

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
ТАДЖИКИСТАН**

Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими

УДК 624.012.45 (575.3)

На правах рукописи



МАХМАДИЗОДА Усмонали Муродали

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
БАЛОК МЕТОДАМИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD),
доктора по специальности 6D072900 Строительство (6D072902–
Строительные конструкции, здания и сооружения)

Душанбе – 2026

Диссертация выполнена на кафедре «Промышленное и гражданское строительство» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Научный руководитель **Каландарбеков Имомёрбек**, заслуженный работник Таджикистана, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими.

Официальные оппоненты: **Филатов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, доцент, директор Института цифровых технологий и моделирования в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, Российская Федерация.

Хотамов Асадулла Тоштемирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Городская инфраструктура» Ташкентского архитектурно–строительного университета, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Ведущая организация **Наманганский государственный технический университет**, г. Наманган, Республика Узбекистан.

Защита диссертации состоится «15» сентября 2026 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета 6D.КOA–027 при Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10^A.
E–mail: dis.sia@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и на официальном сайте университета: www.ttu.tj.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного
совета, доктор PhD



Шокиров Р.М.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современное развитие строительной отрасли Республики Таджикистан, увеличение объёмов городского строительства, возведение высотных каркасных зданий и высокая сейсмическая активность территории Республики Таджикистан обуславливают необходимость совершенствования методов экспериментального исследования и расчётного обоснования работы несущих железобетонных конструкций. В этих условиях особое значение приобретают методы физического моделирования, позволяющие на предпроектной стадии изучать работу строительных конструкций в контролируемых лабораторных условиях при меньших материальных и временных затратах по сравнению с натурными испытаниями.

Научной основой физического моделирования является теория подобия и размерный анализ, обеспечивающие возможность переноса результатов модельных испытаний на натурные конструкции. Однако для железобетона, характеризующегося неоднородной структурой, трещинообразованием и физически нелинейным характером деформирования, обеспечение условий подобия существенно усложняется, особенно на стадиях после образования трещин и изменения жёсткости элемента.

Несмотря на развитие вычислительных технологий и методов численного анализа, вопросы достоверного переноса результатов модельных испытаний на натурные железобетонные конструкции остаются недостаточно решёнными. В частности, требуют дальнейшего развития подходы к определению коэффициентов и критериев подобия, учитывающих изменение напряжённо-деформированного состояния конструкции на различных стадиях её работы.

В связи с этим возникает необходимость разработки экспериментально обоснованной методики физического моделирования железобетонных конструкций, обеспечивающей корректный перенос результатов модельных испытаний на натурные конструкции в пределах от упругой стадии работы до стадии разрушения.

Степень научной проработанности темы исследования. Исследования в области теории подобия охватывают длительный исторический период, начиная с конца XIX века, когда были сформированы фундаментальные положения теории подобия и размерного анализа. Существенный вклад в развитие данного научного направления внесли такие учёные, как Алабужев П. М., Геронимус В. В., Минкевич Л. М., Шеховцов Б. А. [1], Архипов В. А., Березиков А. П. [3], Веников В. А., Веников Г. В. [4], Кирпичев М. В. [8], Мастаченко В. Н. [12–14], Монахенко Д. В. [15], Назаров А. Г. [16–18], Новицкий В. В. [19], Покровский Г. И., Федоров И. С. [20], Поляков Л. П., Файнбург В. М. [21], Пряхин Д. В. [30], Седов Л. И. [26], Крамаренко Н. В. [10], Эйгенсон Л. С. [37], Чемодуров В. Т., Литвинова Э. В. [34], Гухман А. А. [5], Кутателадзе С. С. [11], Тирский Г. А. [31, 32], Иванов М. Г. [7], Иванов И. Е., Ерещенко В. Е. [6], Шаповалов Л. А. [35], Шенк Х. [36], Романов О. Я., Ходосов В. В. [23], Санников Р. Х. [25], Амасян Р. О. [2], Хантли Г. [33], Клайн С. Дж. [9], Прис Б. В., Дэвис Д. Д. [22] и другие исследователи.

Следует отметить, что большинство исследований в данной области ориентировано преимущественно на теоретические аспекты теории подобия и математическое описание процессов, тогда как экспериментальная проверка коэффициентов подобия для строительных конструкций, в особенности железобетонных элементов, получила ограниченное развитие. Это связано с высокой сложностью экспериментального определения условий подобия, обусловленной нелинейным характером деформирования железобетона, стадийностью его работы, а также влиянием масштабного эффекта.

Связь исследования с программами и научными темами. Тема диссертационной работы имеет непосредственную связь с приоритетными направлениями развития строительной отрасли, а также с процессами цифровизации проектирования строительных конструкций. Актуальность рассматриваемого направления обусловлена необходимостью повышения надёжности и эффективности проектных решений на основе применения современных методов экспериментального и численного моделирования.

Указанные направления определены Стратегией развития строительной отрасли Республики Таджикистан на период до 2030 года, утверждённой постановлением Правительства Республики Таджикистан от 27 апреля 2022 г. № 203 [27]. В рамках данной стратегии особое внимание уделяется внедрению инновационных технологий, совершенствованию методов расчёта и проектирования строительных конструкций, а также развитию научных исследований, направленных на повышение их надёжности и долговечности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования – научное обоснование и экспериментальная реализация методики физического моделирования железобетонных балок, направленной на определение коэффициентов и критериев подобия, обеспечивающих достоверный перенос параметров напряжённо–деформированного состояния с модельных образцов на натурные конструкции.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели последовательно решены следующие задачи:

1. Выполнить теоретический анализ физического моделирования железобетонных конструкций на основе теории подобия и определить ключевые факторы, влияющие на формирование НДС, а также на достоверность переноса результатов модельных испытаний на натурные конструкции.

2. Провести натурные экспериментальные исследования железобетонных балок с целью установления параметров их напряжённо – деформированного состояния при статическом нагружении.

3. На основе принципов теории подобия, методов размерного анализа определить теоретические константы, характеризующие геометрическое, механическое и силовое подобие.

4. Провести экспериментальные исследования модельных железобетонных балок и определить характеристики их напряжённо – деформированного состояния в характерных точках и сечениях.

5. Установить закономерности распределения усилий и деформаций в характерных сечениях и точках натуральных и модельных балок.

6. Определить безразмерные константы подобия, обеспечивающие корректный перенос характеристик напряжённо–деформированного состояния с моделей на натурные балки.

7. Сформулировать критерии подобия, позволяющие выполнять достоверный перенос результатов физического моделирования железобетонных балок на натурные конструкции в пределах от упругой стадии до стадии разрушения.

8. Выполнить нелинейное численное моделирование работы натуральных и модельных железобетонных балок методом конечных элементов с учётом фактических характеристик материалов и осуществить сопоставительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными для оценки их достоверности.

Объект исследования – изгибаемые железобетонные балки, работающие в условиях статического нагружения, рассматриваемые как физические системы с нелинейным напряжённо–деформированным состоянием.

Предмет исследования – определение критериев и коэффициентов подобия, обеспечивающих достоверный перенос параметров напряжённо–деформированного состояния с физической модели на натурные железобетонные балки.

Методы исследования. В работе использованы теоретические, экспериментальные и численные методы исследования. Теоретическая часть основана на положениях теории подобия и механики деформируемого твёрдого тела. Экспериментальная часть включает натурные испытания железобетонных балок и испытания их физических моделей в масштабе 1:4 при статическом нагружении с регистрацией основных параметров напряжённо–деформированного состояния. Численные исследования выполнены методом конечных элементов в ПК ЛИРА–САПР 2022 в физически нелинейной постановке с целью проверки достоверности экспериментальных результатов.

Научная новизна исследования состоит в:

1. Разработке экспериментально обоснованной методики физического моделирования изгибаемых железобетонных элементов, базирующейся на положениях теории подобия и позволяющей выполнять переход от результатов модельных испытаний к параметрам работы натурной конструкции;
2. Предложении комплексного коэффициента подобия, учитывающего нелинейный характер деформирования бетона и арматуры, изменение жёсткости сечения после трещинообразования и стадийность работы железобетонной балки при статическом нагружении;
3. Экспериментальном установлении необходимости масштабного моделирования ширины раскрытия трещин как одного из определяющих параметров напряжённо – деформированного состояния; на этой основе получена эмпирическая зависимость для переноса значений ширины раскрытия трещин от модельной балки к натурной конструкции;
4. Обосновании методики физически нелинейного численного моделирования натуральных и модельных железобетонных балок методом конечных элементов, предусматривающей использование фактических диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования напряжённо–деформированного состояния натурной железобетонной балки при статическом нагружении от упругой стадии до стадии разрушения, используемые в качестве эталонной базы для подтверждения достоверности переноса данных модельных испытаний; теоретически и экспериментально обоснованная методика физического моделирования железобетонных балок, обеспечивающая прогнозную оценку параметров напряжённо–деформированного состояния натурной конструкции по результатам модельных испытаний.

2. Критерии и комплексный коэффициент подобия, обеспечивающие перенос параметров напряжённо–деформированного состояния от модельной к натурной железобетонной балке с учётом нелинейной работы конструкции, включая нагрузку, изгибающие моменты, прогибы и ширину раскрытия трещин.

3. Методика физически нелинейного численного моделирования натуральных и модельных железобетонных балок методом конечных элементов в ПК ЛИРА–САПР 2022 с учётом фактических характеристик бетона и арматуры и верификацией расчётных результатов по экспериментальным данным.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Полученные научно обоснованные результаты развивают положения теории подобия и размерного анализа применительно к физическому моделированию изгибаемых железобетонных балок при статическом нагружении. Обоснованные критерии и комплексный коэффициент подобия позволяют выполнять перенос параметров напряжённо–деформированного состояния от физической модели к натурной конструкции в пределах от упругой стадии работы до стадии разрушения. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной методики для прогнозирования напряжённо–деформированного состояния, оценки работоспособности железобетонных балок по второму предельному состоянию, а также для обоснования результатов модельных испытаний при их переносе на натурные конструкции.

Результаты исследования могут быть использованы в научно–исследовательских и проектных организациях, лабораториях экспериментальных исследований, а также в учебном процессе образовательных учреждений строительного профиля.

Степень достоверности результатов. Степень достоверности результатов диссертационного исследования определяется использованием теоретически обоснованной методики, основанной на положениях теории железобетона, строительной механики, теории подобия. Полученные результаты подтверждены сопоставлением данных натуральных и модельных экспериментов и сравнением с результатами физически нелинейного численного моделирования, выполненного методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА–САПР 2022.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 6D072900 – Строительство, утверждённому решением Президиума Высшей аттестационной комиссии при Президенте Республики Таджикистан от 29 декабря 2020 года, № 6.

Исследование охватывает следующие пункты паспорта специальности:

6. Разработка и совершенствование методов и систем оценки качества строительных конструкций зданий и сооружений в период их строительства, эксплуатации, усиления и восстановления;

22. Линейная и нелинейная механика конструкций и сооружений, разработка физико–математических моделей их расчёта;

24. Численные методы расчёта сооружений и их элементов;

25. Теория и методы оптимизации сооружений.

Личный вклад докторанта в получение научных результатов заключается в выборе объекта исследования, разработке методики физического моделирования железобетонных балок, подготовке и проведении натуральных и модельных экспериментальных исследований, получении, обработке и анализе результатов испытаний. Сформулированы выводы и подготовлены научные публикации по теме диссертации.

Апробация и реализация. Основные результаты экспериментальных, теоретических и численных исследований по теме диссертационной работы были представлены и обсуждены на Международной научно–практической конференции «Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера – сегодня – завтра» (г. Душанбе, 2022) и X Международной научно–практической конференции «Наука – основа инновационного развития» (г. Душанбе, 2025).

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты диссертационного исследования отражены в 9 научных публикациях автора, в том числе 5 публикаций размещены в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Президенте Республики Таджикистан для опубликования основных результатов диссертационных исследований, 1 статья опубликована в международном научном журнале и 3 работы – в сборниках материалов научно –практических конференций и иных научных изданиях. Из общего числа опубликованных работ 6 публикаций входят в Российский индекс научного цитирования. Для дальнейшего развития исследований, связанных с испытанием физических моделей строительных конструкций, зданий и сооружений на динамические воздействия, разработан «Стенд для моделирования сейсмических воздействий на физические модели зданий и сооружений», на который получен малый патент Республики Таджикистан №1453.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав, заключения, рекомендаций по практическому использованию результатов, списка литературы, списка основных публикаций по теме диссертации и приложений. Основной текст диссертации до списка литературы изложен на 238 страницах. Общий объём диссертации без учёта приложений составляет 253 страницы, с учётом приложений – 282 страницы. Работа содержит 151 рисунок, 61 таблицу и 3 приложения. Список литературы включает 132 наименования трудов отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении всесторонне обоснована актуальность темы исследования, определены цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы. Изложены научная новизна, практическая значимость и степень достоверности полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также раскрыты структура диссертации и логическая последовательность изложения материала.

В первой главе «ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ» рассмотрены теоретические основы физического моделирования железобетонных конструкций, классификация моделей, цели моделирования и

роль эксперимента в оценке работы строительных конструкций. Раскрыты положения теории подобия и размерного анализа, включая условия геометрического, физического и механического подобия, константы, инварианты подобия и применение π -теоремы [9–А]. Обосновано, что нелинейная работа железобетона, трещинообразование и изменение жёсткости сечения требуют экспериментального уточнения критериев и коэффициентов подобия для достоверного перехода от модельной балки к натурной конструкции [2–А].

Во второй главе «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАТУРНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ» представлены результаты испытаний трёх натуральных железобетонных балок БМ 1–3, использованных в качестве эталонной основы для проверки достоверности прогнозных результатов, полученных по данным модельных испытаний с применением принципов теории подобия [1–А]. Глава состоит из семи параграфов и завершается выводами.

В параграфах 2.1 и 2.2 обоснована научная значимость и практическая необходимость проведения натуральных испытаний железобетонных балок как наиболее достоверного метода оценки их прочности, жёсткости, трещиностойкости и эксплуатационной пригодности. Показано, что результаты натуральных испытаний позволяют получить эталонные экспериментальные данные для проверки физического и численного моделирования, а также для оценки напряжённо–деформированного состояния конструкции на различных стадиях нагружения. Определены цель и задачи исследования натурной железобетонной балки, включающие разработку конструктивного решения, схемы испытаний, изготовление опытных образцов, определение физико–механических характеристик материалов и анализ полученных экспериментальных данных.

В параграфе 2.3 представлены сведения об изготовлении натуральных железобетонных балок, а также об их подготовке к проведению испытаний. В качестве испытуемых объектов были изготовлены три ненапряжённые натурные железобетонные балки БМ–1–БМ–3 из бетона проектного класса В25 длиной 6000 мм и поперечным сечением 300×500 мм. Рабочее армирование растянутой зоны принято в виде трёх стержней $\varnothing 20$ А500, конструктивное армирование сжатой зоны – двух стержней $\varnothing 14$ А500, поперечное армирование – стержнями $\varnothing 8$ А240.

Натурные железобетонные балки изготовлены в условиях строительной площадки с применением материалов, используемых при возведении монолитных железобетонных конструкций. Расчётная схема натуральных железобетонных балок представлены на рис. 1.

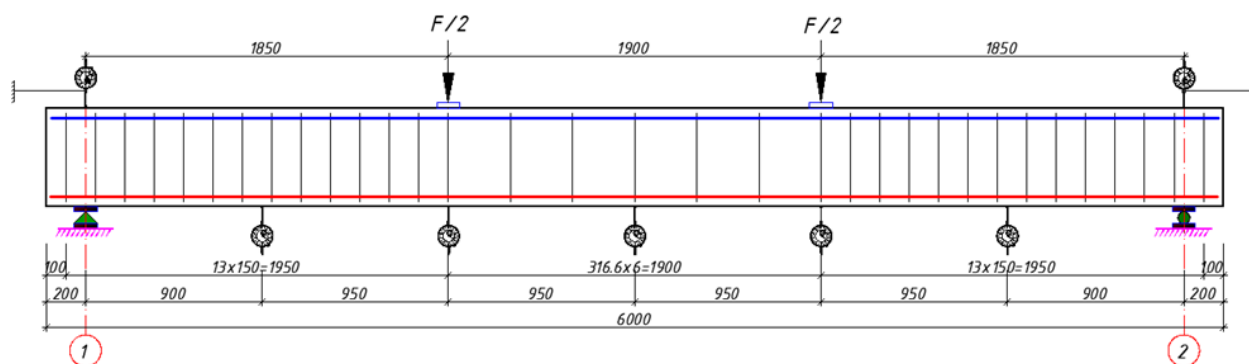


Рисунок 1. Расчётная схема натуральных железобетонных балок

В параграфе 2.4 изложены сведения об изготовлении и испытании контрольных образцов для определения прочностных и деформативных характеристик материалов. Для оценки физико–механических свойств бетона, использованного при изготовлении натуральных железобетонных балок, были подготовлены контрольные образцы из того же состава бетонной смеси: кубы с ребром 100 мм для определения прочности на сжатие и призмы размером 100×100×400 мм для определения модуля упругости, коэффициента Пуассона и предельных деформаций. Всего изготовлены и испытаны 4 куба и 3 призмы.

Испытания бетонных кубов и арматурных стержней проводились в лаборатории «Строительные материалы, изделия и конструкции» ГУП «НИИ Строительство и архитектура»,

а испытания бетонных призм – в лаборатории кафедры «Промышленное и гражданское строительство» факультета строительства и архитектуры Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Диаграммы деформирования бетонной призмы и рабочей арматуры натурной железобетонной балки представлены соответственно на рис. 2 и 3.

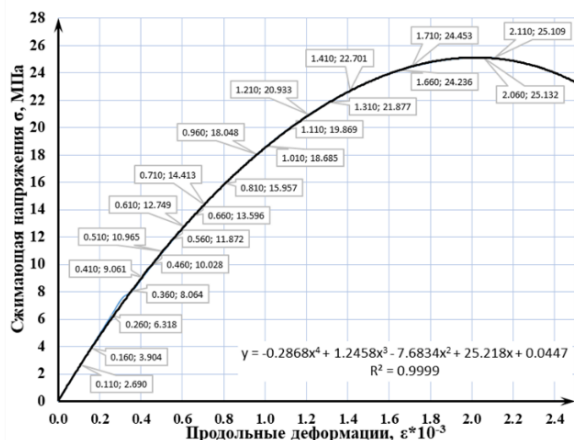


Рисунок 2. Диаграмма деформирования бетонной призмы натурной железобетонной балки

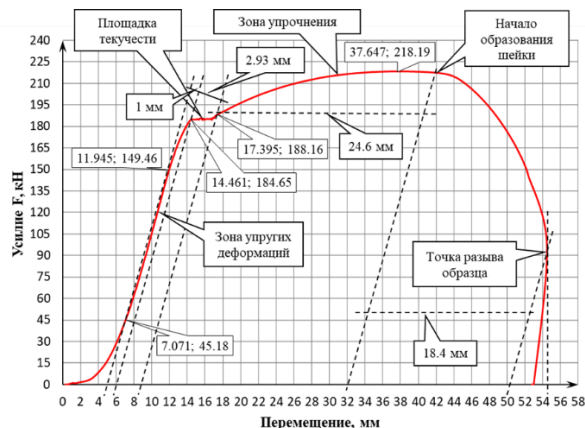
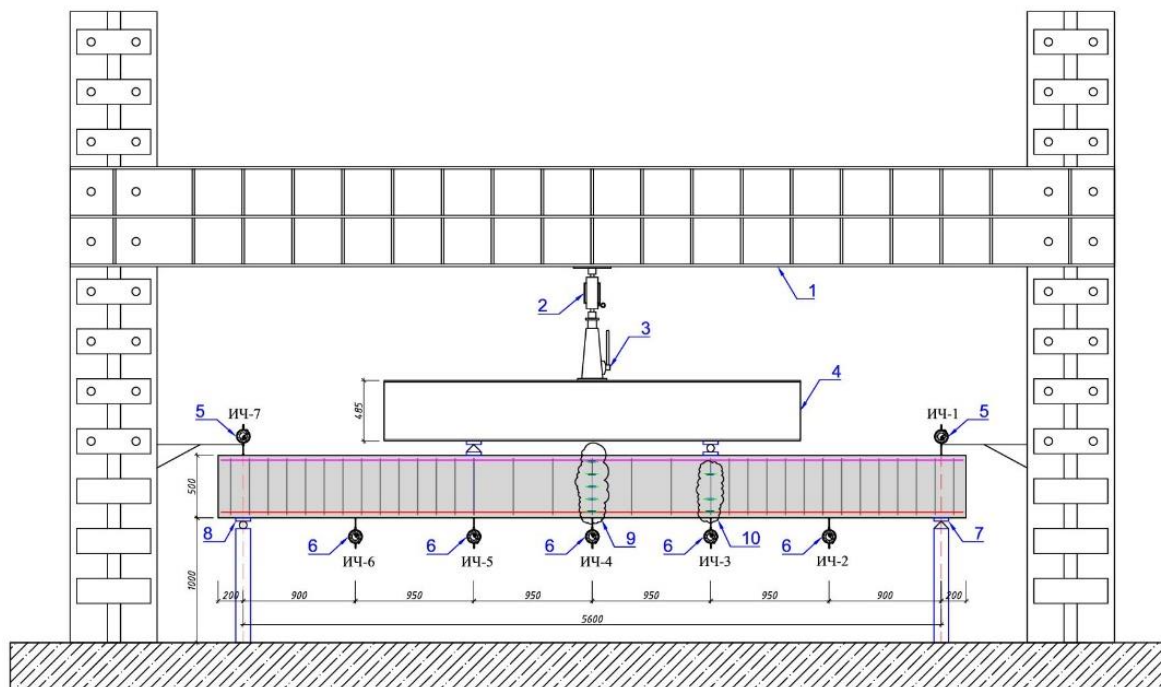


Рисунок 3. Диаграмма растяжения рабочей арматуры натурной железобетонной балки

В параграфе 2.5 описана методика испытаний трёх натуральных железобетонных балок, проведённых в лаборатории «Сейсмостойкость зданий и сооружений» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана. Балки испытывались как однопролётные элементы с ненапрягаемой арматурой при действии двух сосредоточенных сил, симметрично расположенных относительно середины пролёта на расстоянии 950 мм.

Схема испытательного стенда и расстановки измерительных приборов представлена на рис. 4.



1 – стенд для испытания строительных конструкций, 2 – динамометр ДОС–100, 3 – механический винтовой домкрат TOR–50, 4 – распределитель нагрузки (двутавр №50Ш1), 5 – прогибомер часового типа ИЧ–50 (для измерения осадки опор), 6 – прогибомер часового типа ИЧ–50 (для измерения деформаций в пролётной зоне), 7 – шарнирно–неподвижная опора, 8 – шарнирно–подвижная опора, 9 – тензорезисторы типа ПКБ с базой 50мм (для измерения относительных деформаций по высоте сечения в средней зоне балки), 10 – тензорезисторы типа ПКБ с базой 50мм (для измерения относительных деформаций по высоте сечения в зоне приложения нагрузки).

Рисунок 4. Схема испытательного стенда и расположения измерительных приборов при испытании натуральных железобетонных балок

2.6. Результаты испытаний экспериментальных натуральных железобетонных балок БМ 1–3. С учётом неоднородности железобетона и возможного разброса экспериментальных данных испытания проводились на трёх натуральных балках БМ 1–3. Результаты по каждой балке приведены отдельно, а обобщённая оценка основных параметров напряжённо–деформированного состояния выполнена по средним значениям, полученным при испытании трёх опытных элементов.

2.7. Анализ результатов экспериментальных исследований натуральных железобетонных балок. Выполнен анализ закономерностей изменения напряжённо–деформированного состояния натуральных железобетонных балок при поэтапном статическом нагружении. Установлена близость деформаций в симметрично расположенных характерных точках пролётной зоны, что подтверждает равномерность работы балок при принятой схеме нагружения. С учётом выявленной закономерности для последующего сопоставления с модельными данными в качестве основных контрольных точек приняты ИЧ–2, ИЧ–3 и ИЧ–4. В качестве иллюстрации полученных экспериментальных зависимостей на рис. 5 представлен график деформирования натурной железобетонной балки БМ–3 [1–А].

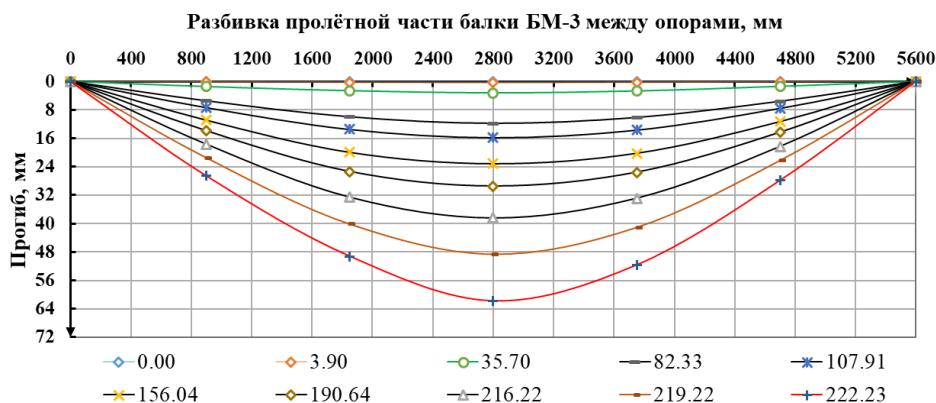


Рисунок 5. График деформирования натурной железобетонной балки БМ–3

Для подтверждения прогнозных данных при переходе от модели к натурной конструкции сопоставление прогибов выполнено по трём контрольным точкам ИЧ–2, ИЧ–3 и ИЧ–4. В связи с ограниченным объёмом автореферата в тексте приведена наиболее наглядная зависимость нагрузки от прогиба по контрольной точке ИЧ–4.

Для графического представления результатов на рис. 6 приведена зависимость нагрузки от прогиба натурной железобетонной балки в контрольной точке ИЧ–4, а на рис. 7 – зависимость изгибающего момента от радиуса кривизны.

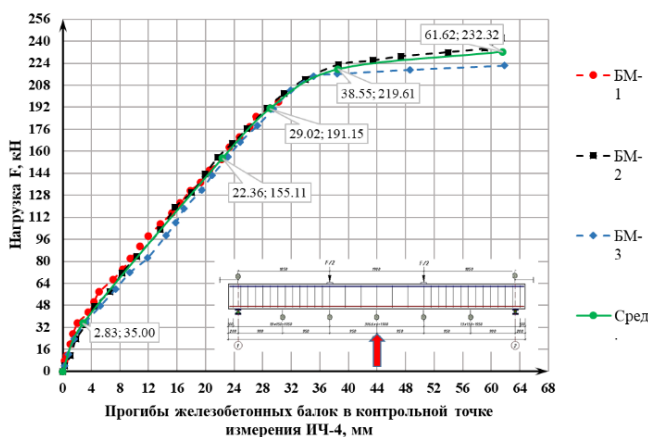


Рисунок 6. График зависимости нагрузки от прогибов железобетонной балки в точке ИЧ–4

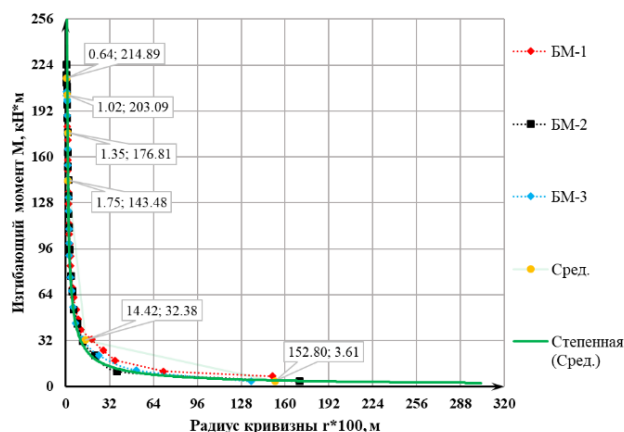
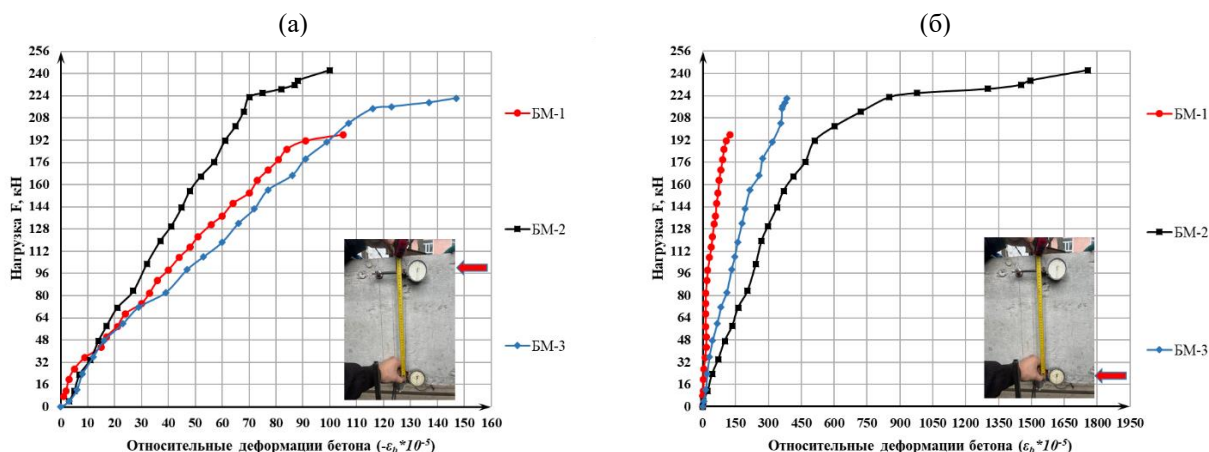


Рисунок 7. График зависимости изгибающего момента от радиуса кривизны натуральных железобетонных балок

Для сопоставления прогнозных данных и определения соответствующих деформационных параметров с учётом условий механического подобия выполнена отдельная аппроксимация экспериментальных зависимостей по участкам, что позволяет точнее описать

фактическую работу балки и использовать полученные зависимости при сравнении натуральных и модельных результатов.

Зависимость нагрузки от относительных деформаций бетона в сжатой и растянутой зоне серии железобетонных балок БМ-1, БМ-2 и БМ-3 приведена на рис. 8.



а– сжатая зона, б–растянутая зона.

Рисунок 8. Зависимость нагрузки от относительных деформаций бетона в сжатой и растянутой зоне серии натуральных железобетонных балок

Анализ результатов показывает, что при нагрузке 35 кН, соответствующей изгибающему моменту $M=32,37$ кН·м, на диаграмме наблюдается участок с плавным увеличением вертикальных перемещений, что свидетельствует о переходе конструкции из упругой стадии работы в стадию трещинообразования.

