фотоволтаици и др.;
- превенция на бедствия - моделиране на наводнения, земетресения или евакуационни планове на градско ниво с цел повишаване на безопасността.

Като добри практики за CIM могат да се посочат [15, 16]:

- Xiong'an New Area, Китай - дигитален контрол на целия жизнен цикъл на града чрез BIM Management Platform;
- Кунмин (Kunming), Китай - изграждане на база данни за трафика чрез дигитален двойник за подобряване на цялостното управление на трафика;
- Шенжен (Shenzhen), Китай - Mawan Smart Port - интелигентна експлоатация на пристанище и управление на навигацията;
- Рен, Франция - Virtual Rennes помага за значителното намаляване на разходите за планиране и строителство на метрото.

Периодът 2020-2030 г. официално се дефинира като "етап на експлозивен растеж" за пазара и технологиите на градските дигитални близнаци [17]. Глобалният пазар на CIM се оценява на 12.8 милиарда долара през 2025 г., а прогнозите са да достигне 67.4 милиарда долара до 2034 г. Азиатско-тихоокеанският регион се очертава като лидер в комерсиалното внедряване [18].

2.3. Интернет на нещата (Internet of Things, IoT) и сензорни системи

Интернет на нещата (IoT) е ключова технология на Construction 4.0, защото създава непрекъснат информационен поток между реалния обект и неговата цифрова среда - поток, който при интеграция с BIM, AI и дигитални двойници става основа за предиктивно управление на жизнения цикъл.

IoT в строителството се реализира чрез мрежи от сензори, свързани с облачни платформи, BIM модели и системи за управление. Основното предимство е преходът от периодичен визуален контрол към непрекъснато измерване и мониторинг в реално време на температура, влажност, деформации, напрежения, вибрации, пукнатини, наклони, корозия и параметри на строителната среда. Основните приложения са: мониторинг на конструктивното състояние (Structural Health Monitoring), управление на строителната площадка и безопасност на работниците, експлоатация и управление на сградите, и превантивна поддръжка - преход от „ремонт след повреда“ към „предвиждане и предотвратяване“.

Развитието на 5G/LPWAN комуникационните мрежи и възможността за облачно съхранение и анализ на големи обеми данни (Big Data) превръщат IoT в стандартен

елемент на концепцията за „интелигентна строителна площадка“ (Smart Construction Site) след 2018 г.

2.4. Изкуствен интелект (Artificial Intelligence, AI)

Изкуственият интелект (Artificial Intelligence, AI, ИИ) навлиза в строителството като логично продължение на данните, натрупани от BIM и IoT, добавяйки способност за анализ, интерпретация и автоматизирано вземане на решения [19]. Основни области на приложение са: конструктивно проектиране и генеративен дизайн; мониторинг и диагностика чрез компютърно зрение за разпознаване на пукнатини и дефекти; управление на строителните процеси (прогнозиране на срокове, разходи, забавяния); безопасност на площадката. Основните ограничения са: зависимостта от качеството на данните, ограничената интерпретируемост на сложните модели и липсата на ясна регулаторна рамка за отговорност при грешка на AI система.

Генеративният изкуствен интелект (Generative AI) и *AI-агенти* са вероятно най-значимият нов тренд. За разлика от традиционните цифрови системи, които обработват предварително структурирани данни, генеративният AI може да работи с текст, чертежи, BIM модели, снимки и сензорни данни и да генерира ново съдържание или решения. Той може да анализира технически спецификации и договори, да извлича информация от строителна документация; да генерира графици и варианти за организация на строителството; да прави оценка на рискове и да открива несъответствия; да прогнозира срокове и разходи. Особено важна тенденция е преминаването от chatbot към AI агенти - системи, които не само дават отговор, а могат последователно да извършват операции върху проектни данни.

През 2025 г. строителният сектор се намира в момент на ускорено навлизане на AI, като най-очакваното въздействие е в оптимизацията на проектните решения, управлението на риска и автоматизацията на професионални дейности. AI трябва да се използва като инструмент за подпомагане на инженерното решение, а не като негов пълен заместител - резултатите трябва да се проверяват чрез физически модели, числени анализи, експериментални данни и действащите нормативни изисквания.

Пазарният и научен анализ сочат бърз растеж на приложенията на AI. Според пазарни данни, пазарът на AI в строителството се очаква да нарасне от около 3,99 млрд. долара през 2024 г. до 11,85 млрд. долара до 2029 г., при годишен темп на растеж от 24,31% [20]. Експертни прогнози за 2025 г. очертават конкретни направления: инструменти за генеративен дизайн, задвижвани от AI, ще оптимизират архитектурни, конструктивни и инсталационни решения, намалявайки отпадъка от материали и подобрявайки строителната изпълнимост, а алгоритми за машинно обучение ще прогнозират рискове по проекти чрез анализ на исторически и реални данни.

Академичните изследвания вече започват систематично да изучават навлизането на големи езикови модели (LLM) и ChatGPT-подобни инструменти в сектора, интеграцията им в обучението, квалификацията и професионалната практика с цел справяне с дефицита на умения и неефективността, разглеждайки ги като част от по-широкия процес на Construction 4.0 [21].

