

5D BIM-информатика, интегрированная с машинным обучением- классификация данных о стоимости строительных материалов и разработка прототипа



Banihashemi, S., Khalili, S., Sheikhhoshkar, M. *et al.* Machine learning-integrated 5D BIM informatics: building materials costs data classification and prototype development. *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 215 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00822-y>

Сигнальный перевод 2022 г. Куприяновский В.П. v.kupriyanovsky@rut.digital

Абстракт

Оценка затрат, не связанных с информатикой, — утомительный процесс, требующий значительного количества времени и ручных операций. Тем не менее, подходы к внедрению BIM привлекли значительное внимание в этом отношении. Поскольку модели BIM основаны на объектах со встроенной параметрической информацией, становится легче фиксировать количество строительных элементов и давать более точные оценки с меньшим количеством ошибок и пропусков. Поскольку большинство современных стандартов оценки стоимости спроектированы и разработаны на основе устаревших систем реализации строительных проектов, наблюдается несовместимость между их классификацией и информатикой на основе BIM. Таким образом, это исследование направлено на разработку информационной основы для интеграции стандарта оценки стоимости с BIM, чтобы ускорить процесс 5D BIM и улучшить методы цифровой трансформации в строительных проектах. Разработанная структура считается новым подходом, который может автоматически оценивать стоимость элементов здания с использованием интегрированных алгоритмов машинного обучения и движка MATLAB для его эффективной реализации.

Введение

Одним из важнейших и жизненно важных процессов в строительных проектах является точная смета расходов. По мере того, как проект становится больше и сложнее, более точная оценка стоимости проекта со временем становится основным фактором успеха проекта [1]. Оценка стоимости относится к процессу расчета и планирования стоимости трех основных частей, включая все строительные материалы, работы и оборудование в рамках проекта [2, 3]. Он включает в себя расчет количества (QTO), который представляет собой список количеств предметов и материалов, необходимых для проекта. Статьи затрат содержат количество и цену за единицу конкретных ресурсов, связанных с одной или несколькими задачами [4]. Стоимость каждой задачи оценивается путем умножения требуемых количеств на их единицы затрат, и тогда общая стоимость представляет собой сумму соответствующих статей затрат [5, 6]. Поскольку оценка стоимости рассматривается как одна из основных частей проектов и принятия решений на концептуальном этапе, ее точность играет ключевую роль в успехе и качестве проекта [7, 8], а перерасход средств является основной проблемой, особенно в проектах с

ограниченным бюджетом. Действительно, перерасход средств может спровоцировать провал проектов [9] в развивающихся странах, таких как Иран, экономика которых страдает от огромной инфляции и неопределенности [10,11,12]. С другой стороны, процесс оценки стоимости по-прежнему трудоемок и подвержен ошибкам [13]. Фактически, оценщики должны вручную снимать информацию с распечатанных чертежей САПР и 2D-документов. Этот процесс не только подвержен ошибкам и требует много времени, но и в значительной степени зависит от знаний и опыта оценщиков. Таким образом, это затрудняет обработку в больших и сложных проектах [14,15,16]. Еще одна сложная задача возникает, когда оценщикам может потребоваться определить различные условия проектирования в своих проектах [17]. В частности, если дизайн изменяется, оценщики должны вручную определять затронутые затраты и корректировать задачи и ресурсы на основе обновленного дизайна проекта. Это в основном подвержено ошибкам и приводит к несоответствиям и неэффективности процесса оценки затрат [18]. Поэтому по-прежнему существует потребность в практических основах и прототипах для точной и точной классификации информатики стоимости строительства, оценки общей стоимости проекта и автоматизации процесса ее оценки [2].

Появление BIM может решить многие проблемы, вызванные использованием традиционных методов оценки [19, 20]. BIM предлагает мощное решение для последовательного выполнения взлетов, подсчетов и измерений с помощью обновленной модели [6, 21]. В отличие от традиционных методов, все данные оценки стоимости могут быть обменены через различное программное обеспечение с помощью платформ для совместной работы и открытого стандарта обмена данными для BIM, такого как Industry Foundation Class (IFC) [22, 23]. Такой обмен информацией может значительно снизить количество рабочих нагрузок и ошибок, связанных с человеческим фактором [24, 25]. Кроме того, BIM представляет собой цифровое представление физических и функциональных характеристик объектов. Ориентированная на продукт и объектно-ориентированная информация модели BIM обогащается параметрическими строительными объектами как свойствами [26, 27]. Всю эту информацию можно извлечь из моделей BIM для будущего анализа, поэтому модель BIM может помочь в принятии решений в различных областях строительства [14, 28, 29]. В конечном счете, Дэвидсон [30] указывает, что BIM может проводить анализ затрат на любом этапе жизненного цикла проекта.

Поскольку традиционная оценка стоимости на основе BIM требует вмешательства человека, как нет стандартизированной спецификации стоимости для соединения с каждым элементом здания, оценка стоимости на основе BIM по-прежнему является трудоемким, подверженным ошибкам процессом и страдает от низкой окупаемости инвестиций [31, 32]. Таким образом, это исследование направлено на устранение вмешательства человека путем разработки прототипа оценки стоимости, интегрированного с машинным обучением и 5D BIM, который классифицирует элементы стоимости строительства, связывается с процессом 5D BIM и улучшает адаптацию систем классификации затрат (Иранский стандарт оценки стоимости, в данном случае) с информатикой на основе BIM. Это исследование также расширяет новый подход к автоматизированному процессу оценки стоимости за счет применения интегрированного метода машинного обучения. В котором сначала строится информационный прототип, чтобы все статьи затрат на строительство можно было классифицировать, собрать, разработать и перенести в программу Excel. Во-вторых, база данных BIM подключается и обновляется через Иранский стандарт оценки стоимости (ICES) [33], и, наконец, разработанное приложение извлекает QTO из каждой статьи стоимости и оценивает стоимость всего проекта. Кроме того, для автоматизации процесса используется набор машинного обучения; Алгоритмы искусственной нейронной сети (ANN), включая многослойный перцептрон (MLP), радиальную базисную функцию (RBF) и

адаптивную нейро-нечеткую систему вывода (ANFIS), разрабатываются и применяются путем установки параметров проекта в качестве входных данных и результата затрат в качестве входных данных. выходы.

Литературный обзор

Существует множество исследований, которые подчеркивают и представляют процесс оценки стоимости на основе BIM. Balali, Zalavadia [34] предложили подход к оценке затрат на основе виртуальной реальности (VR) для улучшения возможности внесения изменений в дизайн и обновления стоимости на предварительном этапе проекта. Однако основной подход представляет только элементарные затраты проекта и не позволяет оценить стоимость труда или оборудования в проекте. Bademosi, Tayeh [35] также разработали структуру, которая использует виртуальную реальность как метод визуализации для повышения эффективности процесса оценки стоимости, и пришли к выводу, что использование виртуальной реальности может значительно сократить время процесса оценки, а также упростить процесс интерактивных оценок для проекта. предложил основанный на знаниях подход к автоматизации процесса QTO, совместимого с кодом, с использованием комбинаций стандартного метода правил измерения и семантической информации. Несмотря на эффективность предложенного метода, основной подход по-прежнему требует вмешательства человека для извлечения информации, связанной с QTO, которая подвержена ошибкам и сбоям. Валентини, Мирарчи [36] сравнили два разных метода оценки стоимости, включая традиционные методы и методы на основе BIM, и обнаружили, что использование BIM может повысить точность и снизить стоимость процесса. разработала основанную на BIM систему для анализа дополнительных затрат на сборные проекты в Китае. Эта двухмерная система индексов дополнительных затрат была проверена на реальном проекте в Шанхае, Китай. разработал метод на основе BIM для оценки стоимости стальных каркасов на ранней стадии строительных проектов. Предлагаемый комплексный подход к проектированию стальных конструкций позволяет оценить полную стоимость стальных каркасов, включая материалы, изготовление и монтаж. Однако основная структура может быть ограничена только стальными проектами, в то время как существует множество других типов проектов, таких как проекты по дереву и бетону.

Аканби и Чжан [37] разработали подход, основанный на семантической обработке естественного языка, который может автоматизировать процесс извлечения и сопоставления информации в основном процессе оценки стоимости. Хосакичалерт, Ябуки [38] предложили автоматический подход для повышения точности QTO в модели BIM для составных элементов. Предлагаемый метод закладывает основу для более оптимизированной оценки затрат, поскольку в этом процессе устраняется множество перекрывающихся областей. Wang, Wang [39] разработали новую структуру для оценки затрат, которая объединяет графики проекта из структуры распределения работ (WBS) и информацию о затратах из структуры распределения затрат (CBS) в области BIM. Во-первых, снимаются все количества по одной статье затрат в BIM; затем отображаются всплывающие меню для оценки стоимости этого элемента. При этом используются ключевые пометки, коды сборки и типы семейств в BIM, и пользователь может вручную изучить названия элементов и получить стоимость желаемых элементов. Однако, несмотря на практичность предложенного метода, модель имеет менее удобный интерфейс, что усложняет применение модели. Кроме того, пользователь должен иметь достаточные знания BIM для эффективной работы модели. Vu, Ван [40] разработали новую систему оценки стоимости, которая позволяет проектировщикам оценить стоимость структурных элементов на предварительном этапе проекта, связав модель ETABS и BIM. Затем предлагаемый метод

проверяется на примере железобетонного здания и его соответствия тайваньским архитектурным законам и правилам. Ма, Лю [13] разработали основанная на логике структура, упрощающая принятие сформулированного представления стоимостных спецификаций для повышения эффективности реализации стоимостных спецификаций в компьютерных программах. Основным преимуществом этого исследования является его способность адаптироваться к другим стоимостным спецификациям, основанным на методе количественного учета. Ма и Лю [41] предложили новый подход к идентификации и получению информации о строительстве, чтобы повысить автоматизацию оценки стоимости для тендеров строительных проектов на основе проектирования на основе BIM. Joosung и Jaejun [42] разработали систему 4D-моделирования, которая может обеспечить более эффективное управление модульными строительными проектами. В соответствии с этой методологией проекты могут выиграть от сокращения времени и затрат, необходимых для выхода модулей. Занни, Шарп [43] исследовали процесс интеграции стоимости всего жизненного цикла и BIM. Этот метод концентрируется только на формирующемся частном секторе аренды, поскольку рынок построенного для аренды представляет собой повторяемую задачу и аналогичную схему рабочего процесса. Предлагаемая модель может улучшить управление жизненным циклом BIM за счет расширенного подхода к принятию решений, который является неотъемлемой частью естественного процесса разработки дизайна. Фазели, Дашти [44] разработали метод оценки стоимости на основе BIM, который может связать иранские спецификации затрат с MasterFormat и UniFormat.

Есть и другие исследования, посвященные применению машинного обучения в процессе оценки затрат. Цзян [45] предложил использовать ИНС для оценки затрат и сравнил результаты с нейронными сетями RBF. Результаты указывают на более высокую производительность ИНС по сравнению с нейронными сетями RBF. Для оптимизации точности модели в документе также были рассмотрены другие типы проектов. Huang и Hsieh [46] предложили основанный на BIM метод прогнозирования трудозатрат с использованием комбинации случайного леса и простой линейной регрессии в строительных проектах. Затем предложенный метод был протестирован на девятнадцати реальных проектах на Тайване. Чанданшайв и Камбекар [47] исследовали потенциал многослойной ИНС с прямой связью вместе с алгоритмом обучения обратного распространения для оценки стоимости в 78 строительных проектах в Индии. Чтобы предотвратить переоснащение модели и улучшить способность нейронных сетей к обобщению, в документе также использовались подходы ранней остановки и байесовской регуляризации. Elghaish, Abrishami [48] разработали подход к процессу оценки стоимости, используя комбинации 5D BIM и интегрированной реализации проекта. В этом исследовании также использовалось моделирование методом Монте-Карло, проектирование целевых значений и расчет затрат на основе деятельности в основном процессе оценки затрат, что может сделать этот процесс уникальным. Бала, Ахмад Бустани [49] использовали ИНС с обратным распространением для прогнозирования стоимости строительных проектов в Нигерии. Несмотря на эффективность модели, исследование принимает во внимание только проекты институционального типа, и нет возможности оценить другие типы проектов. Cheng, Tsai [50] применили гибрид ИНС с нечеткой логикой в качестве инструмента для уменьшения неопределенностей в процессе оценки стоимости. Результаты подтвердили эффективность комбинации моделей по сравнению с подходом, основанным только на ИНС, для прогнозирования стоимости проектов на ранней стадии проекта.

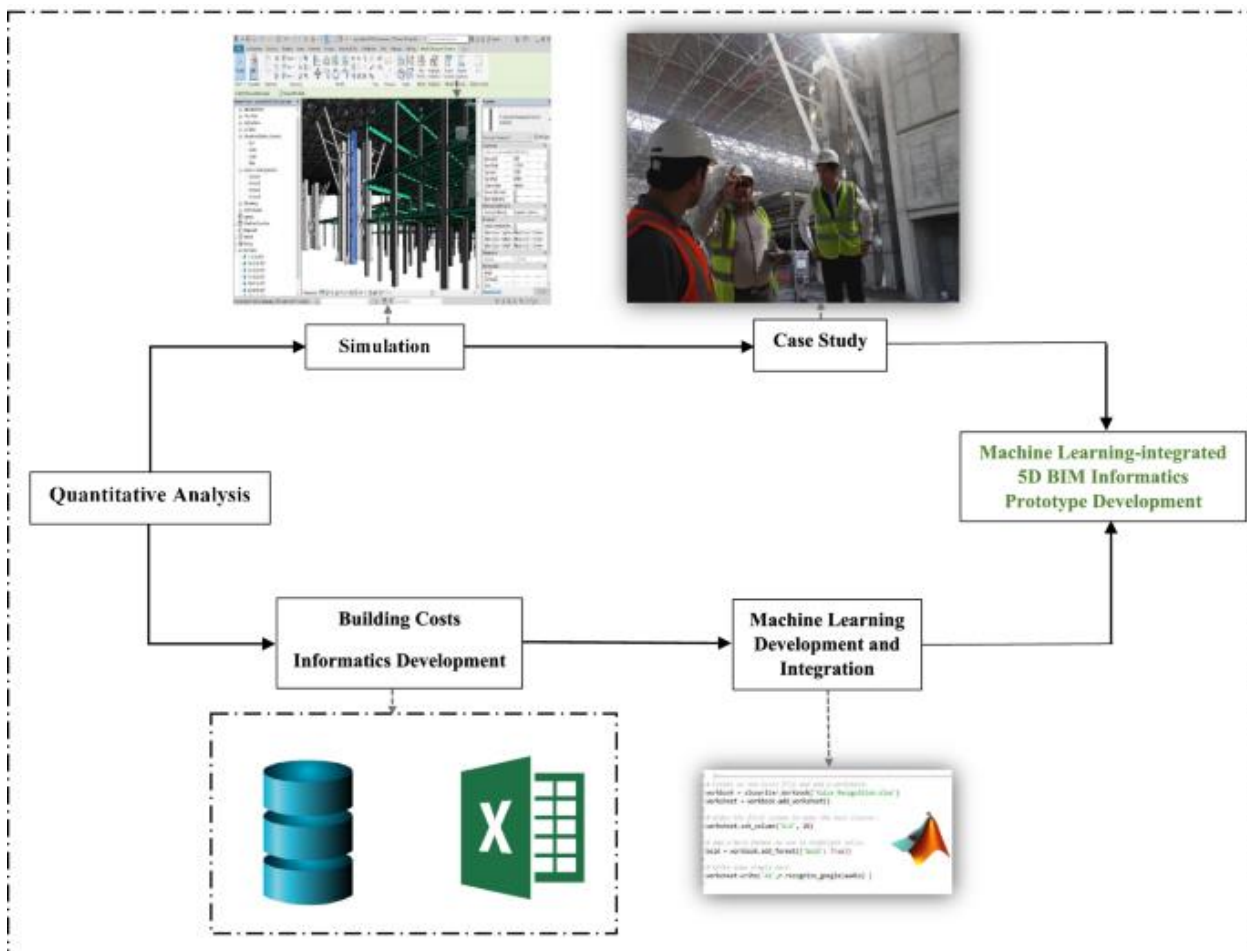
Что касается обзора литературы, в предыдущих исследованиях все еще существуют следующие ограничения. Во-первых, хотя предыдущие подходы направлены на предложение нового

метода оценки затрат, немногие из них применяют стандартизированные спецификации ресурсов, такие как позиции ICES. ICES учитывает не только стоимость материалов, но также стоимость рабочей силы и оборудования, которые могут сделать процесс более точным и точным, наряду с полным набором стандартизированных элементов, которые можно обновлять ежегодно. Кроме того, целостный взгляд на литературу показывает, что еще есть возможности для улучшения процессов классификации и оценки стоимостной информатики на основе BIM, в частности, за счет применения инструментов машинного обучения и их надлежащей интеграции с национальными руководящими принципами затрат для увеличения цифровой трансформации. внедрение в строительную отрасль. Наконец, в нескольких исследованиях пытаются классифицировать различные элементы здания в проекте и интегрировать классифицированную систему с алгоритмами машинного обучения, чтобы сделать процесс более автоматизированным и получить превосходные результаты.