Экспериментальные исследования показали, что разрушение натурной железобетонной балки наступает при нагрузке 232,32 кН, соответствующей изгибающему моменту $M=214,89$ кН·м. Это значение соответствует достижению предельного состояния первой группы и характеризует фактическую несущую способность конструкции. Разрушение произошло в сжатой зоне сечения в результате интенсивного раздробления бетона.

Типовая схема трещинообразования и график зависимости ширины раскрытия трещин от нагрузки натуральных железобетонных балок в пролётной зоне представлены на рис. 9 и 10.

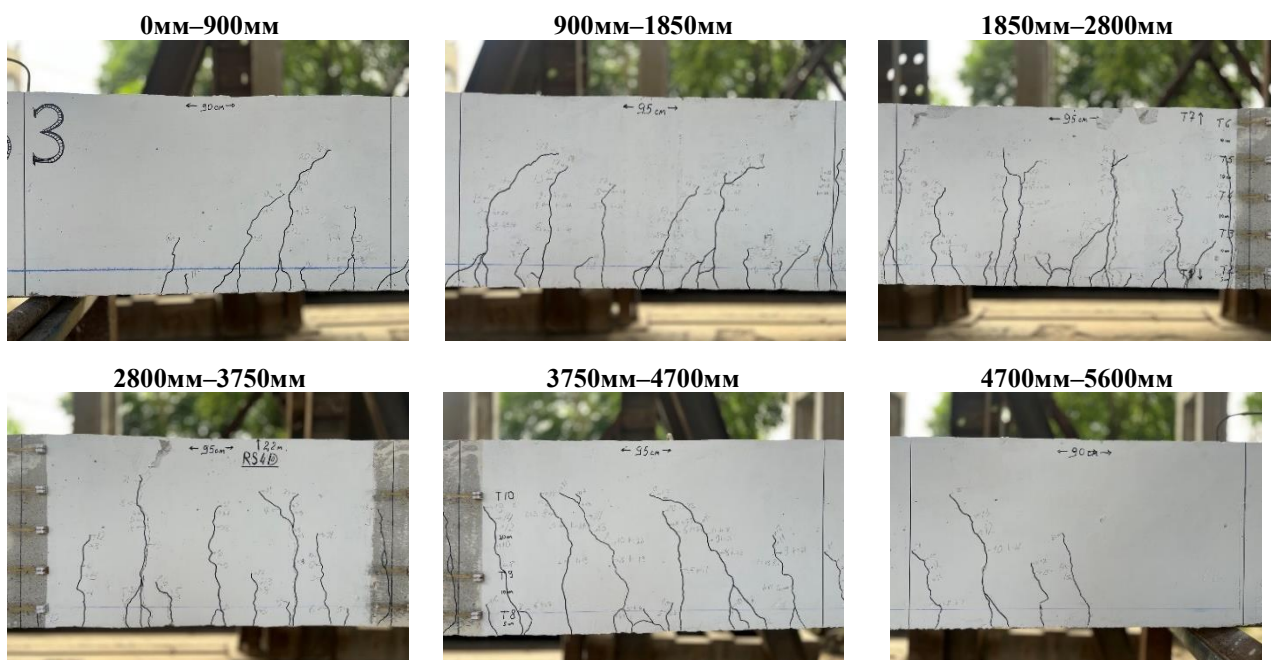
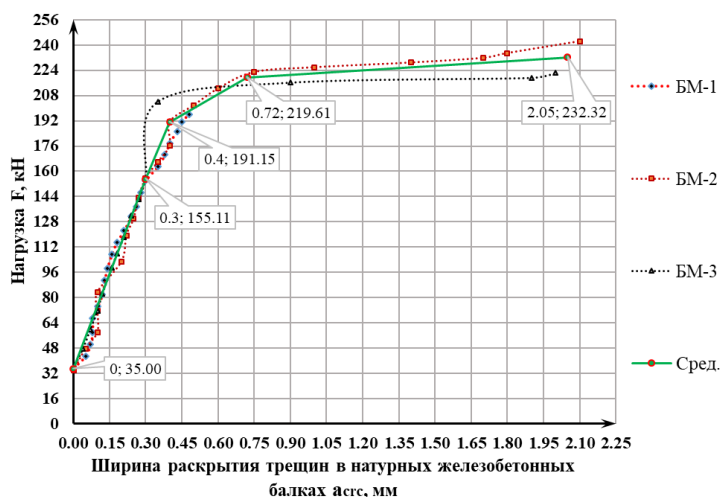


Рисунок 9. Типовая схема трещинообразования в натурной железобетонной балке



Ширина раскрытия трещин $a_{кр}$, мм	Уравнения аппроксимации в пределах участка
0	
0.3	$y = 400.38x + 35$
0.4	$y = 360.35x + 47.009$
0.72	$y = 88.937x + 155.58$
2.05	$y = 9.5564x + 212.73$

x —ширина раскрытия трещин (мм),
 y —нагрузка (кН).

Рисунок 10. График зависимости ширины раскрытия трещин от нагрузки натуральных железобетонных балок

Согласно экспериментальным данным, при нагрузке 155,11 кН и изгибающем моменте $M=143,48$ кН·м, ширина раскрытия трещин составила 0,3 мм (рис. 10). Зафиксированный в этот момент средний прогиб равен 22,36 мм (рис. 6), что практически соответствует нормативному предельному значению $L/250 = 5600/250 = 22,40$ мм. Расхождение между экспериментальным и нормативным значениями составляет около 0,17%, что подтверждает согласованность полученных результатов с предельными нормативными требованиями по прогибу [29].

Третья глава «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ» посвящена результатам экспериментальных исследований трёх модельных железобетонных балок, изготовленных в масштабе 1:4 на основе положений теории подобия [4–А]. Рассмотрены вопросы подбора материалов физической модели, моделирования рабочей арматуры, учёта масштабного эффекта и определения физико–механических характеристик бетона и арматуры. Особое внимание уделено анализу напряжённо–деформированного состояния модельных балок, развитию прогибов и трещинообразования при статическом нагружении. На основе сопоставления модельных и натуральных результатов в сходственных контрольных точках обоснованы коэффициенты и критерии подобия, обеспечивающие переход от физической модели к натурной железобетонной конструкции в пределах от упругой стадии до стадии разрушения. Приведена технико–экономическая оценка эффективности модельных испытаний по сравнению с натурными экспериментами. Глава состоит из девяти параграфов и завершается выводами.

3.1. Основные положения методики физического моделирования железобетонных балок. Изложены методические основы физического моделирования железобетонных балок, включающие выбор масштаба и материалов модели, учёт масштабного эффекта, а также применение размерного анализа и критериев подобия. Обосновано, что достоверный переход от результатов модельных испытаний к параметрам натурной конструкции возможен при соблюдении геометрического, физического и механического подобия, соответствия схемы нагружения и граничных условий, а также при корректном определении коэффициентов подобия.

Согласно рекомендациям авторов [12, 21, 22], для более точной оценки напряжённо–деформированного состояния железобетонных конструкций по результатам модельных испытаний принимается равенство относительных деформаций и коэффициента Пуассона в модели и натурной конструкции. Указанное положение имеет теоретическое обоснование и в настоящем исследовании рассматривается как исходное условие, применимость которого экспериментально проверяется при сопоставлении результатов испытаний модельных и натуральных железобетонных балок. Формулы перехода от параметров модели к натурным значениям с учётом коэффициентов подобия приведены в табл. 1 [2–А].

Таблица 1. – Формулы перехода от параметров модели к натурным значениям с учётом коэффициентов подобия по напряжениям.

Наименование моделируемых параметров	Формулы перехода от модели к натуре с учетом соответствующих коэффициентов подобия
Линейные размеры	$b_n = k_L \cdot b_m, h_n = k_L \cdot h_m, L_n = k_L \cdot L_m$
Площадь	$A_n = k_L^2 \cdot A_m$
Объём	$V_n = k_L^3 \cdot V_m$
Сосредоточенные силы	$P_n = k_\sigma \cdot k_L^2 \cdot P_m$
Изгибающие моменты	$M_n = k_\sigma \cdot k_L^3 \cdot M_m$
Напряжения	$\sigma_n = k_\sigma \sigma_m, k_\sigma = \frac{E_n}{E_m}$
Прогибы	$f_n = k_L \cdot f_m$
k_L – коэффициент подобия линейных размеров (коэффициент масштабирования), $k_\sigma = \frac{E_n}{E_m}$ – коэффициент моделирования напряжений (коэффициент подобия по напряжениям).	

3.2. Цель, задачи и методика экспериментального исследования моделей железобетонных балок. Цель экспериментального исследования моделей железобетонных балок заключалась в получении достоверных данных о напряжённо–деформированном состоянии, прогибах и трещиностойкости изгибаемых элементов в уменьшенном масштабе, а также в оценке применимости условий геометрического, физического и механического подобия при переходе к параметрам натурной конструкции. В соответствии с поставленной целью были решены задачи по обоснованию масштаба моделирования, подбору модельных материалов, разработке конструктивного решения и технологии изготовления моделей, проведению статических испытаний с регистрацией основных параметров напряжённо–деформированного состояния и оценке корректности масштабного перехода на основе критериев подобия.

3.3. Выбор масштаба моделирования, подбор состава бетона и рабочей арматуры для модельных конструкций. Геометрический масштаб модельных железобетонных балок 1:4 был принят с учётом условий размещения образцов в испытательном зале, возможности реализации принятой схемы нагружения, а также обеспечения установки и работы контрольно–измерительной аппаратуры. Подбор состава бетона для модельных конструкций выполнен на основе методических рекомендаций [24, 28 и 3–А].

Согласно работе [17], тождественность материалов в механическом смысле наиболее достоверно устанавливается прямым экспериментом и определяется сохранением одинаковых соотношений между напряжениями и деформациями для одинаковых опытных образцов. Поскольку полное подобие материалов при любом законе нагружения практически недостижимо, при физическом моделировании железобетонных конструкций условие подобия материалов принимается приближённо, а основное значение имеет выбор характеристик, обеспечивающих сопоставимость напряжённо–деформированного состояния модели и натурной конструкции.

На основе сопоставления экспериментальных диаграмм деформирования материалов натурной и модельной железобетонных балок с учётом разномодульного характера их работы получен коэффициент подобия по деформациям в следующем виде:

$$k_\varepsilon = \frac{E_m}{E_n}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_n = k_\varepsilon \varepsilon_m. \quad (2)$$

Анализ зависимости «напряжение – деформация» материалов натурной и модельной конструкций при условии равенства напряжений показывает, что коэффициенты подобия по напряжениям и деформациям находятся в обратно пропорциональной зависимости.

$$k_{\sigma} = \frac{1}{k_{\varepsilon}}. \quad (3)$$

Анализ научной литературы показал, что переход от результатов напряжённо – деформированного состояния физической модели конструкции к натурной конструкции зависит от параметров перехода и осуществляется с использованием указанных коэффициентов подобия. Однако в экспериментах, связанных с изгибаемыми стержневыми элементами, данные коэффициенты, являющиеся ключевыми параметрами перехода, не получили достаточного экспериментального обоснования и практического применения.

Подбор рабочей арматуры модельной железобетонной балки осуществлялся на основе принципа соблюдения подобия площади поперечного сечения арматуры согласно табл. 1 и был подтверждён верификационным расчётом, выполненным в программном комплексе ЛИРА–САПР 2022.

Исходя из принципа соблюдения подобия площади поперечного сечения арматуры и фактической площади рабочей арматуры натурной железобетонной балки $A_s^H = 942.6 \text{ мм}^2$, площадь рабочей арматуры для модели железобетонной балки в масштабе 1:4 составляет

$$A_s^M = 942.6 \cdot \frac{1}{4^2} = 58.91 \text{ мм}^2. \quad (4)$$

Полученное значение соответствует площади одного стержня диаметром около 8,7мм, либо может быть реализовано комбинацией двух стержней диаметром \varnothing мм ($2 \times 28,27 = 56,54 \text{ мм}^2$), что меньше расчётной величины.

Применение арматуры диаметром бмм, обладающей гладкой поверхностью, не обеспечивает надёжного сцепления с бетоном в модельной конструкции. Кроме того, при физическом моделировании необходимо учитывать влияние масштабного эффекта, структурной неоднородности, ползучести и нелинейного характера деформирования бетона, а также невозможность реализации защитного слоя бетона в полном соответствии с принципами геометрического подобия. Указанные факторы в совокупности не позволяют обеспечить требуемую корректность работы конструкции при использовании арматуры малого диаметра.

В связи с указанными ограничениями в модельной железобетонной балке принят один рабочий арматурный стержень диаметром 10мм с площадью поперечного сечения $A_s^M = 78,3 \text{ мм}^2$.

3.4. Изготовление и испытание контрольных образцов для оценки прочностных и деформационных характеристик материалов модели. Физико–механические характеристики материалов модельных железобетонных балок определялись по методикам, аналогичным использованным при испытании материалов натуральных железобетонных балок.

Усреднённая диаграмма деформирования бетонных призм с аппроксимирующими уравнениями, а также диаграмма растяжения рабочей арматуры модельной железобетонной балки представлены на рис. 11 и 12.

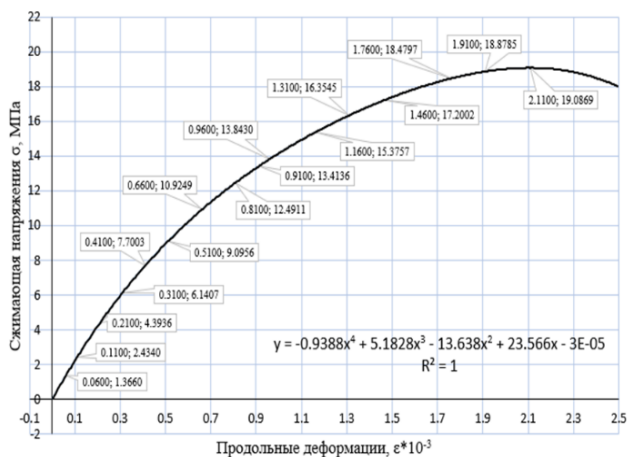


Рисунок 11. Диаграмма деформирования бетонной призмы модельной железобетонной балки

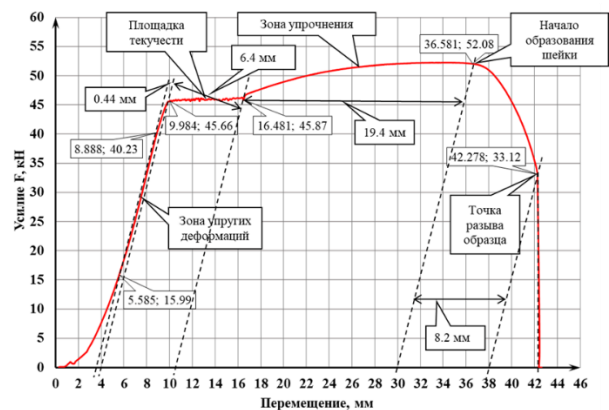


Рисунок 12. Диаграмма растяжения рабочей арматуры модельной железобетонной балки

3.5. Методика проведения испытаний модельных изгибаемых железобетонных балок. Испытания моделей железобетонной балки проводились в соответствии со схемой испытания натурной балки и с соблюдением основных принципов физического моделирования, обеспечивающих геометрическое и силовое подобие [7–А].

Физическая модель железобетонной балки в масштабе 1:4 была изготовлена с учётом соблюдения критериев подобия, применяемых при статических испытаниях моделей железобетонных конструкций. Материал физической модели был подобран из мелкозернистого бетона с классом прочности В20. В растянутой зоне балка армирована рабочей арматурой периодического профиля $\varnothing 10$ мм А500. В сжатой зоне для формирования плоского арматурного каркаса применена конструктивная продольная арматура в виде одного стержня $\varnothing 6$ мм А240. Для обеспечения пространственной жёсткости каркаса и соединения продольных стержней в растянутой и сжатой зонах использованы поперечные хомуты из арматуры диаметром $\varnothing 4$ мм класса А240. Анкеровка рабочей арматуры была обеспечена за счёт приваривания на её торцах поперечных анкерных пластин размерами $20 \times 50 \times 5$ мм. Такое конструктивное решение позволило эффективно передать усилия от арматуры в бетон и предотвратить выкальзывание арматурных стержней из тела балки в процессе испытаний.

Испытания проведены на трёх однопролётных железобетонных балках с ненапрягаемой арматурой, нагруженной двумя сосредоточенными силами, симметрично расположенными относительно её середины на расстоянии 237,5 мм. Нагружение балок осуществлялось с использованием механического винтового домкрата TOR–50. Передача нагрузки от домкрата на балку производится через систему распределительных траверс, выполненных из балочного двутавра №20Б1 ($L=690$ мм), что обеспечивает равномерное распределение нагрузки на две сосредоточенные силы.

Расчётная схема модельных железобетонных балок и соответствующие арматурные каркасы трёх опытных образцов, разработанные с учётом принципов теории подобия и выбранного масштаба моделирования, представлены на рис. 13 [4–А].

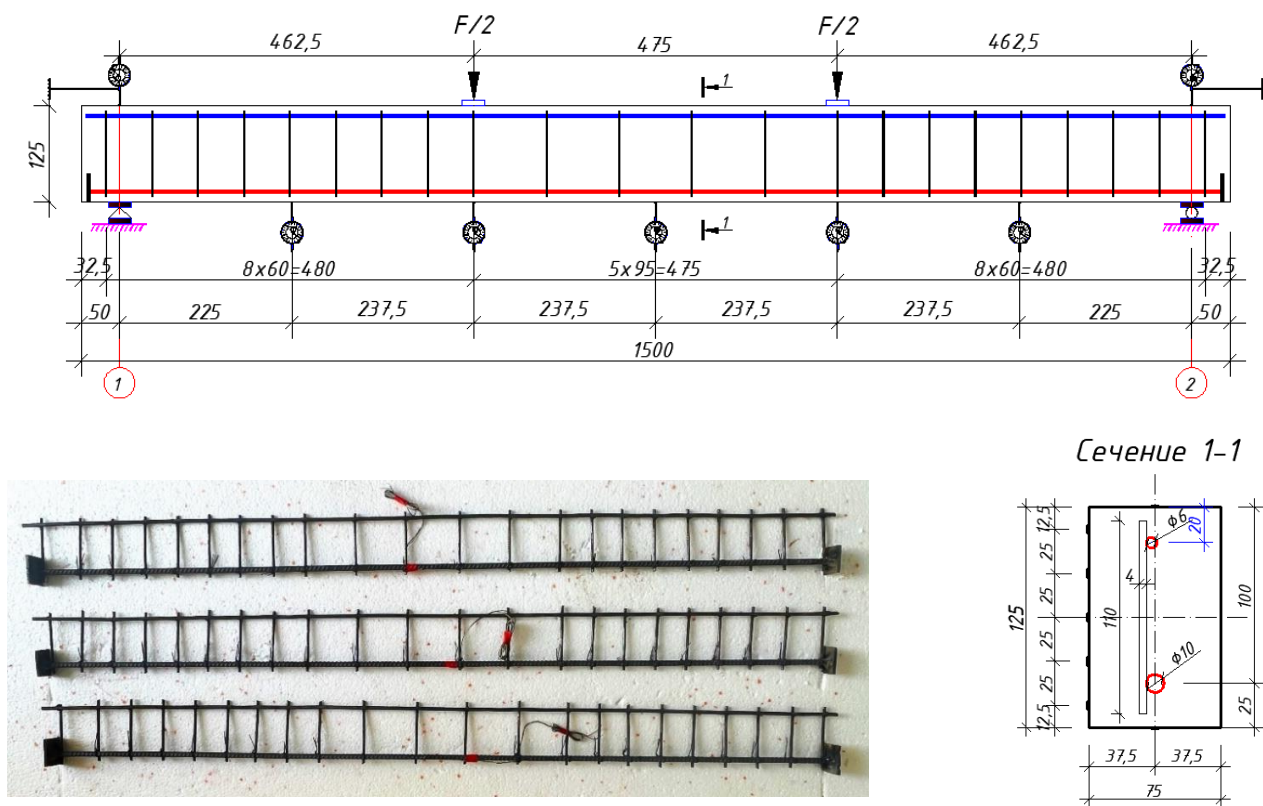
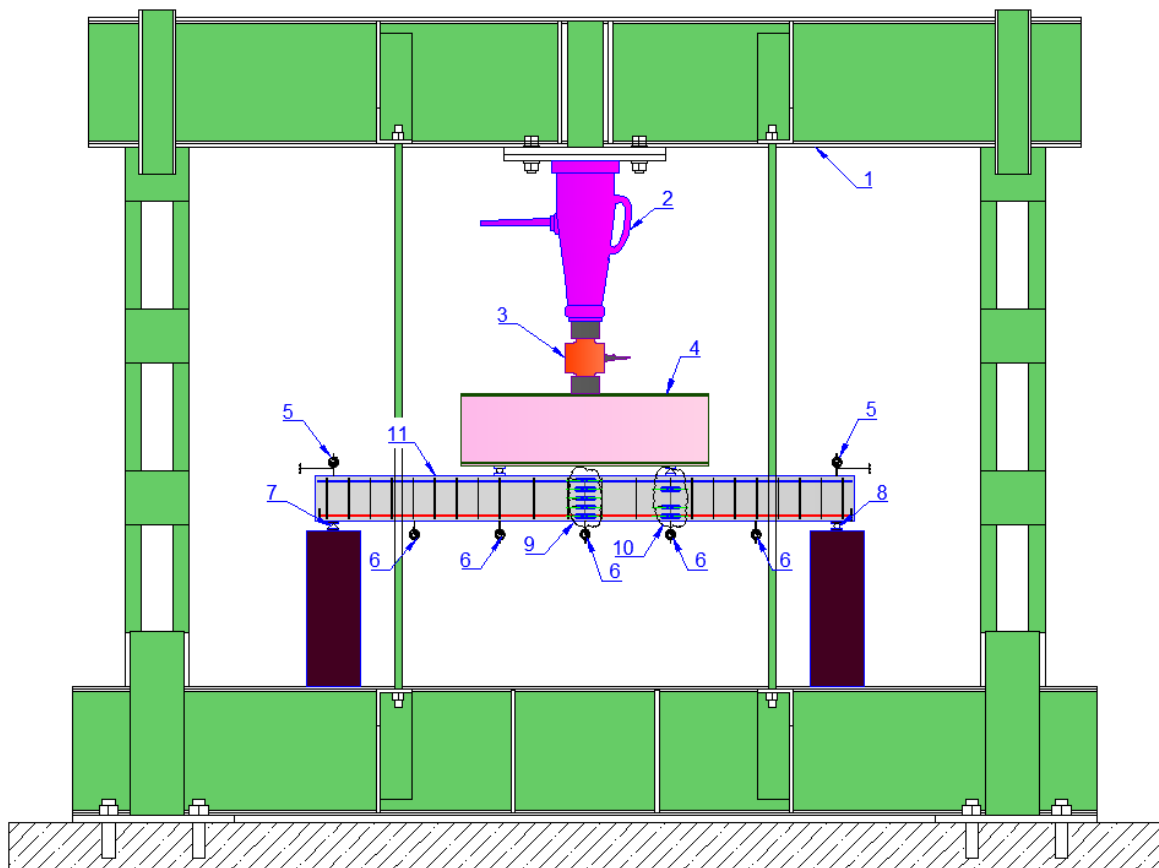


Рисунок 13. Расчётная схема модельных железобетонных балок с армированием

Схема испытательного стенда и расстановки измерительных приборов представлена на рис. 14.



1 – стенд для испытания моделей строительных конструкций, 2 – механический винтовой домкрат марки TOR-50, 3 – электронный динамометр марки ДМС-1000/5-1МГ4, 4 – распределитель нагрузки (двухавт №20Б1), 5 – прогибомер часового типа ИЧ-50 (для измерения осадки опор), 6 – прогибомер часового типа ИЧ-50 (для измерения деформаций в пролётной зоне), 7 – шарнирно-неподвижная опора, 8 – шарнирно-подвижная опора, 9 – тензорезисторы типа ПКБ с базой 50мм (для измерения относительных деформаций по высоте сечения в средней зоне балки), 10 – тензорезисторы типа ПКБ с базой 50мм (для измерения относительных деформаций по высоте сечения в зоне приложения нагрузки), 11 – испытуемая модель железобетонной балки.

Рисунок 14. Схема испытательного стенда и расположения измерительных приборов при испытании модельных железобетонных балок

Для определения прогибов использованы прогибомеры часового типа ИЧ-50 как в пролёте, так и на опорах, что позволяет учитывать влияние возможной осадки опор и получать более точные данные о деформировании балки в процессе нагружения.

Измерение ширины раскрытия трещин осуществлялось с применением специального измерительного устройства, оснащённого индикаторами часового типа, жёстко закреплёнными на поверхности модели железобетонной балки. Прибор обеспечивал высокую точность регистрации деформаций благодаря цене деления 0,001мм, что позволяло фиксировать параметры трещинообразования в процессе нагружения модели. Распределение относительных деформаций по высоте сечения в середине пролёта и в зоне приложения нагрузки оценивалось с применением тензорезисторов типа ПКБ с базой 50мм. Для регистрации относительных деформаций использовался цифровой измеритель деформации ИДЦ-1 [8-А].

3.6. Результаты испытаний экспериментальных модельных железобетонных балок БМ 1-3. С учётом неоднородности железобетона и возможного разброса экспериментальных данных испытания проводились на трёх модельных балках БМ 1-3. По результатам испытаний приведены данные по каждой балке и сформированы усреднённые зависимости основных параметров напряжённо-деформированного состояния, используемые для последующего сопоставления с натурными данными.

3.7. Анализ результатов экспериментальных исследований моделей железобетонных балок. Выполнен анализ напряжённо-деформированного состояния модельных железобетонных балок в сходственных контрольных точках относительно данных, полученных

при испытании натурной железобетонной балки. Полученные результаты использованы для проверки применимости коэффициентов и критериев подобия при переходе от физической модели к натурной железобетонной балке.

Анализ экспериментальных графиков деформирования модельных железобетонных балок показал, что деформации в характерных точках ИЧ-2 и ИЧ-3 проявляют симметрию относительно точек ИЧ-5 и ИЧ-6 и характеризуются близкими значениями. Установленная закономерность свидетельствует о равномерности работы пролётной зоны балки и позволяет ограничить анализ меньшим числом контрольных точек без снижения достоверности результатов. На основании выявленной закономерности для последующего сравнения с натурными данными в качестве основных контрольных точек были выбраны ИЧ-2, ИЧ-3 и ИЧ-4. В качестве иллюстрации полученных экспериментальных зависимостей на рис. 15 представлен график деформирования модельной железобетонной балки БМ-3.

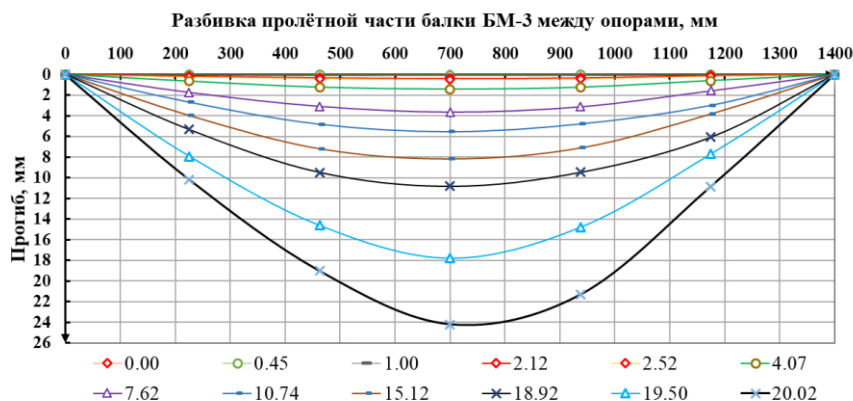


Рисунок 15. График деформирования модели железобетонной балки БМ-3

Для прогнозирования деформированного состояния натурной железобетонной балки по результатам модельных испытаний сопоставление выполнялось в сходственных контрольных точках ИЧ-2, ИЧ-3 и ИЧ-4. Анализ показал, что на соответствующих уровнях нагружения погрешности перехода от модели к натурной конструкции в указанных точках имеют близкие значения. В связи с этим, а также с учётом ограниченного объёма автореферата, результаты сопоставления представлены на примере наиболее наглядной контрольной точки ИЧ-4. Для графического представления результатов на рис. 16 приведена зависимость нагрузки от прогиба модельной железобетонной балки в контрольной точке ИЧ-4, а на рис. 17 – зависимость изгибающего момента от радиуса кривизны [4–А].

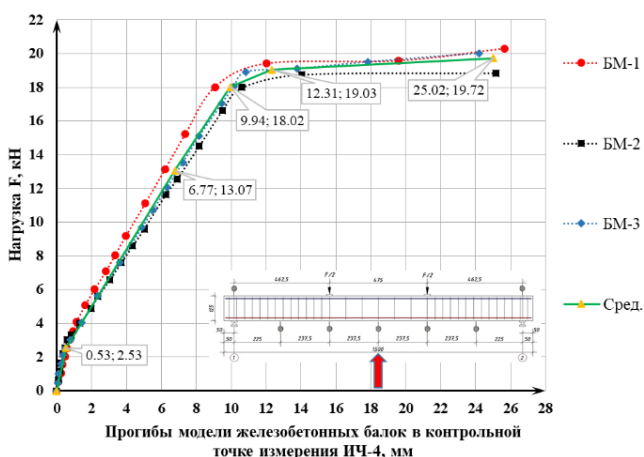


Рисунок 16. График зависимости нагрузки от прогиба модели железобетонной балки в точке ИЧ-4

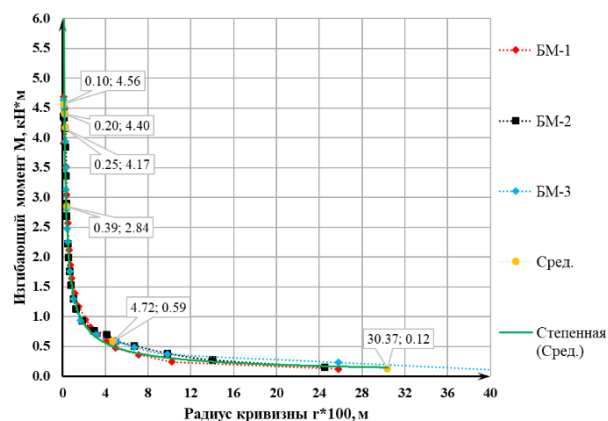


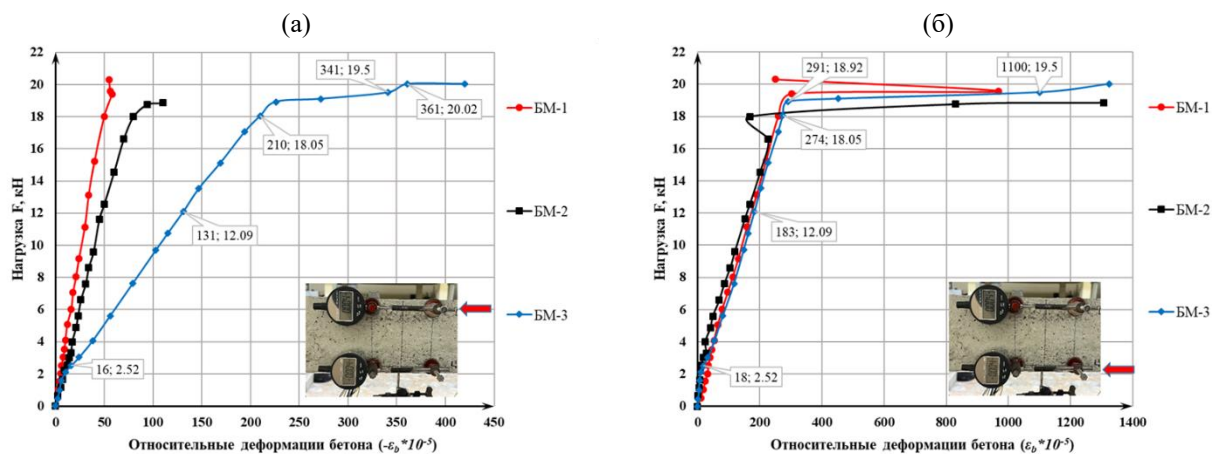
Рисунок 17. График зависимости изгибающего момента от радиуса кривизны модельных железобетонных балок

Анализ результатов испытаний модельных железобетонных балок показал, что при нагрузке 2,53 кН, соответствующей изгибающему моменту $M=0,58\text{кН}\cdot\text{м}$, на диаграмме

наблюдается изменение характера деформирования, свидетельствующее о переходе конструкции от условно упругой стадии к стадии трещинообразования.