2.5. Дигитални двойници (Digital Twins)

2.5.1. Концепция и същност

Дигиталният двойник е динамично цифрово представяне на физически актив, процес или система, което се актуализира чрез данни от сензори, BIM модели, експлоатационни системи и аналитични платформи [22-25]. За разлика от статичния 3D модел, дигиталният двойник съчетава геометрия, свойства на материалите, експлоатационни характеристики, данни от сензори, исторически записи, симулации и аналитични модели (табл. 1).

Основната разлика спрямо BIM е динамичната връзка с реалния обект: BIM моделът обикновено съдържа проектна и информационна структура, докато дигиталният двойник добавя текущи експлоатационни данни, обратна връзка от сензори и възможност за прогнозиране [11, 25].

Таблица 1. Сравнение на BIM и Digital Twin.

Характеристика	BIM	Digital Twin
Геометрия/проектни данни/материали/количества	✓	✓
Реални сензорни данни	обикновено не	✓
Мониторинг в реално време	не е задължително	✓
AI/ML	възможно	широко приложимо
Предиктивен анализ	ограничен	✓
Управление на жизнения цикъл	✓	✓✓

Дигиталните двойници осигуряват няколко съществени положителни ефекта за строителството:

●Устойчивост - чрез постоянен мониторинг на температура, влажност, осветеност, заетост и др. може да се постигне спестяване на енергия от 10-20% [9, 24]. Дигиталният двойник може да проследява въглеродни емисии през целия жизнен цикъл - от избора на материали и строителните процеси до експлоатацията, поддръжката и реконструкцията, което позволява сравняване на различни проектни сценарии, избор на по-устойчиви материали и оценка на ефекта от енергийни мерки, обновяване или промяна в режима на използване. При градски дигитални двойници могат да се анализират транспорт, енергийни мрежи, зелени площи, риск от наводнения, топлинни острови и инфраструктурни натоварвания, така че устойчивостта се разглежда не само на ниво отделна сграда, а и на ниво квартал, град или регионална инфраструктура.

●Планиране и управление на проекта - свързването на BIM модел, график, разходи, ресурси и данни от площадката позволява ранно откриване на конфликти между проектно намерение и реално изпълнение (4D/5D планиране) [22, 24, 26]. За инвеститори, публични администрации и оператори дигиталният двойник служи като инструмент за сценарийно планиране, чрез който могат да се симулират промени в натоварването, трафика, климата, енергийния режим, поддръжката или реконструкцията.

●Контрол на качеството, безопасността и превантивна поддръжка - сравнение на актуалното състояние с проектния модел и данни от BMS/IoT позволяват прогнозиране на износване и повреди, вместо аварийни ремонти [22, 24, 26].

●Адаптивност към климатични и експлоатационни промени - чрез симулации може да се провери как сградата или инфраструктурният обект ще реагират при промени в климата, натоварването, броя на обитателите или режима на използване, което подпомага проектирането на по-гъвкави и устойчиви сгради, способни да се адаптират към бъдещи условия без значителни материални и финансови загуби.

Въпреки многото ползи, масовото прилагане на дигиталните двойници в реалното строителство все още е лимитирано поради липсата на нормативна подкрепа, стандартизация и подготвени специалисти.

2.5.2. Приложение на дигиталните двойници по света и в България

Практическото приложение на дигиталните двойници към настоящия момент е в ранен стадий на развитие [27-31].

Във Великобритания дигиталните двойници се използват при летища и железопътна инфраструктура (Heathrow, Crossrail, HS2) [32-34]; в Китай и Русия - за градско обновяване и smart city управление чрез BIM/CIM платформи, GIS, IoT и 5G [35-38]; в САЩ, Япония, Сингапур - за контрол на пътища, мостове, железопътни и водни системи, както и при офисни, индустриални и публични сгради [28-31].

България е в сравнително начален, но бързо развиващ се етап. Най-значимият пример е цифровият двойник на София, разработван от Институт GATE към СУ „Св. Климент Охридски“ с подкрепата на Столична община [6, 7]. Друг пример е Scan-to-BIM работата на ИПА Архитекти [8], а в академичната сфера - изследването на Михаил Матеев за Digital Twins Concept for Energy-Efficient Smart Buildings с платформата Microsoft Azure [9].

На ниво фирмени и технологични услуги в България вече се предлагат решения за digital twin technology и BIM modelling за инфраструктурни и индустриални проекти, което показва, че дигиталните двойници постепенно преминават от изследователска и пилотна фаза към пазарни приложения - особено при промишлени съоръжения, инфраструктура, производствени обекти, търговски сгради, болници и smart building системи.

2.6. 3D бетонен печат в строителството

2.6.1. Технологии и материали за 3D печат

3D печатът обхваща няколко групи адитивни технологии, които се различават по принцип на работа, използвани материали, мащаб, степен на автоматизация и пригодност за реални строителни конструкции (табл. 2) [39-43].

Таблица 2. Технологии за 3D печат в строителството [39-43].