Методология

Это исследование направлено на разработку прототипа информатики 5D-BIM, интегрированного с машинным обучением, для оценки стоимости зданий и проверки процесса с использованием ICES. На рисунке 1 показан план исследования этой работы, в котором процесс начинается с количественного анализа и проектирования рабочего процесса, так что производится оценка затрат на основе BIM. Затем алгоритмы машинного обучения разрабатываются с помощью метода моделирования, включающего несколько вычислений и формул в движке MATLAB. С помощью моделирования исследователи могут проверить влияние причин и следствий на различные переменные. реакции и вероятности различных сценариев [51]. На этом этапе необходимо разработать рабочий процесс для интеграции машинного обучения с BIM. Затем алгоритмы реализуются с помощью обучающих наборов данных с помощью машинного обучения, и создается автоматизированный процесс оценки стоимости. Согласно Napsock и Algozzine [52], жизнеспособное тематическое исследование демонстрирует ценность и производительность рабочего процесса, моделей или алгоритмов, реализованных в реальных условиях. Таким образом, алгоритмы выполняются на практическом примере обучения машинному обучению и разработки автоматизированной оценки стоимости с помощью BIM. Наконец, контрольный набор данных используется для тестирования процесса и определения оптимальной производительности алгоритмов машинного обучения.

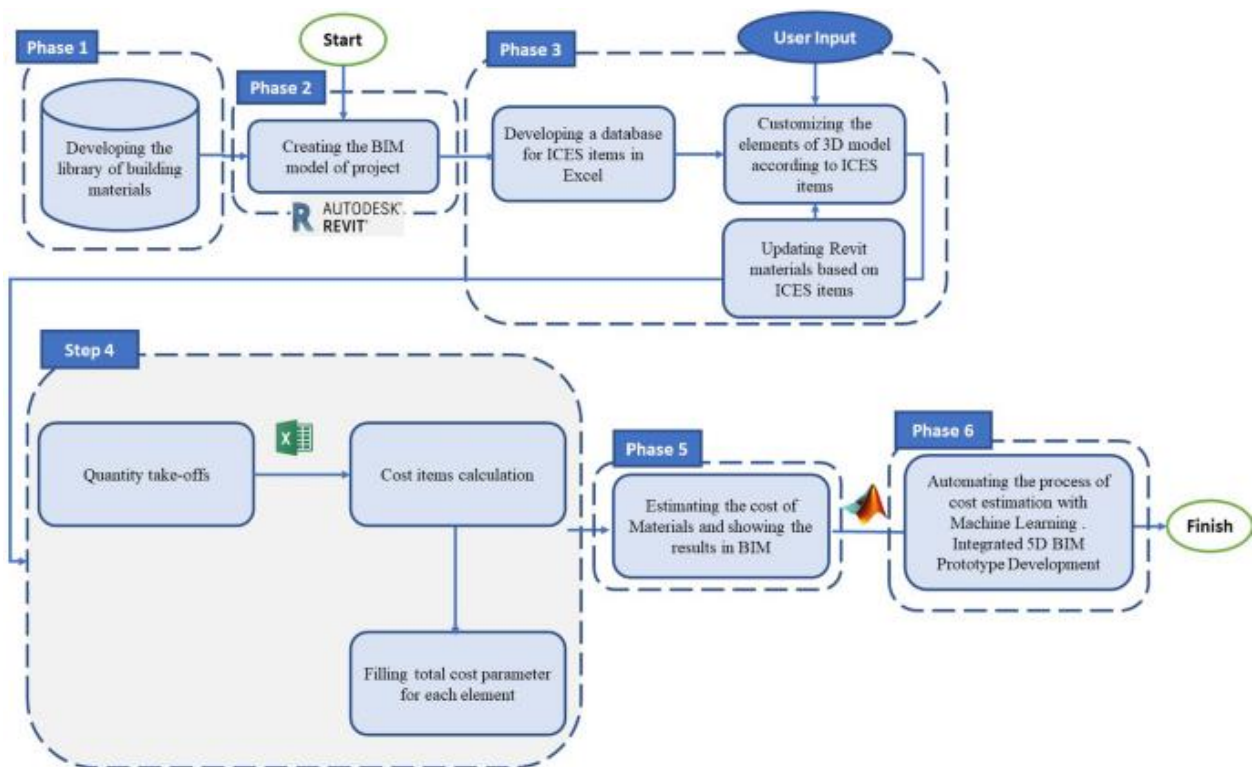
Рисунок 1



Дизайн исследования

Практические шаги для этого плана исследования включают 6 основных технических этапов. Во-первых, база данных элементов ICES создается в Excel и автоматически импортируется в инструмент разработки BIM; Revit для согласования информации о материалах с их дополнительными данными. После этого пользователь должен создать элементы на основе сгенерированных иранских материалов, после чего система оценит стоимость здания через ИНС и покажет результаты как в BIM, так и в Excel в виде отчетов. Однако одной из основных сложных задач для предлагаемого метода является корректировка элементов на основе элементов ICES. Поэтому в этом исследовании также применяется машинное обучение для облегчения процесса оценки стоимости каждого элемента с использованием функций MATLAB. Таким образом, пользователь может оценить стоимость проекта в более короткие сроки. Таким образом, в Revit необходимо разработать расширение на основе BIM с шестью основными функциями, чтобы облегчить и автоматизировать процесс оценки стоимости. Развитие предлагаемого подхода, как показано на рис. 2, объясняется следующими шестью шагами.

Рис. 2



Разработка прототипа 5D BIM

Этап 1: разработка библиотеки строительных материалов

Поскольку программное обеспечение Revit имеет относительно небольшое количество компонентов здания, проектировщики должны создать обширную библиотеку для разработки модели BIM с высокой детализацией информации и компонентов. Эта библиотека компонентов позволяет проектировщикам разрабатывать модель BIM с полной детализацией. Это также необходимо для быстрой и точной оценки стоимости в соответствии с их прайс-листом. Разработчик может определить различные сценарии для проекта, изменив различные компоненты (см. «Приложение 1»), и это поможет заинтересованным сторонам принять эффективное решение в будущем с точки зрения экономии затрат. Компоненты проекта предоставляются в форматах .rvt и .rfa. Таким образом, дизайнер может загружать их с официальных веб-страниц, таких как библиотеки SmartBIM или ArCat, и импортировать их в файловые проекты Revit.

Этап 2: создание BIM-модели проекта

3D-модель считается одним из основных преимуществ BIM. Это очевидное достоинство может значительно помочь всем, кто занимается проектами, обнаруживать конфликты в построении и включать данные для каждого компонента. Эта информация необходима для точной оценки стоимости проекта, поэтому необходимо создать 3D-модель для захвата всего количества объектов.

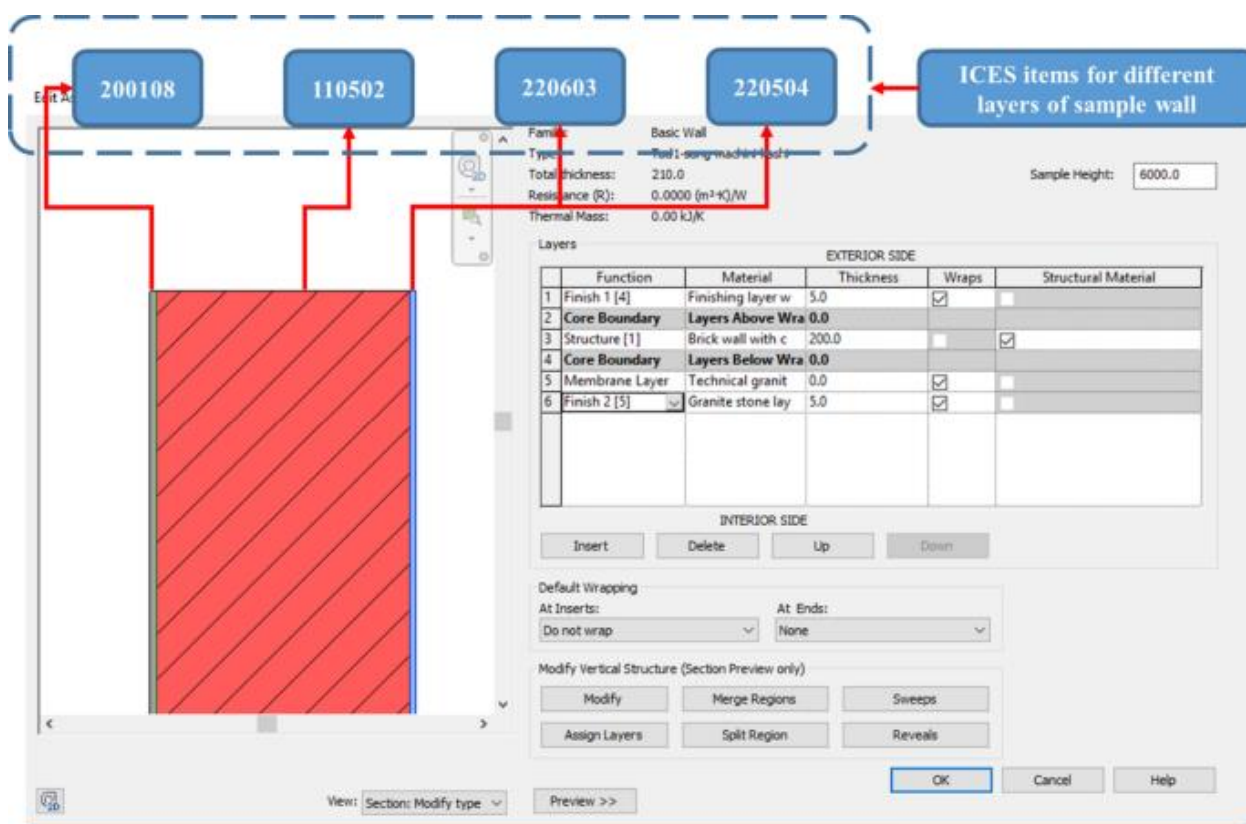
Фаза 3: разработка базы данных для элементов ICES в Excel

Для оценки стоимости проекта в Иране необходимо применить иранские статьи затрат в модели BIM. Для этого на этом этапе в среде Excel создается база данных элементов ICES. Эта база данных

включает всю информацию об элементах ICES, включая название, идентификатор, описание ICES и стоимость единицы продукции.

База данных ICES включает 909 позиций, которые в основном используются для оценки стоимости конструктивных и архитектурных элементов проектов. Для лучшего понимания процесса процесс описывается в виде образца стены. На рис. 3 показаны элементы ICES для этого образца стены. В таблице 1 также указана вся информация Excel об элементах ICES этого образца стены, извлеченная из основной базы данных. В первом столбце указаны названия элементов ICES, а во втором, третьем, четвертом и пятом столбцах — элементы ICES, удельная стоимость, формулы и описание соответственно.

Рис. 3



Различные слои образца стены

Таблица 1 Элементы ICES для образца стены

From: [Machine learning-integrated 5D BIM informatics: building materials costs data classification and prototype development](#)

Name	ICES item	Unit cost	Formula
Finishing layer with glazed tile	200,108	399,500	Area
Brick wall with cement to sand ratio mortar of 1.5	110,502	425,000	Area
Technical granite stone provision (Extra cost for granite stone layer)	220,603	73,000	Area
Granite stone layer on the vertical surface	220,504	674,500	Area

Обновление материалов Revit на основе элементов ICES

На этом этапе создается плагин для импорта всех созданных элементов ICES в среду BIM. При активации этого плагина Revit вызывает файл Excel, информация ICES автоматически импортируется в Revit, и соответствующая таблица обновляется. Итак, в список материалов Revit добавлено 909 позиций ICES. На рис. 4 показана обновленная таблица Revit после внедрения созданного плагина. Как показано на рис. 4, названия материалов, стоимостные параметры и затраты на единицу продукции соответствуют их названиям ICES и Keynotes материалов в Revit.