Разрушение модельной железобетонной балки зафиксировано при средней разрушающей нагрузке 19,72 кН, соответствующей предельному состоянию первой группы. Характер разрушения модели, проявившийся в интенсивном развитии деформаций и раздроблении бетона сжатой зоны, в целом согласуется с основными стадиями работы натурной железобетонной балки.

Зависимость нагрузки от относительных деформаций бетона в сжатой и растянутой зоне серии модельных железобетонных балок БМ–1, БМ–2 и БМ–3 приведён на рис. 18.



а– сжатая зона, б–растянутая зона.

Рисунок 18. Зависимость нагрузки от относительных деформаций бетона в сжатой и растянутой зоне серии модельных железобетонных балок

Типовая схема трещинообразования и график зависимости ширины раскрытия трещин от нагрузки модельных железобетонных балок в пролётной зоне представлены на рис. 19 и 20.

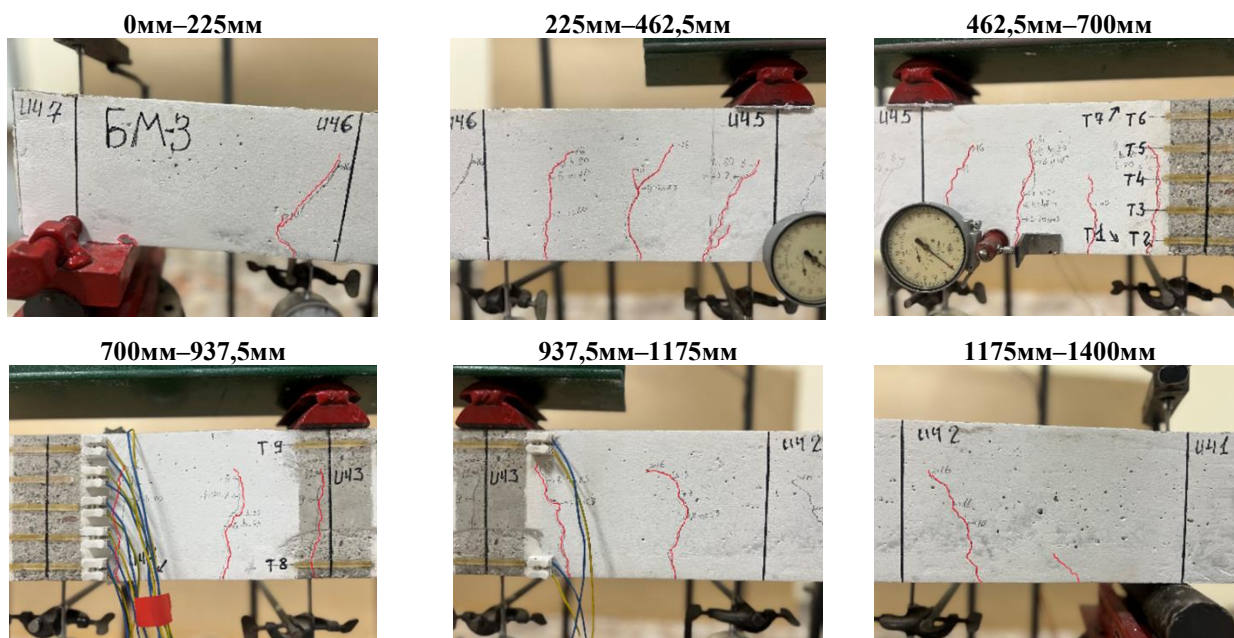


Рисунок 19. Типовая схема трещинообразования в модельной железобетонной балке

Экспериментально установлено, что при оценке работы физической модели по второму предельному состоянию предельное значение ширины раскрытия трещин 0,3 мм не может быть непосредственно принято по аналогии с натурной конструкцией, поскольку для модельного элемента такое раскрытие соответствует стадии, близкой к потере несущей способности. В связи с этим ширина раскрытия трещин в физической модели должна определяться с учётом масштаба моделирования и условий подобия.

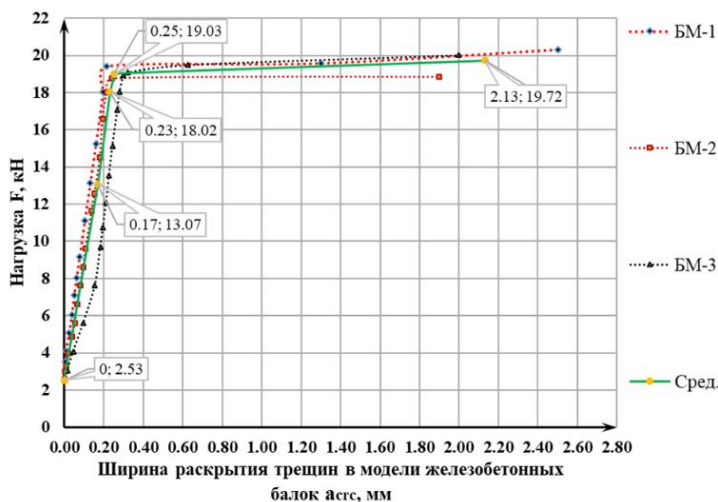


Рисунок 20. График зависимости ширины раскрытия трещин от нагрузки модельных железобетонных балок

Ширина раскрытия трещин $a_{срс}$, мм	Уравнения аппроксимации в пределах участки
0	$y = 61.879x + 2.5333$
0.17	$y = 81.093x - 0.7395$
0.23	$y = 46.615x + 7.2363$
0.25	$y = 0.3687x + 18.937$
2.13	

x – ширина раскрытия трещин (мм),
 y – нагрузка (кН).

3.8. Методика перехода от усреднённых экспериментальных данных физической модели к параметрам натурной железобетонной балки. В данном параграфе изложена методика перехода от усреднённых экспериментальных данных физической модели к параметрам натурной железобетонной балки на основе критериев и коэффициентов подобия. Верификация выполнена по результатам испытаний трёх модельных и трёх натурных балок в сходственных контрольных точках ИЧ–2, ИЧ–3 и ИЧ–4, что позволило оценить достоверность масштабного перехода и применимость критериев геометрического, механического и силового подобия [5–А]. В таблице 2 приведены результаты перехода от параметров физической модели к параметрам натурального элемента в контрольной точке ИЧ–4 с использованием коэффициентов подобия по напряжениям.

Аналогичным образом выполнен переход в контрольных точках ИЧ–2 и ИЧ–3, что подтверждает возможность применения разработанной методики для перехода от параметров физической модели к параметрам натурной конструкции в любых сходственных точках железобетонного элемента при соблюдении условий подобия.

Таблица 2. – Результаты перехода от точки измерения ИЧ–4 физической модели к сходственной точке натурной железобетонной балки с использованием коэффициентов подобия по напряжениям

Средняя экспериментальная нагрузка на модельную балку	Эквивалентная нагрузка для натурной балки	Средняя экспериментальная нагрузка на натурную балку	Погрешность по критерию подобия нагрузки	Среднее экспериментальное значение прогиба модели балки	Эквивалентное значение прогиба для натурной балки	Среднее экспериментальное значение прогиба натурной балки	Погрешность по прогибу
F_M , кН	$F_H = k_\sigma \cdot k_L^2 \cdot F_M$, кН	F_H , кН	%	f_M , мм	$f_H = k_L \cdot f_M$, мм	f_H , мм	%
2.53	48.54	35.00	27.89	0.53	2.12	2.83	–33.49
13.07	235.58	155.11	34.16	6.26	25.04	22.36	10.70
18.02	345.70	191.15	44.71	9.94	39.76	29.02	27.01
19.03	365.07	219.61	39.84	12.31	49.24	38.55	21.71
19.72	378.31	232.32	38.59	25.02	100.08	61.62	38.43
Коэффициент масштабирования $k_L = 4$, коэффициент подобия по напряжениям $k_\sigma = \frac{E_H}{E_M} = 1.199$.							

При переходе от параметров физической модели к параметрам натурной железобетонной балки в сходственных точках ИЧ–2, ИЧ–3 и ИЧ–4 с использованием коэффициентов подобия по напряжениям установлены существенные отклонения от экспериментальных данных. Погрешность по нагрузке составила +27,89 % при трещинообразовании и +38,59 % при разрушении, а по прогибам соответственно –28 % и +36,3 %. Полученные результаты подтверждают недостаточность применения только коэффициента масштабирования для достоверного перехода по силовым и жёсткостным параметрам. На основании анализа разномодульности материалов, выполненного в параграфе 3.3, результаты переноса данных из точки измерения ИЧ–4 физической модели к сходственной точке натурной железобетонной балки с использованием коэффициентов подобия по деформациям представлены в табл. 3.

Таблица 3. – Результаты перехода от точки измерения ИЧ–4 физической модели к сходственной точке натурной железобетонной балки с использованием коэффициентов подобия по деформациям

Средняя экспериментальная нагрузка на модельную балку	Эквивалентная нагрузка для натурной балки	Средняя экспериментальная нагрузка на натурную балку	Погрешность по критерию подобия нагрузки	Среднее экспериментальное значение прогиба модели балки	Эквивалентное значение прогиба для натурной балки	Среднее экспериментальное значение прогиба натурной балки	Погрешность по прогибу
F_m , кН	$F_n = k_\varepsilon \cdot k_L^2 \cdot F_m$, кН	F_n , кН	%	f_m , мм	$f_n = k_L \cdot f_m$, мм	f_n , мм	%
2.53	33.76	35.00	–3.67	0.53	2.12	2.83	–33.49
13.07	174.4	155.11	11.06	6.26	25.04	22.36	10.70
18.02	240.46	191.15	20.51	9.94	39.76	29.02	27.01
19.03	253.94	219.61	13.52	12.31	49.24	38.55	21.71
19.72	263.14	232.32	11.71	25.02	100.08	61.62	38.43
Коэффициент масштабирования $k_L = 4$, коэффициент подобия по деформациям $k_\varepsilon = \frac{E_m}{E_n} = 0.834$.							

Анализ результатов табл. 3 показывает, что при масштабном переходе от параметров физической модели к натурной железобетонной балке по критериям силового и деформационного подобия в сходственных точках измерения (ИЧ–2, ИЧ–3 и ИЧ–4) с использованием коэффициентов подобия по деформациям, приведённых в параграфе 3.3., достигается допустимое совпадение расчётно–теоретических и экспериментальных данных. В частности, погрешность по критерию подобия нагрузки в момент трещинообразования составляет –3,67%, а в момент разрушения +11,71%, что находится в пределах допустимых значений для корректного масштабного перехода.

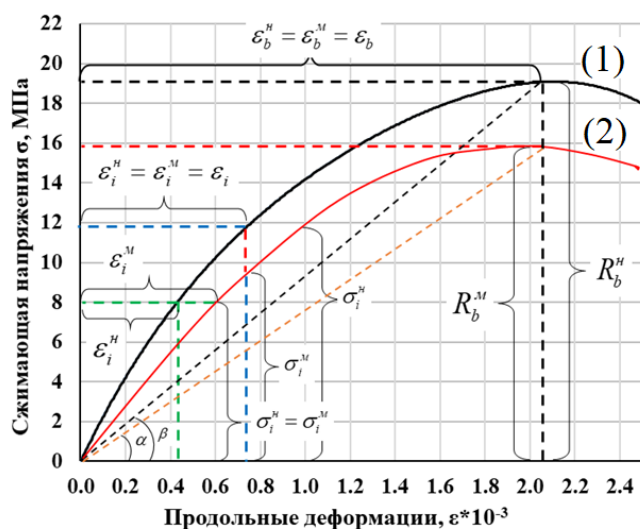
Переход от значений прогиба физической модели к натурной конструкции не может быть корректно описан с применением единственного коэффициента масштабирования, поскольку напряжённо–деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов имеет стадийный и разномодульный характер развития. На стадии до образования трещин определяющим является упругое напряжённое состояние, и масштабный переход должен основываться на коэффициенте подобия по напряжениям, обеспечивающем эквивалентность напряжений в сходственных сечениях модели и натуре. После момента трещинообразования, когда в расчётной схеме начинает преобладать нелинейное деформирование и снижение жёсткости растянутой зоны бетона, приоритетным становится коэффициент подобия по деформациям, которые отражает изменяющуюся криволинейную деформативную работу конструкции.

Следовательно, корректная формула масштабного перехода должна учитывать оба указанных коэффициента с учётом стадийности напряжённо–деформированного состояния железобетонного элемента.

С этой целью переход прогиба от точки измерения ИЧ–4 физической модели к сходственной точке натурной железобетонной балки выполнен согласно комбинированному критерию подобия, и его результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. – Результаты перехода прогиба от точки измерения ИЧ–4 физической модели к сходственной точке натурной железобетонной балки

Средняя экспериментальная нагрузка на модельную балку	Среднее экспериментальное значение прогиба модели балки	Коэффициент подобия	Эквивалентное значение прогиба для натурной балки	Среднее экспериментальное значение прогиба натурной балки	Погрешность по прогибу
до появления трещин					
F_M , кН	f_M , мм	k_σ	$f_n = k_L \cdot k_\sigma \cdot f_M$, мм	f_n , мм	%
2.53	0.53	1.199	2.54	2.83	–10.18
после появления трещин					
F_M , кН	f_M , мм	k_ε	$f_n = k_L \cdot k_\varepsilon \cdot f_M$, мм	f_n , мм	%
13.07	6.26	0.834	20.88	22.36	–6.60
18.02	9.94	0.834	33.16	29.02	14.27
19.03	12.31	0.834	41.07	38.55	6.53
19.72	25.02	0.834	83.47	61.62	35.45



1 – кривая деформирования бетона натурной конструкции; 2 – кривая деформирования бетона физической модели.

Рисунок 21. Сопоставление нелинейных диаграмм деформирования бетона модели и натурной конструкции

Характер изменения коэффициентов подобия напрямую определяется стадийностью деформирования бетона. Как следует из графика нелинейного деформирования бетона (рис. 21), на начальной стадии нагружения материал работает в пределах упругой области, и значения коэффициентов подобия остаются практически неизменными. Однако после появления первых трещин в изгибаемых элементах деформирование приобретает нелинейный характер, что приводит к снижению жёсткости и ускоренному росту прогибов. Вследствие этого коэффициенты подобия перестают быть постоянными и становятся переменными, изменяясь в зависимости от текущей стадии напряжённо–деформированного состояния конструкции.

По результатам анализа графика нелинейного деформирования бетона можно отметить, что прогноз несущей способности натурной железобетонной балки целесообразно выполнять на основе коэффициента, определяемого отношением призматической прочности бетона модели к

призменной прочности бетона натурального элемента. Такой подход обеспечивает более корректный учёт разницы в механических характеристиках материалов и позволяет повысить точность масштабного перехода при оценке предельного состояния конструкции. Результаты оценки предельного состояния с учётом данного коэффициента приведены в табл. 5.

Поскольку эквивалентная нагрузка, полученная по данным физической модели, сравнивается со средним экспериментальным значением нагрузки для натурной балки, установленная погрешность составляет 5,39%. При сопоставлении с результатами непосредственных испытаний натурной железобетонной балки серии БМ–2 данная погрешность дополнительно уточняется и снижается до 1,00%, что свидетельствует о высокой степени сходимости результатов.

Таблица 5. – Результаты оценки предельного состояния натурной железобетонной балки

Средняя экспериментальная разрушающая нагрузка на модельную балку	Коэффициент подобия предельных состояний	Эквивалентная нагрузка для натурной балки	Средняя экспериментальная нагрузка на натурную балку	Погрешность по критерию подобия нагрузки
F_m , кН	$k_u = \frac{R_b^m}{R_b^n}$	$F_n = k_u \cdot k_L^2 \cdot F_m$, кН	F_n , кН	%
19.72	0.776	244.84	232.32	+5.39

Анализ результатов перехода от физической модели к натурной железобетонной балке показал, что каждая стадия работы изгибаемых элементов определяется преобладанием определённого критерия подобия, и использование одного фиксированного коэффициента масштабирования для всего диапазона нагружения является методологически некорректным. В процессе нагружения балка проходит последовательную смену стадий – от упругой до предельного состояния, в каждой из которых физическая природа деформирования различна, а следовательно, требуется дифференцированный подход к выбору коэффициента подобия.

В связи с этим в данной работе была поставлена и решена задача экспериментального определения коэффициентов подобия, характеризующих работу конструкции на всех ключевых этапах её напряжённо–деформированного состояния – от упругой стадии до стадии разрушения. Такой подход позволяет не только обеспечить корректность масштабного перехода, но и повысить точность прогноза несущей способности и деформативности натуральных железобетонных балок, что имеет практическое значение для инженерного расчёта и экспериментального моделирования.

По результатам исследования предлагается следующий уточнённый коэффициент подобия, учитывающий стадийность деформирования и разномодульное поведение материалов конструкции,

$$k_{um} = \frac{E_m}{E_n} - \frac{F_{срс}^m}{F_{раз}^m} \cdot \frac{F_i^m}{F_{раз}^m}, \quad (5)$$

- где k_{um} – комплексный коэффициент подобия;
- E_m – начальный модуль деформации материала модели;
- E_n – начальный модуль деформации материала натурной конструкции;
- $F_{срс}^m$ – нагрузка, соответствующая моменту образования трещин в модельной балке;
- F_i^m – нагрузка на модельную балку на рассматриваемом этапе нагружения;
- $F_{раз}^m$ – разрушающая нагрузка модельной балки.

В табл. 6 представлены результаты перехода от параметров физической модели к параметрам натурального элемента в контрольной точке ИЧ-4 с использованием комплексного коэффициента подобия.

Таблица 6. – Результаты перехода от точки измерения ИЧ-4 физической модели к сходственной точке натурной железобетонной балки с учетом комплексного коэффициента подобия

Средняя экспериментальная нагрузка на модельную балку	Комплексный коэффициент подобия	Эквивалентная нагрузка для натурной балки	Средняя экспериментальная нагрузка на натурную балку	Погрешность по критерию подобия нагрузки	Среднее экспериментальное значение прогиба модели балки	Эквивалентное значение прогиба для натурной балки	Среднее экспериментальное значение прогиба натурной балки	Погрешность по прогибу
F_M , кН	k_{um}	$F_n = k_{um} \cdot k_L^2 \cdot F_M$, кН	F_n , кН	%	f_M , мм	$f_n = k_L \cdot k_{\sigma} \cdot f_M$, мм	f_n , мм	%
в момент образования трещин								
2.53	0.818	33.11	35	5.40	0.53	2.54	2.83	-10.18
после образования трещин					f_M , мм	$f_n = k_L \cdot k_{um} \cdot f_M$	f_n , мм	
13.07	0.754	157.68	155.11	-1.66	6.77	20.42	22.36	-8.68
18.02	0.717	206.73	191.15	-8.15	9.94	28.51	29.02	-1.76
19.03	0.710	216.18	219.61	1.56	12.31	34.96	38.55	-9.31
19.72	0.706	222.76	232.32	4.12	25.02	70.66	61.62	14.66
Коэффициент масштабирования $k_L=4$, предлагаемый коэффициент подобия $k_{um} = \frac{E_M}{E_n} \cdot \frac{F_{срс}^M}{F_{раз}^M} \cdot \frac{F_i^M}{F_{раз}^M}$.								

Анализ результатов показал, что при расширенном физическом моделировании применение единого коэффициента подобия на всех стадиях работы изгибаемой конструкции является недостаточным. В частности, в переходной стадии, соответствующей моменту образования трещин, подобие по нагрузке должно определяться с учётом комплексного коэффициента подобия, тогда как прогиб целесообразно рассчитывать по коэффициенту подобия по напряжениям, поскольку напряжённое состояние конструкции в этот момент ещё преимущественно соответствует упругой работе конструкции.

После образования трещин, когда конструкция переходит в область нелинейного деформирования с выраженным разномодульным поведением, как нагрузка, так и прогиб должны определяться исключительно по комплексному коэффициенту подобия, который учитывает изменение жёсткостных характеристик элемента. Средняя погрешность в момент образования трещин по трём точкам измерения составляет 5,4 % по нагрузке и 6,27 % по прогибу, что не превышает допустимых значений и подтверждает корректность масштабного перехода на данной стадии. После образования трещин средняя погрешность составляет 3,87 % по нагрузке и 7,22 % по прогибу, что ещё раз подтверждает адекватность предложенного комплексного критерия подобия и его применимость для определения напряжённо-деформированного состояния натуральных железобетонных балок.

Помимо оценки по первой группе предельных состояний, характеризующей несущую способность конструкции, в настоящем исследовании выполнена оценка по второй группе предельных состояний, которая отражает эксплуатационную пригодность железобетонного элемента, включая жёсткостные характеристики, прогибы и ширину раскрытия трещин.

Картина трещинообразования и графиков зависимости ширины раскрытия трещин от нагрузки для натуральных и модельных железобетонных балок показал, что в физической модели предельная ширина раскрытия трещин достигается пред разрушением, что подтверждает

возможность моделирования предельного состояния по трещиностойкости при расширенном физическом моделировании.

По критерию подобия нагрузки, установлено, что для натурной железобетонной балки критическая нагрузка по второй группе предельных состояний составляет 155,11 кН, следовательно, эквивалентная нагрузка для физической модели с учетом комплексного коэффициента подобия определяется равной 13,07 кН.

На основании уравнений аппроксимации усреднённых экспериментальных зависимостей ширины раскрытия трещин от нагрузки для натурных и модельных железобетонных балок предлагается эмпирическая формула в условиях статического нагружения.

Для натурной конструкции зависимость имеет вид

$$y = 400,38 \cdot x + 35. \quad (6)$$

Для физической модели

$$y = 61,88 \cdot x + 2,53, \quad (7)$$

где $35 - F_{crc}^H$ – нагрузка трещинообразования натурной железобетонной балки;
 $2,53 - F_{crc}^M$ – нагрузка трещинообразования физической модели балки;
 $x - a_{crc}^H, a_{crc}^M$ – ширина раскрытия трещин натурной и модельной железобетонной балки;
 $y - F_H$ – приложенная нагрузка на натурную балку, определяемая как функция ширины раскрытия трещин;
 $y - F_M$ – приложенная нагрузка на модельную балку, определяемая как функция ширины раскрытия трещин.

После подстановки (x) и (y) соответствующими величинами получены следующие уравнения.

Для натурной конструкции

$$F_H = 400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^H. \quad (8)$$

Для модельной конструкции

$$F_M = 62 \cdot a_{crc}^M + F_{crc}^M. \quad (9)$$

Разделив выражение (9) на (8), получим следующую зависимость:

$$\frac{F_M}{F_H} = \frac{62 \cdot a_{crc}^M + F_{crc}^M}{400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^H}, \quad \frac{F_M}{F_M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}} = \frac{62 \cdot a_{crc}^M + F_{crc}^M}{400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}},$$

$$400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um} = 62 \cdot a_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um} + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}, \quad (10)$$

$$a_{crc}^M = \frac{400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um} - F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}}{62 \cdot k_L^2 \cdot k_{um}}, \quad a_{crc}^M = \frac{400 \cdot a_{crc}^H}{62 \cdot k_L^2 \cdot k_{um}}.$$

Подставляя нормативное предельное значение ширины раскрытия трещин натурной конструкции и соответствующих коэффициентов подобия в полученную эмпирическую зависимость (10), определяем предельную ширину раскрытия трещин для модели железобетонной балки.

$$a_{crc}^M = \frac{400 \cdot a_{crc}^H}{62 \cdot k_L^2 \cdot k_{um}} = \frac{400 \cdot 0,3}{62 \cdot 4^2 \cdot 0,754} = 0,16 \text{ мм}. \quad (11)$$

Расчётное значение, определённое по зависимости (11), сопоставлено с усреднёнными экспериментальными величинами ширины раскрытия трещин в модельных железобетонных балках. При обеспечении подобия действующей нагрузки и применении соответствующих коэффициентов подобия отклонение расчётных данных от экспериментальных значений составило 5,88%. Данная величина погрешности свидетельствует о достаточной точности

предлагаемого подхода и подтверждает корректность масштабного перехода по критерию трещиностойкости.

Таким образом, полученные нами результаты обосновывают возможность применения разработанной эмпирической зависимости для оценки предельной ширины раскрытия трещин при физическом моделировании изгибаемых железобетонных балок.

Переход от значений изгибающих моментов физической модели к параметрам натурной конструкции выполнен с использованием коэффициентов подобия по напряжениям и деформациям, а также разработанного комплексного коэффициента подобия. Применение комплексного коэффициента подобия обеспечило более точный перенос расчётно-прогнозных параметров от физической модели к натурной конструкции. Полученное соответствие расчётно-прогнозных и экспериментальных данных подтверждает обоснованность предложенного коэффициента при оценке работы изгибаемых железобетонных элементов.

Результаты моделирования изгибающих моментов и сопоставления полученных значений с натурными данными на основе комплексного коэффициента подобия представлены в табл. 7.

Таблица 7. – Моделирование изгибающих моментов на основе комплексного коэффициента подобия

Средний экспериментальный изгибающий момент в модельной балке, кН*м	Комплексный коэффициент подобия	Эквивалентный изгибающий момент для натурной балки, кН*м	Средний экспериментальный изгибающий момент в натурной балке, кН*м	Погрешность по критерию подобия изгибающих моментов
M_m	k_{um}	$M_n = M_m \cdot k_L^3 \cdot k_{um}$	M_n	%
0.59	0.818	30.89	32.38	4.61
2.84	0.754	137.05	143.48	4.48
4.17	0.717	191.35	176.81	-8.23
4.40	0.710	199.94	203.09	1.55
4.56	0.706	206.04	214.89	4.12

Анализ результатов по критерию подобия нагрузки с использованием комплексного коэффициента подобия показал высокую степень соответствия расчётных и экспериментальных значений. На основании полученных данных установлено, что комплексный коэффициент подобия может быть использован для обеспечения соответствия изгибающих моментов на основных стадиях работы железобетонного элемента – от упругой стадии до стадии разрушения. Данный подход обеспечивает высокую точность масштабного перехода и корректное отражение силового поведения изгибаемых железобетонных конструкций в условиях физического моделирования. При использовании комплексного коэффициента подобия средняя погрешность перехода на всех стадиях работы конструкции составляет 4,6%, что подтверждает его высокую эффективность и обеспечивает требуемую точность при моделировании изгибающих моментов железобетонных элементов.

Выполненный анализ подтвердил корректность разработанной методики перехода от усреднённых экспериментальных данных физической модели к параметрам натурной железобетонной балки. Установлено, что использование комплексного коэффициента подобия, учитывающего силовые и деформационные характеристики, обеспечивает требуемую точность масштабного перехода на всех стадиях работы элемента – от упругой до разрушения. Сравнение результатов показало допустимые значения погрешности, что свидетельствует о достоверности предложенного подхода и возможности его применения для оценки напряжённо-деформированного состояния изгибаемых железобетонных конструкций в условиях физического моделирования.

3.9. Техничко – экономическая оценка экспериментальных исследований натуральных и модельных конструкций. Выполненная технико-экономическая оценка показала, что применение модельных железобетонных балок позволяет существенно снизить затраты на проведение экспериментальных исследований. Суммарные затраты на изготовление трёх

модельных образцов составили 2,19% от затрат на изготовление натуральных балок, что подтверждает экономическую эффективность физического моделирования при сохранении достоверности получаемых результатов.

Четвёртая глава «ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ» посвящена подтверждению достоверности экспериментальных данных путём физически нелинейного моделирования натурной и модельной железобетонных балок в ПК ЛИРА–САПР 2022. Расчёты выполнены с использованием стержневых и объёмных конечно–элементных моделей с пошаговым приложением нагрузки, при этом физическая нелинейность бетона и арматуры учитывалась на основе фактических экспериментальных данных, полученных при испытании контрольных образцов материалов [б–А]. Структура главы включает десять параграфов и завершается выводами.

В параграфах 4.1–4.2 изложены общие положения численного моделирования строительных конструкций и приведены характеристики материалов, использованные при расчёте натуральных и модельных железобетонных балок. На основе экспериментальных диаграмм деформирования бетона и арматуры сформированы исходные данные для физически нелинейного расчёта в ПК ЛИРА–САПР 2022.

В параграфах 4.3–4.6 представлены результаты численного исследования натурной железобетонной балки при стержневом и объёмном моделировании. Установлено, что стержневое моделирование натурной железобетонной балки в физически нелинейной постановке с применением конечного элемента КЭ210 и метода последовательных приближений (итерационный метод) позволяет получить параметры напряжён–деформированного состояния, близкие к экспериментальным данным.

Распределение трещин в натурной железобетонной балке при объёмном моделировании и изополя напряжений при нагрузке 260 кН представлены на рис. 22 и 23.