Технология	Принцип	Материали	Основни ограничения
FDM / Binder Jetting	Термопластична екструзия / свързване на прах	Полимери, композити, пясък, керамика	Ограничена носимоспособност; ниска начална якост
Material Extrusion	Екструзия на строителна смес	Циментови смеси, геополимери, глина	Реология, армировка
Contour Crafting	Контролирана екструзия с оформяне	Бетонни/циментови смеси	Нормативна база
Роботизиран печат	Индустриален/мобилен робот	Бетон, глина, полимери	Калибриране, безопасност
WAAM	Послойно електродъгово отлагане	Стомана, алуминий	Остатъчни напрежения

Най-широко приложение в строителната практика намират екструзионните технологии (Material Extrusion) - водещ метод за мащабно строително приложение, при който портална система, роботизирана ръка или мобилна машина следва предварително генерирана траектория. Разновидност на екструзионния метод е Contour Crafting, при който дюзата е съчетана с оформящи инструменти за по-добро качество на повърхността. Роботизираният 3D печат използва индустриални роботи с по-голяма свобода на движение, а металният адитивен печат (Wire Arc Additive Manufacturing) е важен при производство на стоманени възли и мостови компоненти.

Материалите, които се използват за строителен 3D печат са:

- *циментови и бетонови смеси* - най-разпространените материали за принтиране в строителството [3, 4]. Развитието на дигиталното строителство доведе до създаването на

високотехнологични бетонни смеси за 3D печат (3DCP), чиито свойства се различават фундаментално от тези на традиционния бетон – те са течливи по време на изпомпване и бързо втвърдяват след екструдиране [1, 39, 40, 44]. За тези смеси се въвеждат нови характеристики [39, 40, 45-47] - контролирана тиксотропия; изграждаща способност (buildability), екструдируемост (extrudability) и изпомпваемост (pumpability). След втвърдяването им се контролират междуслойна адхезия и анизотропност. С оглед намаляване на съсъхването се влагат полимерни или стоманени фибри, а за увеличаване живота на материала се използват самовъзстановяващи се циментови матрици [39, 40, 48].

- *геополимерни материали* (летяща пепел, доменна шлака, метакаолин) - алтернатива с потенциално по-нисък въглероден отпечатък [48-50], а глинените и земни материали се използват при устойчиви и нисковъглеродни решения.

Липсата на кофраж затруднява армирането на бетонната смес, което налага при 3D печата да се прилагат различни подходи (фиг. 2).

Фигура 2. Подходи за армиране на 3D принтиран бетон.

За разлика от традиционния стоманобетон, за адитивно произведените строителни елементи все още липсва напълно установена нормативна база - съществуващите стандарти не покриват специфични за 3D печата явления като междуслойната анизотропия и контрола на ранната якост [42, 45-47]. Развитието на нормативната рамка се движи паралелно от международни технически комитети [51], производствени стандарти [52] и национални пилотни разрешителни режими „проект по проект“ в Германия, Нидерландия и Дубай.

2.6.2. Реализирани обекти и приложение в строителството и архитектурата

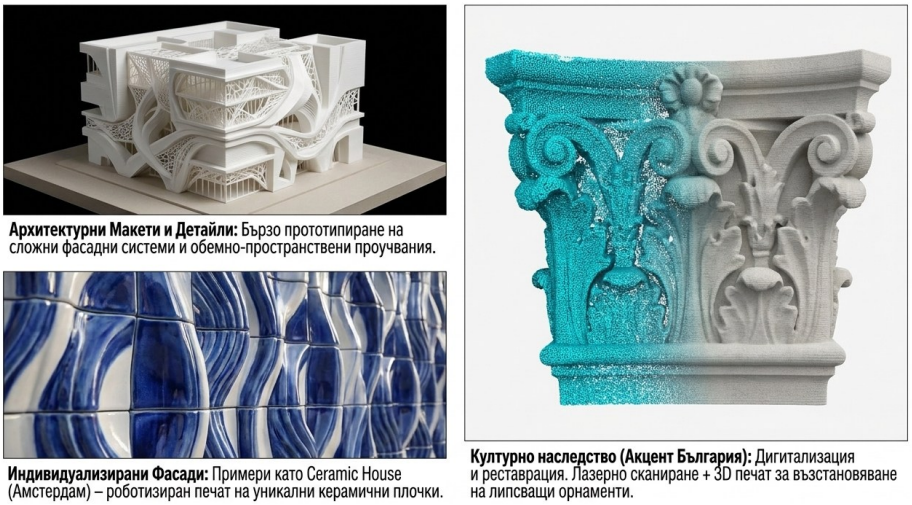
3D принтирането в строителството се намира в етап на ранно внедряване. Броят на 3D принтираните строителни обекти е трудно да се определи точно поради липса на унифицирана международна статистика и различни критерии за отчитане между източниците. Публикуваната през 2024 г. литература систематизира 154 строителни проекта и 204 3D принтирани сгради за периода 2013-2023 г. [53]. Индустриална справка на COBOD посочва 129 3D принтирани сгради в света до края на 2022 г., като само през 2022 г. са добавени 54 нови сгради [53, 54]. За сравнение, класическото строителство в световен мащаб произвежда милиони нови сгради годишно, поради което делът на 3D принтираните структури спрямо традиционното строителство в периода 2013-2023 г. може да се определи като статистически пренебрежим - значително под 0,01% от новите строителни обекти.