Рис. 4

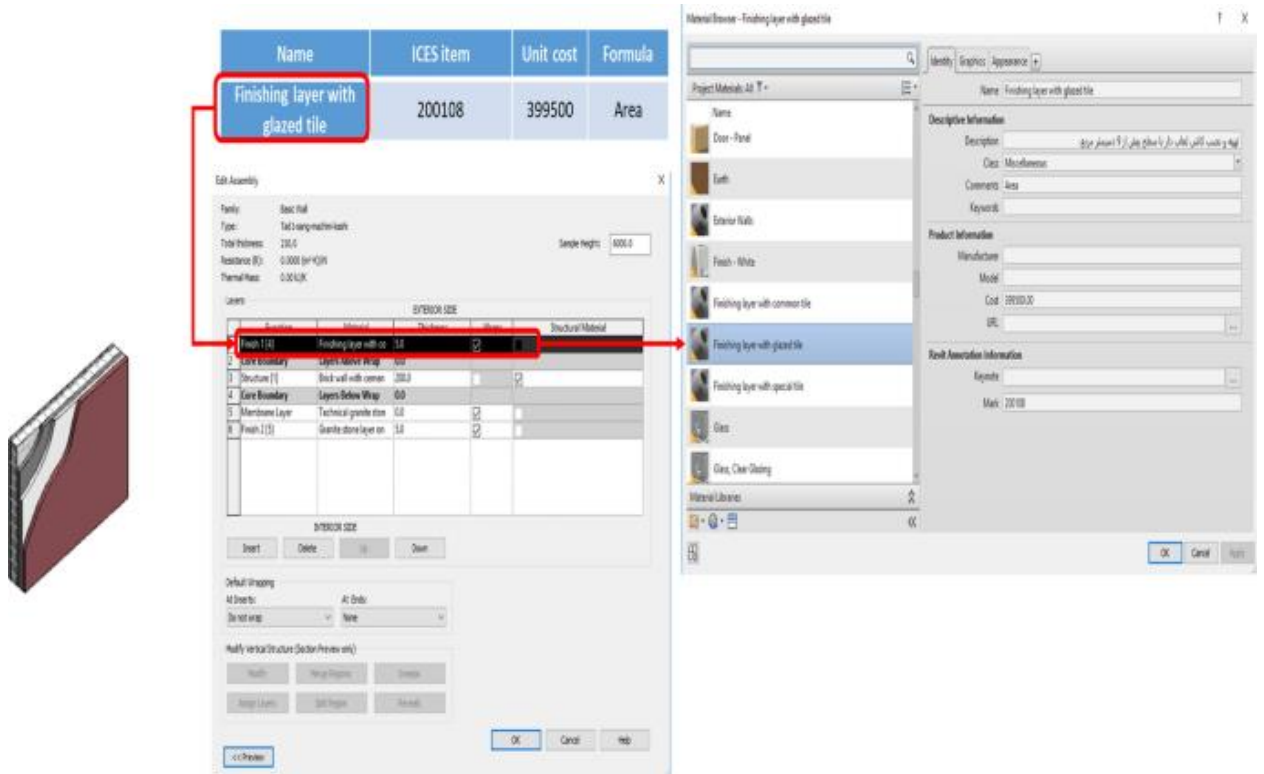
	A	B	C	D	E
	Name	ICES Item	UnitCost	Formula	Description
1	roof covering with thatch plaster with thickness of 5 cm	180101	14,200	Area	انورد کاشان روی هر نوع سطح، با ضخامت ۵ سانتیمتر از صورت.
S13	Smoothing vertical and ceiling surfaces	180201	26,400	Area	نرمود، به ازای هر یک سانتیمتر ضخامت.
S14	Plaster Finishing for vertical surfaces with thickness of 2.5 cm	180202	75,800	Area	انورد گچ و خاک به ضخامت ۲.۵ سانتیمتر، روی سطوح قائم.
S15	Ceiling Plaster Finishing with thickness of 2.5 cm	180203	102,600	Area	انورد گچ و خاک به ضخامت ۲.۵ سانتیمتر، برای زیر سقفها.
S16	Whitewashing of vertical surfaces	180204	70,300	Area	سفید کاری روی سطوح قائم و پرداخت آن با گچ کشته.
S17	Whitewashing on the ceiling	180205	93,300	Area	سفید کاری زیر سقفها و پرداخت آن با گچ کشته.

Обновлена база данных элементов ICES в материалах Revit.

Настройка элементов 3D-модели по элементам ICES

Составляя базу данных элементов ICES в Revit, пользователь может датировать элементы на основе элементов ICES. Для этого пользователь должен обновить слои компонентов в соответствии с элементами ICES. На рис. 5 показано, как пользователь может добавлять элементы ICES в образец стены. Как видно на этом рисунке 5, стена имеет четыре слоя, и каждый слой выбирается из базы данных элементов ICES.

Рис. 5

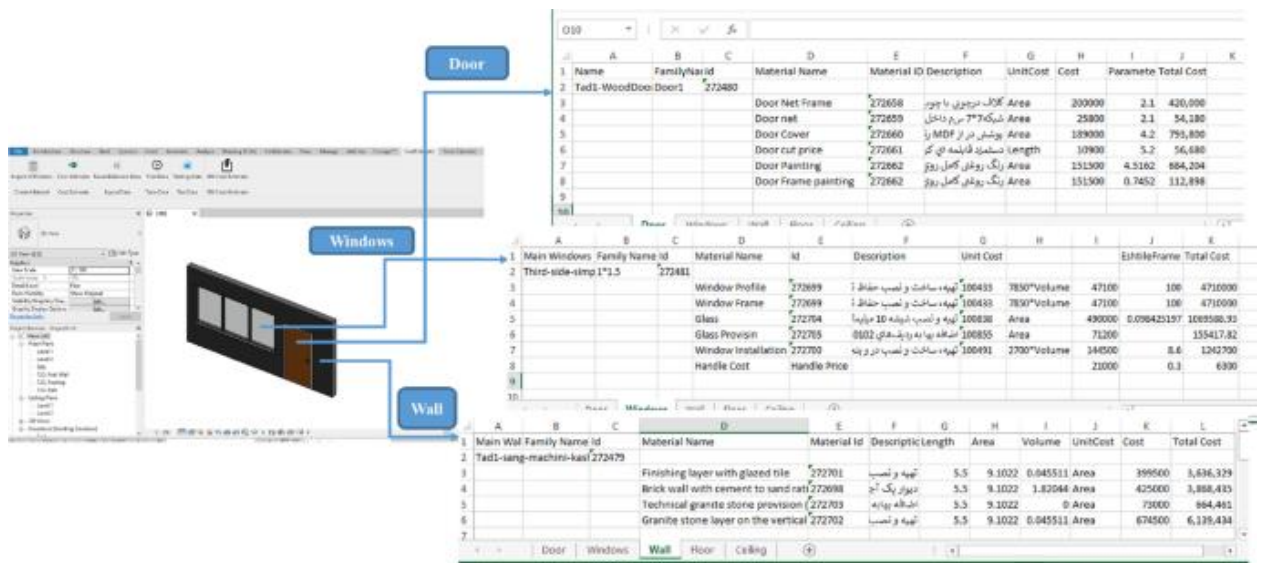


Настройка элементов 3D-модели по элементам ICES

Этап 4: количественный взлет

На этом этапе все материалы извлекаются из файлов Revit и отправляются в Excel. Таким образом, все необходимые данные для оценки стоимости, такие как статьи затрат и удельные затраты в ICES, а также геометрическая информация, такая как площадь, объем и длина строительных элементов, экспортируются и классифицируются на основе параметров BIM (рис. 6).

Рис. 6



Процесс оценки стоимости и отчетность в файле Excel

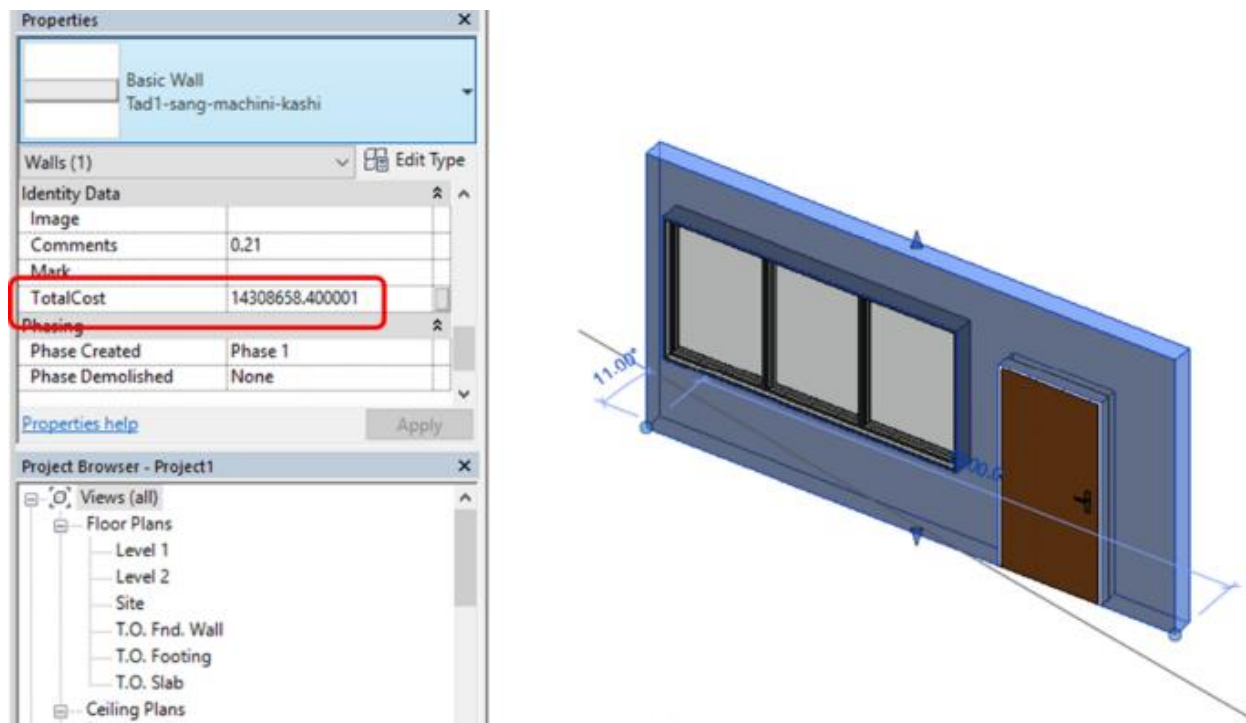
Расчет статей затрат

На этом этапе все необходимые расчеты выполняются путем умножения всех связанных статей затрат ICES, соответствующих удельных затрат ICES и соответствующих количеств их компонентов. В элементах ICES есть разные единицы измерения, включая квадратный метр, метр, кубический метр и килограмм. Следует учитывать, что все эти процессы выполнялись ранее с использованием формулы вместо единиц единиц ICES (таблица 1). На рис. 6 показана оценка стоимости образца стены вместе с дверями и окнами. Как видно на рис. 4, 6 оцениваются категории, включая пол, стены, двери и окна, и для каждой из них создается отдельный лист, и результаты каждой категории и затраты отображаются в Excel.

Заполнение параметра общей стоимости для каждого элемента

На этом шаге сгенерированный параметр общей стоимости заполняется функцией «Стоимость-Оценка» в разработанном расширении. Для этого сначала вся информация о стоимости элементов суммируется в Excel. Полученные данные о стоимости затем устанавливаются в параметре общей стоимости для каждого компонента. Этот параметр необходим для прогнозирования будущих затрат с использованием алгоритмов ИНС. Эти данные будут рассматриваться как выходные данные для алгоритмов машинного обучения и будут экспортированы в MATLAB для запуска (рис. 7).

Рис. 7

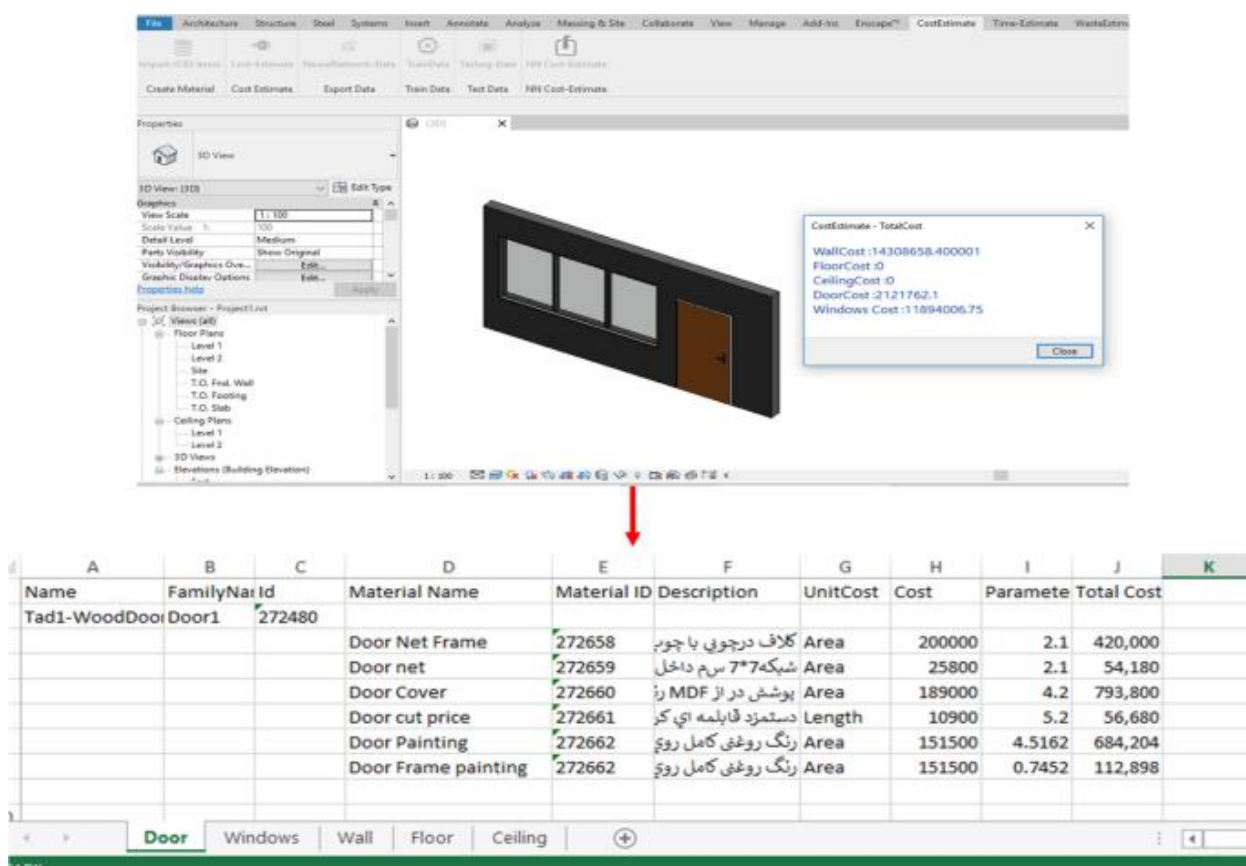


Полученная общая стоимость для каждого компонента в Revit

Фаза 5: оценка стоимости материалов и отображение результатов в BIM

На этапе 5 общая стоимость различных категорий компонентов здания отображается в среде Revit с помощью функции «Стоимостная оценка». Как объяснялось на предыдущих шагах, все данные элементов сортируются в соответствии с параметрическими элементами Revit, поэтому значения затрат суммируются для получения общей сметы затрат (рис. 8). Платформа также экспортирует полные отчеты об оценке стоимости на основе BIM в программное обеспечение Excel. Этот отчет может помочь специалистам по оценке затрат показать всем заинтересованным сторонам проекта детали оценки стоимости. С помощью этого отчета оценщики могут легко изменить желаемые элементы ICES для каждого элемента, используя соответствующий идентификатор, и если есть какая-либо ошибка, включая неправильные элементы ICES или неправильный тип элементов, они могут легко решить эту проблему. На самом деле, основная цель этого шага состоит в том, чтобы уменьшить количество ошибок, возникающих в результате вмешательства персонала при выборе элементов ICES на этапе 3 исследования.

Рис. 8



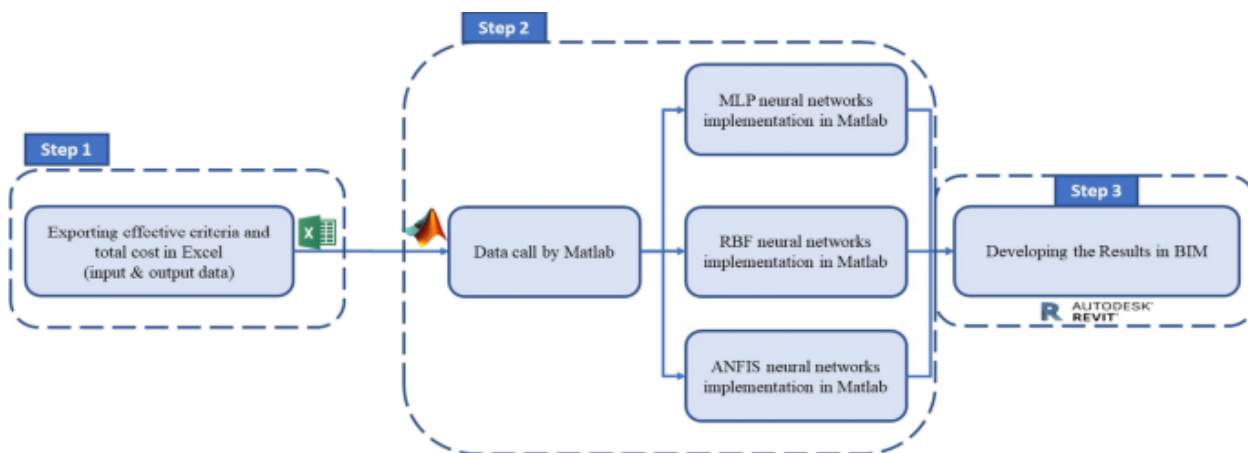
Представление общей стоимости

Этап 6: автоматизация процесса оценки стоимости с помощью разработки прототипа 5D BIM с интегрированным машинным обучением.