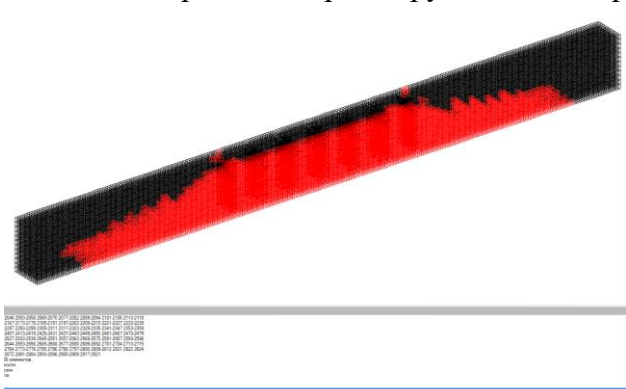


Рисунок 22. Картина распределения трещин натурной железобетонной балки

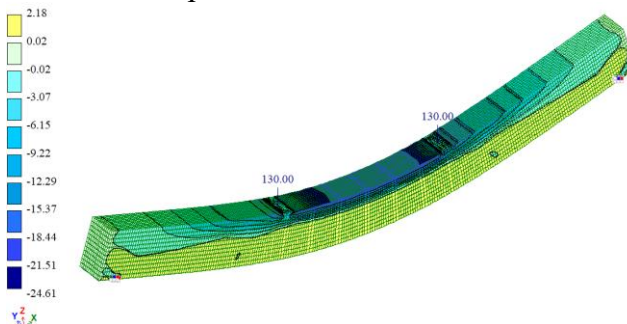


Рисунок 23. Изополя напряжений N_x (МПа) при нагрузке $P_{ult} = 260$ кН

Зависимости прогиба в середине пролёта балки и ширины раскрытия трещин от нагрузки, полученные по результатам численного моделирования натуральных железобетонных балок, в сопоставлении с экспериментальными данными представлены соответственно на рис. 24 и 25.

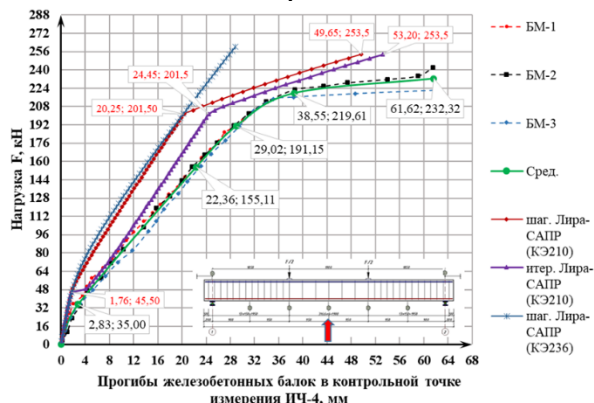


Рисунок 24. Зависимость прогиба от нагрузки в сходственной точке ИЧ–4

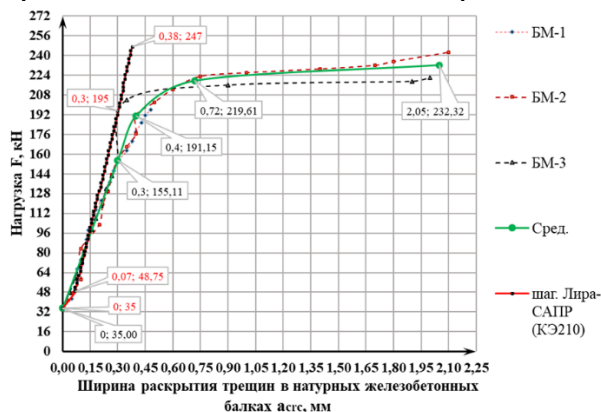


Рисунок 25. График зависимости ширины раскрытия трещин от нагрузки

В параграфах 4.7–4.10 приведены результаты численного исследования модельной железобетонной балки с использованием стержневых и объёмных конечно–элементных моделей. Показано, что нелинейное объёмное моделирование модельной балки с применением конечного элемента КЭ236 и метода последовательных нагружений (шаговый метод) нагружения позволяет получить параметры напряжённо–деформированного состояния, хорошо согласующиеся с результатами экспериментальных испытаний.

Картина распределения трещин в модельной железобетонной балке при объёмном моделировании и изополю напряжений при нагрузке 19,74 кН представлены на рис. 26 и 27.



Рисунок 26. Картина распределения трещин модельной железобетонной балки

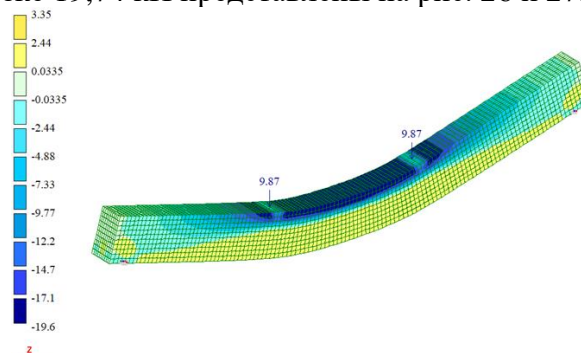


Рисунок 27. Изополю напряжений N_x (МПа) при нагрузке $P_{ult}=19,74\text{кН}$

Зависимости прогиба в середине пролёта балки и ширины раскрытия трещин от нагрузки, полученные по результатам численного моделирования модельных железобетонных балок, в сопоставлении с экспериментальными данными представлены на рис. 28 и 29.

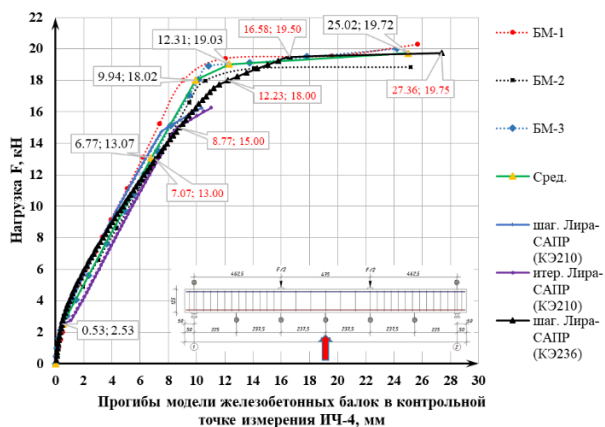


Рисунок 28. Зависимость прогиба от нагрузки в сходственной точке ИЧ–4

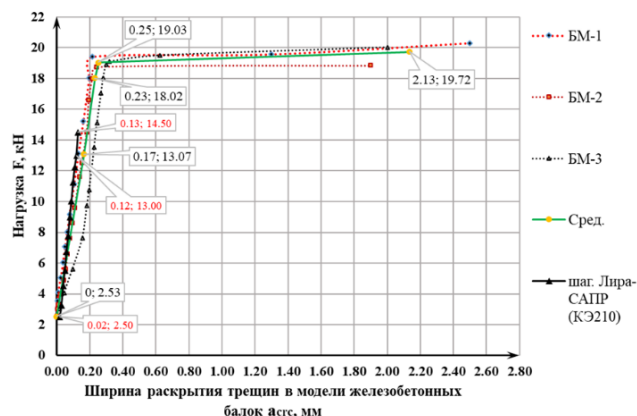


Рисунок 29. График зависимости ширины раскрытия трещин от нагрузки

Проведённые численные исследования натурной и модельной железобетонных балок показали, что учёт неоднородности бетона и совместной работы бетона с арматурой остаётся актуальной задачей совершенствования расчётных моделей. При этом численное моделирование не заменяет экспериментальное исследование, а служит инструментом проверки, уточнения и объяснения особенностей работы конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию железобетонных балок методами физического моделирования на основе теории подобия. В работе проведены натурные и модельные испытания железобетонных балок, выполнен анализ их напряжённо–деформированного состояния, трещинообразования, прогибов и несущей способности на различных стадиях нагружения.

На основе полученных экспериментальных данных обоснованы критерии и коэффициенты подобия, обеспечивающие переход от параметров физической модели к натурной железобетонной конструкции. Установлено, что достоверное моделирование работы изгибаемых железобетонных элементов требует учёта как силовых, так и деформационных критериев подобия, особенно после образования трещин и изменения жёсткости конструкции.

Численное моделирование в ПК ЛИРА–САПР 2022 подтвердило согласованность расчётных и экспериментальных результатов, а также возможность применения физически нелинейных стержневых и объёмных конечно–элементных моделей для анализа работы натурных и модельных железобетонных балок. Полученные результаты имеют научную и практическую значимость и могут быть использованы при экспериментальных исследованиях, физическом моделировании и верификации расчётных моделей железобетонных конструкций.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработана структурная схема физического моделирования железобетонных конструкций на основе принципов теории подобия, позволяющая систематизировать процесс моделирования и повысить обоснованность прогнозирования напряжённо–деформированного состояния железобетонных элементов.

2. В качестве базового объекта для проверки масштабного перехода использованы результаты натурных испытаний железобетонных балок, по которым определены стадии НДС работы конструкции: образование трещин, достижение предельной ширины их раскрытия, нелинейное деформирование и разрушение. Указанные уровни приняты как эталонные при сопоставлении с прогнозной оценкой работы натурной балки, полученной по данным модельных испытаний с соблюдением принципов теории подобия.

3. Установлено, что после образования трещин железобетонная балка переходит в область нелинейного деформирования с изменением жёсткости сечения, поэтому перенос нагрузки и прогиба целесообразно выполнять по предлагаемому комплексному коэффициенту подобия. Средняя погрешность масштабного перехода в момент образования трещин составила 5,40 % по нагрузке и 6,27 % по прогибу, а после образования трещин – соответственно 3,87 % и 7,22 %. Полученные значения подтверждают корректность применения комплексного коэффициента подобия для прогнозной оценки работы натурной железобетонной балки от упругой стадии до стадии разрушения на основе данных модельных испытаний.

4. Экспериментально установлено, что использование комплексного коэффициента подобия при определении эквивалентного изгибающего момента натурной железобетонной балки обеспечивает среднюю погрешность масштабного перехода 4,6% на всех рассматриваемых стадиях работы конструкции.

5. Установлено, что предельная ширина раскрытия трещин 0,30 мм, принимаемая в качестве предельно допустимой для натурных железобетонных конструкций, не может быть без соответствующего масштабного пересчёта применена к модельным балкам, поскольку при масштабе моделирования 1:4 указанная величина соответствует стадии предельного состояния и фактически характеризует разрушение элемента. В связи с этим обоснована необходимость моделирования ширины раскрытия трещин как отдельного параметра напряжённо–деформированного состояния модельной железобетонной балки.

6. На основе выявленной экспериментальной закономерности, изложенной в пункте 5, предложена эмпирическая зависимость для определения эквивалентной ширины раскрытия трещин в модельных железобетонных балках. Установлено, что предельному значению

ширины раскрытия трещин для модельных железобетонных балок в рамках диссертационной работы соответствует величина 0,16 мм; при этом погрешность относительно экспериментальных данных составила 5,88 %.

7. Техничко–экономическая оценка показала, что применение модельных железобетонных балок обеспечивает существенное снижение затрат на проведение экспериментальных исследований. Согласно выполненному сметному расчёту в рамках данной диссертационной работы, суммарные затраты на изготовление модельных образцов составляют 2,19% от затрат на изготовление натуральных балок, что подтверждает экономическую эффективность физического моделирования при сохранении научной достоверности получаемых результатов.

8. Установлено, что применение стержневого КЭ210 и объёмного КЭ236 при нелинейном численном моделировании соответственно натуральных и модельных железобетонных балок с учётом фактических характеристик материалов обеспечивает получение параметров напряжённо–деформированного состояния, близких к экспериментальным данным. Использование метода последовательных приближений в стержневой модели натурной балки и метода последовательных нагружений в объёмной модели модельной балки позволило достоверно отразить работу конструкций в физически нелинейной постановке.

9. Численным методом подтверждена достоверность разработанной эмпирической формулы для прогнозирования ширины раскрытия трещин в натуральных железобетонных балках по данным модельных испытаний. Полученные результаты подтверждают возможность применения данной зависимости для оценки трещиностойкости конструкций при физическом моделировании.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенные в диссертационной работе материалы и методики позволяют исследовать железобетонные конструкции в модельном виде при соблюдении принципов теории подобия с целью прогнозирования напряжённо–деформированного состояния натурной конструкции. Разработанный подход может быть использован для изучения работы узлов монолитных железобетонных конструкций, а также элементов, поведение которых не имеет точного аналитического решения.

Методика проведения модельных испытаний железобетонных балок, а также порядок определения физико–механических характеристик бетона и арматуры могут быть использованы при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Железобетонные конструкции», а также при выполнении научно–исследовательских работ в области экспериментального изучения строительных конструкций.

Предложенные подходы к физически нелинейному численному расчёту методом последовательных нагружений (шаговым методом) и методом последовательных приближений (итерационным методом), могут быть использованы при обследовании зданий и сооружений для оценки фактического состояния конструкций на основе проверочных расчётов с учётом действующих нагрузок.

С учётом роста численности населения Республики Таджикистан, увеличения доли городского населения, необходимости рационального использования земельных участков и высокой сейсмической активности территории при разработке проектных решений для уникальных, высотных, многопролётных и ответственных зданий и сооружений, на предпроектной стадии испытание физических моделей на основе принципов теории подобия является перспективным направлением. Особое значение предлагаемой методики позволяет предварительно оценить напряжённо–деформированное состояние, характер работы конструктивной системы и обоснованность принимаемых проектных решений в условиях плотной городской застройки и повышенных требований к сейсмостойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабужев П. М., Геронимус В. В., Минкевич Л. М., Шеховцов Б. А. Теория подобия и размерностей. Моделирование. М.: Высш. шк., 1968. 206 с.
2. Амаян Р.О. Некоторые задачи статистического моделирования строительных конструкций: автореф. дис. канд. техн. наук. – Ереван: Ереванский политехнический институт, 1969. – 20 с.
3. Архипов В. А., Березиков А. П. Основы теории инженерно–физического эксперимента. Томск: Томск политехнич. ун–т, 2008. 206 с.
4. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1984 – 439 с.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.
6. Иванов И.Е., Ерещенко В.Е. Методы подобия физических процессов: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2015.– 144 с.
7. Иванов М.Г. Размерность и подобие: учеб. пособие. – Долгопрудный, 2013. – 68 с.
8. Кирпичев М.В. Теория подобия – М.: 1953. – 94 с.
9. Клайн С. Дж. Подобие и приближённые методы. – М.: Мир, 1968. – 302 с.
10. Крамаренко Н.В. Методы подобия в механике. Анализ уравнений: учебное пособие – Новосибирск: Изд–во НГТУ, 2018. – 124 с.
11. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. Новосибирск: Изд–во СО РАН, 1986. 295 с.
12. Мастаченко В.Н. О переходе от параметров модели к параметрам оригинала. – Труды МИИТ, №369, 1971.
13. Мастаченко В.Н. Надежность моделирования строительных конструкций. –М.: Стройиздат, 1974. – 84 с.
14. Мастаченко В.Н. К вопросу вычисления вероятности подобия при моделировании конструкций. – Труды МИИТ, №427, 1973 – с.78–83.
15. Монахенко Д.В. Предельная теорема аффинности и ее применение при моделировании задач строительной механики. – Л.: Изд–во ЛИИЖТа, 1968.–с. 173–179.
16. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. – Ереван: Изд–во АН Арм. ССР, 1965. – 303 с.
17. Назаров А. Г. О механическом подобии твёрдых тел и его применении к исследованию строительных конструкций и сейсмостойкости сооружений. Сообщение. – Известия АН Армянской ССР. Сер. технических наук. 1961. Т. XIV, № 1. С. 1–16.
18. Назаров А.Г., Шагинян С.А. Руководство по исследованию механических свойств строительных конструкций на моделях. Издательство АН АрмССР, Ленинакан. 1966.
19. Новицкий В.В. Экспериментальные исследования строительных конструкций на моделях методом муаров. – Л.: Стройиздат, "Моделирование строительных конструкций", 1971.
20. Покровский Г.И., Федоров И.С. Центробежное моделирование в строительном деле. –М.: Стройиздат, 1968.
21. Поляков Л.П., Файнбург В.М. Моделирование строительных конструкций. – К.: Будівельник, 1975. – 160 с.
22. Прис Б. В., Дэвис Д. Д. Моделирование железобетонных конструкций // Минск.: Высш. шк. – 1974.
23. Романов О.Я., Ходосов В.В. Моделирование при проектировании сложных технических систем. – СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2006. – 60 с.
24. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ СССР. – М.: Стройиздат, 1979. – 87 с.

25. Санников Р.Х. Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента: учебное пособие. – Уфа: УГНТУ, 2010. – 253 с.
26. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1987. – 447 с.
27. Стратегия развития строительной отрасли Республики Таджикистан на период до 2030 года, утверждённой постановлением Правительства Республики Таджикистан от 27 апреля 2022 г. № 203.
28. СНиП 82–02–95. Бетоны. Правила подбора состава. – М.: Минстрой России, 1995. – 48 с.
29. СНиП РТ 52–03–2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Душанбе: ГУП «Научно–исследовательский институт „Строительство и архитектура“», 2021. – 135 с.
30. Тарасов А.М., Бобров Ф.Ю., Пряхин Д.В. Применение физического моделирования при строительстве мостов и других сооружений // Вестник мостостроения. – 2007. – № 1. – С. 21–26.
31. Тирский Г.А. Анализ размерностей // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 7, № 6. – С. 82–87.
32. Тирский Г.А. Подобие и физическое моделирование // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 8. – С. 122–127.
33. Хантли Г. Анализ размерностей. М.: Мир, 1970. 176 с.
34. Чемодуров В.Т., Литвинова Э.В. Физическое и математическое моделирование строительных систем: учебное пособие. – Москва: ИНФРА–М, 2021. – 196 с. DOI: 10.12737/1014191.
35. Шаповалов Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкции. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
36. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
37. Эйгенсон Л.С. Моделирование. – М.: Советская наука, 1952 – 372 с.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан

[1–А]. **Махмадиев, У. М.** Экспериментальное исследование напряжённо деформированного состояния натуральных железобетонных балок / И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев // Светоч науки. – 2025. – № 2. – С. 29–41. – EDN WDXOAJ.

[2–А]. **Махмадиев, У. М.** Размерный анализ и критерии подобия в задачах моделирования железобетонных конструкций / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев // Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2025. – Т. 68, № 5. – С. 489–495. – EDN DAУРАК.

[3–А]. **Махмадиев, У. М.** Применение мелкозернистого бетона при физическом моделировании железобетонных конструкций / И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 4(68). – С. 177–183. – EDN OXYZNM.

[4–А]. **Махмадиев, У. М.** Экспериментальные исследования моделей железобетонных балок на основе теории подобия / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев [и др.] // Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2025. – Т. 68, № 6. – С. 578–587. – EDN HUCYС.

[5–А]. **Махмадиев, У. М.** Экспериментальные исследования железобетонных балок с целью определения коэффициентов подобий. // Политехнический вестник. (серия инженерные исследования) – №2–(58) 2022, – Душанбе: Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, 2022. – 164 с. – С. 132–142, ISSN 2520–2227.

[6–А]. **Махмадиев, У. М.** Применение нелинейного закона деформирования бетона в ПК ЛИРА–САПР 2022 на основе результатов экспериментальных исследований / У. М. Махмадиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2026. – № 1(73). – С. 239–246. – DOI 10.65599/ENG7748. – EDN CCBAVD.

Статьи в материалах конференции и других журналов

[7–А]. **Махмадиев, У. М.** О моделировании железобетонной балки. // международный научный журнал «Молодой ученый» №48 (443), декабрь 2022 г. (стр. 31–38) , URL: <https://moluch.ru/archive/443/97222/> ISSN 2072–0297.

[8–А]. **Махмадиев, У. М.** Экспериментальные исследования модели железобетонных балок [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60–летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. – С. 213–216.

[9–А]. **Махмадиев, У. М.** Теоретические основы и инженерное применение теории подобия при моделировании строительных конструкций / И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев, И. И. Каландарбеков // Наука–основа инновационного развития : Материалы X Международной научно–практической конференции, Душанбе, 17–18 апреля 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 163–168. – EDN SFNZOO.

Патенты, авторские свидетельства и государственная регистрация информационных ресурсов

[10–А]. **Махмадиев, У. М.** Стенд для моделирования сейсмических воздействий на физические модели зданий и сооружений [Текст]/ Махмадиев У.М., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Малый патент Республики Таджикистан №1453, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан от 04.12.2023 г.

ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

ВБД 624.012.45 (575.3)

Бо ҳуқуқи дастнавис



МАҲМАДИЗОДА Усмоналӣ Муродалӣ

**ТАҲҚИҚОТИ ТАҶРИБАВИИ БОЛОРҶОИ ОҶАНУБЕТОНӢ БО ИСТИФОДА
АЗ МЕТОДҶОИ МОДЕЛКУНОНИИ ФИЗИКӢ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т И

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа (PhD),
доктор аз рӯи ихтисоси 6D072900 – Сохтмон (6D072902 – Конструксияҳои
сохтмонӣ, биноҳо ва иншоот)

Душанбе – 2026

Диссертатсия дар кафедраи «Сохтмони саноатӣ ва шахрванди»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ иҷро шудааст.

Роҳбари илмӣ **Қаландарбеков Имомёрбек,** корманди шоистаи Тоҷикистон, доктори илмҳои техникӣ, профессори кафедраи «Сохтмони саноатӣ ва шахрванди»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

Муқарризони расмӣ: **Филатов Владимир Владимирович,** доктори илмҳои техникӣ, дотсент, директори Институти технологияҳои рақамӣ ва моделсозӣ дар сохтмони Донишгоҳи миллии таҳқиқоти давлатии сохтмони Москва, ш. Москва, Федератсияи Русия.

Хотамов Асадулла Тоштемирович, доктори илмҳои техникӣ, профессор, мудири кафедраи «Инфрасохтори шаҳри»-и Донишгоҳи меъморӣ-сохтмони Тошканд, ш. Тошканд, Ҷумҳурии Ўзбекистон.

Муассисаи пешбар **Донишгоҳи давлатии техникии Намангон,** ш. Намангон, Ҷумҳурии Ўзбекистон.

Ҳимояи диссертатсия санаи «15» сентябри соли 2026, соати 9:00 дар ҷаласаи шурои диссертатсионии 6D.КOA–027 назди Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ бо суроғаи: 734042, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10^А, баргузор мегардад. E-mail: dis.sia@mail.ru

Бо матни диссертатсия дар китобхонаи илмии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ ва дар сомонаи расмӣ донишгоҳ бо нишони www.ttu.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферати диссертатсия санаи «__» _____ соли 2026 фиристода шуд.

Котиби илмии
шурои диссертатсионӣ,
доктори PhD



Шокиров Р.М.

МУҚАДДИМА

Мухимияти мавзӯ. Рушди муосири соҳаи сохтмони Ҷумҳурии Тоҷикистон, афзоиши ҳаҷми сохтмони шахрӣ, бунёди биноҳои баландошӯнаи синҷӣ ва ғаёлнокии баланди сейсмикии ҳудуди ҷумҳурӣ зарурати тақмили усулҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ ва асосноккунии ҳисобии қори констрuksияҳои борбардори оҳанубетониро ба миён овардааст. Дар чунин шароит усулҳои моделсозии физикӣ аҳамияти махсус пайдо намуда, имкон медиҳанд, ки қори констрuksияҳои сохтмонӣ ҳанӯз дар марҳилаи пешазлоиҳавӣ, бо истифода аз шароити назоратшавандаи озмоишгоҳӣ ва бо хароҷоти камтари моддию вақтӣ нисбат ба озмоишҳои асли мавриди омӯзиш қарор дода шавад.

Асоси илмии моделсозии физикиро назарияи монандӣ ва таҳлили андозавӣ ташкил дода, имконияти интиқоли натиҷаҳои озмоишҳои моделиро ба констрuksияҳои асли таъмин менамоянд. Бо вучуди ин, барои оҳанубетон, ки дорои сохтори ғайрираққинса мебошад, пайдоиши тарқишҳо ва хусусияти физикии шаклтағйирии ғайрихатӣ тавсиф гардида, таъмин намудани шартҳои монандӣ, махсусан дар марҳилаҳои баъди пайдоиши тарқишҳо ва тағйирёбии сахтии унсур хеле мураккаб мегардад.

Сарфи назар аз рушди технологияҳои ҳисоббарорӣ ва усулҳои таҳлили ададӣ, масъалаҳои интиқоли боэътимоди натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ ба констрuksияҳои асли оҳанубетонӣ то ҳол ҳалли пурраи худро наёфтаанд. Аз ҷумла, усулҳои муайян намудани зарифҳо ва меъёрҳои монандӣ, ки тағйирёбии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии констрuksияро дар марҳилаҳои гуногуни қори он ба ҳисоб мегиранд, ба таҳқиқоти минбаъда ниёз доранд.

Дар ин робита зарурати таҳияи методикаи аз ҷиҳати таҷрибавӣ асоснокшудаи моделсозии физикии констрuksияҳои оҳанубетонӣ ба миён меояд, ки интиқоли дурусти натиҷаҳои озмоишҳои моделиро ба констрuksияҳои асли аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ таъмин намояд.

Дарачаи қорқарди илмии мавзӯи таҳқиқот. Таҳқиқот дар соҳаи назарияи монандӣ давраи тӯлоии таърихро фаро гирифта, аз охири асри XIX оғоз меёбад. Маҳз дар ҳамин давра асосҳои бунёди назарияи монандӣ ва таҳлили андозавӣ ташаккул ёфтаанд. Дар рушди ин самти илмӣ олимони зерин саҳми назаррас гузоштаанд: П. М. Алабужев, В. В. Геронимус, Л. М. Минкевич, Б. А. Шеховцов [1], В. А. Архипов, А. П. Березиков [3], В. А. Веников, Г. В. Веников [4], М. В. Кирпичев [8], В. Н. Мастаченко [12–14], Д. В. Монахенко [15], А. Г. Назаров [16–18], В. В. Новитский [19], Г. И. Покровский, И. С. Федоров [20], Л. П. Поляков, В. М. Файнбург [21], Д. В. Пряхин [30], Л. И. Седов [26], Н. В. Крамаренко [10], Л. С. Эйгенсон [37], В. Т. Чемодуров, Э. В. Литвинова [34], А. А. Гухман [5], С. С. Кутателадзе [11], Г. А. Тирский [31, 32], М. Г. Иванов [7], И. Е. Иванов, В. Е. Ереценко [6], Л. А. Шаповалов [35], Х. Шенк [36], О. Я. Романов, В. В. Ходосов [23], Р. Х. Санников [25], Р. О. Амаян [2], Г. Хантли [33], С. Ч. Клайн [9], Б. В. Прис, Д. Д. Дэвис [22] ва дигар муҳаққикон.

Бояд қайд намуд, ки аксари таҳқиқоти дар ин соҳа амалигашта асосан ба ҷанбаҳои назариявии назарияи монандӣ ва тавсифи математикии равандҳо равона шудаанд, дар ҳоле ки санҷиши таҷрибавии зарифҳои монандӣ барои констрuksияҳои сохтмонӣ, махсусан унсурҳои оҳанубетонӣ то ҳол рушди маҳдуд дорад. Ин ҳолат ба раванди мураккаби муайян намудани шартҳои монандӣ дар шароити таҷрибавӣ вобаста буда, пеш аз ҳама аз хусусияти ғайрихаттии шаклтағйирии оҳанубетон, марҳилавии қори он ва таъсири падидаи микрос, вобаста мебошад.

Алоқамандии таҳқиқот бо барномаҳо ва мавзӯҳои илмӣ. Мавзӯи қори диссертатсия ба самтҳои афзалиятнокӣ рушди соҳаи сохтмон, инчунин ба равандҳои рақамикунонии лоиҳақашии констрuksияҳои сохтмонӣ робитаи бевосита дорад. Мубрамияти самти мазкур аз зарурати истифодаи усулҳои муосири моделсозии таҷрибавӣ ва ададӣ барои баланд бардоштани эътимоднокӣ ва самаранокии ҳалҳои лоиҳавӣ асоснок мегардад.

Самтҳои зикргардида дар Стратегияи рушди соҳаи сохтмони Ҷумҳурии Тоҷикистон барои давраи то соли 2030, ки бо қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 27 апрели соли 2022, № 203 тасдиқ гардидааст, муайян шудаанд [27]. Дар доираи стратегияи мазкур ба ҷорӣ

намудани технологияҳои инноватсионӣ, такмили усулҳои ҳисоб ва лоиҳакашии конструкцияҳои сохтмонӣ, инчунин рушди таҳқиқоти илмие, ки ба баланд бардоштани эътимоднокӣ ва дарозумрии конструкцияҳо равона шудаанд, диққати махсус дода шудааст.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқот асосноккунии илмӣ ва татбиқи таҷрибавии методикаи моделсозии физикии болорҳои оҳанубетонӣ мебошад, ки ба муайян намудани зарибҳо ва меъёрҳои монандӣ равона гардида, интиқоли боэътимоди параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйириро аз намунаҳои моделӣ ба конструкцияҳои асли таъмин менамояд.

Вазифаҳои таҳқиқот. Барои ноил гардидан ба мақсади гузошташуда вазифаҳои зерин пай дар пай ҳал карда шуданд:

1. Иҷро намудани таҳлили назариявии моделсозии физикии конструкцияҳои оҳанубетонӣ дар асоси назарияи монандӣ ва муайян намудани омилҳои асосии таъсиррасон ба ташаккули ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ, инчунин ба боэътимодии интиқоли натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ ба конструкцияҳои асли.

2. Гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавии болорҳои оҳанубетонии асли бо мақсади муайян намудани параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии онҳо ҳангоми боргузории статикӣ.

3. Дар асоси принципҳои назарияи монандӣ ва усулҳои таҳлили андозавӣ муайян намудани бузургҳои назариявие, ки монандии геометрӣ, механикӣ ва қуввавиरो тавсиф менамояд.

4. Гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавии болорҳои оҳанубетонии моделӣ ва муайян намудани хусусиятҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии онҳо дар нуқтаҳо ва буришҳои хос.

5. Муқаррар намудани қонуниятҳои тақсимшавии қувваҳои дохилӣ ва шаклтағйириҳо дар буришҳо ва нуқтаҳои хоси болорҳои асли ва моделӣ.

6. Муайян намудани доимиятҳои беандозаи монандӣ, ки интиқоли дурусти хусусиятҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйириро аз моделҳо ба болорҳои асли таъмин менамоянд.

7. Тартиб додани меъёрҳои монандие, ки имкони интиқоли боэътимоди натиҷаҳои моделсозии физикии болорҳои оҳанубетониро ба конструкцияҳои асли аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ фароҳам меоранд.