Сред най-значимите примери за 3D принтирани строителни обекти са Striatus Bridge, Liuyun Bridge, Dubai Office of the Future, PERI House, Yhnova, BioHome3D, ICON House Zero, COBOD BOD2, Apis Cor House, Winsun, Kamp C, Dubai Municipality building и Villa Dubai / 3DXB (табл. 3). Тези проекти показват различни посоки на развитие: пешеходни мостове, жилищни сгради, офисни обекти, социални жилища, биобазирани конструкции, индустриални принтери и демонстрационни пилотни обекти.

Таблица 3. Примери за реализирани 3D принтирани обекти.

Обект		**Технология, показатели**	**Отличителна характеристика**
Striatus Bridge Венеция, 2021 [55]		Роботизиран печат 53 блока	Монтаж без строителен разтвор и армировка. Разглобяемо и рециклируемо съоръжение.
Office of the Future Дубай, 2016 [56]		Роботизиран принтер	Първата офис сграда, отпечатана изцяло от бетон.
Apis Cor House Ступино, Русия, 2017 [57]		Мобилен строителен принтер ≈38 m² ≈24 ч. чист печат	Най-евтиният и бърз печат на носеща конструкция на място.
Villa Dubai / 3DXB Дубай, 2023 [58]		Мобилен robotic-arm принтер	≈303 m² - рекорд на Гинес 3D печат на сложни архитектурни форми с голям мащаб и високи изисквания за качество на изпълнението.
PERI House Бекум, Германия, 2020 [59]		Портална система ≈100 ч. печат	Цената на 3D принтирания продукт не се отличава от тази на конвенционална къща.

3D принтирането има много важно приложение и в архитектурата като средство за създаване на физически модели, архитектурни детайли, демонстрационни макети, паметници, скулптури и елементи на културното наследство (фиг. 3) [61-65]. В този контекст технологията служи не само за производство, но и за комуникация на проектната идея, проверка на пространствени решения, изследване на сложни форми и представяне на обекти пред инвеститори, обществени институции, студенти и широка публика [3, 4, 8].



Фигура 3. Примери за приложение на 3D печата в архитектурната практика.

В световен мащаб вече е реализиран преходът от експеримент към ранно индустриално приложение - има реално изградени сгради, мостове и специализирани приложения, но остава силна зависимост от стандарти, материали и икономика. В Европа може да се приеме, че има напреднало пилотно внедряване, за което свидетелстват примери като D-Shape footbridge в Мадрид и PERI House в Германия, но регулациите и мащабът остават ограничение. България е на много ранен етап на приемане на тази технология - обект на академични и научни публикации, доклади на конференции и общи дискусии за Industry 4.0 и 3D печат, но без доказателства за масово строително внедряване в страната. Показателен пример за България е работата на арх. Надя Стаматова по дигитализация на културно наследство във Варна (2013-2022), използваща BIM, GIS, IoT, XR и фотограметрия (фиг. 4) [64].

Фигура 4. Проект „Не-видимият град“ (КАБ-РК Варна) за дигитални и физически модели на вече несъществуващи сгради с културна стойност в гр. Варна [64].

2.6.3. Сравнение на 3D печата с класическите технологии

3D печатът не е универсален заместител на класическото строителство. Той е най-подходящ при сложни геометрии, автоматизирано производство, серийни елементи и

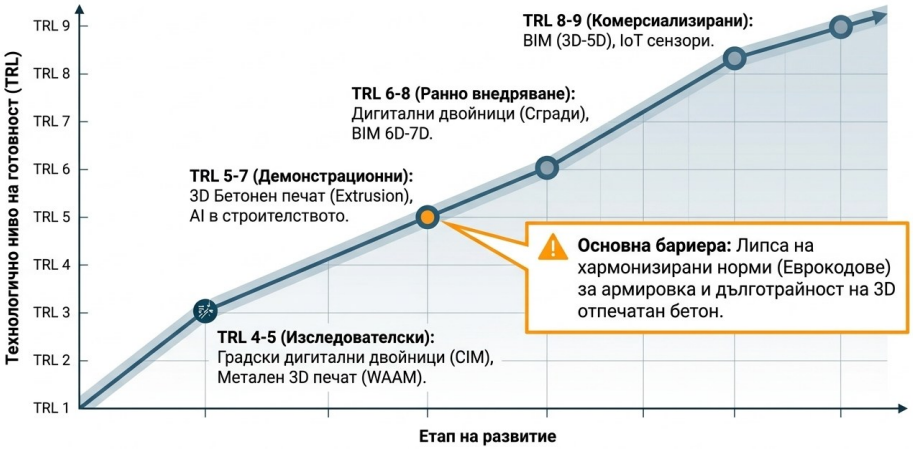
пилотни жилищни решения. Класическите технологии остават незаменими при масови конструктивни решения, нормативно утвърдени системи и обекти със стандартни геометрии.