Основной задачей этого этапа является разработка алгоритма, облегчающего процесс оценки стоимости каждого элемента проекта с использованием нейронной сети для обучения данных. Поскольку процесс выбора элементов ICES для различных элементов проекта был трудоемким и подвержен ошибкам, этот шаг может помочь всем заинтересованным сторонам строительных проектов автоматически оценить стоимость элементов. Кроме того, для понимания производительности различных алгоритмов нейронной сети рассматриваются три версии

нейронных сетей, включая MLP, RBF и ANFIS. На рис. 9 показан обзор реализации алгоритмов нейронной сети в MATLAB.

Рис. 9

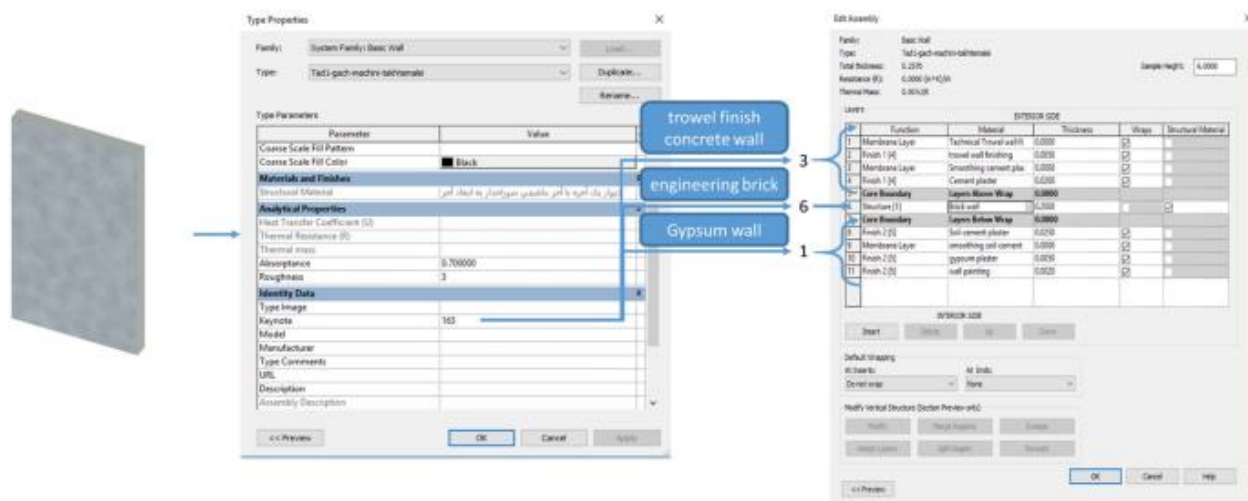


Процесс реализации машинного обучения в MATLAB

Шаг 1: экспорт эффективных критериев и общей стоимости в Excel (входные и выходные данные)

Основной задачей на этом этапе является определение основных эффективных критериев, которые существенно влияют на стоимость составных элементов. Для этого была применена методика оцифровки и сопоставления компонентов для выявления значимых критериев общей стоимости элементов. На рис. 10 показан образец стены № 163. Как видно, первая цифра (1) – гипсокартонная стена, расположенная в качестве нижнего отделочного слоя стены, вторая цифра (6) – инженерный кирпич, являющийся конструкционным слоем стены, а третья цифра (3) демонстрирует шпаклевку бетонной стены, которая укладывается в верхний слой отделки стены. Аналогичный метод применяется для всех других компонентов здания, параметров и стоимости.

Рис. 10



Классификация составных элементов в Revit

Параметр общей стоимости также экспортируется из Revit в Excel. Этот параметр является выходом для алгоритмов нейронной сети. Все выходные данные экспортируются в Excel с помощью функции «NeuralNetwork-Data» в расширении.

Шаг 2: вызов данных с помощью MATLAB

В этом исследовании был выбран MATLAB, потому что он обладает мощным и гибким механизмом и хорошо связан с моделями BIM [53]. Имея данные в Excel, создается другой плагин, который может передавать их в MATLAB, реализовывать алгоритмы нейронной сети и, наконец, отображать результаты в BIM. Следовательно, реализация алгоритмов ANN, охватывающих MLP, RBF и ANFIS, объясняется в следующих трех шагах.

Реализация нейронных сетей MLP в MATLAB

Известно, что сеть MLP является распространенной и одной из наиболее известных сетей, применяемых в нейронных сетях. Согласно MLP, условия смещения и взвешенная сумма входных данных переходят на уровень активации с помощью передаточной функции для создания выходных данных. Блоки расположены в многоуровневой топологии с прямой связью, придуманной как нейронная сеть с прямой связью. MLP имеет некоторые особенности, включая любое количество входов, скрытые слои с любым количеством единиц, функции линейной комбинации во входных слоях, функции активации в скрытых слоях и любое количество выходов с любой функцией активации [54]. Каждый слой включает набор нейронов и узлов. Входной и выходной слои связаны скрытым слоем. Все соединения между входными слоями и скрытыми слоями содержат матрицу входных весов, а все соединения между скрытыми слоями и выходными слоями охватывают матрицу выходных весов [55]. Каждый нейрон, вычисляя взвешенную сумму своих входных данных (x_j , для $j = 1, 2, \dots, n$), использует нелинейную функцию активации, чтобы получить выходной сигнал y , как в уравнении. 1:

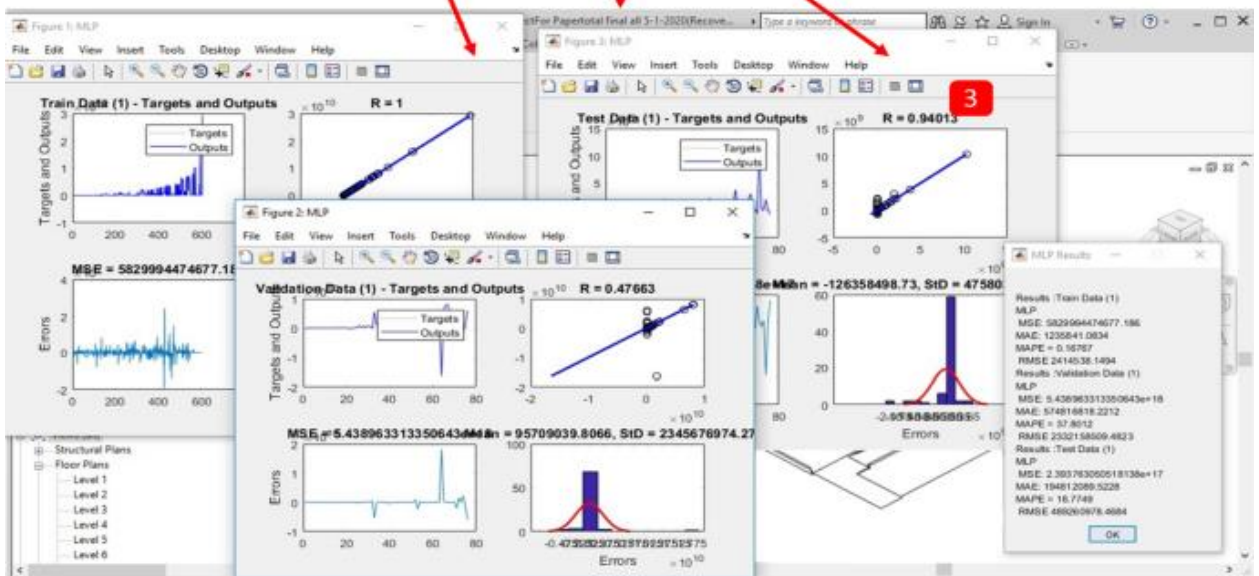
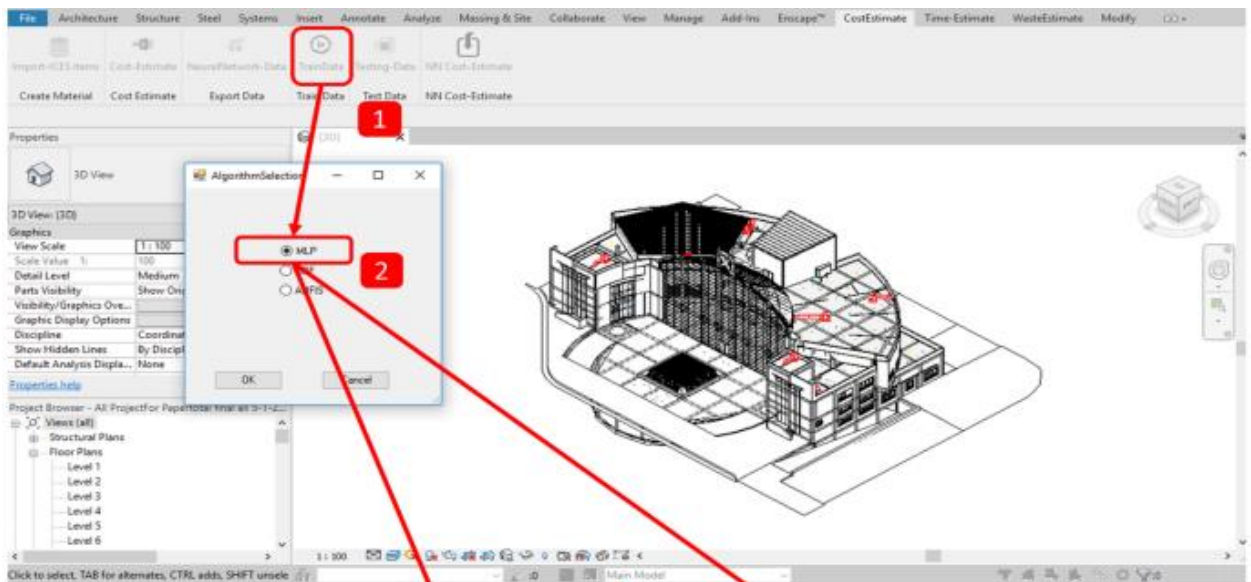
$$y = f\left(\sum_{j=1}^n w_j x_j\right) \quad (1)$$

где f — сигмовидная функция активации, которая используется в большинстве приложений нейронных сетей с прямой связью. Функция демонстрируется как уравнение. 2:

$$\text{sgm}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

После нажатия на функцию «TrainData» в разработанном расширении Revit предлагает пользователям выбрать, какой алгоритм следует реализовать. При выборе функции алгоритма MLP данные передаются и обрабатываются в MATLAB, а MATLAB отправляет обработанные данные обратно в Revit. На рис. 11 показано, как работает это обратное приложение.

Рис. 11



Взад и вперед реализация MLP

Реализация нейронных сетей RBF в MATLAB

Нейронные сети RBF в качестве функций распознавания образов были предложены несколькими исследователями для разработки методов обучения и повышения точности алгоритма по сравнению с другими нейронными сетями [55]. Сети RBF хорошо работают при моделировании аппроксимаций нелинейных функций. Одноэтапное обучение позволяет добиться хорошего результата, а не применять повторяющийся процесс в МЛП, а также раннее изучение приложения [56]. Он также используется в классификации данных, системном моделировании и управлении [55]. Он включает в себя один входной слой, один скрытый слой с нелинейной функцией активации RBF, а также один линейный выходной слой. Каждый RBF имеет два ключевых параметра, представляющих расположение центра функций и его отклонение или ширину. Скрытый блок вычисляет разрыв между входными данными и центром их RBF. Также существует один скрытый слой и два набора весов, соединяющих скрытые слои с входным и выходным слоями. Веса, связывающие скрытый слой с входным, включают в себя параметры базисных функций. Веса применяются для составления линейных комбинаций активаций

базовых функций (скрытых единиц) для получения выходных данных сети [54]. Выход сети как Eq. 3:

$$y_k(x) = \sum_{j=1}^M W_{kj} \phi_j(x) + W_{k0} \quad (3)$$

где M — количество базовых функций, x — вектор входных данных, w_{kj} представляет собой взвешенную связь между базовой функцией и выходным слоем, а ϕ_j — нелинейная функция j -го элемента, которая обычно является функцией Гаусса (уравнение 4).):

$$\phi_j(x) = \exp\left(-\frac{|x - \mu_j|^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (4)$$

где x и μ — вход и центр единицы РБФ соответственно, а σ_j — разброс базисной функции Гаусса.

При нажатии на функцию «TrainData» в разработанном расширении активируется тот же процесс, что и в MLP.

Реализация нейронных сетей ANFIS в MATLAB

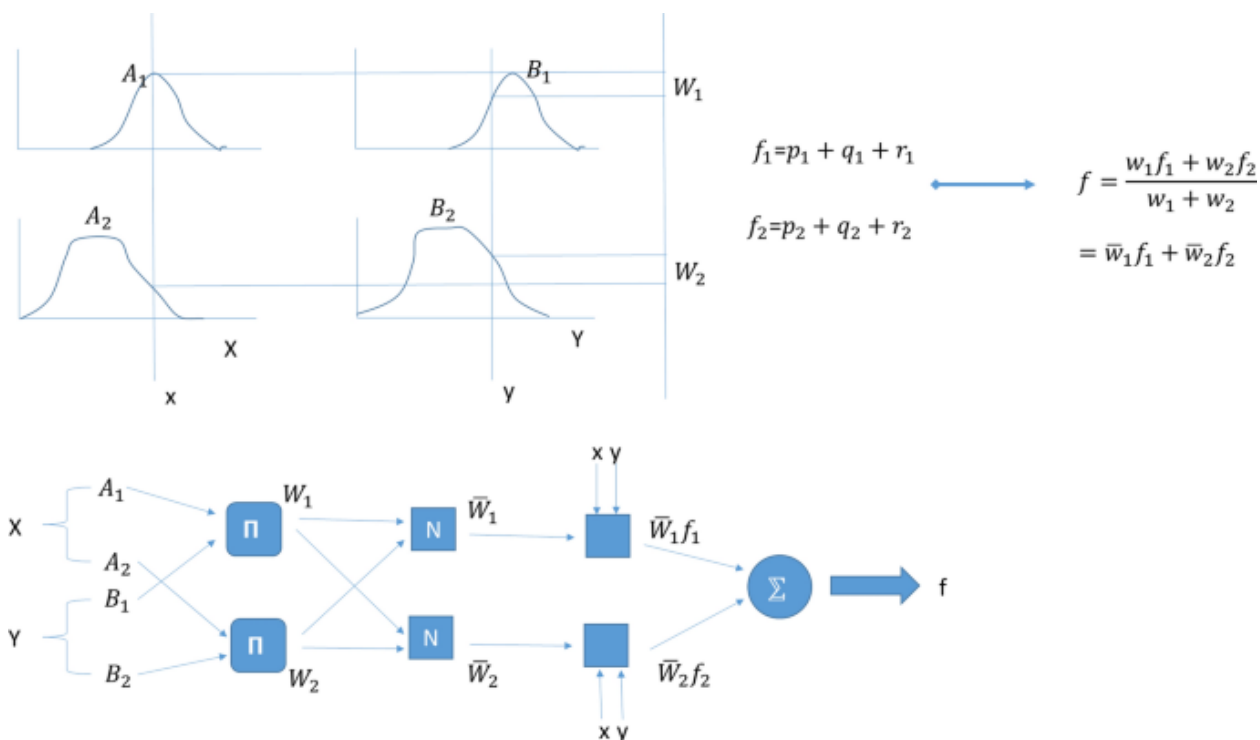
ANFIS представляет собой комбинацию нейронных сетей и нечетких систем, которые содержат преимущества обеих, разработанных [57, 58]. Его структура основана на системе нейронной сети с прямой связью, где каждый слой формируется из компонентов нейро-нечеткой системы [55]. Для облегчения процесса обучения и адаптации ANFIS работает в соответствии с моделью нечеткого хирурга в приложении адаптивной системы [59]. Это делает моделирование ANFIS более систематическим и не требует специальных знаний. На рис. 12 представлена нечеткая система хирурга, включающая два входных параметра, один выходной параметр и два правила [55, 60]. Соответствующая архитектура ANFIS представляет собой также указано на рис. 12 [54, 55]. Его правила таковы:

- Rule 1 If x is A_1 and y is B_1 Then $f = p_1x + q_1y + r_1$
- Rule 2 If x is A_2 and y is B_2 Then $f = p_2x + q_2y + r_2$

Правило 1: Если x равно A_1 , а y равно B_1 , то $f = p_1x + q_1y + r_1$

Правило 2: Если x равно A_2 , а y равно B_2 , то $f = p_2x + q_2y + r_2$

Рис. 12



Процесс ANFIS в MATLAB [54, 55]

где x и y — входы, A_i и B_i — нечеткие множества, f_i — выход, а p_i , q_i и r_i — параметры дизайна, определяемые во время обучения [57]. Он имеет пять слоев, в которых каждый выходной сигнал вводится в узлы следующего слоя.