8. Иҷро намудани моделсозии ададии ғайрихаттии кори болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ бо усули унсурҳои ниҳой, бо назардошти хусусиятҳои воқеии масолеҳҳо, инчунин бо мақсади боэътимодии натиҷаҳои таҷрибавӣ гузаронидани таҳлили муқоисавӣ бо натиҷаҳои моделсозии ададӣ.

Объекти таҳқиқот болорҳои оҳанубетонии қатшаванда мебошанд, ки дар шароити боргузории статикӣ қор мекунанд ва ҳамчун системаҳои физикии дорои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии ғайрихатӣ баррасӣ мегарданд.

Предмети таҳқиқот муайян намудани меъёрҳо ва зарибҳои монандӣ мебошад, ки интиқоли боэътимоди параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйириро аз модели физикӣ ба болорҳои оҳанубетонии асли таъмин менамоянд.

Усулҳои таҳқиқот. Дар кори мазкур усулҳои назариявӣ, таҷрибавӣ ва адабии таҳқиқот истифода шудаанд. Қисми назариявӣ ба муқаррароти назарияи монандӣ ва механикаи ҷисми сахти шаклтағйирёбанда асос ёфтааст. Қисми таҷрибавӣ озмоишҳои болорҳои аслии оҳанубетонӣ ва моделҳои физикии онҳоро дар миқёси 1:4 ҳангоми боргузории статикӣ, бо бақайдгирии параметрҳои асосии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ дар бар мегирад. Таҳқиқоти ададӣ бо усули унсурҳои ниҳой дар барномаи ҳисобии ЛИРА-САПР 2022 бо назардошти ҳосияти физикии ғайрихатӣ масолеҳ, бо мақсади санҷиши боэътимодии натиҷаҳои таҷрибавӣ анҷом дода шудаанд.

Навгонии илмӣ таҳқиқот дар нуқтаҳои зерин ифода меёбад:

1. Дар таҳияи методикаи аз ҷиҳати таҷрибавӣ асоснокшудаи моделсозии физикии унсурҳои қатшавандаи оҳанубетонӣ, ки ба муқаррароти назарияи монандӣ асос ёфта, имкони

гузариш аз натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ ба параметрҳои кори конструксияи аслиро фароҳам меорад;

2. Дар пешниҳод намудани зареби маҷмуавии монандӣ, ки хусусияти ғайрихаттии шаклтағйирии бетон ва арматура, тағйирёбии сахтии буриш баъд аз пайдошавии тарқишҳо ва хусусияти марҳилавии кори болори оҳанубетониро ҳангоми боргузории статикӣ ба ҳисоб мегирад;

3. Дар асоси таҳқиқоти таҷрибавӣ муайян гардидани зарурати моделсозии микёсии паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо ҳамчун яке аз параметрҳои муайянкунандаи ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ; дар ин асос вобастагии эмпирикӣ барои интиқоли қиматҳои паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо аз болори моделӣ ба конструксияи асли ҳосил карда шудааст;

4. Асоснок намудани методикаи моделсозии ададии физикии ғайрихаттии болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ бо усули унсурҳои ниҳой, ки истифодаи диаграммаҳои кори воқеии шаклтағйирии бетон ва арматураро пешбинӣ менамояд.

Натиҷаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

1. Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии болори оҳанубетонии асли ҳангоми боргузории статикӣ аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ, ки ҳамчун заминаи эталонӣ барои тасдиқи боэътимодии интиқоли натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ истифода мешаванд; инчунин методикаи аз ҷиҳати назариявӣ ва таҷрибавӣ асоснокшудаи моделсозии физикии болорҳои оҳанубетонӣ, ки баҳодиҳии пешгӯии параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии конструксияи аслиро аз рӯи натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ таъмин менамояд.

2. Меъёрҳо ва зареби маҷмуавии монандӣ, ки интиқоли параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйириро аз болори оҳанубетонии моделӣ ба болори оҳанубетонии асли бо назардошти кори ғайрихаттии конструксия, аз ҷумла бор, моментҳои қатқунанда, ҳамишҳо ва паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо таъмин менамоянд.

3. Методикаи моделсозии ададии физикии ғайрихаттии болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ бо усули унсурҳои ниҳой дар барномаи ҳисобии ЛИРА-САПР 2022 бо назардошти хусусиятҳои воқеии бетон ва арматура, инчунин таҳлили муқоисавии натиҷаҳои ҳисобии ададӣ бо натиҷаҳои таҷрибавӣ.

Аҳамияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот. Натиҷаҳои аз ҷиҳати илмӣ асоснокшудаи бадастомада муқаррароти назарияи монандӣ ва таҳлили андозавиро нисбат ба моделсозии физикии болорҳои ҳамшавандаи оҳанубетонӣ ҳангоми боргузории статикӣ инкишоф медиҳанд. Меъёрҳои асоснокшуда ва зареби маҷмуавии монандӣ имкон медиҳанд, ки интиқоли параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ аз модели физикӣ ба конструксияи асли дар ҳудуди аз марҳилаи чандирии қор то марҳилаи вайроншавӣ иҷро карда шавад. Аҳамияти амалии таҳқиқот дар имконияти истифодаи методикаи таҳияшуда барои пешгӯии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ, арзёбии қобилияти кории болорҳои оҳанубетонӣ аз рӯи ҳолати ҳаддии дуюм, инчунин барои асоснок намудани натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ ҳангоми интиқоли онҳо ба конструксияҳои асли ифода меёбад.

Натиҷаҳои таҳқиқот метавонанд дар ташкилоти илмӣ таҳқиқотӣ, лоиҳакашӣ, озмоишгоҳҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ, инчунин дар раванди таълимии муассисаҳои таълимии самти сохтмон истифода шаванд.

Дарачаи боэътимодии натиҷаҳо. Дарачаи боэътимодии натиҷаҳои таҳқиқоти диссертатсионӣ бо истифодаи методикаи аз ҷиҳати назариявӣ асоснокшуда, ки ба муқаррароти назарияи оҳанубетон, механикаи сохтмонӣ ва назарияи монандӣ асос ёфтааст, муайян мегардад. Натиҷаҳои бадастомада тавассути муқоисаи натиҷаҳои озмоишҳои асли ва моделӣ, инчунин бо натиҷаҳои моделсозии ададии физикии ғайрихатӣ, ки бо усули унсурҳои ниҳой дар барномаи ҳисобии ЛИРА-САПР 2022 иҷро шудааст, тасдиқ гардидаанд.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Кори диссертатсионӣ ба шиносномаи ихтисоси илмӣ 6D072900 – Сохтмон, ки бо қарори Раёсати Комиссияи олии

аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 29 декабри соли 2020, №6 тасдиқ гардидааст, мутобиқат менамояд.

Таҳқиқот бандҳои зерини шиносномаи ихтисосро фаро мегирад:

6. Таҳия ва тақмили усулҳо ва механизмҳои арзёбии сифати конструксияҳои сохтмони биноҳо ва иншоот дар давраи сохтмон, истифодабарӣ, пурқуватсозӣ ва барқарорсозии онҳо;

22. Механикаи ҳаттӣ ва ғайриҳаттии конструксияҳо ва иншоот, ҳисоб ва таҳияи моделҳои физикию математикии онҳо;

24. Бо усулҳои ададӣ ҳисобкунии иншоот ва унсурҳои онҳо;

25. Назария ва усулҳои муносибгардонии иншоот.

Саҳми шахсии докторант дар натиҷаҳои илмии таҳқиқот аз интиҳоби объекти таҳқиқот, таҳияи методикаи моделсозии физикии болорҳои оҳанубетонӣ, омода намудан ва гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавии болорҳои оҳанубетонии аслӣ ва моделӣ, инчунин гирифтани натиҷаи озмоишҳо, коркард ва таҳлили онҳо иборат мебошад. Докторант аз рӯи мавзуи диссертатсия хулосаҳои илмиро тартиб дода, мақолаҳои илмиро омода намудааст.

Апробатсия ва татбиқ. Натиҷаҳои асосии таҳқиқоти таҷрибавӣ, назариявӣ ва ададӣ аз рӯи мавзуи кори диссертатсионӣ дар Конференсияи байналмилалии илмӣ-амалии «Меъморӣ ва шаҳрсозии Тоҷикистон: дирӯз – имрӯз – фардо» (ш. Душанбе, 2022) ва Конференсияи X байналмилалии илмӣ-амалии «Илм – асоси рушди инноватсионӣ» (ш. Душанбе, 2025) пешниҳод ва мавриди муҳокима қарор дода шудаанд.

Интишорот аз рӯи мавзуи диссертатсия. Муқаррароти асосӣ ва натиҷаҳои таҳқиқоти диссертатсионӣ дар 9 интишороти илмии муаллиф инъикос ёфтаанд, аз ҷумла 5 интишорот дар нашрияҳои илмии тақризишаванда, ки аз ҷониби Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон барои нашри натиҷаҳои асосии таҳқиқоти диссертатсионӣ тавсия гардидаанд, ба таъъ расидаанд. Ҷамчунин 1 мақола дар маҷаллаи илмии байналмилалӣ ва 3 мақола дар маҷмуаҳои маводи конференсияҳои илмӣ-амалӣ ва дигар нашрияҳои илмӣ нашр шудаанд. Аз шумораи умумии мақолаҳои нашргардида 6 интишорот ба Индекси иқтибосоварии илмии Русия дохил мебошанд. Барои рушди минбаъдаи таҳқиқот вобаста ба озмоиши моделҳои физикии конструксияҳои сохтмонӣ, биноҳо ва иншоот зери таъсирҳои динамикӣ «Стенд барои моделсозии таъсирҳои сейсмикӣ ба моделҳои физикии биноҳо ва иншоот» ихтироъ карда шуда, ба он патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон №1453 гирифта шудааст.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, тавсифи умумии қор, қор боб, хулоса, тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳо, рӯйхати адабиёт, рӯйхати интишороти асосӣ доир ба мавзуи диссертатсия ва замимаҳо иборат мебошад. Матни асосии диссертатсия то рӯйхати адабиёт дар 238 саҳифа баён гардидааст. Ҷаҳми умумии диссертатсия бе назардошти замимаҳо 253 саҳифа ва бо назардошти замимаҳо 282 саҳифаро ташкил медиҳад. Қор 151 расм, 61 қадвал ва 3 замимаро дар бар мегирад. Рӯйхати адабиёт 132 номгӯи осори муаллифони ватанӣ ва хориҷиро фаро мегирад.

МАЗМУНИ АСОСИИ ДИССЕРТАТСИЯ

Дар муқаддима муҳимияти мавзуи таҳқиқот ҳамчониба асоснок гардида, мақсад, вазифаҳо, объект ва предмети кори диссертатсионӣ муайян карда шудаанд. Ҷамчунин навгонии илмӣ, аҳамияти амалии таҳқиқот ва дараҷаи бозғатимодии натиҷаҳои бадастомада тавсиф гардида, муқаррароти асосии ба ҳимоя пешниҳодшаванда ифода ёфтаанд ва сохтори диссертатсия бо пай дар пайи мантиқии баёни мавод шарҳ дода шудааст.

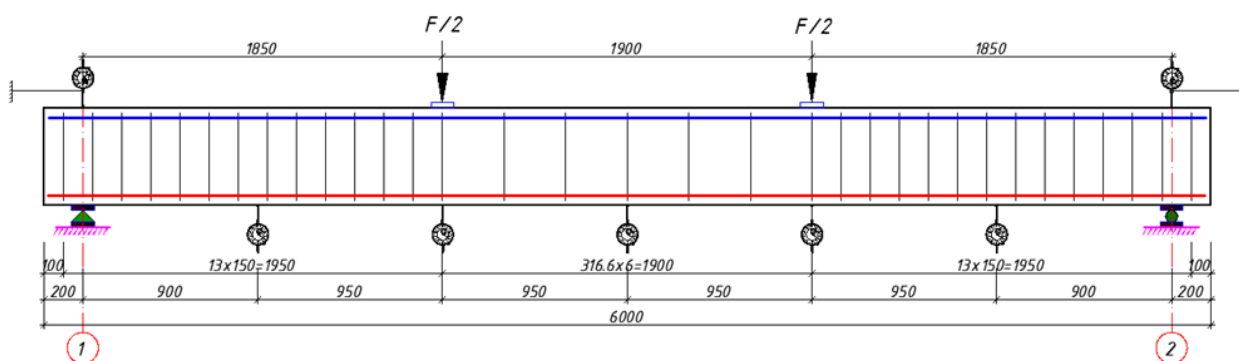
Дар боби якум – «ШАРҲ ВА ТАҲЛИЛИ УСУЛҲОИ МОДЕЛСОЗИИ ФИЗИКӢ ДАР ТАҲҚИҚОТИ ТАҶРИБАВИИ КОНСТРУКСИЯҲОИ ОҲАНУБЕТОНӢ» асосҳои назариявии моделсозии физикии конструксияҳои оҳанубетонӣ, таснифи моделҳо, мақсадҳои моделсозӣ ва нақши қорҳои озмоишӣ дар арзёбии кори конструксияҳои сохтмонӣ баррасӣ гардидаанд. Муқаррароти назарияи монандӣ ва таҳлили андозавӣ, аз ҷумла шартҳои монандии геометрӣ, физикӣ ва механикӣ, доимиятҳо, инвариантҳои монандӣ ва истифодаи π -теорема

шарҳ дода шудаанд [9–А]. Асоснок гардидааст, ки кори ғайрихаттии оҳанубетон, пайдоиши тарқишҳо ва тағйирёбии сахтии буриш, зарурати ба таври таҷрибавӣ дақиқ намудани меъёрҳо ва зарифҳои монандиро барои гузариши боэътимод аз болори моделӣ ба конструксияи аслиро ба миён овардааст [2–А].

Дар зербобҳои 2.1 ва 2.2 аҳамияти илмӣ ва зарурати амалии гузаронидани озмоишҳои болорҳои оҳанубетонӣ асли ҳамчун яке аз усулҳои боэътимоди арзёбии мустаҳкамӣ, сахтӣ, тарқиштоварӣ ва қобилияти истифодабарии онҳо асоснок карда шудаанд. Муқаррар гардидааст, ки натиҷаҳои озмоишҳои асли имкон медиҳанд натиҷаҳои эталонии таҷрибавӣ барои санҷиши натиҷаҳои моделсозии физикӣ ва ададӣ, инчунин барои арзёбии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ конструксия дар марҳилаҳои гуногуни боргзорӣ ба даст оварда шаванд. Мақсад ва вазифаҳои таҳқиқоти болорҳои оҳанубетонии асли муайян гардидаанд, ки таҳияи ҳалли конструктивӣ, схемаи озмоиш, тайёр намудани намунаҳои таҷрибавӣ, муайян кардани хусусиятҳои физикию механикии масолеҳ ва таҳлили натиҷаҳои таҷрибавии бадастомадаро дар бар мегиранд.

Дар зербоби 2.3 маълумот оид ба тайёр намудани болорҳои оҳанубетонии асли, инчунин омодаسازی онҳо барои гузаронидани озмоишҳо пешниҳод гардидааст. Ба сифати объектҳои озмоишӣ се болори оҳанубетонии асли бе шиддати пешакӣ БМ-1–БМ-3 аз бетони синфи лоиҳавии В25, бо дарозии 6000 мм ва буриши кӯндалангии 300×500 мм тайёр карда шуданд. Армураи кории минтақаи кашишбанд дар шакли се милаи Ø20 А500, армураи конструктивии минтақаи фишурдашаванда – дар шакли ду милаи Ø14 А500 ва армураи кӯндаланг – аз милаҳои Ø8 А240 қабул гардидааст.

Болорҳои оҳанубетонии асли дар шароити майдони сохтмон бо истифодаи масолеҳи дар бунёди конструксияҳои оҳанубетонии монолитӣ истифодашаванда тайёр карда шудаанд. Схемаи ҳисобии болорҳои оҳанубетонии асли дар расми 1 оварда шудааст.

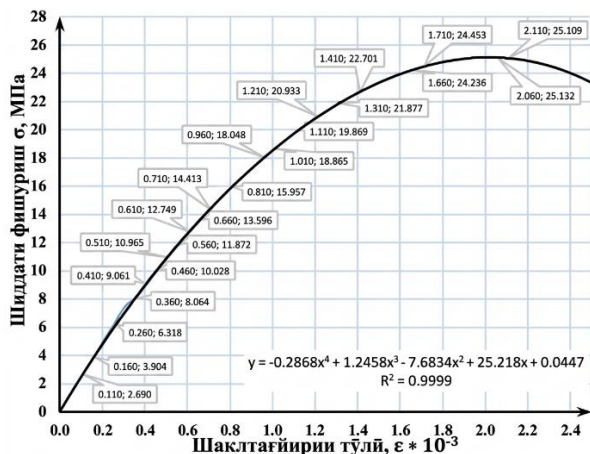


Расми 1. Схемаи ҳисобии болорҳои оҳанубетонии асли

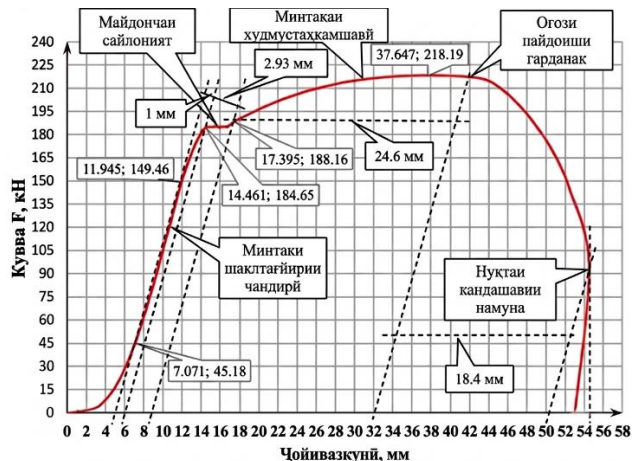
Дар зербоби 2.4 маълумот оид ба тайёр намудани намунаҳои назоратӣ барои муайян кардани хусусиятҳои мустаҳкамӣ ва шаклтағйирӣ масолеҳ оварда шудааст. Барои арзёбии хусусиятҳои физикию механикии бетоне, ки ҳангоми тайёр намудани болорҳои оҳанубетонии асли истифода шудааст, аз ҳамон таркиби омехтаи бетон намунаҳои назоратӣ омода карда шуданд: кубҳо бо андозаи тегаи 100 мм барои муайян намудани мустаҳкамӣ ҳангоми фишурдашавӣ ва призмаҳо бо андозаҳои 100×100×400 мм барои муайян намудани модули чандирӣ, зарифи Пуассон ва шаклтағйирҳои ҳаддӣ. Дар маҷмӯъ 4 куб ва 3 призма тайёр ва озмоиш карда шуданд.

Озмоиши кубҳои бетонӣ ва армураҳо дар озмоишгоҳи «Масолеҳ, маснуот ва конструксияҳои сохтмонӣ»-и КВД «Пажӯҳишгоҳи илмию таҳқиқотии «Сохтмон ва меъморӣ», озмоиши призмаҳои бетонӣ бошад, дар озмоишгоҳи кафедраи «Сохтмони саноатӣ ва шаҳрвандӣ»-и факултети сохтмон ва меъморӣ Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М. С. Осимӣ гузаронида шуданд.

Диаграммаҳои шаклтағйирӣ призмаи бетонӣ ва армураи кории болори оҳанубетонии асли мутаносибан дар расмҳои 2 ва 3 оварда шудаанд.



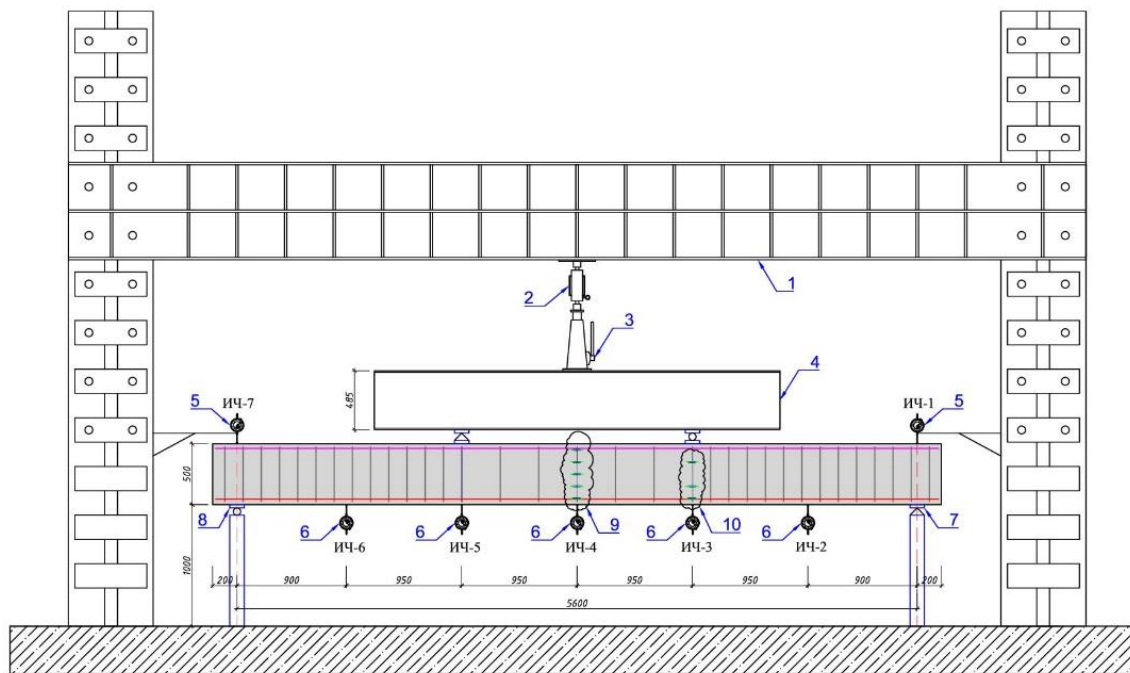
Расми 2. Диаграммаи шаклтағйири призмаи бетони болори оҳанубетони асли



Расми 3. Диаграммаи кашиши арматураи кори болори оҳанубетони асли

Дар зербоби 2.5 методикаи озмоиши се болори оҳанубетони асли пешниҳод шудааст. Озмоишҳо дар озмоишгоҳи «Ба зилзила тобоварии биноҳо ва иншоот»-и Институти геология, сохтмони ба зилзила тобовар ва сейсмологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон гузаронида шудаанд. Болорҳо ҳамчун унсурҳои якравоқа бо арматураи бе шиддати пешақӣ таҳти таъсири ду қувваи мутамарказ, ки нисбат ба миёнаи равоқ дар масофаи 950 мм ба таври симметрии ҷойгир шудаанд, озмоиш карда шуданд.

Схемаи стени озмоишӣ ва ҷойгиркунии асбобҳои ченкунанда дар расми 4 оварда шудааст.

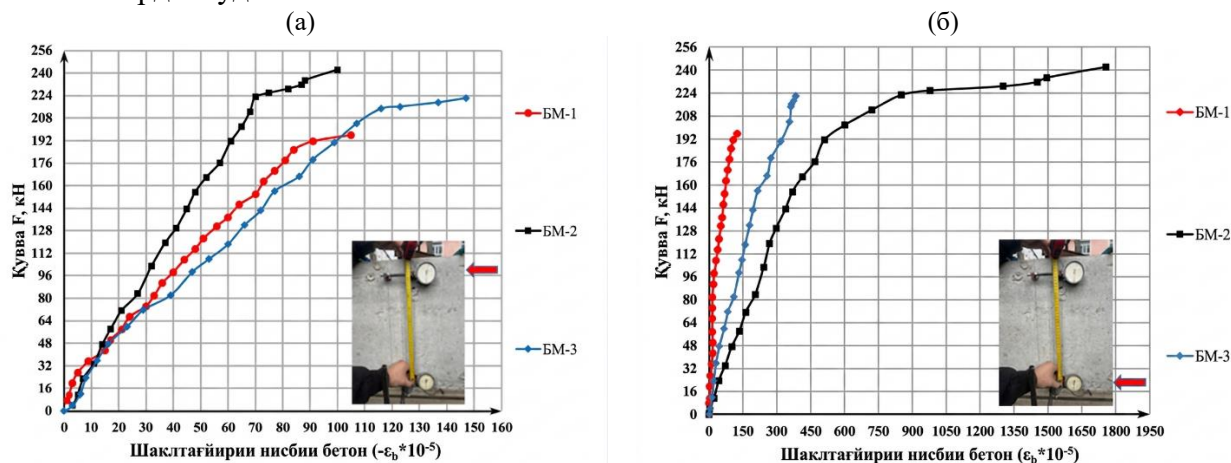


1 – стени барои озмоиши конструкцияҳои сохтмонӣ, 2 – динамометри ДОС-100, 3 – домкрати механикии винтии TOR-50, 4 – тақсимкунандаи бор, дутавр №50Ш1, 5 – хамишсанҷи соати ИЧ-50 барои чен намудани нишастаи тақиягоҳҳо, 6 – хамишсанҷи соати ИЧ-50 барои чен намудани ҷойивазкуниҳо дар минтакаи равоқӣ, 7 – тақиягоҳи шарнирии беҳаракат, 8 – тақиягоҳи шарнирии ҳаракаткунанда, 9 – тензорезисторҳои навъи ПКБ бо базаи 50 мм барои чен намудани шаклтағйириҳои нисбӣ аз рӯи баландии буриш дар минтакаи миёнаи болор, 10 – тензорезисторҳои навъи ПКБ бо базаи 50 мм барои чен намудани шаклтағйириҳои нисбӣ аз рӯи баландии буриш дар минтакаи гузориши бор.

Расми 4. Схемаи стени озмоишӣ ва ҷойгиркунии асбобҳои ченкунанда ҳангоми озмоиши болорҳои оҳанубетони асли

2.6. Натиҷаҳои озмоиши таҷрибавии болорҳои оҳанубетони аслии БМ-1–БМ-3. Бо назардошти ғайриҷинса будани оҳанубетон ва эҳтимоли парокандагии натиҷаҳои таҷрибавӣ, озмоишҳо дар се болори аслии БМ-1–БМ-3 гузаронида шуданд. Натиҷаҳои ҳар як болор

Вобастагии қувваи таъсиркунанда аз шаклтағйирҳои нисбии бетон дар минтақаҳои фишурдашаванда ва кашишбанди силсилаи болорҳои оҳанубетонии БМ-1, БМ-2 ва БМ-3 дар расми 8 оварда шудааст.



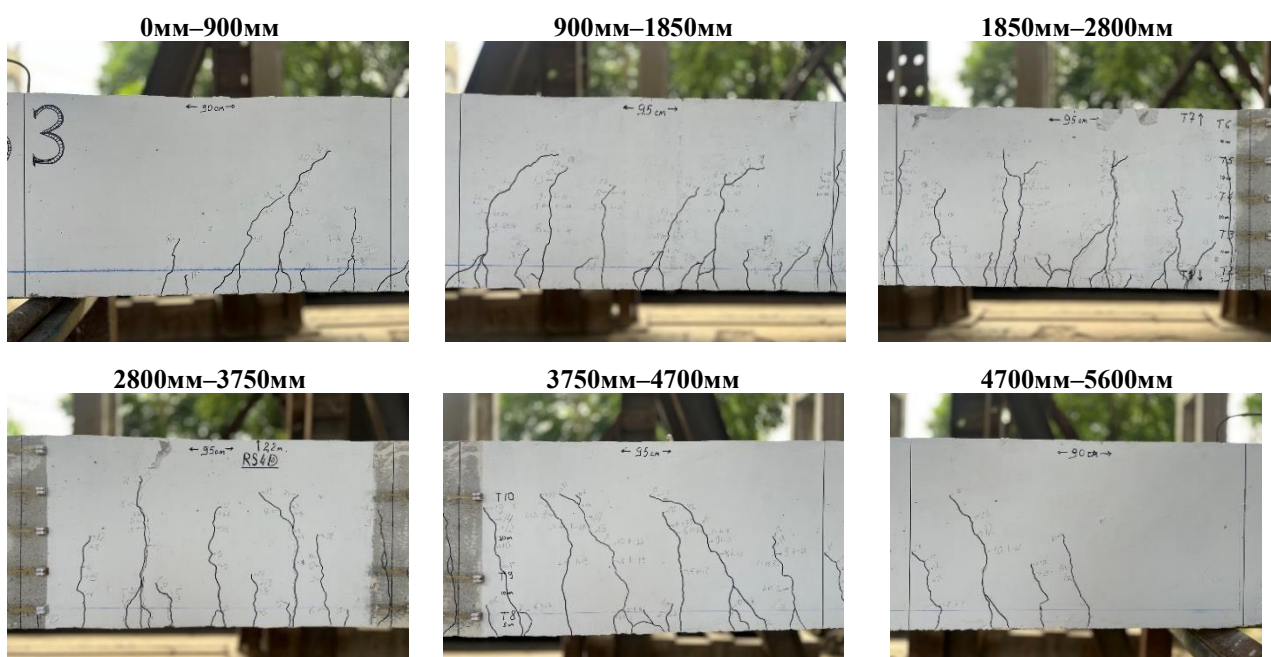
а– минтақаи фишурдашуда, б–минтақаи кашидашуда.

Расми 8. Вобастагии қувваи таъсиркунанда аз шаклтағйирҳои нисбии бетон дар минтақаҳои фишурдашаванда ва кашишбанди болорҳои оҳанубетонии аслӣ

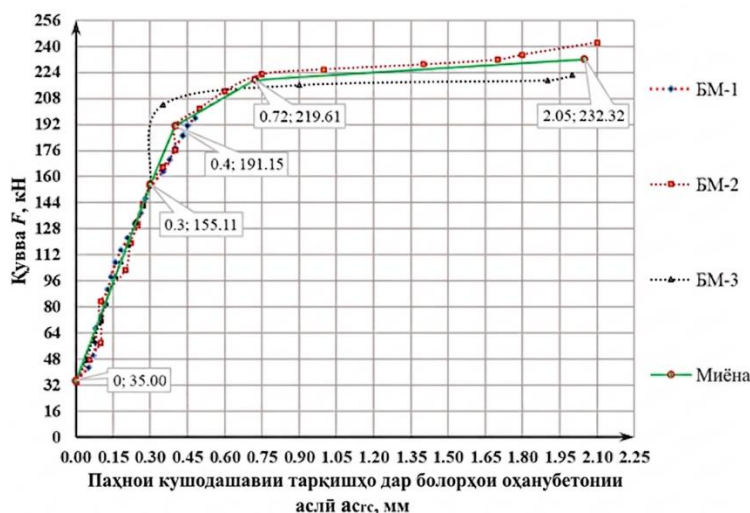
Таҳлили натиҷаҳо нишон медиҳад, ки ҳангоми ба 35 кН расидани қувваи таъсиркунанда, ки ба моменти қаткунандаи $M = 32,37 \text{ кН}\cdot\text{м}$ мувофиқат мекунад, дар диаграмма қитъаи афзоиши тадриҷии ҷойивазкуниҳои амудӣ мушоҳида мешавад. Ҳолати мазкур аз гузариши конструкция аз марҳилаи кори чандирӣ ба марҳилаи чандир-пластикӣ, яъне ба марҳилаи пайдоиши тарқишҳо, шаҳодат медиҳад.