Таблица 4. Сравнение между класическо строителство и 3D печат.

Показател	**Класическо строителство**	**3D печат**
Време	По-дълги процеси, зависими от кофраж и ръчен труд	Потенциално по-кратко чрез автоматизация
Цена	По-ниска начална инвестиция, високи разходи за труд и кофраж	Висока начална инвестиция, икономии при мащаб
Кофраж	Съществен елемент	Често се елиминира или намалява
Отпадъци	По-големи количества	По-малко отпадъци чрез точно дозиране
Архитектурна свобода	Ограничена от кофраж и цена	По-голяма свобода за сложни геометрии
Автоматизация	Частична	Висока степен чрез BIM, G-code, роботика

2.7. Сравнителен анализ и ниво на технологична готовност (TRL)

В строителния сектор съществува значителна разлика в зрелостта на отделните технологии (фиг. 5). *BIM* е сред най-зрелите - формализиран чрез ISO 19650 и широко комерсиализиран (TRL 8-9), докато по-напредналите му измерения (6D-7D, Facility Management) тепърва се внедряват при по-големи проекти (TRL 7-8). *Дигиталните двойници* на ниво отделна сграда достигат демонстрационна и пилотна готовност (TRL 6-7), докато на градско/инфраструктурно ниво остават предимно в изследователска фаза (TRL 4-5) поради предизвикателствата с обема на данните и оперативната съвместимост [66]. *3D печатът* показва най-голямата разлика между потенциал и реална готовност - демонстрационните проекти достигат TRL 6-7, но масовото индустриално приложение е ограничено от липсата на хармонизирани армировъчни решения и норми.



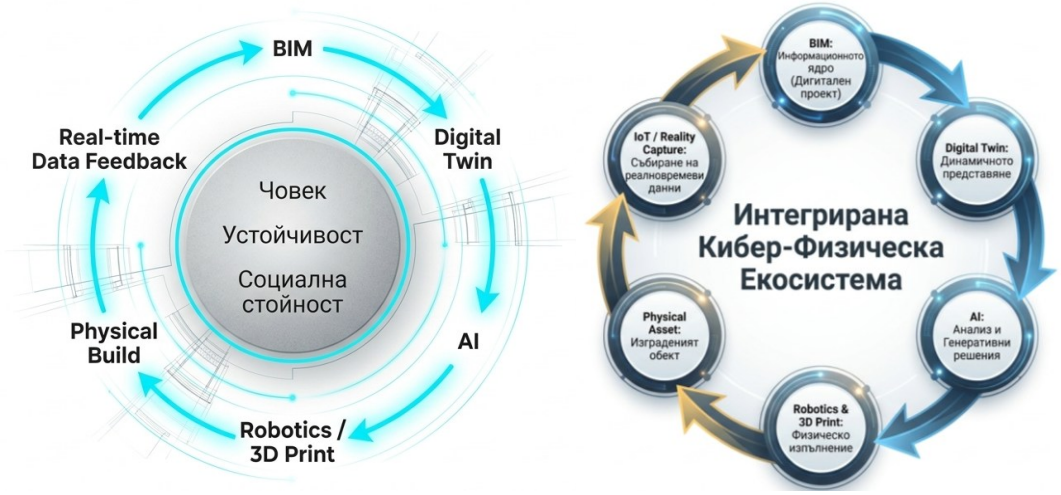
Фигура 5. Сравняване на дигиталните технологии в строителството по технологично ниво на готовност.

2.8. Перспективи и препоръки

Цифровизацията на строителния сектор ще се развива с посока преход от отделни цифрови инструменти към интегрирани, интелигентни и частично автономни цифрови екосистеми. Очертават се пет взаимосвързани посоки [1, 22, 24, 26]: BIM + AI за по-интелигентни проектни решения; BIM + Digital Twin за свързване на проектните модели с реални експлоатационни данни; BIM + Robotics за преход от модел към машина; Autonomous Construction - автономни роботи, дронове и сензорни системи; Smart Cities - свързване на сградите и инфраструктурата в обща градска цифрова среда.

От Construction 4.0 към *Construction 5.0* е концептуално най-новата тенденция [66, 67], според която технологичният напредък трябва да бъде съчетан с устойчивост на инфраструктурата и човекоцентричен подход (фиг. 6а).

Цифровизацията на строителството през 2025 г. се характеризираше с преход от цифровизация на отделни строителни дейности към интегрирана кибер-физическа строителна екосистема (фиг. 6б), в която BIM осигурява структурираното информационно ядро, IoT и Reality Capture осигуряват данни от физическия обект, Digital Twin създава динамично цифрово представяне, а AI анализира данните, прогнозира развитието и постепенно автоматизира вземането на решения и физическото изпълнение.