Слои от входа к выходу следующие [55]:

Уровень 1, нечеткий уровень, включает в себя функции принадлежности. Треугольные и колоколообразные функции являются наиболее популярными функциями принадлежности в этом слое. Каждый узел в этом слое является адаптивным узлом.

Уровень 2, уровень продукта, представляет силу каждого правила. Фактически он оценивает степень активации встроенных правил. Каждый узел в этом слое является фиксированным узлом.

Уровень 3, нормализованный уровень, представляет нормализованную силу каждого правила. i -й узел вычисляет коэффициент силы применения i -го правила. Каждый узел в этом слое является фиксированным узлом.

Слой 4, дефаззирванный слой, содержит линейную комбинацию входных данных, умноженных на нормализованную силу w . Он производит вывод слоев.

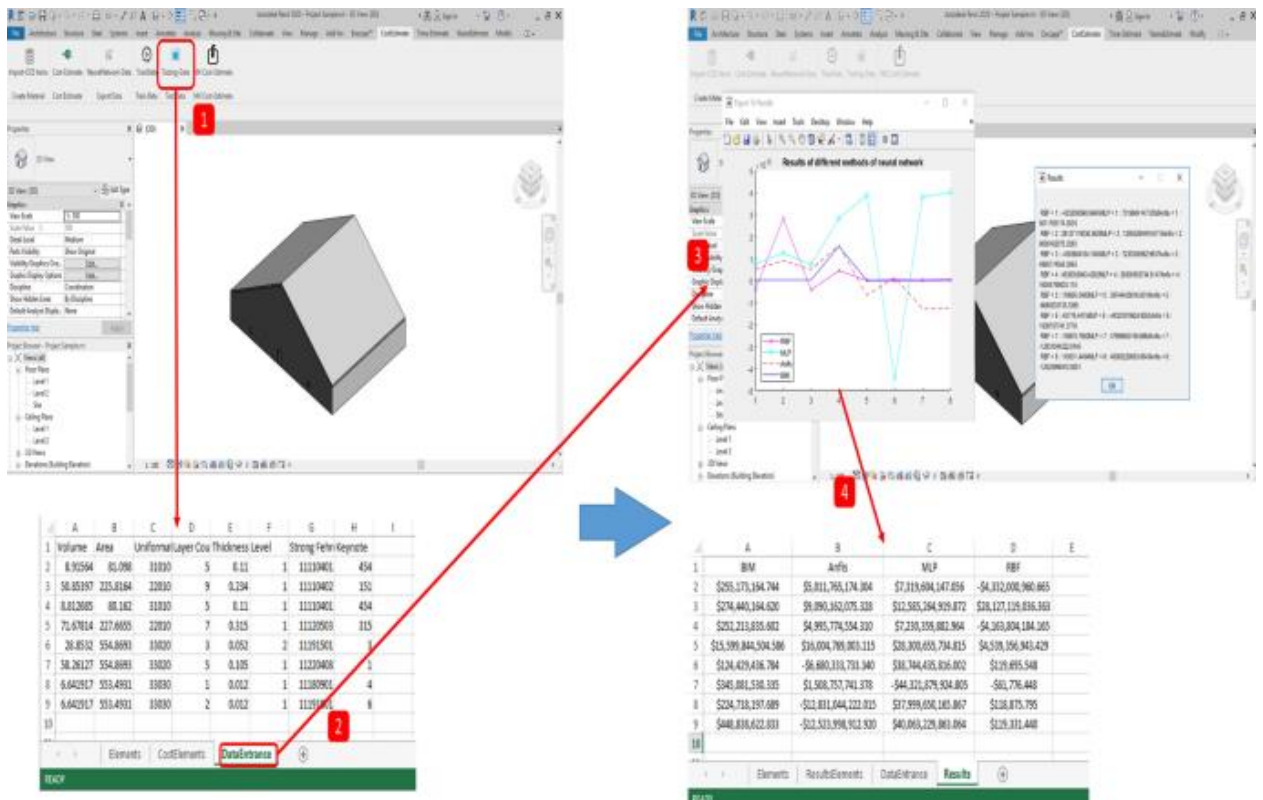
Слой 5, общий выходной слой, вычисляет сумму выходов в слое 4 (рис. 12).

Такой же возвратно-поступательный метод используется и для ANFIS.

Шаг 3: обработка результатов в BIM

На этом этапе результаты желаемого алгоритма, обученного MATLAB, отображаются для пользователя в Revit. Таким образом, показаны 4 значения, включая графики обучения и испытаний, все данные, полученные в результате алгоритмов, и измерение ошибок в алгоритмах с использованием различных методов, включая среднеквадратичную ошибку (MSE), среднюю абсолютную ошибку (MAE), среднюю абсолютную ошибку в процентах (MAPE) и среднеквадратичной ошибки (RMSE) для всех диаграмм. На рис. 11 показаны примеры диаграмм алгоритма MLP после реализации фреймворка. Как видно, для каждой диаграммы есть несколько таблиц. Первая таблица — это данные обучения или теста в MATLAB, вторая — для отображения линейной регрессии результатов, третья — для демонстрации ошибок и последняя — варианты ошибок. Все эти процессы автоматически реализованы на функции «TrainData» в разработанном расширении. Следует учитывать, что MATLAB может сохранять обученные данные. Итак, для тестирования обученных данных для разных алгоритмов был создан еще один плагин. Этот плагин позволяет инженерам BIM определить наиболее эффективную нейронную сеть, которая работает так же близко, как и оценка стоимости на основе BIM (рис. 13).

Рис. 13

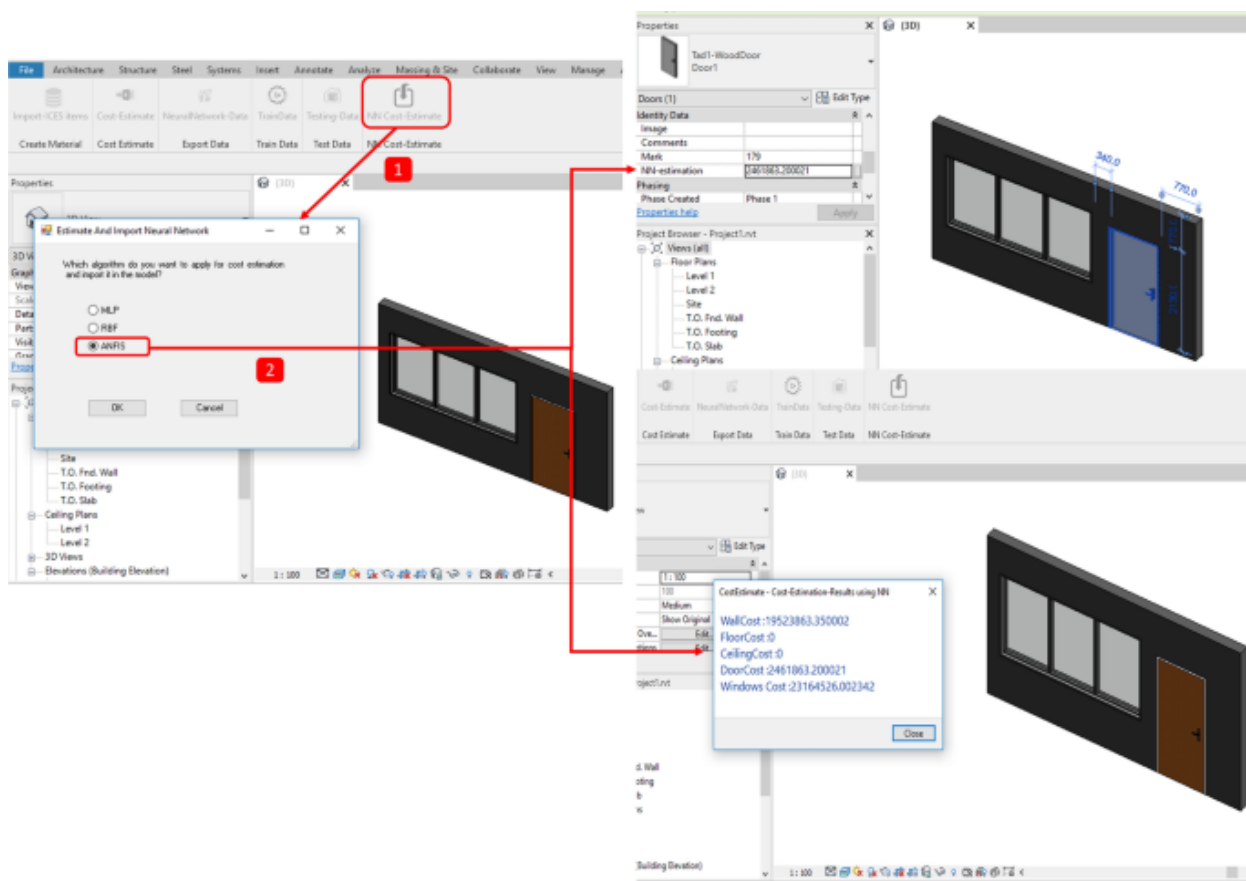


Процесс тестирования инфраструктуры данных

Приложение под названием «Данные тестирования» было создано для оценки и сравнения стоимости элементов с использованием обученных данных с оценкой стоимости на основе BIM. Плагин извлекает данные из новой 3D-модели, и пользователь может, наконец, оценить стоимость элементов, используя обученные данные. Это приложение может давать оценку стоимости различными методами в виде диаграмм вместе с отчетами в MATLAB (рис. 13).

Выяснив лучший алгоритм ИНС, нет необходимости повторять весь предыдущий процесс изучения различных типов нейронных сетей, и инженеры BIM могут просто оценить стоимость строительных элементов в будущих проектах с помощью плагина «NN Cost Estimate». Фактически этот инструмент оценивает стоимость элементов с помощью обученного алгоритма и связывает результаты с каждым элементом здания. На рис. 14 показано, как работает этот плагин. Как видно, сначала BIM-инженерам нужно выбрать лучший алгоритм нейронной сети для текущего проекта, а затем генерируется новый параметр, называемый «NN-оценка», и для каждого элемента рисуется оценочная стоимость. Сгенерированный плагин также предоставляет общую стоимость каждого элемента.

Рис. 14



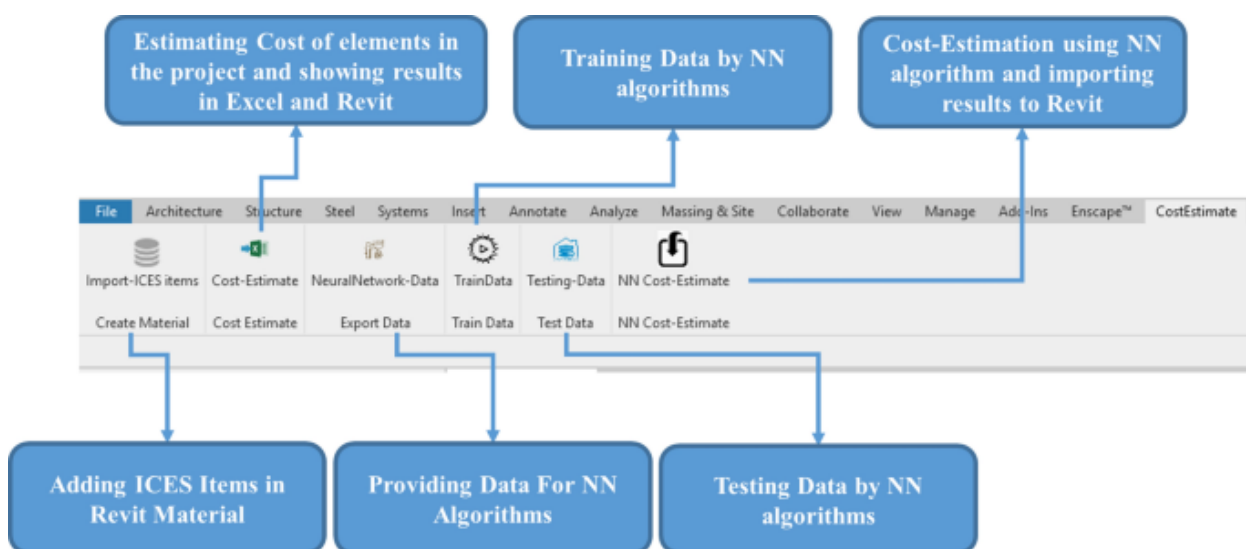
Импорт результатов оценки алгоритмов

Сгенерированный прототип

Для реализации предложенного метода разработано расширение и компиляция из 6 плагинов. Рисунок 14 демонстрирует общий вид сгенерированного прототипа. Как видно, первый плагин

под названием «ImportICES» отправляет элементы ICES в Revit, используя базу данных ICES, созданную в Excel. Второй плагин CostEstimate предназначен для оценки стоимости каждого элемента и создания отчета для пользователя. Этот плагин также создает параметр общей стоимости для каждого элемента в проекте и заполняет пустые параметры расчетными затратами. Следующая часть плагина, приложение «TrainData», предназначена для отправки созданных данных и реализации алгоритмов ИНС в MATLAB. Следующий плагин предназначен для тестирования новых данных и позволяет инженерам BIM тестировать различные алгоритмы в разных проектах и выбирать наиболее подходящий для этого проекта. Последний плагин предназначен для оценки стоимости с использованием алгоритма и импорта результатов в Revit (рис. 15).