Таҳқиқоти таҷрибавӣ нишон доданд, ки вайроншавии болорҳои оҳанубетонии аслӣ ҳангоми ба 232,32 кН расидани қувваи таъсиркунанда, ки ба моменти қаткунандаи $M = 214,89 \text{ кН}\cdot\text{м}$ мувофиқат мекунад, ба амал меояд. Қимати мазкур ба расидан ба ҳолати ҳаддии гурӯҳи якум мувофиқат намуда, қобилияти воқеии борбардории конструкцияро тавсиф менамояд. Вайроншавӣ дар минтақаи фишурдашавандаи буриш дар натиҷаи резашавии шадиди бетон ба амал омадааст.

Схемаи намунавии тарқишпайдошавӣ ва графикаи вобастагии паҳнои кушодашавии тарқишҳо аз қувваи таъсиркунанда барои болорҳои оҳанубетонии аслӣ дар минтақаи равоқӣ дар расмҳои 9 ва 10 оварда шудаанд.



Расми 9. Схемаи намунавии тарқишпайдошавӣ дар болори оҳанубетонии аслӣ



Паҳнои кушодашавии тарқишҳо $a_{срс}$, мм	Муодилаҳои аппроксиматсия дар ҳудуди қитъаҳо
0	
0.3	$y = 400.38x + 35$
0.4	$y = 360.35x + 47.009$
0.72	$y = 88.937x + 155.58$
2.05	$y = 9.5564x + 212.73$

x – паҳнои кушодашавии тарқишҳо (мм),
 y – қувваи таъсирунда (кН).

Расми 10. Графики вобастагии паҳнои кушодашавии тарқишҳо аз қувваи таъсирунда барои болорҳои оҳанубетонии аслӣ

Мувофиқи натиҷаҳои таҷрибавӣ, ҳангоми ба 155,11 кН расидани қувваи таъсирунда ва моменти қатқунандаи $M = 143,48$ кН·м, паҳнои кушодашавии тарқишҳо 0,3 мм-ро ташкил дод (расми 10). Ҳамиши миёна дар ҳамин марҳила сабтгардида ба 22,36 мм баробар гардид (расми 6), ки амалан ба қимати ҳадди меъёри $L/250 = 5600/250 = 22,40$ мм мувофиқат мекунад. Фарқият байни қимати таҷрибавӣ ва қимати меъёрӣ тақрибан 0,17 %-ро ташкил медиҳад, ки мутобиқати натиҷаҳои бадастомадаро бо талаботи ҳадди меъёрӣ аз рӯи ҳамиш тасдиқ менамояд [29].

Боби сеюм «ТАҲҚИҚОТИ ТАҶРИБАВИИ БОЛОРҲОИ ОҲАНУБЕТОНИИ МОДЕЛӢ БО ИСТИФОДА АЗ НАЗАРИЯИ МОНАНДӢ» ба натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии се болори оҳанубетонии моделӣ бахшида шудааст, ки дар миқёси 1:4 дар асоси муқаррароти назарияи монандӣ омода карда шудаанд [4-А]. Масъалаҳои интихоби масолеҳ барои модели физикӣ, моделсозии арматураи корӣ, ба ҳисоб гирифтани падидаи миқёс ва муайян намудани хусусиятҳои физикию механикии бетон ва арматура баррасӣ гардидаанд. Ба таҳлили ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии болорҳои моделӣ афзоиши ҳамишҳо ва тарқишпайдошавӣ ҳангоми боргузори статикӣ диққати махсус дода шудааст. Дар асоси муқоисаи натиҷаҳои моделӣ ва аслӣ дар нуқтаҳои назоратии ҳаммонанд, зарибҳо ва меъёрҳои монандӣ асоснок карда шудаанд, ки гузаришро аз модели физикӣ ба конструксияи оҳанубетонии аслӣ дар ҳудуди аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ таъмин менамоянд. Арзёбии самаранокии техникаю иқтисодии озмоишҳои моделӣ дар муқоиса бо озмоишҳои аслӣ пешниҳод шудааст. Боб аз нӯҳ зербоб иборат буда, бо хулосаҳо анҷом меёбад.

3.1. Муқаррароти асосии методикаи моделсозии физикии болорҳои оҳанубетонӣ. Дар зербоби мазкур асосҳои методи моделсозии физикии болорҳои оҳанубетонӣ тавсиф шудаанд, ки интихоби миқёс ва масолеҳи модели физикӣ, ба ҳисоб гирифтани падидаи миқёс, инчунин истифодаи таҳлили андозавӣ ва меъёрҳои монандиро дар бар мегиранд. Асоснок карда шудааст, ки гузариши бозътимод аз натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ ба параметрҳои конструксияи аслӣ танҳо ҳангоми риояи шартҳои монандии геометрӣ, физикӣ ва механикӣ, мутобиқати схемаи боргузорӣ ва шартҳои сарҳадӣ, инчунин ҳангоми дуруст муайян намудани зарибҳои монандӣ имконпазир мебошад.

Мувофиқи тавсияҳои муаллифон [12, 21, 22] барои арзёбии дақиқтари ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии конструксияҳои оҳанубетонӣ аз рӯи натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ, баробарии шаклтағйириҳои нисбӣ ва зарибҳои Пуассон дар модел ва конструксияи аслӣ қабул карда мешавад. Муқаррароти мазкур асоси назариявӣ дошта, дар таҳқиқоти мазкур ҳамчун шарт ибтидоӣ баррасӣ мегардад, ки татбиқпазирии он ҳангоми муқоисаи натиҷаҳои озмоиши болорҳои оҳанубетонии моделӣ ва аслӣ ба таври таҷрибавӣ санҷида мешавад. Формулаҳои

гузариш аз параметрҳои модел ба қиматҳои конструксияи асли бо назардошти зарбҳои монандӣ дар ҷадвали 1 оварда шудаанд [2-А].

Ҷадвали 1. – Формулаҳои гузариш аз параметрҳои модели физикӣ ба қиматҳои конструксияи асли бо назардошти зарбҳои монандӣ аз рӯи шиддатҳо

Номгӯи параметрҳои моделсозӣ	Формулаҳои гузариш аз модел ба асл бо назардошти зарбҳои дахлдори монандӣ
Андозаҳои хаттӣ	$b_n = k_L \cdot b_m, h_n = k_L \cdot h_m, L_n = k_L \cdot L_m$
Масоҳат	$A_n = k_L^2 \cdot A_m$
Ҳаҷм	$V_n = k_L^3 \cdot V_m$
Қувваи мутамакказ	$P_n = k_\sigma \cdot k_L^2 \cdot P_m$
Моменти қатқунанда	$M_n = k_\sigma \cdot k_L^3 \cdot M_m$
Шиддат	$\sigma_n = k_\sigma \sigma_m, k_\sigma = \frac{E_n}{E_m}$
Ҳамиш	$f_n = k_L \cdot f_m$
k_L – зарби монандии андозаҳои хаттӣ (зарби миқёсӣ), $k_\sigma = \frac{E_n}{E_m}$ – зарби моделсозии шиддатҳо (зарби монандӣ аз рӯи шиддат).	

3.2. Мақсад, вазифаҳо ва методикаи таҳқиқоти таҷрибавии модели болорҳои оҳанубетонӣ. Мақсади таҳқиқоти таҷрибавии модели болорҳои оҳанубетонӣ ба даст овардани натиҷаҳои боэътимод оид ба ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ, ҳамишҳо ва тарқиштовариҳои унсурҳои ҳамшаванда дар миқёси хурдкардашуда, инчунин арзёбии татбиқпазирии шартҳои монандии геометрӣ, физикӣ ва механикӣ ҳангоми гузариш ба параметрҳои конструксияи асли мебошад. Мутобиқи мақсади гузошташуда масъалаҳои асоснок намудани миқёси моделсозӣ, интихоби масолеҳи моделӣ, таҳияи схемаи конструктивӣ ва технологияи омода намудани моделҳо, гузаронидани озмоишҳои статикӣ бо бақайдгирии параметрҳои асосии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ, инчунин арзёбии дурустии гузариши миқёсӣ дар асоси меъёрҳои монандӣ ҳал карда шуданд.

3.3. Интихоби миқёси моделсозӣ, таркиби бетон ва арматураи кори барои конструксияҳои моделӣ. Миқёси геометрии болорҳои оҳанубетонии моделӣ 1:4 бо назардошти шароити ҷойгиркунии намунаҳо дар толори озмоишӣ, имконияти татбиқи схемаи қабулгардидаи боргузорӣ, инчунин таъмин намудани насб ва кори таҷҳизоти назоратӣ ченкунанда қабул карда шудааст. Интихоби таркиби бетон барои конструксияҳои моделӣ дар асоси тавсияҳои методӣ [24, 28 ва 3-А] иҷро гардидааст.

Мувофиқи кори [17] айнияти масолеҳ аз нуқтаи назари механикӣ боэътимодтар тавассути озмоиши мустақим муқаррар гардида, бо нигоҳ доштани таносубҳои яхела байни шиддатҳо ва шаклтағйирӣҳои барои намунаҳои таҷрибавӣ яхела муайян карда мешавад. Азбаски монандии пурраи масолеҳ ҳангоми ҳар гуна қонуни боргузорӣ амалан дастнорас мебошад, дар моделсозии физикии конструксияҳои оҳанубетонӣ шартҳои монандии масолеҳ ба таври тақрибӣ қабул карда мешавад. Дар ин ҳолат интихоби хусусиятҳои аҳамияти асосӣ доранд, ки муқоисашавандагии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣи модел ва конструксияи аслиро таъмин менамоянд.

Дар асоси муқоисаи диаграммаҳои таҷрибавӣ шаклтағйирӣи масолеҳи болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ, бо назардошти хусусияти гуногунмодулии кори онҳо, зарби монандӣ аз рӯи шаклтағйирӣҳои дар шакли зерин ҳосил карда шуд:

$$k_\varepsilon = \frac{E_m}{E_n}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_n = k_\varepsilon \varepsilon_m. \quad (2)$$

Таҳлили вобастагии «шиддат – шаклтағйирӣ»-и масолеҳи конструкцияҳои асли ва моделӣ дар шароити баробарии шиддатҳо нишон медиҳад, ки зарибҳои монандӣ аз рӯйи шиддатҳо ва шаклтағйирӣҳо дар вобастагии баръакси мутаносиб қарор доранд.

$$k_{\sigma} = \frac{1}{k_{\epsilon}}. \quad (3)$$

Таҳлили адабиётҳои илмӣ нишон дод, ки гузариш аз натиҷаҳои ҳолати шиддатнокӣ ба шаклтағйирӣ модели физикии конструкция ба конструкцияи асли аз параметрҳои гузариш вобаста буда, бо истифодаи зарибҳои зикршудаи монандӣ амалӣ карда мешавад. Бо вуҷуди ин, дар таҳқиқоти таҷрибавии унсурҳои милавии ҳамшаванда зарибҳои мазкур ҳамчун параметрҳои асосии гузариш ба шумор рафта, то ҳол ба қадри кофӣ асоснок карда нашуда, татбиқи амалии васеъ пайдо накардаанд.

Интихоби арматураи кории болори оҳанубетонии моделӣ дар асоси принципи риояи монандии масоҳати буриши кӯндаланги арматура мутобиқи қадвали 1 анҷом дода шуда, бо ҳисоббарории санҷишӣ, ки дар маҷмааи барномавии ЛИРА-САПР 2022 иҷро гардидааст, тасдиқ карда шуд.

$$A_s^m = 942.6 \cdot \frac{1}{4^2} = 58.91 \text{ мм}^2. \quad (4)$$

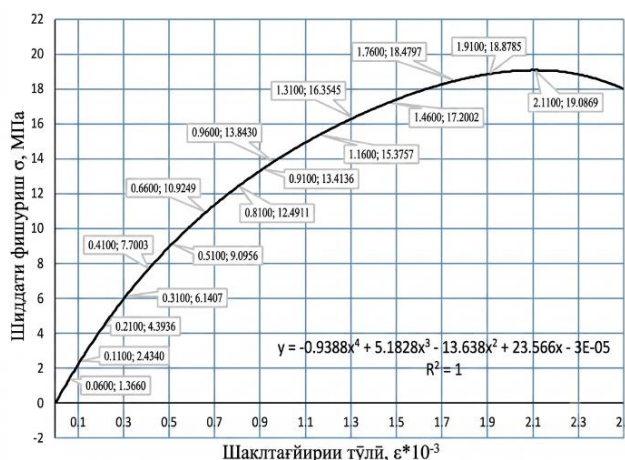
Қимати ҳосилшуда ба масоҳати як милаи кутраш тақрибан 8,7 мм мувофиқат мекунад ё метавонад бо истифодаи таркиби ду милаи кутраш 6 мм амалӣ карда шавад ($2 \times 28,27 = 56,54 \text{ мм}^2$), аммо қимати мазкур аз масоҳати ҳисобӣ камтар мебошад.

Истифодаи арматураи кутри 6 мм, ки сатҳи ҳамвор дорад, дар конструкцияи моделӣ пайвасти боэътимод бо бетонро таъмин карда наметавонад. Илова бар ин, ҳангоми моделсозии физикӣ зарурати ба ҳисоб гирифтани таъсири падидаи микрӯс, ғайричинса будани сохтори бетон, ҳазиш ва хусусияти ғайрихаттии шаклтағйирӣи бетон, инчунин ғайриимкон будани таъмини қабати муҳофизатии бетон дар мутобиқати пурра бо принципҳои монандии геометрӣ ба миён меояд. Маҷмуи омилҳои зикршуда имкон намедиҳад, ки ҳангоми истифодаи арматураи кутри хурд дурустии зарурии кори конструкцияро таъмин намояд.

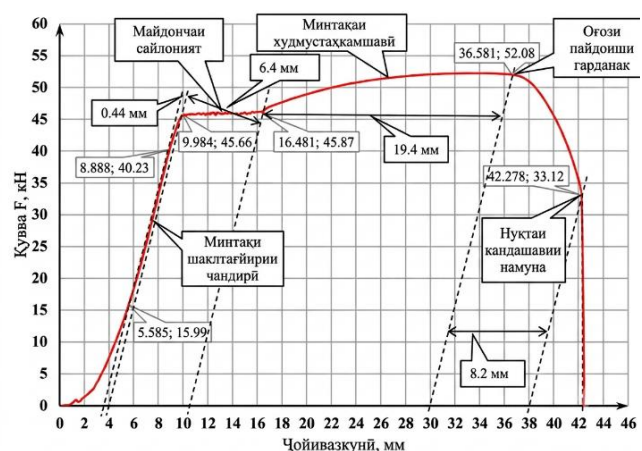
Бо назардошти маҳдудиятҳои зикршуда, дар болори оҳанубетонии моделӣ як арматураи кории кутраш 10 мм, бо масоҳати буриши кӯндалангаш ($A_s = 78,3 \text{ мм}^2$) қабул карда шуд.

3.4. Омода ва озмоиши намунаҳои назоратӣ барои арзёбии хусусиятҳои мустаҳкамӣ ва шаклтағйирӣи масолеҳи моделҳо. Хусусиятҳои физикию механикии масолеҳи болорҳои оҳанубетонии моделӣ тибқи методикаҳои муайян карда шуданд, ки барои озмоиши масолеҳи болорҳои оҳанубетонии асли истифода гардида буданд.

Дар расмҳои 11 ва 12 диаграммаи миёнаи натиҷаҳои шаклтағйирӣи призмаҳои бетонӣ бо муодилаҳои аппроксиматсионӣ ва диаграммаи кашиши арматураи кории болори оҳанубетонии моделӣ оварда шудаанд.



Расми 11. Диаграммаи шаклтағйирӣи призмаи бетонии болори оҳанубетонии моделӣ



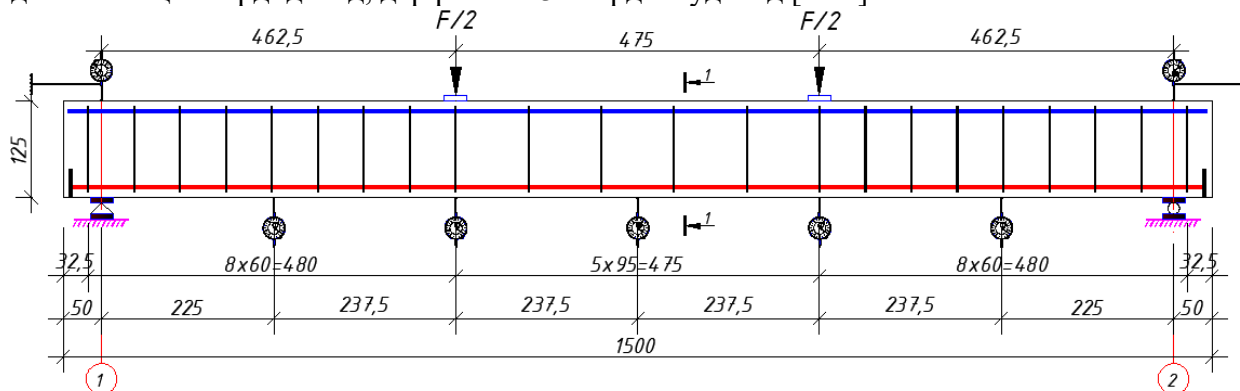
Расми 12. Диаграммаи кашиши арматураи кории болори оҳанубетонии моделӣ

3.5. Методикаи гузаронидани озмоишҳои модели болорҳои оҳанубетонии ҳамшаванда. Озмоиши болорҳои оҳанубетонии моделӣ тибқи схемаи озмоиши болори асли ва бо риояи принципҳои асосии моделсозии физикӣ гузаронида шуданд, ки монандии геометрӣ ва қуввагии модели физикиро таъмин менамоянд [7–А].

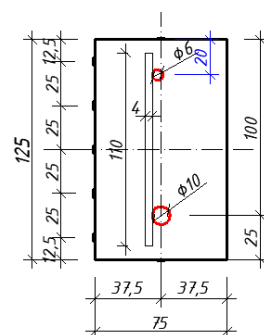
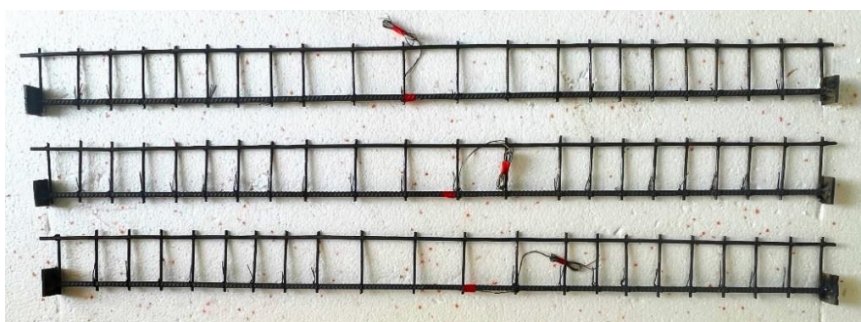
Моделҳои физикии болори оҳанубетонӣ дар миқёси 1:4 бо назардошти риояи меъёрҳои монандӣ, ки ҳангоми озмоишҳои статикӣ дар модели конструксияҳои оҳанубетонӣ истифода мешаванд, омода карда шуд. Масолеҳи модели физикӣ аз бетони майдадонаи синфи мустаҳкамии В20 интихоб карда шудааст. Дар минтақаи кашишбанди болор бо арматураи кори қутри 10 мм синфи А500 армиронӣ карда шудааст. Дар минтақаи фишурдашаванда барои ташаккули каркаси ҳамвор арматураи конструктивии тӯлонӣ дар шакли як милаи қутри 6 мм, синфи А240, истифода гардид. Барои таъмин намудани сахтии фазоии каркас ва пайвасти намудани милаҳои тӯлонӣ дар минтақаҳои кашишбанди ва фишурдашаванда ҳамутҳои кӯндаланг аз арматураи қутри 4 мм, синфи А240, истифода гардидааст. Ангиронии арматураи қорӣ тавассути кафшер намудани лавҳаҳои филизӣ бо андозаи 20×50×5 мм дар нӯғҳои он таъмин карда шуд. Чунин ҳалли конструктивӣ имкон дод, ки қувваҳо аз арматура ба бетон самаранок интиқол ёфта, дар раванди озмоиш аз бадани болор лағжида баромадани арматураҳои қорӣ пешگیری карда шавад.

Озмоишҳо дар се болори оҳанубетонии якравоқа бо арматураи бе шиддати пешакӣ гузаронида шуданд. Болорҳо бо ду қувваи мутамарказ, ки нисбат ба миёнаи равоқ ба таври симметрӣ дар масофаи 237,5 мм ҷойгир шудаанд, боргузори карда шуданд. Боргузори болорҳо бо истифода аз домкрати механикӣ винтии TOR-50 амалӣ карда шуд. Интиқоли бор аз домкрат ба болор тавассути трайверси бортаксимкунанда, ки аз дутаври болорӣ №20Б1 бо дарозии L = 690 мм сохта шудаанд, иҷро гардида, тақсими якхелаи борро ба ду қувваи мутамарказ таъмин менамояд.

Нақшаи ҳисобӣ ва армиронии болорҳои оҳанубетонии моделӣ тибқи се намунаи таҷрибавӣ, ки бо назардошти принципҳои назарияи монандӣ ва миқёси интихобшудаи моделсозӣ таҳия гардидаанд, дар расми 13 оварда шудаанд [4–А].

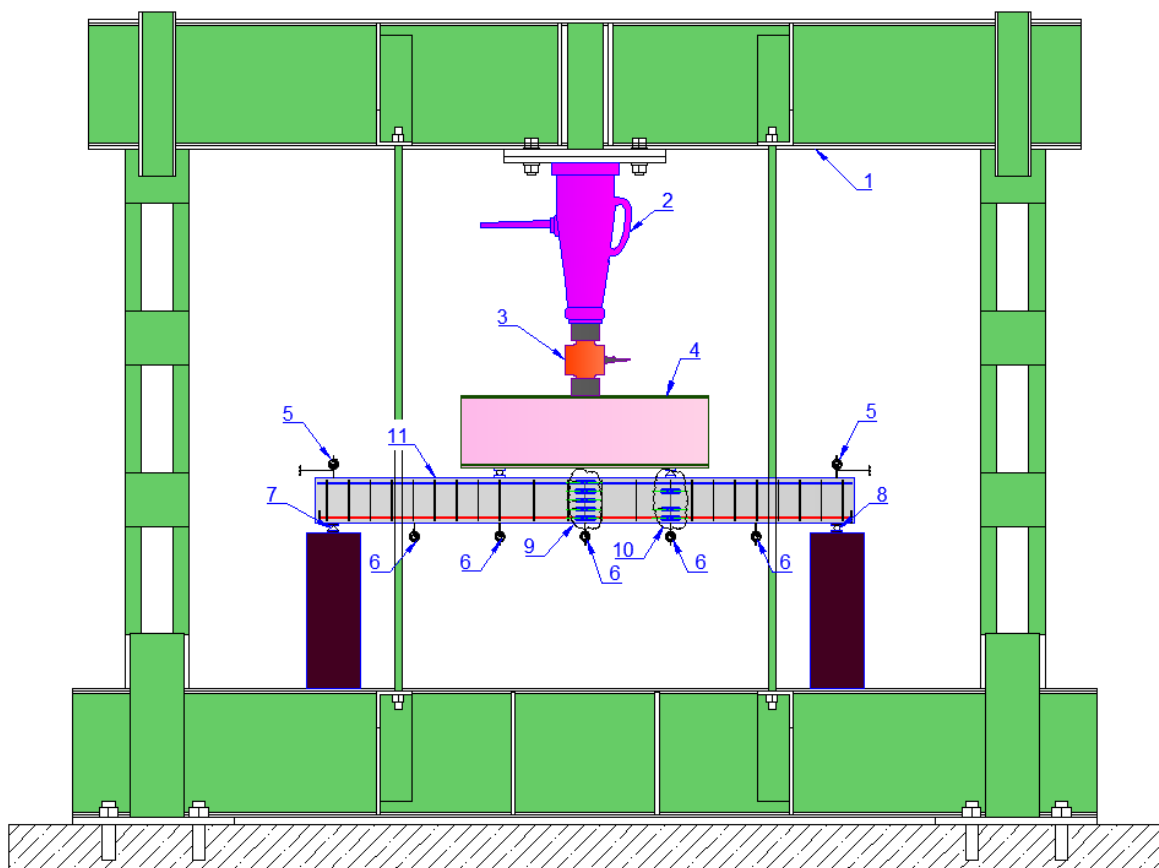


Буриши 1-1



Расми 13. Нақшаи ҳисобӣ ва армиронии болорҳои оҳанубетонии моделӣ

Схемаи стени озмоишӣ ва ҷойгиркунии асбобҳои ченкунанда дар расми 14 оварда шудааст.



1 – стенд барои озмоиши модели конструкцияҳои сохтмонӣ; 2 – домкрати механикии винтии тамғаи TOR-50; 3 – қуввасанчи электрони тамғаи ДМС-1000/5-1МГ4; 4 – тақсимкунандаи бор, дутаври №20Б1; 5 – хамишсанчи навъи соати ИЧ-50 барои чен намудани нишастаи таъягоҳҳо; 6 – хамишсанчи навъи соати ИЧ-50 барои чен намудани хамишҳо дар минтақаи равоқӣ; 7 – таъягоҳи шарнирии беҳаракат; 8 – таъягоҳи шарнирии ҳаракаткунанда; 9 – тензорезисторҳои навъи ПКБ бо базаи 50 мм барои чен намудани шаклтағйириҳои нисбӣ аз рӯйи баландии буриш дар минтақаи миёнаи болор; 10 – тензорезисторҳои навъи ПКБ бо базаи 50 мм барои чен намудани шаклтағйириҳои нисбӣ аз рӯйи баландии буриш дар минтақаи гузоштани бор; 11 – модели озмоишшавандаи болори оҳанубетонӣ.

Расми 14. Схекаи стени озмоишӣ бо ҷойгирони асбобҳои ченкунанда ҳангоми озмоиши болорҳои оҳанубетонии моделӣ

Барои муайян намудани хамишҳо хамишсанҷҳои навъи соати ИЧ-50 ҳам дар минтақаи равоқӣ ва ҳам дар таъягоҳҳо истифода карда шуданд. Ин имкон медиҳад, ки таъсири эҳтимолии нишастаи таъягоҳҳо ба ҳисоб гирифта шуда, оид ба шаклтағйириҳои болор дар раванди боргузори натиҷаҳои дақиқтар ба даст оварда шавад.

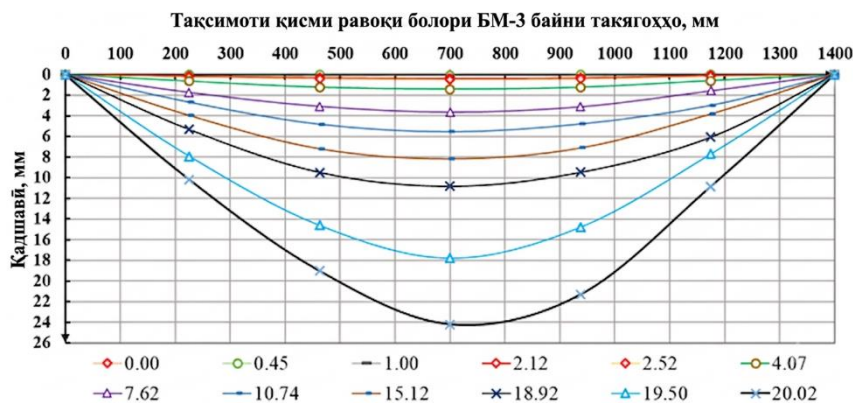
Ченкунии паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо бо истифода аз дастгоҳи махсуси ченкунанда анҷом дода шуд, ки бо индикаторҳои навъи соати ба сатҳи модели болори оҳанубетонӣ ба таври саҳт маҳкамгардида мучаҳҳаз мебошад. Дастгоҳ бо тақсимои 0,001 мм дақиқии баландии бақайдгирии шаклтағйириҳоро таъмин намуда, имкон дод, ки дар раванди боргузори модел тарқишпайдошавӣ зина ба зина саҳт карда шаванд. Тақсимшавии шаклтағйириҳои нисбӣ аз рӯйи баландии буриш дар миёнаи равоқ ва дар минтақаи гузоштани қувва бо истифода аз тензорезисторҳои навъи ПКБ бо базаи 50 мм муайян карда шуд. Барои бақайдгирии шаклтағйириҳои нисбӣ ченкунаки рақамии шаклтағйирӣ ИДЦ-1 истифода гардид [8–А].

3.6. Натиҷаҳои озмоиши таҷрибавии моделҳои болорҳои оҳанубетонии БМ-1–БМ-3. Бо назардошти ғайричинса будани оҳанубетон ва эҳтимоли парокандагии натиҷаҳои таҷрибавӣ, озмоишҳо дар се болори моделии БМ-1–БМ-3 гузаронида шуданд. Аз рӯйи натиҷаҳои озмоиш, маълумот барои ҳар як болор дар алоҳидагӣ оварда шуда, вобастагҳои миёнагардидаи параметрҳои асосии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ муайян карда шуданд, ки барои муқоисаи минбаъда бо натиҷаҳои болорҳои аслии истифода мегарданд.

3.7. Таҳлили натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии модели болорҳои оҳанубетонӣ.

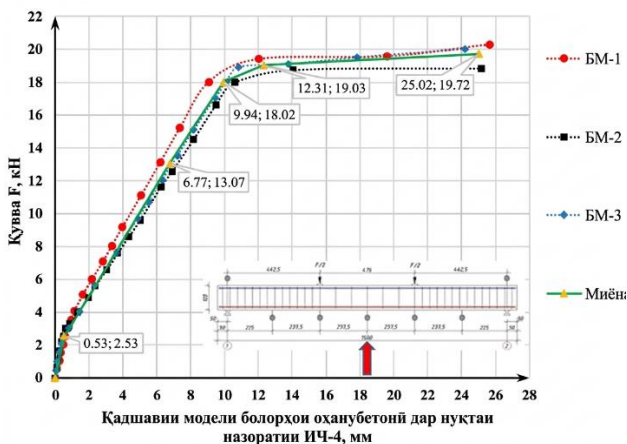
Таҳлили ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии моделӣ болорҳои оҳанубетонӣ дар нуқтаҳои назоратии ҳаммонанд нисбат ба маълумоте, ки ҳангоми озмоиши болори оҳанубетонии асли ба даст оварда шудаанд, иҷро карда шуд. Натиҷаҳои бадастомада барои санҷиши дурустии истифодаи зарифҳо ва меъёрҳои монандӣ ҳангоми гузариш аз модели физикӣ ба болори оҳанубетонии асли истифода гардиданд.