а б

Фигура 6. Парадигма на Construction 5.0 (а) и схематично представяне на интегрирана кибер-физическа строителна екосистема (б).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съвременните дигитални технологии в строителството - BIM, IoT, изкуствен интелект, дигитални двойници и 3D бетонен печат - демонстрират реален, но все още ограничен мащаб на индустриално приложение спрямо технологичния си потенциал. Докато BIM и IoT са технологично зрели и широко комерсиализирани, изкуственият интелект, дигиталните двойници и 3D печатът остават с висок потенциал, реализиран в различна степен. Ограничението произтича основно от липсата на хармонизирани норми и стандарти, а не от липса на технологична осъществимост. За широкото им внедряване са необходими стандартизация, нормативна яснота, обучение на специалисти и доказани икономически модели - посоки, по които България вече прави първи, макар и все още ограничени по мащаб стъпки.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Begić H., M. Galić, A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11(8), 2021, 337. DOI: 10.3390/buildings11080337.
[2] Sawhney A., M. Riley, J. Irizarry, Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment. Routledge, 2020, 526 p. DOI: 10.1201/9780429398100.
[3] Захариева Р., С. Първанова, В. Кърджиев, Ж. Добелаере, Предизвикателства при моделиране и оразмеряване на вертикален елемент, изпълнен от бетон по технологията на 3D печата. *Годишник на УАСГ*, 51 (12), 2018, 29 - 42.
[4] Иванова Ст., Р. Захариева, Особености при моделирането на елементи, изпълнени от бетон по технологията на 3D печата. *Годишник на УАСГ*, 50 (4), 2017, 213 - 220.
[5] Иванова Ст., Р. Захариева, Основни технологични параметри при 3D печата с композити на циментова основа. *Годишник на УАСГ*, 50 (4), 2017, 213 – 220.
[6] Концепция за градски двойник - Цифров двойник на София – градът в дигитално огледало. Available: https://www.sofia.bg/city-digital-twin [посетен на 9 септември 2026 г.].
[7] Български проект за цифров двойник на София със световно отличие. Available: https://www.economy.bg/charts/view/62546/Bylgarski-proekt-za-cifrov-dvojnik-na-Sofiya-sys-svetovno-otlichie [посетен на 9 септември 2026 г.].
[8] ИПА Архитекти R&D и дигитални иновации в архитектурата и инженерното проектиране Available: https://www.ip-arch.com/rnd/1 [посетен на 9 септември 2026 г.].
[9] Mateev M., Digital Twins Concept For Energy-Efficient Smart Buildings, *Yearbook of the Faculty of Economics and Business Administration, Sofia University, Faculty of Economics and Business Administration, Sofia University St Kliment Ohridski - Bulgaria*, 23(1), 2024, 187-198.
[10] Sacks R., C. Eastman, G. Lee, P. Teicholz, BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. 3rd ed., Wiley, 2018, 659 p.
[11] Nguyen T., S. Adhikari, The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review. *Sustainability*, 15(13), 2023, 10462.
[12] БДС EN ISO 19650 (части 1-5) Организация и дигитализация на информацията за сгради и строителни съоръжения, включително строително-информационно моделиране (BIM).
[13] Al-Kazee M., I. Sallam, Building to City: Integrating BIM into CIM for a comprehensive digital urbanism. *PLANNING MALAYSIA*, 24(41), 2026. DOI: 10.21837/pm.v24i41.2017.
[14] Al-Kazee M., M. Mahdavinejad, R. Ramhamdani, I. Sallam, An Investigation of Barriers to Adopting Building Information Modeling (BIM) in the AEC Industry of Developing Countries: A Critical Review. *Civil and Environmental Engineering*, 21, 2025, 1005-1014. DOI: 10.2478/cee-2025-0076.
[15] World Economic Forum; China Academy of Information and Communications Technology. *Digital Twin Cities: Framework and Global Practices*. Insight Report. *CAICT Reports & Statistics*, 2022. Available: https://www.caict.ac.cn/english/research/rs/202205/P020220510494346383935.pdf. [посетен на 9 септември 2026 г.].
[16] World Economic Forum; China Academy of Information and Communications Technology. *Digital Twin Cities: Key Insights and Recommendations*. Insight Report, August 2023. Available: https://www.weforum.org/publications/digital-twin-cities-key-insights-and-recommendations/. [посетен на 9 септември 2026 г.].