Рис. 15



Обзор сгенерированного прототипа в Revit

Проверка прототипа

Проверить в качестве разработанного прототипа был использован реальный офис строительной инженерной организации, расположенный в городе Кум, Иран. В этом здании могут разместиться около 900 человек. Проект включает в себя четыре основных этажа с одним цокольным этажом для парковки и подсобным помещением. Строительная площадка проекта имеет общую площадь 6800 квадратных метров. На рис. 16 представлен обзор проекта.

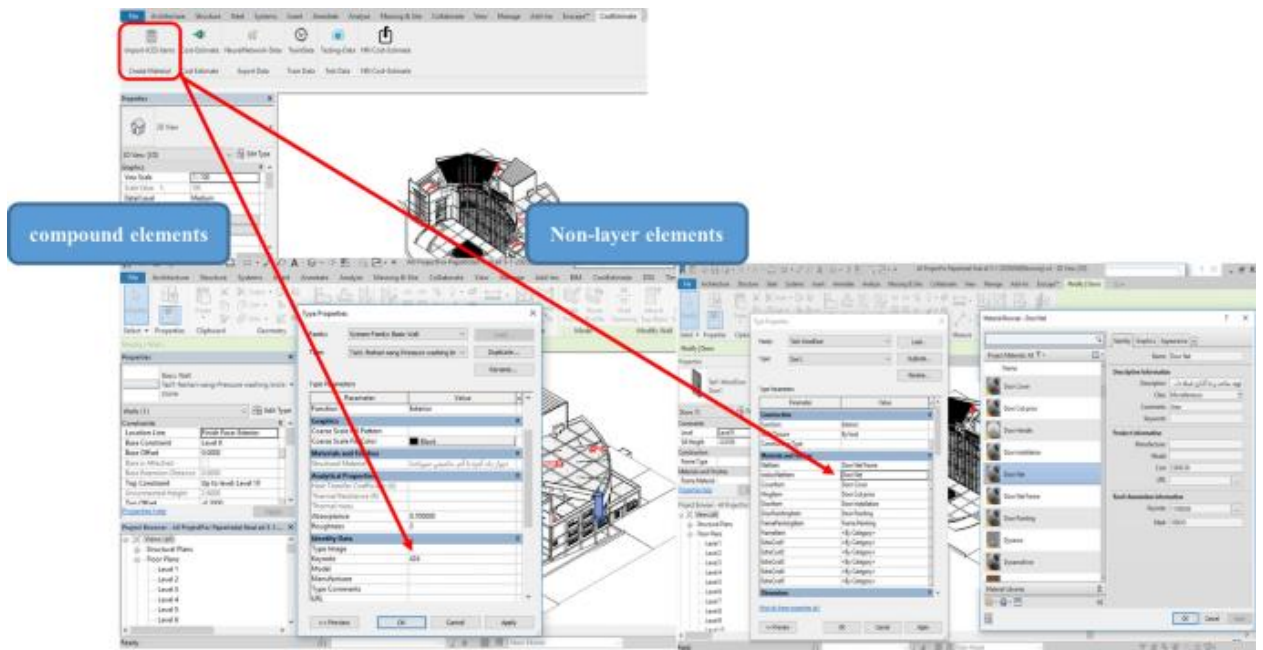
Рис. 16



Обзор тематического исследования

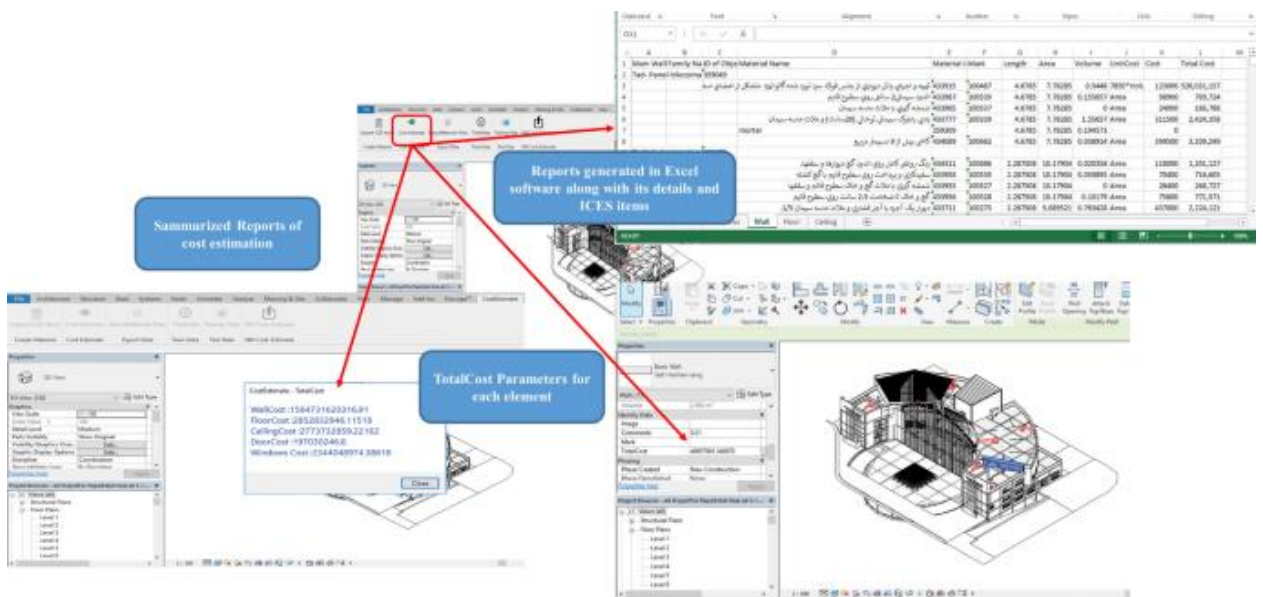
Для оценки стоимости проекта все элементы ICES в проекте импортируются с помощью плагина «ImportICES item». Затем пользователь должен определить соответствующие элементы ICES для каждого элемента проекта. После этого пользователь может применить плагин «оценка стоимости» для проекта, а затем плагин оценивает стоимость и отображает всплывающее окно для сводного отчета об оценке стоимости. Плагин также сообщает полные элементы ICES вместе с подробностями в файле Excel. Он также создает параметр, который называется общей стоимостью каждого элемента, и пользователь может увидеть стоимость, щелкнув по каждому элементу. На рис. 17 показано, как пользователь должен выбирать пункты ICES для элементов, а на рис. 18 показаны сводные отчеты об оценке стоимости. Следует отметить, что для этого тематического исследования использовалась самая последняя версия ICES 2020 года [33].

Рис. 17



Выбор элементов ICES пользователем

Рис. 18



Применение результатов по прототипу

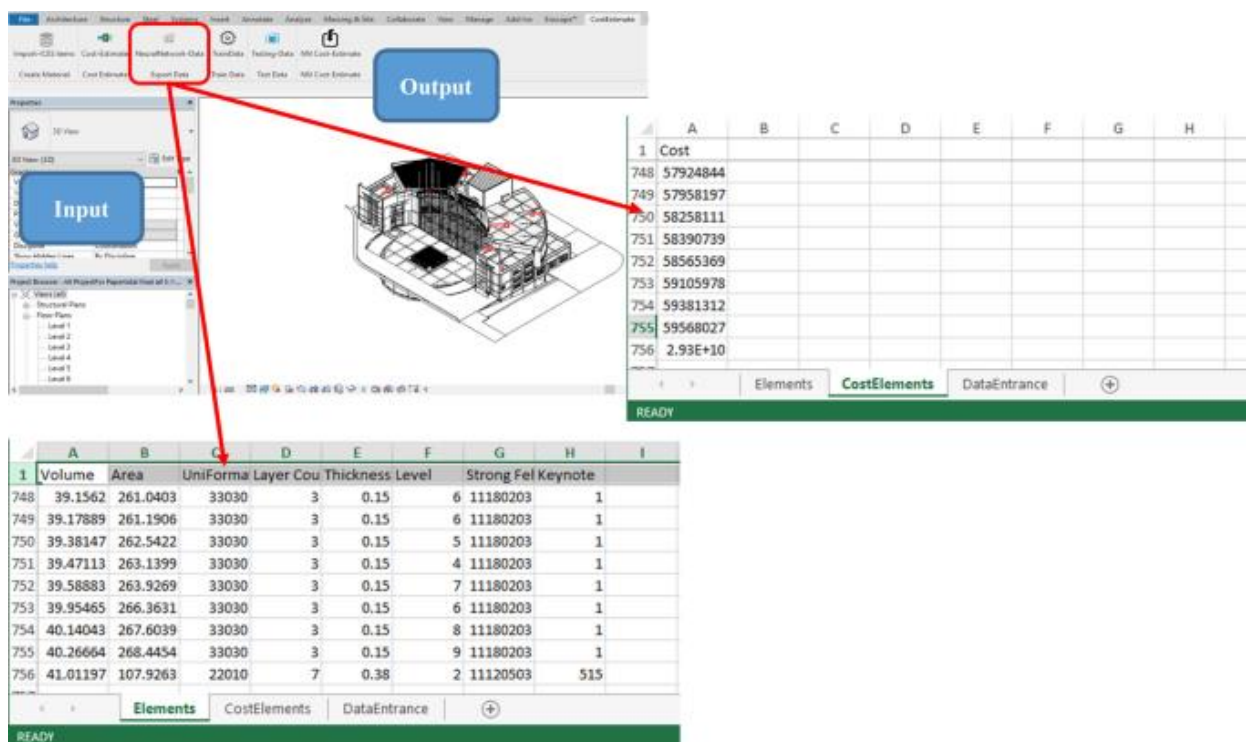
В Таблице 2 показана стоимость каждой категории элементов проекта. Как видно, стоимость категории стены составляет 1,564 Е + 12 риалов, что составляет наибольшую стоимость проекта. Пол и окна находятся со второго по третье место, представляя 2,852 Е + 9 риалов и 2,344 Е + 9 риалов соответственно. Дверные компоненты составляют наименьшую часть стоимости на 1,970 Е + 8 риалов.

Таблица 2. Результаты оценки затрат для тематического исследования

Category	Cost (Rials)
Wall	1,564,731,620,316.910
Floor	2,852,832,946.115
Door	197,030,246.800
Windows	2,344,048,974.386
Total Cost	1,572,899,265,343.430

Основной задачей разработанного прототипа является ручной выбор элементов ICES, что является очень трудоемкой и подверженной ошибкам задачей. Основным решением этой проблемы является оценка стоимости элементов с использованием подхода машинного обучения. Поэтому все данные элементов в проекте применяются в качестве обучающих данных для ИНС. Итак, все данные были извлечены из Revit и импортированы в Excel с помощью плагина «NeuralNetwork Data». При его активации все необходимые входы и выходы проекта были импортированы в «Элементы» и «Элементы затрат» Excel, и в результате в Excel была отправлена запись из 756 элементов элементов вместе с их стоимостью. Рисунок 19 демонстрирует обзор созданного Excel.

Рис. 19

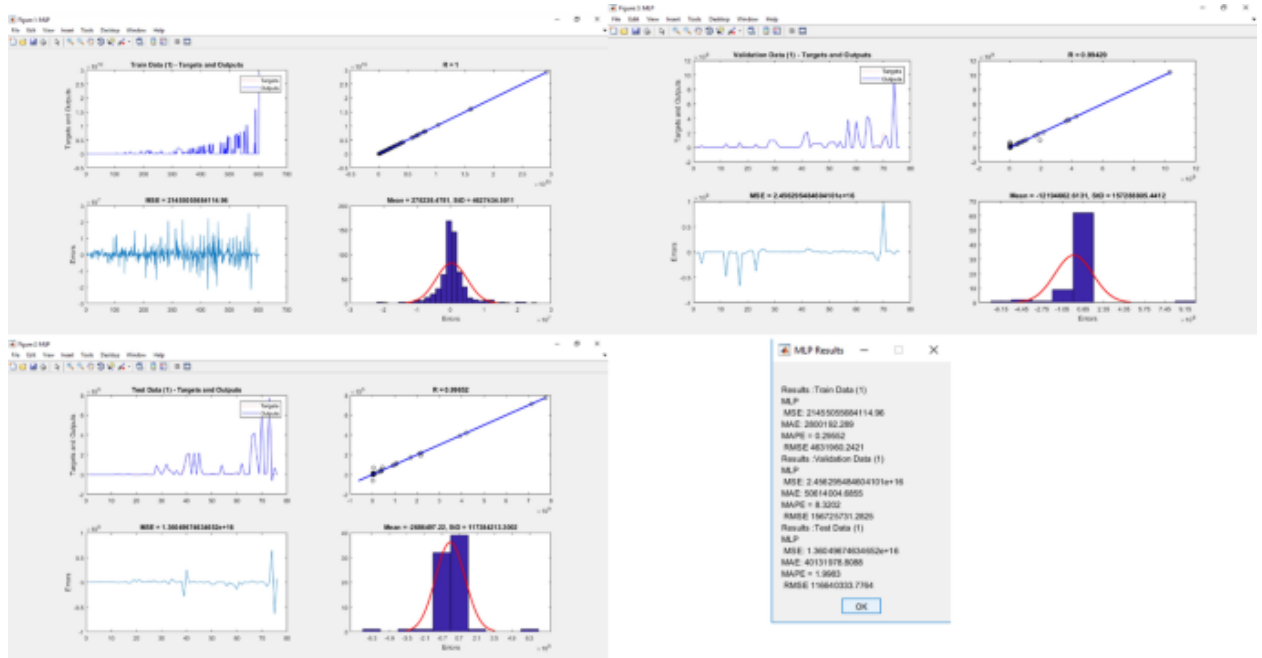


Извлечение данных для алгоритмов машинного обучения

После компиляции набора данных для нейронной сети используются алгоритмы машинного обучения с использованием движка MATLAB. Фактически, с помощью плагина «TrainingData» пользователь должен выбрать нужный алгоритм, а MATLAB находит данные, сгенерированные Excel, реализует алгоритм и обучает данные. В этом исследовании все алгоритмы были проведены для тематического исследования. На рисунке 20 показаны результаты алгоритма MLP. Как видно из рисунка, 80 % данных использовались для обучения, а 10 % — для проверки и

тестирования соответственно. Для оценки эффективности алгоритма применялись четыре основных показателя MSE, MAE, MAPE и RMSE. MSE, MAE, MAPE и RMSE для тестовых данных были найдены как $1,36 \text{ E}+16$, $40,13 \text{ E}+6$, $1,9983$ и $11,664 \text{ E}+7$ соответственно.