Таҳлили графикҳои таҷрибавии шаклтағйирии болорҳои оҳанубетонии моделӣ нишон дод, ки шаклтағйириҳо дар нуқтаҳои хоси ИЧ-2 ва ИЧ-3 нисбат ба нуқтаҳои ИЧ-5 ва ИЧ-6 хусусияти симметрии дошта, бо қиматҳои ба ҳам наздик тавсиф мешаванд. Қонуниятӣ муайяншуда аз якхелагии қори минтақаи равоқии болор шаҳодат дода, имкон медиҳад, ки таҳлил бо шумораи камтари нуқтаҳои назоратӣ, бе кохиш ёфтани эътимоднокии натиҷаҳо, маҳдуд карда шавад. Дар асоси қонуниятӣ мазкур, барои муқоисаи минбаъда бо натиҷаҳои болорҳои асли, нуқтаҳои ИЧ-2, ИЧ-3 ва ИЧ-4 ҳамчун нуқтаҳои асосии назоратӣ интихоб карда шуданд. Барои нишон додани вобастагии таҷрибавии бадастомада дар расми 15 графика қатшавии болори оҳанубетонии моделии БМ-3 оварда шудааст.

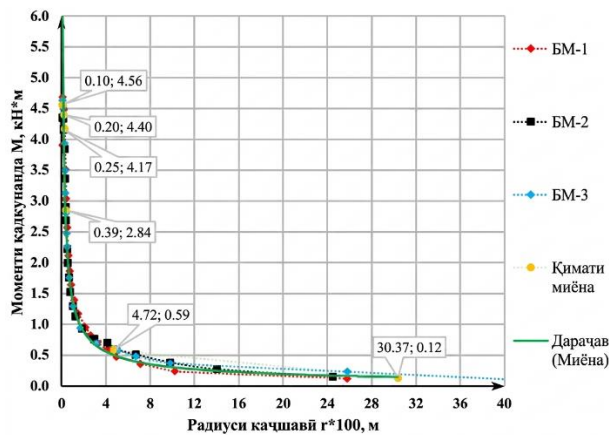


Расми 15. Графика қатшавии модели болори оҳанубетонии БМ-3

Барои пешгӯии ҳолати қатшавии болори оҳанубетонии асли аз рӯи натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ, муқоиса дар нуқтаҳои назоратии ҳаммонанди ИЧ-2, ИЧ-3 ва ИЧ-4 иҷро карда шуд. Таҳлил нишон дод, ки дар сатҳҳои мувофиқи боргузори ҳатогиҳои гузариш аз модел ба конструкцияи асли дар нуқтаҳои зикршуда қиматҳои ба ҳам наздик доранд. Бо назардошти ҳаҷми маҳдуди автореферат натиҷаҳои муқоисашаванда дар мисоли нуқтаи назоратии аз ҳама максималӣ ИЧ-4 пешниҳод карда мешавад. Барои инъикоси графикии натиҷаҳо дар расми 16 вобастагии қувва аз ҳамиши болори оҳанубетонии моделӣ дар нуқтаи назоратии ИЧ-4 ва дар расми 17 вобастагии моменти қатқунанда аз радиуси қачӣ оварда шудааст [4–А].



Расми 16. Графика вобастагии қувва аз ҳамиши модели болорҳои оҳанубетонӣ дар нуқтаи назоратии ИЧ-4

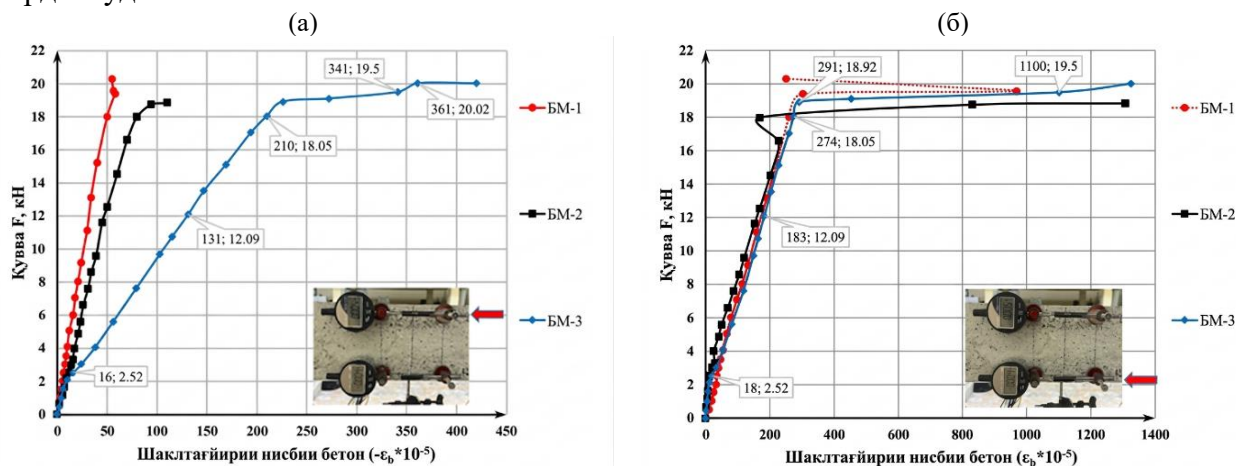


Расми 17. Графика вобастагии моменти қатқунанда аз радиуси қачии болорҳои оҳанубетонии моделӣ

Таҳлили натиҷаҳои озмоиши модели болорҳои оҳанубетонӣ нишон дод, ки ҳангоми ба 2,53 кН расидани қувваи таъсиркунанда, ки ба моменти қатқунандаи ($M=0,58$ кН·м) мувофиқат мекунад, дар диаграмма тағйирёбии хусусияти шаклтағйирӣ мушоҳида мегардад. Ҳолати мазкур гузариши конструксияро аз марҳилаи чандирӣ ба марҳилаи чандир – пластикӣ, яъне пайдоиши тарқишҳо шаҳодат медиҳад.

Вайроншавии болори оҳанубетонии моделӣ ҳангоми қувваи миёнаи вайронкунанда ба 19,72 кН баробар будан ба қайд гирифта шуд, ки ба ҳолати ҳаддии гурӯҳи яқум мувофиқат мекунад. Хусусияти вайроншавии модел, ки дар афзоиши бошиддати шаклтағйирӣ ва резашавии бетони минтақаи фишурдашаванда зоҳир гардид, дар маҷмӯъ ба марҳилаҳои асосии кори болори оҳанубетонии асли мувофиқат намуд.

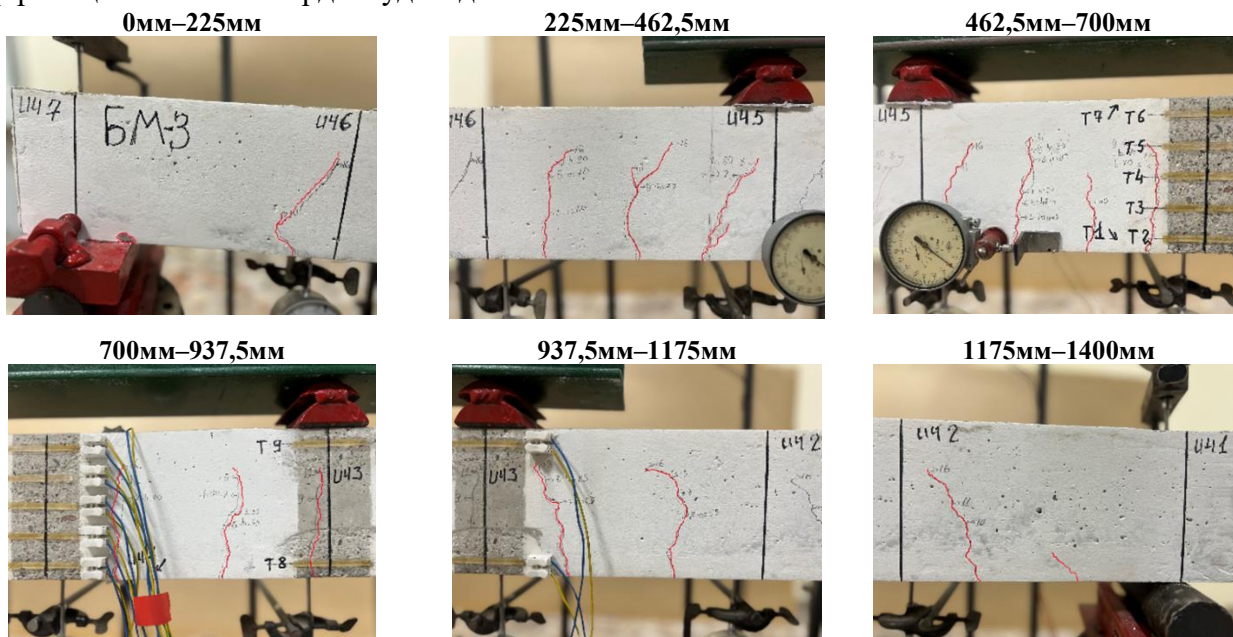
Вобастагии қувва аз шаклтағйирӣҳои нисбии бетон дар минтақаҳои фишурдашаванда ва кашишбанди силсилаи болорҳои оҳанубетонии моделии БМ-1, БМ-2 ва БМ-3 дар расми 18 оварда шудааст.



а– минтақаи фишурдашаванда , б–минтақаи кашишбанда.

Расми 18. Вобастагии қувва аз шаклтағйирӣҳои нисбии бетон дар минтақаҳои фишурдашаванда ва кашишбанди силсилаи болорҳои оҳанубетонии моделӣ

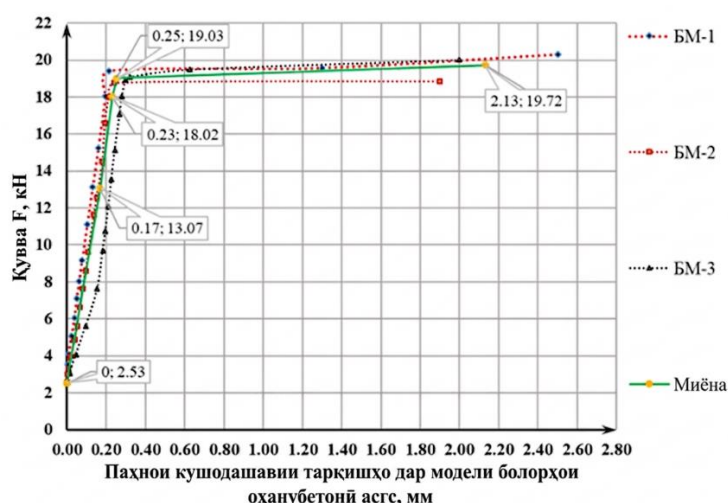
Схемаи намунавии тарқишпайдошавӣ ва графики вобастагии паҳнои қушодашавии тарқишҳо аз қувваи таъсиркунанда барои болорҳои оҳанубетонии моделӣ дар минтақаи равоқӣ дар расмҳои 19 ва 20 оварда шудаанд.



Расми 19. Схемаи намунавии тарқишпайдошавӣ дар модели болори оҳанубетонӣ

Ба таври таҷрибавӣ муқаррар карда шуд, ки ҳангоми арзёбии кори модели физикӣ аз рӯи ҳолати ҳаддии гурӯҳи дуҷум қимати ҳаддии паҳнои қушодашавии тарқишҳо бо қиёс ба конструксияи асли ба 0,3 мм баробар буда наметавонад, зеро барои конструксияҳои моделӣ

қимати мазкур ба марҳилаи наздик ба ҳадди қобилияти борбардорӣ (вайроншавӣ) мувофиқат мекунад. Аз ин лиҳоз, паҳнои кушодашавии тарқишҳо дар модели физикӣ бояд бо назардошти миқёси моделсозӣ ва шартҳои монандӣ муайян карда шавад.



Паҳнои кушодашавии тарқиш $a_{сге}$, мм	Муодилаҳои аппроксиматсия дар ҳудуди қитъаҳо
0	$y = 61.879x + 2.5333$
0.17	$y = 81.093x - 0.7395$
0.23	$y = 46.615x + 7.2363$
0.25	$y = 0.3687x + 18.937$
2.13	

x – паҳнои кушодашавии тарқиш (мм),
y – қувва (кН).

Расми 20. Графикҳои вобастагии паҳнои кушодашавии тарқишҳо аз қувваи таъсиркунанда барои модели болорҳои оҳанубетонӣ

3.8. Методикаи гузариш аз натиҷаҳои миёнагардидаи таҷрибавии модели физикӣ ба параметрҳои болори оҳанубетонии асли. Дар зербоби мазкур методикаи гузариш аз натиҷаҳои миёнагардидаи таҷрибавии модели физикӣ ба параметрҳои болори оҳанубетонии асли дар асоси меъёрҳо ва зарифҳои монандӣ оварда шудааст. Санҷиши дурустии методика аз рӯи натиҷаҳои озмоиши се болори моделӣ ва се болори асли дар нуқтаҳои назоратии ҳаммонанди ИЧ-2, ИЧ-3 ва ИЧ-4 иҷро карда шуд, ки ин имкон дод эътимоднокии гузариши миқёсӣ ва дурустии истифодаи меъёрҳои монандии геометрӣ, механикӣ ва қуввагӣ арзёбӣ карда шавад [5–А]. Дар ҷадвали 2 натиҷаҳои гузариш аз параметрҳои модели физикӣ ба параметрҳои конструксияи асли дар нуқтаи назоратии ИЧ-4 бо истифодаи зарифи монандӣ аз рӯи шиддат оварда шудааст.

Бо ҳамин тартиб, гузариш дар нуқтаҳои назоратии ИЧ-2 ва ИЧ-3 низ иҷро карда шуд, ки ин имконияти истифодаи методикаи таҳияшударо барои гузариш аз параметрҳои модели физикӣ ба параметрҳои конструксияи асли дар ҳар гуна нуқтаҳои ҳаммонанди унсури оҳанубетонӣ, ҳангоми риояи шартҳои монандӣ тасдиқ менамояд.

Ҷадвали 2. – Натиҷаҳои гузариш аз нуқтаи ҷенкунии ИЧ-4-и модели физикӣ ба нуқтаи ҳаммонанди болори оҳанубетонии асли бо истифодаи зарифи монандӣ аз рӯи шиддат

Қувваи миёна таҷрибавӣ ба болори моделӣ	Қувваи эквивалентӣ барои болори асли	Қувваи миёна таҷрибавӣ ба болори асли	Ҳатоғӣ аз рӯи меъёри монандии қувва	Қимати миёна таҷрибавӣ ҳамаи болори моделӣ	Қимати эквивалентии ҳамаи болори асли	Қимати миёна таҷрибавӣ ҳамаи болори асли	Ҳатоғӣ аз рӯи ҳамаи
F_M , кН	$F_H = k_\sigma \cdot k_L^2 \cdot F_M$, кН	F_H , кН	%	f_M , мм	$f_H = k_L \cdot f_M$, мм	f_H , мм	%
2.53	48.54	35.00	27.89	0.53	2.12	2.83	-33.49
13.07	235.58	155.11	34.16	6.26	25.04	22.36	10.70
18.02	345.70	191.15	44.71	9.94	39.76	29.02	27.01
19.03	365.07	219.61	39.84	12.31	49.24	38.55	21.71
19.72	378.31	232.32	38.59	25.02	100.08	61.62	38.43
Зарифи миқёсӣ $k_L = 4$, зарифи монандӣ аз рӯи шиддат $k_\sigma = \frac{E_H}{E_M} = 1.199$.							

Ҳангоми гузариш аз параметрҳои модели физикӣ ба параметрҳои болори оҳанубетонии асли дар нуктаҳои ҳаммонанди ИЧ-2, ИЧ-3 ва ИЧ-4 бо истифодаи зарибҳои монандӣ аз рӯи шиддат фарқиятҳои назаррас нисбат ба натиҷаҳои таҷрибавӣ муайян карда шуданд. Ҳатогӣ аз рӯи қувваи таъсиркунанда ба болорҳо ҳангоми пайдоиши тарқишҳо +27,89 % ва ҳангоми вайроншавӣ +38,59 %-ро ташкил дод, дар ҳоле ки аз рӯи ҳамишҳо мутаносибан ба –28 % ва +36,3 % баробар гардид. Натиҷаҳои бадастомада нокифоя будани истифодаи танҳо зариви микёсбандиро барои гузариши бозътимод аз рӯи параметрҳои қуввагӣ ва сахтӣ тасдиқ менамоянд. Дар асоси таҳлили гуногунмодулии масолах, ки дар зербоби 3.3 анҷом дода шудааст, натиҷаҳои интиқоли маълумот аз нуктаи ченкунии ИЧ-4-и модели физикӣ ба нуктаи ҳаммонанди болори оҳанубетонии асли бо истифодаи зарибҳои монандӣ аз рӯи шаклтағйирӣ дар ҷадвали 3 оварда шудаанд.

Ҷадвали 3. – Натиҷаҳои гузариш аз нуктаи ченкунии ИЧ-4-и модели физикӣ ба нуктаи ҳаммонанди болори оҳанубетонии асли бо истифодаи зариви монандӣ аз рӯи шаклтағйирӣ

Қувваи миёнаи таҷрибавӣ ба болори моделӣ	Қувваи эквивалентӣ барои болори асли	Қувваи миёнаи таҷрибавӣ ба болори асли	Ҳатогӣ аз рӯи меъёри монандии қувва	Қимати миёнаи таҷрибавии ҳамиши болори моделӣ	Қимати эквивалентии ҳамиш барои болори асли	Қимати миёнаи таҷрибавии ҳамиши болори асли	Ҳатогӣ аз рӯи ҳамиш
F_m , кН	$F_n = k_\varepsilon \cdot k_L^2 \cdot F_m$, кН	F_n , кН	%	f_m , мм	$f_n = k_L \cdot f_m$, мм	f_n , мм	%
2.53	33.76	35.00	-3.67	0.53	2.12	2.83	-33.49
13.07	174.4	155.11	11.06	6.26	25.04	22.36	10.70
18.02	240.46	191.15	20.51	9.94	39.76	29.02	27.01
19.03	253.94	219.61	13.52	12.31	49.24	38.55	21.71
19.72	263.14	232.32	11.71	25.02	100.08	61.62	38.43
Зариви микёсӣ $k_L = 4$, зариви монандӣ аз рӯи шаклтағйирӣ $k_\varepsilon = \frac{E_m}{E_n} = 0.834$.							

Таҳлили натиҷаҳои ҷадвали 3 нишон медиҳад, ки ҳангоми гузариши микёсӣ аз параметрҳои модели физикӣ ба болори оҳанубетонии асли аз рӯи меъёрҳои монандии қуввагӣ ва шаклтағйирӣ дар нуктаҳои ҳаммонанди ченкунӣ – ИЧ-2, ИЧ-3 ва ИЧ-4 – бо истифодаи зариви монандӣ аз рӯи шаклтағйирӣ, ки дар зербоби 3.3 оварда шудаанд, мутобиқати қобили қабули натиҷаҳои ҳисобию назариявӣ ва таҷрибавӣ ба даст меояд. Аз ҷумла, ҳатогӣ аз рӯи меъёри монандии қувва дар лаҳзаи пайдоиши тарқишҳо –3,67 % ва дар лаҳзаи вайроншавӣ +11,71 %-ро ташкил медиҳад, ки дар ҳудуди қиматҳои иҷозатдодашуда барои гузариши микёсии дуруст қарор дорад.

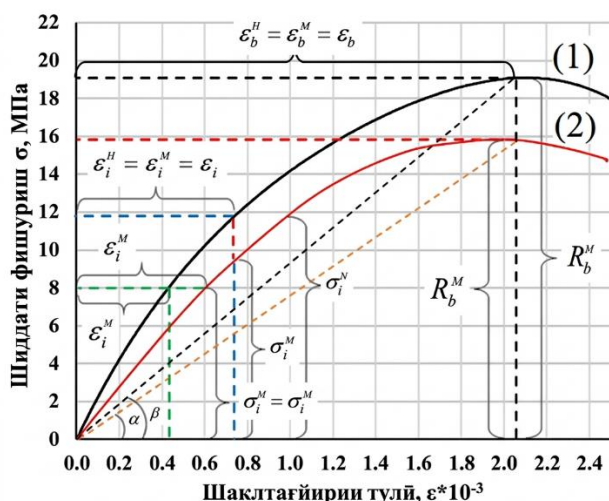
Гузариш аз қиматҳои ҳамиши модели физикӣ ба конструкцияи асли бо истифодаи танҳо як зариви микёсбандӣ дуруст тавсиф карда шуда наметавонад, зеро ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣи унсурҳои оҳанубетонии ҳамшаванда хусусияти марҳилавӣ ва гуногунмодулии тағйирёбӣ дорад. Дар марҳилаи то пайдоиши тарқишҳо ҳолати шиддатнокӣи чандирӣ муайянкунанда буда, гузариши микёсӣ бояд ба зариви монандӣ аз рӯи шиддатҳо асос ёбад, ки ҳамарзишии шиддатҳоро дар буришҳои ҳаммонанди модел ва конструкцияи асли таъмин менамояд. Пас аз лаҳзаи пайдоиши тарқишҳо, вақте ки дар схемаи ҳисобӣ шаклтағйирӣи ғайрихаттӣ ва қоҳиш ёфтани сахтии минтақаи кашишбанди бетон бартарӣ пайдо мекунад, зариви монандӣ аз рӯи шаклтағйирӣ аҳамияти асосӣ пайдо менамояд, зеро он хусусияти тағйирёбандаи кори шаклтағйирӣи қатъаттаи конструкцияро инъикос мекунад.

Бинобар ин, формулаи дурусти гузариши микёсӣ бояд ҳар ду зариви зикршударо бо назардошти марҳилавӣ будани ҳолати шиддатнокӣи шаклтағйирӣи унсурҳои оҳанубетонӣ ба ҳисоб гирад.

Бо ин мақсад, гузариши хамиш аз нуқтаи ченкунии ИЧ-4-и модели физикӣ ба нуқтаи ҳаммонанди болори оҳанубетонии аслӣ тибқи меъри омехтаи монандӣ иҷро карда шуда, натиҷаҳои он дар ҷадвали 4 оварда шудааст.

Ҷадвали 4. – Натиҷаҳои гузариши хамиш аз нуқтаи ченкунии ИЧ-4-и модели физикӣ ба нуқтаи ҳаммонанди болори оҳанубетонии аслӣ

Қувваи миёнаи таҷрибавӣ ба болори моделӣ	Қимати миёнаи таҷрибавии хамиши болори моделӣ	Зарибҳои монандӣ аз рӯи шиддат ва шаклтағйирӣ	Қимати эквивалентии хамиш барои болори аслӣ	Қимати миёнаи таҷрибавии хамиши болори аслӣ	Хатоги аз рӯи хамиш
то пайдошавии тарқиш					
F_M , кН	f_M , мм	k_σ	$f_n = k_L \cdot k_\sigma \cdot f_M$, мм	f_n , мм	%
2.53	0.53	1.199	2.54	2.83	-10.18
баъд аз пайдошавии тарқиш					
F_M , кН	f_M , мм	k_ε	$f_n = k_L \cdot k_\varepsilon \cdot f_M$, мм	f_n , мм	%
13.07	6.26	0.834	20.88	22.36	-6.60
18.02	9.94	0.834	33.16	29.02	14.27
19.03	12.31	0.834	41.07	38.55	6.53
19.72	25.02	0.834	83.47	61.62	35.45



1 – қачхатаи шаклтағйирии бетони конструкцияи аслӣ;
2 – қачхатаи шаклтағйирии бетони модели физикӣ.

Расми 21. Муқоисаи диаграммаҳои шаклтағйирии ғайрихаттии бетони модел ва конструкцияи аслӣ

Хусусияти тағйирёбии зарибҳои монандӣ бевосита аз марҳилавӣ будани шаклтағйирии бетон вобаста мебошад. Тавре ки аз графикаи шаклтағйирии ғайрихаттии бетон бармеояд (расми 21), дар марҳилаи ибтдоии боргузорӣ ба намунаи санҷишӣ бетон чандирӣ кор мекунад ва қиматҳои зарибҳои монандӣ амалан бетағйир боқӣ мемонанд. Аммо пас аз пайдоиши тарқишҳои аввалин дар унсурҳои ҳамшаванда шаклтағйирӣ хусусияти ғайрихаттӣ пайдо менамояд, ки боиси коҳиш ёфтани сахтӣ ва афзоиши босуръати хамишҳо мегардад. Дар натиҷа, зарибҳои монандӣ ҳамчун қиматҳои доимӣ боқӣ намонда, ба қиматҳои тағйирёбанда табдил меёбанд ва вобаста ба марҳилаи муайяни ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии конструкция тағйир меёбанд.

Аз рӯи натиҷаҳои таҳлили графикаи шаклтағйирии ғайрихаттии бетон метавон қайд намуд, ки пешгӯии қобилияти борбардории болори оҳанубетонии аслӣ дар асоси зарибе иҷро карда шавад, ки он нисбати мустаҳкамии призмавии бетони модел ба мустаҳкамии призмавии бетони аслӣ муайян мегардад. Чунин тартиб имкон медиҳад, ки фарқиати хусусиятҳои механикии масолеҳ дурусттар ба ҳисоб гирифта шуда, дақиқии гузариши миқёсӣ ҳангоми арзёбии ҳолати

ҳаддӣ конструкия баланд бардошта шавад. Натиҷаҳои арзёбии ҳолати ҳаддӣ бо назардошти зариви мазкур дар ҷадвали 5 оварда шудаанд.

Азбаски бори эквивалентии аз рӯйи натиҷаҳои модели физикӣ ҳосилшуда бо қимати миёнаи таҷрибавии қувва барои болори аслии муқоиса карда мешавад, ҳатогии муайяншуда 5,39 %-ро ташкил медиҳад. Ҳангоми муқоиса бо натиҷаҳои озмоиши болори оҳанубетонии аслии БМ-2 ҳатогии мазкур дақиқтар арзёбӣ гардида, то 1,00 % коҳиш меёбад, ки аз дараҷаи баланди мувофиқати натиҷаҳои пешгӯишуда шаҳодат медиҳад.

Ҷадвали 5. – Натиҷаҳои арзёбии ҳолати ҳаддӣ болори оҳанубетонии асли

Қувваи миёнаи вайронкунандаи болори моделӣ	Зариви монандии ҳолати ҳаддӣ	Қувваи эквивалентӣ барои болори асли	Қувваи миёнаи таҷрибавӣ ба болори асли	Ҳатогӣ аз рӯйи меъёри монандии қувва
F_m , кН	$k_u = \frac{R_b^m}{R_b^n}$	$F_n = k_u \cdot k_L^2 \cdot F_m$, кН	F_n , кН	%
19.72	0.776	244.84	232.32	+5.39

Таҳлили натиҷаҳои гузариш аз модели физикӣ ба болори оҳанубетонии аслии нишон дод, ки ҳар як марҳилаи кори унсурҳои ҳамшаванда бо бартарии меъёри муайяни монандӣ тавсиф мегардад ва истифодаи як зариви доимии микёсбандӣ барои тамоми ҳудуди боргузорӣ аз нуқтаи назари методӣ нодуруст мебошад. Дар раванди боргузори марҳилавӣ кори болори оҳанубетонӣ аз марҳилаи чандирӣ то расидан ба ҳолати ҳаддӣ пай дар пай тағйир меёбад, ки дар ҳар як марҳила моҳияти физикии шаклтағйирӣ гуногун мебошад. Аз ин лиҳоз, интиҳоби зариви монандӣ бояд барои ҳар як марҳилаи кори унсури оҳанубетонӣ ба таври алоҳида асоснок карда шавад.

Вобаста ба масъалаи зикргардида, дар таҳқиқоти мазкур ба таври таҷрибавӣ муайян намудани зарибҳои монандӣ, ки кори конструкияро дар ҳамаи марҳилаҳои асосии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ – аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ – тавсиф менамоянд, омукта шуд. Ҳолати мазкур имкон медиҳад, ки на танҳо дурустии гузариши микёсӣ таъмин карда шавад, балки дақиқии пешгӯии қобилияти борбардорӣ ва шаклтағйирпазирии болорҳои оҳанубетонии аслии низ баланд бардошта шавад, ки барои ҳисобҳои муҳандисӣ ва моделсозии таҷрибавӣ аҳамияти амалӣ дорад.

Аз рӯйи натиҷаҳои таҳқиқот зариви дақиқтари монандӣ пешниҳод карда мешавад, ки марҳилавӣ будани шаклтағйирӣ ва рафтори гуногунмодулии масолеҳи конструкияро ба инобат мегардад,

$$k_{um} = \frac{E_m}{E_n} \cdot \frac{F_{crc}^m}{F_{раз}^m} \cdot \frac{F_i^m}{F_{раз}^m}, \quad (5)$$

дар ин ҷо k_{um} – зариви маҷмуавии монандӣ;

E_m – модули ибтидоии шаклтағйирии масолеҳи модел;

E_n – модули ибтидоии шаклтағйирии масолеҳи конструкияи асли;

F_{crc}^m – қуввае, ки ба лаҳзаи пайдоиши тарқишҳо дар болори моделӣ мувофиқат мекунад;

F_i^m – қувваи ба болори моделӣ таъсиркунанда дар марҳилаи муайяни боргузорӣ;

$F_{раз}^m$ – қувваи вайронкунандаи болори моделӣ.

Дар ҷадвали 6 натиҷаҳои гузариш аз параметрҳои модели физикӣ ба параметрҳои болори асли дар нуқтаи назоратии ИЧ-4 бо истифодаи зариви маҷмуавии монандӣ оварда шудааст.