[17] Intelligent Build.Tech. Digital Twins: A New Model for Urban Governance. Available: https://www.intelligentbuild.tech/2024/04/19/digital-twins-a-new-model-for-urban-governance/. [посетен на 9 септември 2026 г.].
[18] Smart City Digital Twin Market. Available: https://dataintelo.com/report/smart-city-digital-twin-market [посетен на 9 септември 2026 г.].
[19] Pan Y., L. Zhang, Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends. *Automation in Construction*, 122, 2021, 103517. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517.
[20] Ragan, J. Top 2025 AI Construction Trends: According to the Experts. *Autodesk Digital Builder*. Available: https://www.autodesk.com/blogs/construction/top-2025-ai-construction-trends-according-to-the-experts/. [посетен на 9 септември 2026 г.].
[21] Jelodar M. Generative AI, Large Language Models, and ChatGPT in Construction Education, Training, and Practice. *Buildings*, 15(6), 2025, 933. DOI: 10.3390/buildings15060933.
[22] Nour El-Din M., P. Pereira, J. Poças Martins, N. Ramos, Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. *Buildings*, 12(12), 2022, 2155. DOI: 10.3390/buildings12122155.
[23] Wimmer J., T. Braml, Digital Twins for Engineering Structures - An Industry 4.0 Perspective. *Structural Concrete*, 25(6), 2024, 4202–4218. DOI: 10.1002/suco.202400683.
[24] Zhang X., J. Zheng, P. Li, Y. Yang, Y. Ye, F. Causone, X. Shi, A Review of Building Digital Twins: Framework and Enabling Technologies. *Journal of Building Engineering*, 2025, 113117. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.113117.
[25] Boje C., A. Guerriero, S. Kubicki, Y. Rezgui, Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. *Automation in Construction*, 114, 2020, 103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
[26] Moshood T. D., J. Rotimi, W. Shahzad, J. Bamgbade, Infrastructure Digital Twin Technology: A New Paradigm for Future Construction Industry. *Technology in Society*, 77, 2024, 102519. DOI: 10.1016/j.techsoc.2024.102519.
[27] Digital Twin City: Inside China's growing digital twin workforce. Available: https://news.cgtn.com/news/2026-02-28/VHJhbnNjcmlwdDg5Mjk1/index.html; Циндао използва модерни технологии за по-безопасен град. Available: https://bulgarian.cgtn.com/2026/05/11/ARTI1778483939165417 [посетени на 9 септември 2026 г.].
[28] Virtual Singapore – Singapore’s virtual twin. Available: https://oecd-opsi.org/innovations/virtual-twin-singapore/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[29] Project PLATEAU. The Initiative of Digital Twin in Japan. Available: https://www.mlit.go.jp/plateau/en/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[30] Digital Twin: A New Solution for Urban Challenges in Tokyo. Available: https://www.english.metro.tokyo.lg.jp/w/110-101-005910 [посетен на 9 септември 2026 г.].
[31] Building the Tokyo Digital Twin with TerriaJS and Cesium ion. Available: https://terria.com/resources/case-studies/tokyo-digital-twin [посетен на 9 септември 2026 г.].
[32] How Digital Twin Technology is Helping Heathrow Cut 30,000 Tonnes of CO2 Emissions. Available: https://smartspatial.com/post/how-digital-twin-technology-is-helping-heathrow-cut-30-000-tonnes-of-co2-emissions [посетен на 9 септември 2026 г.].
[33] Elizabeth’s digital twin: the technology helping Crossrail to know itself. Available: https://rail.nridigital.com/future_rail_jul21/digital_twin_crossrail [посетен на 9 септември 2026 г.].

[34] HS2 digital twin to boost reliability and prevent failures. Available: https://www.geplus.co.uk/news/hs2-digital-twin-to-boost-reliability-and-prevent-failures-14-02-2022/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[35] Liu Y., M. Ye, Digital Twin Technology and Energy Sustainability in China: A Regional and Spatial Perspective. *Energies*, 18(16), 2025, 4294. DOI: 10.3390/en18164294.
[36] Park K., China’s Digital Twin City and its Implications. *KIET Industrial Economic Review*, 26(3), 2021, 53–61. DOI: 10.2139/ssrn.4190967.
[37] Moscow Digital Twin and Mos.Cloud management platform presented at the CIPR 2022. Available: https://cgitc.ru/en/groups/news/vladelets-tiktok-nabiraet-inzhenerov-dlya-razrabotki-sobstvennykh-chipov/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[38] Khudyakov S., D. Aleksandrovna, S. Barykin, A multicriteria neural networkbased approach to adaptive investment portfolio formation. *Finance & AI*, 2026, 1. DOI: 10.66693/finai.1008.
[39] Rehman A., J.-H. Kim, 3D Concrete Printing: A Systematic Review. *Materials*, 14(14), 2021, 3800. DOI: 10.3390/ma14143800.
[40] Luo J., Q. Wang, L. Wang, M. Fang, A Review of the Rheological Properties of 3D-Printed Concrete: Raw Materials, Printing Parameters, and Evolution Mechanisms. *Buildings*, 16, 2026, 1264. DOI: 10.3390/buildings16061264.
[41] Baidabekov, A.K., K. Begimbay, D. Tusupbaeva, The use of 3D printing in construction and the prospects for its development. *Problems of engineering and professional education*, 55, 2019, 22-38. DOI: 10.32523/2220-685X-2019-55-4-22-38.
[42] Marifah S.L., U. Saputri, D. Permadi, Systematic Literature Review: 3D Printing Technology for Sustainable Construction Innovation. *Eng. Proc.* 107, 2025, 93. DOI: 10.3390/engproc2025107093.
[43] Yasmin F., Z. Zhu, A. Devkota, Additive Manufacturing for Sustainable Construction 4.0: Trends, Opportunities, and Future Directions. *Architecture*, 6, 2026, 110. DOI: 10.3390/architecture6030110.
[44] Kaszynska M., M. Hoffmann, S. Marcin, S. Skibicki, A. Zielinski, M. Techman, N. Olczyk, T. Wroblewski, Evaluation of suitability for 3D printing of high performance concretes. *MATEC Web of Conferences*, 163, 2018, 01002. DOI: 10.1051/matecconf/201816301002.
[45] Huang Q., H. Yang, J. Zhang, Y. Wu, Research on the Workability of 3D Printed Fiber-Reinforced Concrete Materials. *Fibers*, 14, 2026, 1. DOI: 10.3390/fib14010001
[46] Chang Z., Y. Chen, E. Schlangen, B. Šavija, A review of methods on buildability quantification of extrusion-based 3D concrete printing: From analytical modelling to numerical simulation. *Developments in the Built Environment*, 16, 2023, 100241. DOI: 10.1016/j.dibe.2023.100241.
[47] Hassan A., T. Alomayri, M. Noaman, C. Zhang, 3D Printed Concrete for Sustainable Construction: A Review of Mechanical Properties and Environmental Impact. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32, 2025, 2713–2743. DOI: 10.1007/s11831-024-10220-5.
[48] Ur Rehman A., V. Sglavo, 3D printing of geopolymer-based concrete for building applications. *Rapid Prototyping Journal*, 26, 2020, 1783-1788. DOI: 10.1108/RPJ-09-2019-0244.
[49] Kamel K.T., R. Shamass, Y.-Y. Lin, R. Jin, Toward Sustainable 3D Concrete Printing: A Critical Review of Waste-Derived Materials Across Binder, Geopolymer, and Aggregate Systems. *Appl. Sci.* 16, 2026, 6258. DOI: 10.3390/app16126258.
[50] Roussel N., D. Lowke, R. Buswel, Digital Fabrication with Cement-Based Materials - The Rilem D.F.C. Technical Committee History, Strategy and Achievements. In: Roussel, N.,