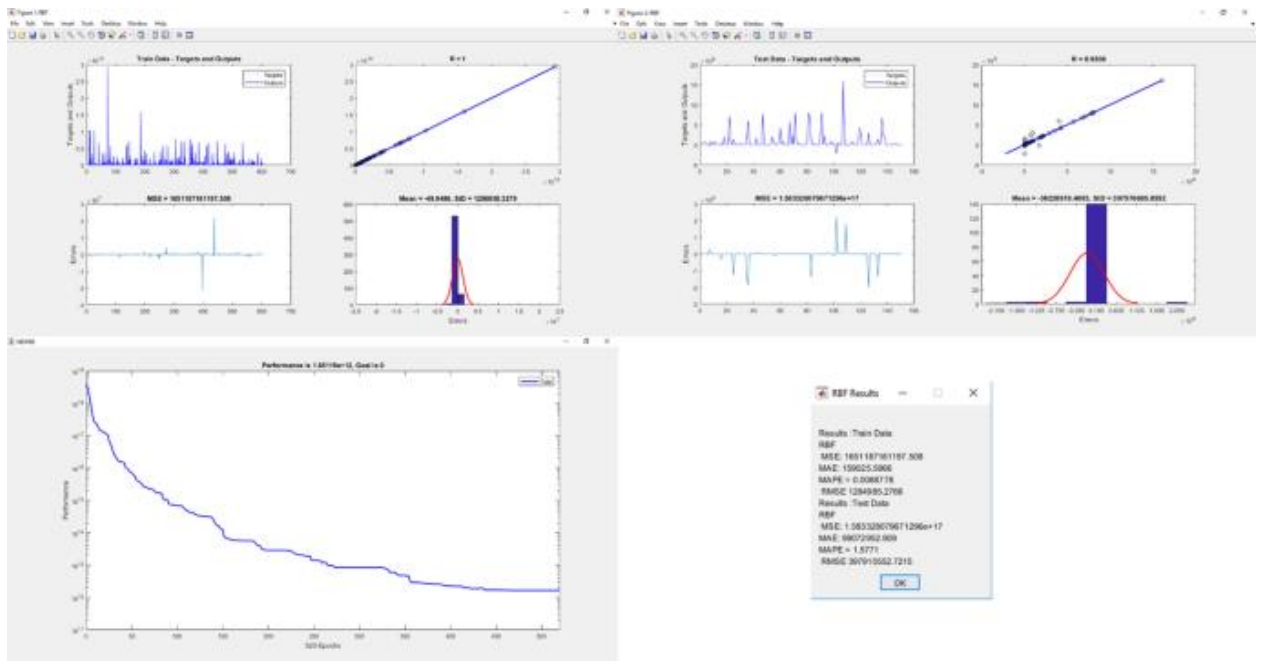
Рис. 20



Результаты алгоритма MLP

Рисунок 21 демонстрирует применение алгоритма RBF к данным. Данные были выполнены максимум нейронов 525 нейронов. 80% данных использовались для обучения, а остальные использовались для тестирования. Как показано на рис. 20, показатели производительности алгоритма MSE, MAE, MAPE и RMSE для тестирования данных составляют $1,58 \text{ E}+17$, $99,07 \text{ E}+6$, $1,57$ и $39,79 \text{ E}+7$ соответственно.

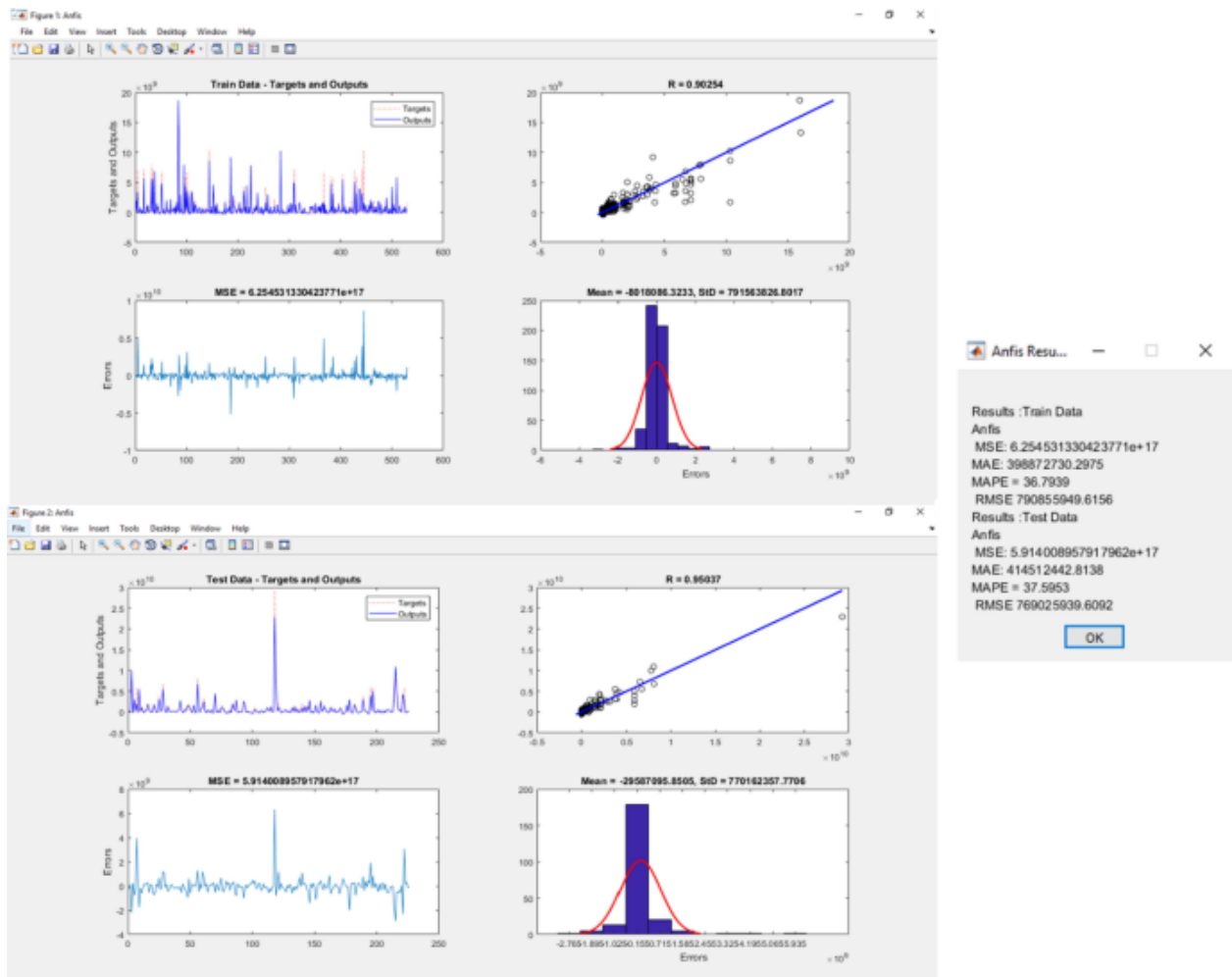
Рис. 21



Результаты алгоритма RBF

На рисунке 22 показаны результаты ANFIS. Исходная система нечеткого вывода для данных выполнялась с максимальной итерацией 450 через функцию хирурга. 70% данных использовались для обучения, а остальные использовались для тестирования. Как видно из этого рисунка, индексы производительности алгоритма MSE, MAE, MAPE и RMSE для тестирования данных составляют 5,91 E+17, 414,51 E+6, 37,59 и 76,90 E+7 соответственно.

Рис. 22

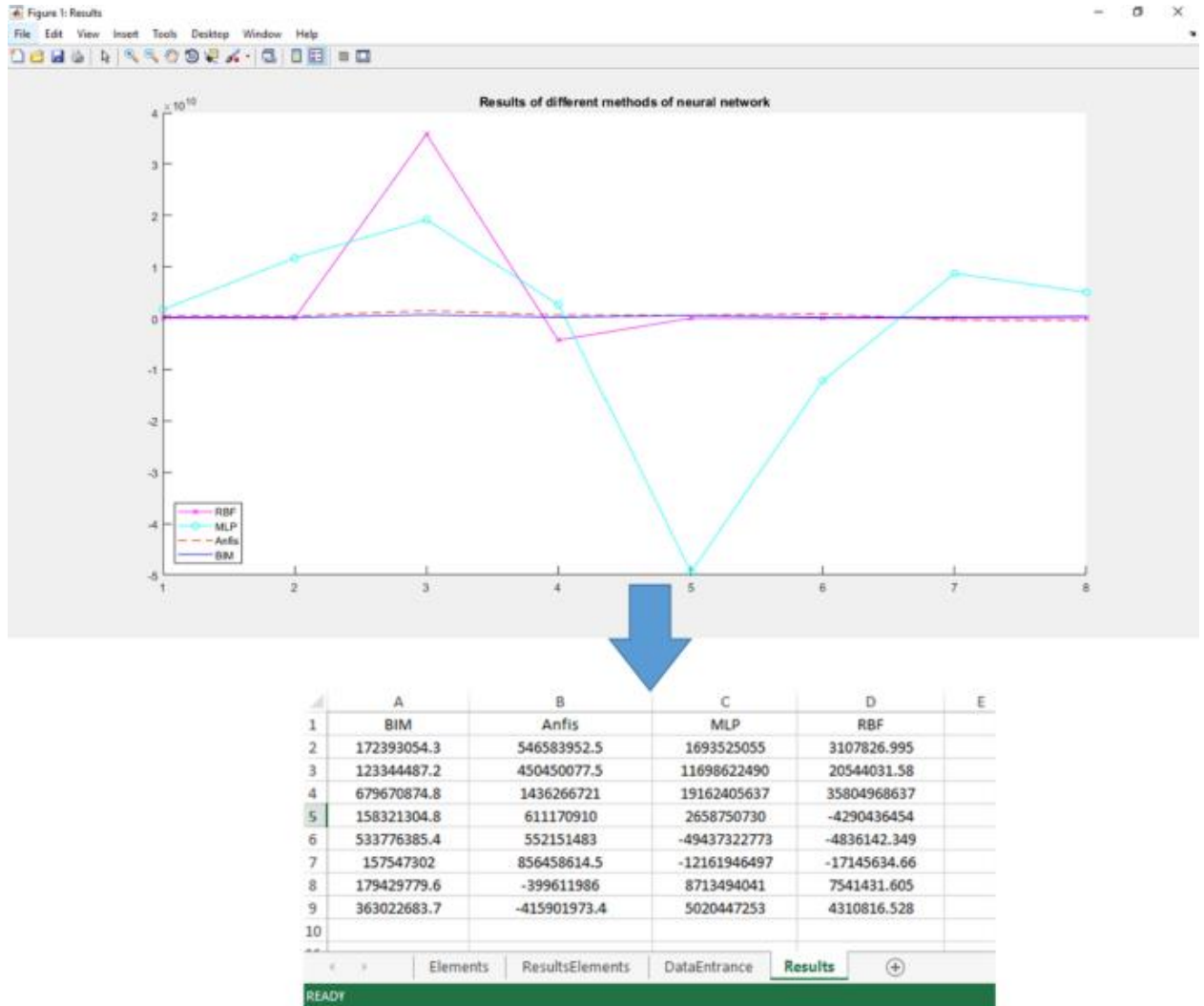


Результаты алгоритма ANFIS

После обучения данных алгоритмы готовятся путем добавления новых входных данных и сравнения выходных данных на этапе проверки. По сути, основная цель этого шага — сравнить различные типы нейронных сетей и выбрать оптимизированный алгоритм для оценки стоимости. Для этого на листе «Входные данные» Excel были добавлены новые входные данные.

Путем создания новых входных данных был применен плагин «TestingData» для оценки стоимости элементов с использованием обученных алгоритмов. Плагин сначала оценил стоимость элементов с помощью BIM, а затем спрогнозировал стоимость с помощью обученных данных. Рисунок 23 показывает сгенерированные результаты, полученные по разным алгоритмам. Как следует из этого рисунка, лучшим алгоритмом, давшим наиболее оптимальные результаты, является ANFIS. Он идеально сгенерировал смету расходов, соответствующую оценке системы 5D BIM. Далее следует RBF, а MLP показывает худшие результаты. Из этого рисунка видно, что, несмотря на хорошие результаты обучения, одиночное применение нейронных сетей не может точно оценить стоимость строительных элементов в этом прототипе. Это может быть связано с недостаточным количеством данных, которые следует использовать для обучения этого типа алгоритма. Тем не менее, ANFIS показал себя намного лучше, чем RBF и MLP, а также дал результаты, хорошо согласующиеся с 5D BIM. Поэтому это рекомендуемый инструмент машинного обучения для интеграции 5D BIM.

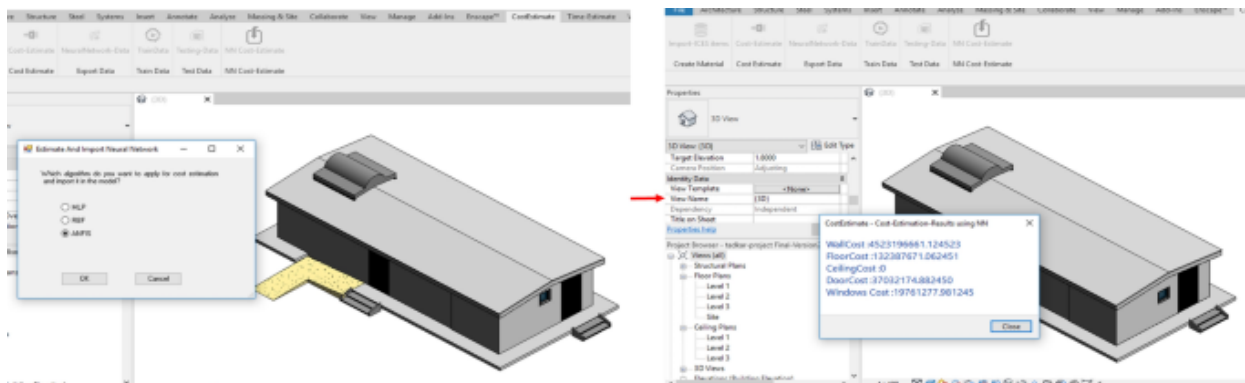
Рис. 23



Результаты работы алгоритмов

Выбрав ANFIS в качестве лучшего алгоритма, нет необходимости повторять процесс тестирования различных алгоритмов, и инженеры BIM могут выбрать ANFIS в дальнейшем как наиболее оптимизированный алгоритм для оценки стоимости будущих проектов. Поэтому для оценки стоимости по данному алгоритму выбран одноэтажный жилой дом, расположенный в Тегеране. На рис. 24 показан результат оценки затрат с использованием ANFIS для этого тематического исследования.

Рис. 24



Оценка стоимости с использованием ANFIS

В таблице 3 сравниваются результаты тематического исследования ANFIS (рис. 24) с оценкой стоимости на основе BIM, которая совпадает с запланированной оценкой стоимости элементов здания. Сравнение показывает приемлемую производительность для категории стены, где разница между ANFIS и BIM составляет около 13%, тогда как для других элементов, включая пол, двери и окна, разница выше. Этот вывод может быть сделан с учетом преимуществ большего количества данных для категории стен и меньшего набора данных для пола, окон и дверей в прикладном тематическом исследовании. В целом, ANFIS показал хорошие результаты при оценке стоимости элементов, хотя еще есть возможности для повышения производительности за счет расширения набора данных для более эффективного обучения.

Таблица 3 Сравнение оценки стоимости с использованием системы ANFIS и системы на основе BIM

	Cost estimation using ANFIS	BIM-based cost estimation	Variation%
Walls	4,523,196,661	3,986,712,706	13.4568
Floor	132,387,671.1	100,199,942.5	32.1235
Doors	37,032,174.88	46,541,225.91	- 20.431458
Windows	19,761,277.98	15,999,419.57	23.512468

Обсуждение и вклад

Отсутствие связи между BIM и стоимостными спецификациями является одним из основных препятствий для внедрения BIM в строительной отрасли развивающихся стран, таких как Иран. Таким образом, этот документ был направлен на устранение разрыва между спецификациями стоимости строительства и системой на основе BIM. Элементы ICES используются в качестве представителя спецификации, где инженеры BIM могут применять аналогичную систему для других приложений, интегрированных с BIM. В предыдущих исследованиях была сделана попытка отдельно оценить стоимость материалов, оборудования и работ. Однако в этом исследовании разрабатывается интегрированная система, в которой учитываются все статьи затрат на строительство. Кроме того, процесс оценки стоимости проекта, не связанный с информатикой, требует большого количества времени и ошибок. Таким образом, приоритетом исследований является разработка классифицированного компонента стоимости строительства и интеграция с 5D BIM для облегчения процедуры оценки стоимости. Эта необходимость особенно важна, когда параметрические возможности BIM могут облегчить этот подверженный

ошибкам процесс. Поэтому в этом исследовании был разработан новый прототип информатики, который может связывать элементы ICES с инструментами разработки BIM. Однако следует отметить, что этот процесс все еще был полуавтоматическим и включал ручную работу, поскольку пользователи, сметчики и менеджеры BIM должны назначать и выбирать соответствующие элементы ICES для каждого элемента в проектах. Таким образом, оценка стоимости может по-прежнему занимать много времени и быть подвержена ошибкам. Чтобы решить эту проблему, в этом исследовании использовались алгоритмы машинного обучения и ИНС, чтобы полностью автоматизировать процесс. Таким образом, были реализованы три основных типа ИНС, включая MLP, RBF и ANFIS, а их производительность была проверена и сравнена на примере реального строительства. Результаты показали наиболее оптимальную производительность алгоритма ANFIS по сравнению с другими алгоритмами ANN. Причина кроется в интеграции нечетких и нейронных сетей в ANFIS, которая снижает негативные эффекты механизма черного ящика нейронных сетей. Однако проверочное сравнение между ANFIS и оценкой затрат на основе BIM подразумевает, что алгоритм следует обучать с использованием более крупных и расширенных наборов данных, чтобы получать более точные и близкие результаты с результатами системы BIM.

В дополнение к вышеперечисленным преимуществам, сметчики могут получить выгоду от следующих пунктов:

1. Оценщики могут автоматически определять количество всех строительных элементов вместе с деталями оценки стоимости в виде отчетов и графиков.

2. Разработан прототип приложения, которое может использовать сформулированную карту процесса и алгоритмы в процессе оценки стоимости. Этот процесс может значительно снизить рабочую нагрузку и количество ошибок оценщиков.

3. Стоимость может быть определена на предварительных этапах разработки проекта.

Вывод

Традиционный процесс оценки стоимости включает в себя выбор отдельных элементов, использование инструмента для определения размеров для взлета и ввод количества в список QTO. Эти недостатки требуют от сметчиков, инженеров и руководителей строительства значительных затрат времени, ошибок и упущений. Однако использование BIM-систем может облегчить процесс точного QTO, поскольку они обогащены объектной и встроенной параметрической информацией. Несмотря на то, что было проведено много исследований в области реализации подхода BIM при оценке стоимости, очень мало известно об интегрированной и стандартизированной системе на основе BIM для оценки стоимости с использованием алгоритмов нейронных сетей на этапе проектирования строительных проектов. Это особенно заметно для таких развивающихся стран, как Иран, где уровень внедрения BIM и цифровая трансформация строительства находятся в зачаточном состоянии.

Это исследование было направлено на разработку нового прототипа информатики для оценки стоимости, который объединяет компоненты стоимости строительства объектов ICES с BIM. Процесс автоматизации также искали с помощью алгоритмов ANN, включая MLP, RBF и ANFIS. Предлагаемый прототип не только вводит стандартизированную и интегрированную систему на основе BIM на предварительном этапе строительного проекта, но также делает большой шаг для поощрения интеграции спецификаций затрат с BIM. Постепенно было разработано приложение на основе BIM в среде Revit, чтобы облегчить процесс оценки стоимости, и в дальнейшем MATLAB использовался для автоматизации процесса путем реализации алгоритмов нейронной сети для данных.

Разработанный прототип был дополнительно изучен на примере реального строительства. Для автоматизации процесса оценки стоимости результаты тематического исследования были использованы для обучения алгоритмов ИНС. В исследовании также сравнивались и изучались различные нейронные сети. Результаты показывают, что ANFIS обеспечивает наилучшие результаты и является наиболее согласованным алгоритмом с системой оценки затрат на основе BIM по сравнению с другими алгоритмами. Несмотря на относительно хорошую производительность других алгоритмов, единственная система нейронной сети не смогла точно оценить стоимость компонентов по сравнению с системой, интегрированной с BIM и ANFIS. Для повышения производительности этих алгоритмов рекомендуется добавить количество обучающих данных, разделить различные компоненты и обучить каждый отдельно для получения лучших результатов.

Кроме того, в это исследование были включены только четыре категории строительных элементов, включая стены, пол, двери и окна, в то время как другие строительные элементы также могут быть рассмотрены. В текущем исследовании учитываются только архитектурные и конструктивные части элементов ICES, тогда как в ICES есть и другие части, такие как электрические и механические элементы, которые могут быть включены в будущие работы. Кроме того, в ICES есть некоторые коэффициенты для применения уровня инфляции в строительных элементах на этапе строительства проекта. Рекомендуется учитывать эти коэффициенты в будущих работах по оценке стоимости.

References

-
1. Lee G, Park HK, Won JS (2012) 3D City project-Economic impact of BIM-assisted design validation. *Autom Constr* 22:577–586

[Article Google Scholar](#)

2. Elfaki AO, Alatawi S, Abushandi E (2014) Using intelligent techniques in construction project cost estimation: 10-year survey. *Adv Civ Eng*
 3. Ma Z, Wei Z, Zhang X (2013) Semi-automatic and specification-compliant cost estimation for tendering of building projects based on IFC data of design model. *Autom Constr* 30:126–135
-

[Article Google Scholar](#)

4. Simpson A et al. (2018) Asset information requirements guide: information required for the operation and maintenance of an asset
5. Xu S et al (2016) Computers in Industry A framework for integrating syntax, semantics and pragmatics for computer-aided professional practice: with application of costing in construction industry. *Comput Ind* 83:28–45

[Article Google Scholar](#)

6. Liu X, Li Z, Jiang S (2016) Ontology-based representation and reasoning in building construction cost estimation in China. *Fut Internet* 8(3):39

[Article Google Scholar](#)

7. Yarnold J et al. (2021) Building and construction quality: systematic literature review, thematic and gap analysis. *Int J Build Pathol Adapt*
8. Akbari S et al. (2020) Dynamic sustainable success prediction model for infrastructure projects: a rough set based fuzzy inference system. *Constr Innov*
9. Elmousalami HH (2020) Artificial intelligence and parametric construction cost estimate modeling: state-of-the-art review. *J Constr Eng Manag* 146(1):03119008

[Article Google Scholar](#)

10. Khanzadi M, Sheikhhoshkar M, Banihashemi S (2020) BIM applications toward key performance indicators of construction projects in Iran. *Int J Constr Manag* 20(4):305–320

[Google Scholar](#)

11. Hosseini MR et al. (2016) Building information modeling (BIM) in Iran: an exploratory study. *J Eng Project Prod Manag*
12. Banihashemi S et al (2017) Critical success factors (CSFs) for integration of sustainability into construction project management practices in developing countries. *Int J Project Manage* 35(6):1103–1119

[Article Google Scholar](#)

13. Ma Z, Liu Z, Wei Z (2016) Formalized representation of specifications for construction cost estimation by using ontology. *Comput-Aided Civ Infrastruct Eng* 31(1):4–17

[Article Google Scholar](#)

14. Liu H, Lu M, Al-Hussein M (2016) Ontology-based semantic approach for construction-oriented quantity take-off from BIM models in the light-frame building industry. *Adv Eng Inform* 30(2):190–207

[Article Google Scholar](#)

15. Monteiro A, Martins JP (2013) A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design. *Autom Constr* 35:238–253

[Article Google Scholar](#)

16. Banihashemi S, Zarepour Sohi S (2022) Data-centric regenerative built environment: big data for sustainable regeneration
17. Shourangiz E et al. (2011) Flexibility of BIM towards design change. In: 2nd international conference on construction and project management. IPEDR ACSIT Press, Singapore
18. Staub-French S et al (2003) A generic feature-driven activity-based cost estimation process. *Adv Eng Inform* 17(1):23–39

[Article Google Scholar](#)

19. National Institute of Building Sciences C. (2007) National building information modeling standards: overview principles, and methodologies. NBIMS, United States, vol 1
20. Banihashemi S et al. (2019) Multi-sided platforms: a business model for BIM adoption in built environment SMEs. In: HCI in business, government and organizations. Information systems and analytics. HCII 2019. Lecture Notes in Computer Science. Springer, pp 22–32
21. Ferdosi H et al. (2022) BIM applications in sustainable construction: scientometric and state-of-the-art review. *International Journal of Construction Management*
22. Building Smart International, L.T.D. (2016) IFC overview
23. Oraee M et al (2017) Where the gaps lie: ten years of research into collaboration on BIM-enabled construction projects. *Constr Econ Build* 17(1):121–139

[Article Google Scholar](#)

24. Estimator (2016) *Graphisoft*.
25. ToCoMan (2016) *Tocosoft*.

26. Banihashemi S, Tabadkani A, Hosseini MR (2018) Integration of parametric design into modular coordination: a construction waste reduction workflow. *Autom Constr* 88:1–12
-

[Article Google Scholar](#)

27. Hosseini MR et al (2016) BIM adoption within Australian small and medium-sized enterprises (SMEs): an innovation diffusion model. *Constr Econ Build* 16(3):71–86
-

[Article Google Scholar](#)

28. Banihashemi S (2017) Active BIM with artificial intelligence for energy optimisation in buildings. University of Technology Sydney
29. Banihashemi S, Ding G, Wang J (2015) Developing a framework of artificial intelligence application for delivering energy efficient buildings through active BIM. In: RICS COBRA 2015. RICS
30. Davidson AR (2009) A study of the deployment and impact of Building Information Modelling software in the construction industry. *e-Engineering--Journal of Undergraduate Research (University of Leeds)*. London: Available at: <http://www.engineering.leeds.ac.uk/eengineering>. *e-Engineering--Journal of Undergraduate Research (University of Leeds)*. London
31. Sompolgrunk A, Banihashemi S, Mohandes SR (2021) Building information modelling (BIM) and the return on investment: a systematic analysis. *Construction Innovation*
32. Sompolgrunk A et al. (2022) An integrated model of BIM return on investment for Australian small- and medium-sized enterprises (SMEs). *Engineering, Construction and Architectural Management*
33. ICES. Iranian Cost Estimation Standard (2022) <http://sama.mporg.ir/sites/publish/SitePages/ZabetehView.aspx?mdid=5577>
34. Balali V, Zalavadia A, Heydarian A (2020) Real-time interaction and cost estimating within immersive virtual environments. *J Constr Eng Manag* 146(2):10
-

[Article Google Scholar](#)

35. Bademosi FM, Tayeh R, Issa RRA (2019) An immersive approach to construction cost estimating, in *computing in civil engineering 2019*, pp 48–54
36. Valentini V, Mirarchi C, Pavan A (2017) Comparison between traditional and digital preliminary cost-estimating approaches. *Innov Infrast Solut* 2(1):1–8
-

[Article Google Scholar](#)

37. Akanbi T, Zhang JS (2021) Design information extraction from construction specifications to support cost estimation. *Autom Constr* 131:14
-

[Article Google Scholar](#)

38. Khosakitchalert C, Yabuki N, Fukuda T (2020) Automated modification of compound elements for accurate BIM-based quantity takeoff. *Autom Constr* 113:23
-

[Article Google Scholar](#)

39. Wang K-c et al. (2016) Applying building information modeling to integrate schedule and cost for establishing construction progress curves. *Autom Constr*
40. Wu C-L, Wang KC, Wang WC (2018) A BIM-based conceptual cost estimation model considering structural analysis and design. In: ISARC. proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction, vol 35, pp 1–8
41. Ma Z, Liu Z (2014) BIM-based intelligent acquisition of construction information for cost estimation of building projects. *Procedia Eng* 85:358–367
-

[Article Google Scholar](#)

42. Joosung L, Jaejun K (2017) BIM-based 4D simulation to improve module manufacturing productivity for sustainable building projects
43. Zanni M et al (2019) Developing a methodology for integration of whole life costs into bim processes to assist design decision making. *Buildings* 9(5):114–114
-

[Article Google Scholar](#)

44. Fazeli A et al. (2020) An integrated BIM-based approach for cost estimation in construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*
45. Jiang Q (2019) Estimation of construction project building cost by back-propagation neural network. *J Eng Des Technol* 18(3):601–609
-

[Google Scholar](#)

46. Huang CH, Hsieh SH (2020) Predicting BIM labor cost with random forest and simple linear regression. *Autom Constr* 118:16
-

[Article Google Scholar](#)

47. Chandanshive V, Kambekar AR (2019) Estimation of building construction cost using artificial neural networks. *J Soft Comput Civ Eng* 3(1):91–107

[Google Scholar](#)

48. Elghaish F et al (2021) Revolutionising cost structure for integrated project delivery: a BIM-based solution. *Eng Constr Archit Manag* 28(4):1214–1240

[Article Google Scholar](#)

49. Bala K, Ahmad Bustani S, Shehu Waziri B (2014) A computer-based cost prediction model for institutional building projects in Nigeria: an artificial neural network approach. *J Eng Des Technol* 12(4):519–530

[Google Scholar](#)

50. Cheng M-Y, Tsai H-C, Sudjono E (2010) Conceptual cost estimates using evolutionary fuzzy hybrid neural network for projects in construction industry. *Expert Syst Appl* 37(6):4224–4231

[Article Google Scholar](#)

51. Prive NC, Errico RM (2016) Observing system simulation experiments: an overview. Maryland University, College Park

[Google Scholar](#)

52. Hancock D, Algozzine B (2016) Doing case study research: a practical guide for beginning researchers. Teachers College Press

[Google Scholar](#)

53. Fazeli A et al. (2019) BIM-integrated TOPSIS-Fuzzy framework to optimize selection of sustainable building components. *Int J Constr Manag*:1–20
54. Kashi H, Emamgholizadeh S, Ghorbani H (2014) Estimation of soil infiltration and cation exchange capacity based on multiple regression, ANN (RBF, MLP), and ANFIS models. *Commun Soil Sci Plant Anal* 45(9):1195–1213

[Article Google Scholar](#)

55. Amid S, Mesri Gundoshmian T (2017) Prediction of output energies for broiler production using linear regression, ANN (MLP, RBF), and ANFIS models. *Environ Prog Sustain Energy* 36(2):577–585

[Article Google Scholar](#)

56. Venkatesan P, Anitha S (2006) Application of a radial basis function neural network for diagnosis of diabetes mellitus. *Curr Sci* 91(9):1195–1199

[Google Scholar](#)

57. Jang JR (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 23(3):665–685

[Article Google Scholar](#)

58. Wali WA et al (2012) Online genetic-ANFIS temperature control for advanced microwave biodiesel reactor. *J Process Control* 22(7):1256–1272

[Article Google Scholar](#)

59. Mousavi SM et al (2021) An intelligent hybrid classification algorithm integrating fuzzy rule-based extraction and harmony search optimization: medical diagnosis applications. *Knowl-Based Syst* 220:106943

[Article Google Scholar](#)

60. Riahi-Madvar H et al (2019) Comparative analysis of soft computing techniques RBF, MLP, and ANFIS with MLR and MNLR for predicting grade-control scour hole geometry. *Eng Appl Comput Fluid Mech* 13(1):529–550

[Google Scholar](#)