Lowke, D. (eds) Digital Fabrication with Cement-Based Materials. RILEM State-of-the-Art Reports, 36, 2022, 1-9. DOI: 10.1007/978-3-030-90535-4_1.
[51] ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary.
[52] Placzek G., P. Schwerdtner, A Global Snapshot of 3D-Printed Buildings: Uncovering Robotic-Oriented Fabrication Strategies. *Buildings*, 14(11), 2024, 3410. DOI: 10.3390/buildings14113410.
[53] Global inventory over 3D printed buildings shows COBOD’s leading position COBOD International. Available: https://cobod.com/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[54] Striatus 3D Concrete Printed masonry. Available: https://www.striatusbridge.com/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[55] Office of the Future. Available: https://www.killadesign.com/portfolio/office-of-the-future/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[56] Wawrek I. Zero house by 3D printer technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 566, 2019, 012037. DOI:10.1088/1757-899X/566/1/012037.
[57] Alqaryouti Y., M. Al Suwaidi, R.M. AlKhuwaildi, H. Kolthoum, I. Youssef, M. Al Imam, A Case Study of the Largest 3D Printed Villa: Breaking Boundaries in Sustainable Construction. *E3S Web Conf.*, 586, 2024, 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202458601002
[58] PERI House (Германия) Available: https://www.peri3dconstruction.com/en [посетен на 9 септември 2026 г.].
[59] Bhooshan S., V. Bhooshan, A. Dell’Endice, J. Chu, P. Singer, J. Megens, T. Van Mele, P. Block, The Striatus Bridge: Computational Design and Robotic Fabrication of an Unreinforced, 3D-Concrete-Printed Masonry Arch Bridge. *Architecture, Structures and Construction*, 2(4), 2022, 521–543. DOI: 10.1007/s44150-022-00051-y.
[60] SHoP architects' enormous 3D printed pavilion to mark design miami/ 2016 entrance. Available: https://www.designboom.com/design/design-miami-shop-architects-3d-printed-pavilion-10-07-2016/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[61] Rael San Fratello Architects. Available: https://www.rael-sanfratello.com/made/digital-cement [посетен на 9 септември 2026 г.].
[62] Blanco S., J. Madrid, Michael Hansmeyer's Algorithmic Architecture: The Transformative Impact of 3D Printing on Architectural Design and Education. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 19, 2024, 44-58. DOI: 10.3991/ijet.v19i07.50845.
[63] Altostrata: A 3D-printed parametric pavilion. Available: https://mamou-mani.com/project/altostrata-pavilion/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[64] НЕВИДИМИЯТ ГРАД възкръсва в Музея за нова история на Варна. Available: https://www.museumvarna.com/nevidimiyat-grad-vuzkrusva-v-muzeya-za-nova-istoria/ [посетен на 9 септември 2026 г.].
[65] Technology Readiness Levels in Horizon Europe: Assessment & Management. Available: https://www.emdesk.com/de/horizon-2020-horizon-europe-basics-guide/technology-readiness-levels-horizon-europe-guide [посетен на 9 септември 2026 г.].
[66] BUILD UP Editorial Team. Smart Construction: Technologies Redefining the Present and Shaping the Future. Available: https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/publications/smart-construction-technologies-redefining-present-and-shaping [посетен на 9 септември 2026 г.].
[67] FCIOB, E. A. Construction 5.0 poses challenges and opportunities for construction management. Available: https://www.ciob.org/blog/construction-50-poses-challenges-and-opportunities-for-construction-management [посетен на 9 септември 2026 г.].