Ҷадвали 6. – Натиҷаҳои гузариш аз нуктаи ченкунии ИЧ-4-и модели физикӣ ба нуктаи ҳаммонанди болори оҳанубетонии аслӣ бо назардошти зариви маҷмуавии монандӣ

Қувваи миёнаи таҷрибавӣ ба болори моделӣ	Зариви маҷмуавии монандӣ	Қувваи эквивалентӣ барои болори аслӣ	Қувваи миёнаи таҷрибавӣ ба болори аслӣ	Ҳагоғ аз рӯи меъёри монандии қувва	Қимати миёнаи таҷрибавии ҳамиши болори моделӣ	Қимати эквивалентии ҳамиш барои болори аслӣ	Қимати миёнаи таҷрибавии ҳамиши болори аслӣ	Ҳагоғ аз рӯи ҳамиш
F_M , кН	k_{um}	$F_n = k_{um} \cdot k_L^2 \cdot F_M$, кН	F_n , кН	%	f_M , мм	$f_n = k_L \cdot k_{\sigma} \cdot f_M$, мм	f_n , мм	%
дар марҳилаи пайдоиши тарқиш								
2.53	0.818	33.11	35	5.40	0.53	2.54	2.83	-10.18
пас аз пайдоиши тарқиш					f_M , мм	$f_n = k_L \cdot k_{um} \cdot f_M$	f_n , мм	
13.07	0.754	157.68	155.11	-1.66	6.77	20.42	22.36	-8.68
18.02	0.717	206.73	191.15	-8.15	9.94	28.51	29.02	-1.76
19.03	0.710	216.18	219.61	1.56	12.31	34.96	38.55	-9.31
19.72	0.706	222.76	232.32	4.12	25.02	70.66	61.62	14.66
Зариви микёсӣ $k_L=4$, зариви монандии пешниҳодшаванда $k_{um} = \frac{E_M}{E_n} - \frac{F_{crc}^M}{F_{раз}^M} \cdot \frac{F_i^M}{F_{раз}^M}$.								

Таҳлили натиҷаҳо нишон дод, ки ҳангоми моделсозии физикии васеъ истифодаи як зариви ягонаи монандӣ барои ҳамаи марҳилаҳои кори констрuksияи ҳамшаванда нокифоя мебошад. Аз ҷумла, дар марҳилаи гузариш, ки ба лаҳзаи пайдоиши тарқишҳо мувофиқат мекунад, монандӣ аз рӯи қувва бояд бо назардошти зариви маҷмуавии монандӣ муайян карда шавад. Ҳамзамон, ҳамиш дар ин марҳила бояд аз рӯи зариви монандии шиддат ҳисоб карда шавад, зеро ҳолати шиддатнокии констрuksия дар ин марҳила асосан ба кори чандирии он мувофиқат менамояд.

Пас аз пайдоиши тарқишҳо, ҳангоме ки констрuksия ба ҳолати шаклтағйирии ғайрихаттӣ мегузарад ва кори гуногунмодулии масолеҳ бештар зоҳир мегардад, ҳам қувва ва ҳам ҳамиш бояд аз рӯи зариви маҷмуавии монандӣ муайян карда шаванд. Ин зариб тағйирёбии хусусиятҳои сахтии унсурро дар марҳилаҳои гуногуни кори констрuksия ба ҳисоб мегирад. Ҳагҳои миёна дар лаҳзаи пайдоиши тарқишҳо аз рӯи се нуктаи ченкунӣ барои қувва 5,4 % ва барои ҳамиш 6,27 %-ро ташкил медиҳад. Қиматҳои мазкур дар ҳудуди муайяни иҷозатдодашуда буда, дурустии гузариши микёсиро дар марҳилаи мазкур тасдиқ менамоянд. Пас аз пайдоиши тарқишҳо ҳагҳои миёна барои қувва 3,87 % ва барои ҳамиш 7,22 %-ро ташкил медиҳад. Ин натиҷаҳо асоснокии истифодаи меъёри маҷмуавии пешниҳодшудаи монандиро дар марҳилаи ғайрихаттӣ кори констрuksия барои гузариши микёсии параметрҳои қуввагӣ ва шаклтағйирӣ аз модели физикӣ ба болори оҳанубетонии аслӣ тасдиқ менамоянд.

Илова ба арзёбӣ аз рӯи ҳолатҳои ҳаддӣ гурӯҳи яқум, ки қобилияти борбардории констрuksияро тавсиф менамояд, дар таҳқиқоти мазкур арзёбӣ аз рӯи ҳолатҳои ҳаддии гурӯҳи дуум низ иҷро карда шудааст. Ҳолатҳои ҳаддии гурӯҳи дуум истифодабарӣ ва коршоямии унсурҳои оҳанубетонӣ, аз ҷумла хусусиятҳои сахтӣ, ҳамишҳо ва паҳнои кушодашавии тарқишҳо ро инъикос менамояд.

Таҳлили шакли пайдоиши тарқишҳо ва графикҳои вобастагии паҳнои кушодашавии тарқишҳо аз қувваи таъсиркунанда дар болорҳои оҳанубетонии аслӣ ва моделӣ нишон дод, ки дар модели физикӣ паҳнои ҳаддии кушодашавии тарқишҳо аз рӯи меъёр дар марҳилаи наздик ба вайроншавӣ ба қайд гирифта шуд. Натиҷаи мазкур асоснок менамояд, ки ҳангоми моделсозии физикии васеъ ҳолати ҳаддии гурӯҳи дуум аз рӯи меъёри паҳнои кушодашавии тарқишҳо бо дараҷаи кофӣ эътимоднокӣ арзёбӣ карда шавад.

Тибқи меъёри монандии қувва муқаррар карда шуд, ки барои болори оҳанубетонии аслӣ қувваи ҳаддӣ аз рӯи ҳолати ҳаддӣ гурӯҳи дуҷум 155,11 кН-ро ташкил медиҳад. Бинобар ин, қувваи эквивалентӣ барои модели физикӣ бо назардошти зарифи маҷмуавии монандӣ ба 13,07 кН баробар муайян гардид.

Дар асоси муодилаҳои аппроксиматсияи вобастагҳои миёнагардидаи таҷрибавии паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо аз қувваи таъсиркунанда дар болорҳои оҳанубетонии аслӣ ва моделӣ, барои шароити боргузори статикӣ формулаи эмпирикӣ пешниҳод карда мешавад.

Барои конструкияи аслӣ вобастагӣ чунин намуд дорад:

$$y = 400,38 \cdot x + 35. \quad (6)$$

Барои модели физикӣ:

$$y = 61,88 \cdot x + 2,53, \quad (7)$$

дар ин ҷо $35 - F_{crc}^H$ – қувваи пайдоиши тарқишҳо дар болори оҳанубетонии аслӣ;

$2,53 - F_{crc}^M$ – қувваи пайдоиши тарқишҳо дар модели физикии болор;

$x - a_{crc}^H, a_{crc}^M$ – паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо дар болорҳои оҳанубетонии аслӣ ва моделӣ;

$y - F_H$ – қувваи ба болори аслӣ таъсиркунанда, ки дар вобастагӣ аз паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо муайян карда мешавад;

$y - F_M$ – қувваи ба болори моделӣ таъсиркунанда, ки дар вобастагӣ аз паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо муайян карда мешавад.

Пас аз гузоштани бузургҳои мувофиқ ба ҷойҳои (x) ва (y) муодилаҳои зерин ҳосил карда мешавад.

Барои конструкияи аслӣ:

$$F_H = 400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^H. \quad (8)$$

Барои конструкияи моделӣ:

$$F_M = 62 \cdot a_{crc}^M + F_{crc}^M. \quad (9)$$

Бо тақсим намудани ифодаи (9) ба ифодаи (8) вобастагии зерин ҳосил мегардад:

$$\frac{F_M}{F_H} = \frac{62 \cdot a_{crc}^M + F_{crc}^M}{400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^H}, \quad \frac{F_M}{F_M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}} = \frac{62 \cdot a_{crc}^M + F_{crc}^M}{400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}},$$

$$400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um} = 62 \cdot a_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um} + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}, \quad (10)$$

$$a_{crc}^M = \frac{400 \cdot a_{crc}^H + F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um} - F_{crc}^M \cdot k_L^2 \cdot k_{um}}{62 \cdot k_L^2 \cdot k_{um}}, \quad a_{crc}^M = \frac{400 \cdot a_{crc}^H}{62 \cdot k_L^2 \cdot k_{um}}.$$

Ҳангоми гузоштани қимати меъёрии ҳаддӣ паҳноӣ кушодашавии тарқишҳои конструкияи аслӣ ва зарифҳои мувофиқи монандӣ ба вобастагии эмпирикии (10) паҳноӣ ҳаддӣ кушодашавии тарқишҳо барои модели болори оҳанубетонӣ муайян карда мешавад.

$$a_{crc}^M = \frac{400 \cdot a_{crc}^H}{62 \cdot k_L^2 \cdot k_{um}} = \frac{400 \cdot 0,3}{62 \cdot 4^2 \cdot 0,754} = 0,16 \text{ мм}. \quad (11)$$

Қимати ҳисобии аз рӯи вобастагии (11) муайян гардида, бо қиматҳои миёнаи таҷрибавии паҳноӣ кушодашавии тарқишҳои болорҳои оҳанубетонии моделӣ муқоиса карда шуд. Ҳангоми таъмин намудани монандии қувваи таъсиркунанда ва истифодаи зарифҳои мувофиқи монандӣ фарқияти қиматҳои ҳисобӣ аз қиматҳои таҷрибавӣ 5,88%-ро ташкил дод. Қимати мазкур дақиқии кофӣ усули пешниҳодшударо нишон дода, дурустии гузариши микросиро аз рӯи меъёри тарқиштоварӣ тасдиқ менамояд.

Ҳамин тариқ, натиҷаҳои бадастомада имконияти истифодаи вобастагии эмпирикии таҳияшударо барои арзёбии паҳноӣ ҳаддӣ кушодашавии тарқишҳо ҳангоми моделсозии физикии болорҳои ҳамшавандаи оҳанубетонӣ асоснок менамоянд.

Гузариш аз қимати моментҳои ҳамкунандаи модели физикӣ ба параметрҳои конструксияи аслӣ бо истифодаи зарибҳои монандӣ аз рӯйи шиддат, шаклтағйирӣ ва зариви маҷмуавии таҳияшудаи монандӣ иҷро карда шуд. Истифодаи зариви маҷмуавии монандӣ мутобиқати баландтари қиматҳои пешгӯишуда ва таҷрибавиро нишон дод, ки самаранокии онро ҳангоми арзёбии кори унсурҳои ҳамшавандаи оҳанубетонӣ тасдиқ менамояд. Натиҷаҳои моделсозии моментҳои ҳамкунанда ва муқоисаи онҳо бо натиҷаҳои конструксияи аслӣ дар асоси зариви маҷмуавии таҳияшудаи монандӣ дар ҷадвали 7 оварда шудаанд.

Гузариш аз қимати моментҳои ҳамкунандаи модели физикӣ ба параметрҳои конструксияи аслӣ бо истифодаи зарибҳои монандӣ аз рӯйи шиддат, шаклтағйирӣ ва зариви маҷмуавии таҳияшудаи монандӣ иҷро карда шуд. Истифодаи зариви маҷмуавии монандӣ интиқоли дақиқтари параметрҳои ҳисобию пешгӯишударо аз модели физикӣ ба конструксияи аслӣ таъмин намуд. Мутобиқати ҳосилшуда дар асоси муқоисаи натиҷаҳои ҳисобии пешгӯишуда бо натиҷаҳои таҷрибавӣ асоснокии зариви пешниҳодшударо ҳангоми арзёбии кори унсурҳои ҳамшавандаи оҳанубетонӣ тасдиқ менамояд.

Натиҷаҳои моделсозии моментҳои ҳамкунанда ва муқоисаи қиматҳои ҳосилшуда бо натиҷаҳои конструксияи аслӣ дар асоси зариви маҷмуавии монандӣ дар ҷадвали 7 оварда шудаанд.

Ҷадвали 7. – Моделсозии моментҳои ҳамкунанда дар асоси зариви маҷмуавии монандӣ

Моменти миёнаи ҳамкунанда таҷрибавӣ дар болори моделӣ, кН·м	Зариви маҷмуавии монандӣ	Моменти ҳамкунандаи эквивалентӣ барои болори аслӣ, кН·м	Моменти миёнаи ҳамкунандаи таҷрибавӣ дар болори аслӣ, кН·м	Ҳаҷоғӣ аз рӯйи меъёри монандии моментҳои ҳамкунанда
M_m	k_{um}	$M_n = M_m \cdot k_L^3 \cdot k_{um}$	M_n	%
0.59	0.818	30.89	32.38	4.61
2.84	0.754	137.05	143.48	4.48
4.17	0.717	191.35	176.81	-8.23
4.40	0.710	199.94	203.09	1.55
4.56	0.706	206.04	214.89	4.12

Таҳлили натиҷаҳо аз рӯйи меъёри монандии қувва бо истифодаи зариви маҷмуавии монандӣ дараҷаи баланди мутобиқати қиматҳои ҳисобӣ ва таҷрибавиро нишон дод. Дар асоси натиҷаҳои ҳосилшуда муқаррар гардид, ки зариви маҷмуавии монандӣ метавонад барои таъмин намудани мутобиқати моментҳои ҳамкунанда дар марҳилаҳои асосии кори унсурҳои оҳанубетонӣ – аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ истифода шавад. Методикаи пешниҳодгардида дақиқии баланди гузариши микёсиро таъмин намуда, рафтори қуввавии конструксияҳои ҳамшавандаи оҳанубетониро дар шароити моделсозии физикӣ дуруст инъикос менамояд. Ҳангоми истифодаи зариви маҷмуавии монандӣ ҳаҷоғии миёнаи гузариш дар ҳамаи марҳилаҳои кори конструксия 4,6%-ро ташкил медиҳад. Ин натиҷа самаранокии баланди зариви мазкурро тасдиқ намуда, дақиқии зарурии моделсозии моментҳои ҳамкунандаи унсурҳои оҳанубетониро нишон медиҳад.

Таҳлили анҷомдодашуда дурустии методикаи таҳияшудаи гузариш аз натиҷаҳои миёнаи таҷрибавии модели физикӣ ба параметрҳои болори оҳанубетонии аслиро тасдиқ намуд. Муқаррар гардид, ки истифодаи зариви маҷмуавии монандӣ, бо назардошти хусусиятҳои қувваӣ ва шаклтағйирӣ дақиқии зарурии гузариши микёсиро дар ҳамаи марҳилаҳои кори унсур – аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ таъмин месозад. Муқоисаи натиҷаҳои қиматҳои иҷозатдодашудаи ҳаҷоғиро нишон дода, эътимоднокии методикаи пешниҳодшуда ва имконияти истифодаи онро барои арзёбии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ конструксияҳои ҳамшавандаи оҳанубетонӣ дар шароити моделсозии физикӣ асоснок менамояд.

3.9. Арзёбии техникаю иқтисодии таҳқиқоти таҷрибавии конструксияҳои аслӣ ва моделӣ. Арзёбии техникаю иқтисодии анҷомдодашуда нишон дод, ки истифодаи болорҳои оҳанубетонии моделӣ имкон медиҳад хароҷоти гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ ба таври назаррас кам карда шавад. Хароҷоти умумӣ барои омода намудани се намунаи моделӣ 2,19%-и

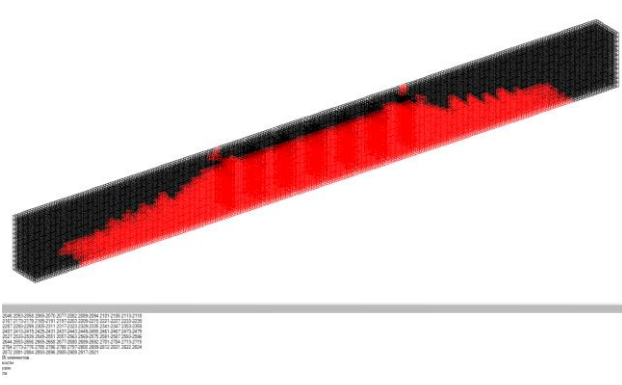
харочоти тайёр намудани болорҳои аслиро ташкил дод, ки самаранокии иқтисодии моделсозии физикиро ҳангоми нигоҳ доштани эътимоднокии натиҷаҳои ҳосилшаванда тасдиқ менамояд.

Боби чорум «МОДЕЛСОЗИИ АДАДИИ БОЛОРИ ОҲАНУБЕТОНӢ БО УСУЛИ УНСУРҲОИ НИҲОӢ» ба тасдиқи эътимоднокии натиҷаҳои таҷрибавӣ тавассути моделсозии ададии аз ҷиҳати физикӣ ғайрихаттӣ болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ дар барномаи ҳисобии ЛИРА-САПР 2022 бахшида шудааст. Ҳисобҳо бо истифодаи моделҳои милағӣ ва ҳаҷмии унсурҳои ниҳой бо гузштани қувваи таъсиркунандаи зинавӣ иҷро гардида, ҳосияти ғайрихаттӣ физикии бетон ва арматура дар асоси натиҷаҳои воқеии таҷрибавӣ, ки ҳангоми озмоиши намунаҳои назоратии маводҳо ҳосил шудаанд, ба инобат гирифта шуд [6–А]. Сохтори боб аз даҳ зербоб иборат буда, бо хулосаҳо анҷом меёбад.

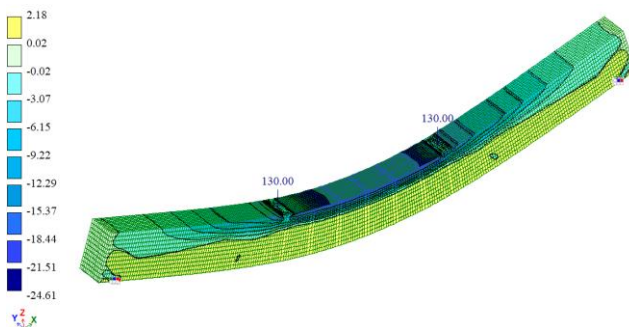
Дар зербобҳои 4.1 – 4.2 муқаррароти умумии моделсозии ададии конструкцияҳои сохтмонӣ баён гардида, хусусиятҳои масолеҳи ҳангоми ҳисобкунии ададии болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ истифодагардида оварда шудааст. Дар асоси диаграммаҳои таҷрибавии шаклтағйирии бетон ва арматура натиҷаҳои ибтидоӣ барои ҳисоби ададӣ аз ҷиҳати физикӣ ғайрихаттӣ дар барномаи ҳисобии ЛИРА-САПР 2022 тартиб дода шуд.

Дар зербобҳои 4.3–4.6 натиҷаҳои таҳқиқоти ададии болори оҳанубетонии асли ҳангоми моделсозии милағӣ ва ҳаҷмӣ оварда шудаанд. Муқаррар гардид, ки ҳангоми моделсозии милағии болори оҳанубетонии асли бо назардошти ғайрихаттӣ физикии қори конструкция, истифодаи унсури ниҳоии КЭ210 ва усули наздикшавиҳои пай дар пай (усули итератсионӣ) имкони муайян намудани параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйириро, ки ба натиҷаҳои таҷрибавӣ наздиканд, фароҳам меорад.

Паҳншавии тарқишҳо дар болори оҳанубетонии асли ҳангоми моделсозии ҳаҷмӣ ва майдонҳои тақсими шиддатҳои зерини таъсири қувваи $P_{ult} = 260$ кН дар расмҳои 22 ва 23 оварда шудаанд.

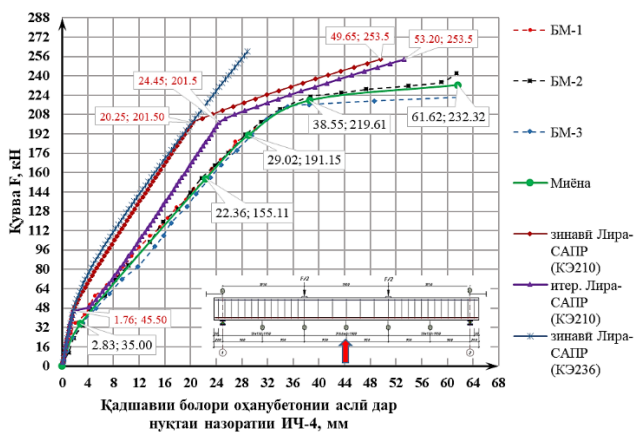


Расми 22. Паҳншавии тарқишҳо дар болори оҳанубетонии асли

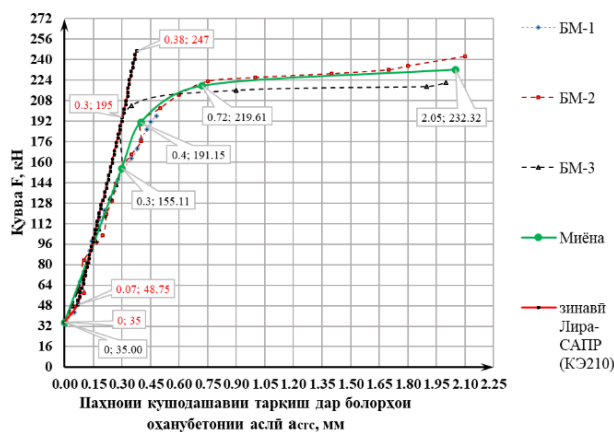


Расми 23. Майдонҳои тақсими шиддатҳои N_x (МПа) ҳангоми таъсири қувваи $P_{ult} = 260$ кН

Вобастагии хамиш дар миёнаи равоқи болор ва паҳноии кушодашавии тарқишҳо аз қувва, ки аз рӯи натиҷаҳои моделсозии ададии болорҳои оҳанубетонии асли ҳосил шудаанд, дар муқоиса бо натиҷаҳои таҷрибавӣ мутаносибан дар расмҳои 24 ва 25 оварда шудаанд.



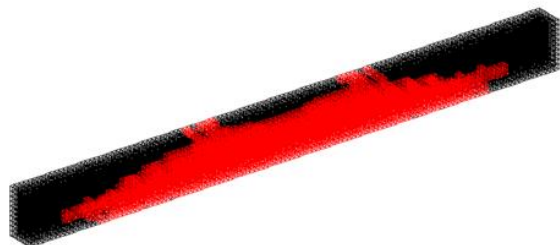
Расми 24. Вобастагии хамиш аз қувва дар нуқтаи ҳаммонанди ИЧ-4



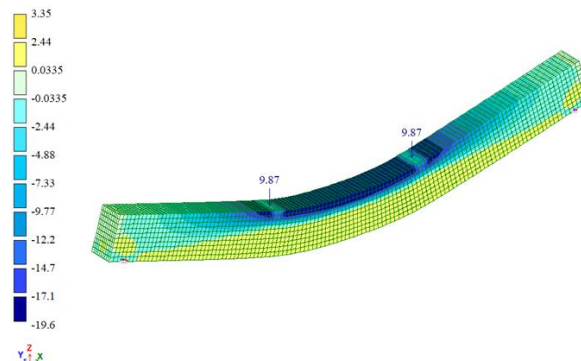
Расми 25. Вобастагии паҳноии кушодашавии тарқишҳо аз қувва

Дар зербобҳои 4.7–4.10 натиҷаҳои таҳқиқоти ададии болори оҳанубетонии моделӣ бо истифодаи моделҳои милағӣ ва ҳаҷмии унсурҳои ниҳой оварда шудаанд. Нишон дода шудааст, ки моделсозии ҳаҷмии ғайрихаттии болори моделӣ бо истифодаи унсурҳои ниҳойи КЭ236 ва усули боргузори пай дар пай (усули зинавӣ) имкон медиҳад параметрҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ муайян карда шаванд, ки бо натиҷаҳои озмоишҳои таҷрибавӣ мувофиқати хуб доранд.

Паҳншавии тарқишҳо дар болори оҳанубетонии аслии ҳангоми моделсозии ҳаҷмӣ ва майдонҳои тақсими шиддатҳо зерин таъсири қувваи 19,74 кН дар расмҳои 26 ва 27 оварда шудаанд.

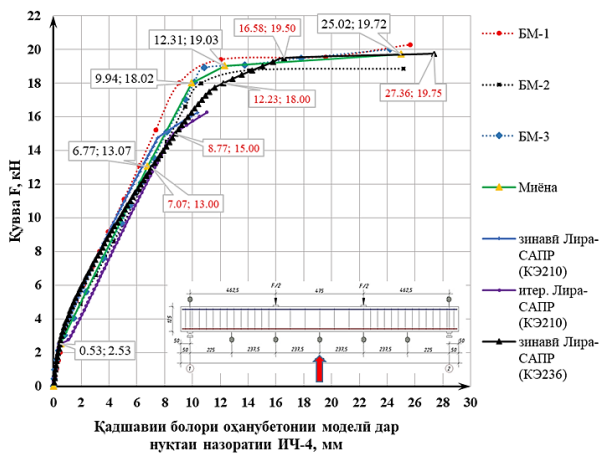


Расми 26. Паҳншавии тарқишҳо дар болори оҳанубетонии моделӣ

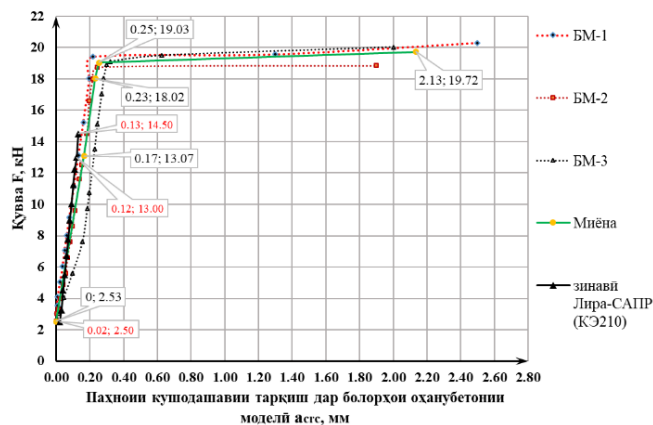


Расми 27. Майдонҳои тақсими шиддатҳои N_x (МПа) ҳангоми таъсири қувваи $P_{ult}=19,74\text{кН}$

Вобастагии хамиш дар миёнаи равоқи болор ва паҳноии кушодашавии тарқишҳо аз қувва, ки аз рӯи натиҷаҳои моделсозии ададии болорҳои оҳанубетонии моделӣ ҳосил шудаанд, дар муқоиса бо натиҷаҳои таҷрибавӣ дар расмҳои 28 ва 29 оварда шудаанд.



Расми 28. Вобастагии хамиш аз қувва дар нуқтаи ҳаммонанди ИЧ-4



Расми 29. Вобастагии паҳноии кушодашавии тарқишҳо аз қувва

Таҳқиқоти ададии анҷомдодашудаи болорҳои оҳанубетонии аслии ва моделӣ нишон доданд, ки ба инобат гирифтани хусусияти ғайриҷинсаи бетон ва кори якҷояи бетон бо арматура ҳамчун масъалаи муҳими тақмили моделҳои ҳисобӣ боқӣ мемонад. Дар баробари ин, моделсозии ададӣ таҳқиқоти таҷрибавиро иваз намекунад, балки ҳамчун воситаи санҷиш, дақиқсозӣ ва шарҳи хусусиятҳои кори конструксияҳо хизмат менамояд.

ХУЛОСА

Кори диссертационӣ ба таҳқиқоти таҷрибавии болорҳои оҳанубетонӣ бо усулҳои моделсозии физикӣ дар асоси назарияи монандӣ бахшида шудааст. Дар қор озмоишҳои болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ гузаронида шуда, ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ, тарқишпайдошавӣ, ҳамишҳо ва қобилияти борбардории онҳо дар марҳилаҳои гуногуни боргузорӣ таҳлил гардидааст.

Дар асоси натиҷаҳои таҷрибавии ҳосилшуда меъёрҳо ва зарифҳои монандӣ асоснок карда шудаанд, ки гузаришро аз параметрҳои модели физикӣ ба конструкцияи аслии оҳанубетонӣ таъмин менамоянд. Муқаррар гардид, ки моделсозии боэътимоди кори унсурҳои ҳамшавандаи оҳанубетонӣ ба инобат гирифтани ҳам меъёрҳои қувваӣ ва ҳам меъёрҳои шаклтағйирии монандиро махсусан пас аз пайдоиши тарқишҳо ва тағйирёбии саҳтии конструкция талаб менамояд.

Моделсозии ададӣ дар барномаи ҳисобии ЛИРА-САПР 2022 мувофиқати натиҷаҳои ҳисобӣ ва таҷрибавиро тасдиқ намуда, имконияти истифодаи моделҳои милағӣ ва ҳаҷмии унсурҳои ниҳонӣ аз ҷиҳати физикӣ ғайрихаттиро барои таҳлили кори болорҳои оҳанубетонии асли ва моделӣ нишон дод. Натиҷаҳои ҳосилшуда дорои аҳамияти илмӣ ва амалӣ буда, метавонанд ҳангоми таҳқиқоти таҷрибавӣ, моделсозии физикӣ ва санҷиши моделҳои ҳисобии конструкцияҳои оҳанубетонӣ истифода шаванд.

Натиҷаҳои асосии илмӣ диссертатсия аз инҳо иборатанд:

1. Нақшаи сохтори моделсозии физикии конструкцияҳои оҳанубетонӣ дар асоси принципҳои назарияи монандӣ таҳия карда шуд, ки имкони ба низом даровардани раванди моделсозӣ ва баланд бардоштани асоснокии пешгӯии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии унсурҳои оҳанубетониро фароҳам меорад.

2. Ҳамчун объекти базавӣ барои санҷиши гузариши миқёсӣ натиҷаҳои озмоишҳои аслии болорҳои оҳанубетонӣ истифода шуданд, ки дар асоси онҳо марҳилаҳои ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии кори конструкция муайян карда шуданд: пайдошавии тарқишҳо, расидан ба паҳноӣ ҳадди қушодашавии онҳо, шаклтағйирии ғайрихаттӣ ва вайроншавӣ. Марҳилаҳои зикршуда ҳангоми муқоиса бо арзёбии пешгӯии кори болори асли, ки аз рӯи натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ бо риояи принципҳои назарияи монандӣ ҳосил гардидааст, ҳамчун марҳилаҳои эталонӣ қабул карда шуданд.

3. Муқаррар гардид, ки пас аз пайдошавии тарқишҳо болори оҳанубетонӣ ба марҳилаи шаклтағйирии ғайрихаттӣ гузашта, саҳтии буриш тағйир меёбад. Аз ин лиҳоз, интиқоли қувва ва ҳамишро мувофиқи зарифи маҷмуавии пешниҳодшудаи монандӣ иҷро намудан мувофиқи мақсад мебошад. Хатоии миёнаи гузариши миқёсӣ дар лаҳзаи пайдошавии тарқишҳо аз рӯи қувва 5,40% ва аз рӯи ҳамиш 6,27%-ро ташкил дод, пас аз пайдошавии тарқишҳо бошад, мутаносибан 3,87% ва 7,22%-ро ташкил намуд. Қиматҳои ҳосилшуда дурустии истифодаи зарифи маҷмуавии монандиро барои арзёбии пешгӯишудаи кори болори оҳанубетонии асли аз марҳилаи чандирӣ то марҳилаи вайроншавӣ дар асоси натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ тасдиқ менамоянд.

4. Ба таври таҷрибавӣ муқаррар гардид, ки истифодаи зарифи маҷмуавии монандӣ ҳангоми муайян намудани моменти ҳамкунандаи эквивалентии болори оҳанубетонии асли хатоии миёнаи гузариши миқёсиро дар ҳамаи марҳилаҳои баррасишавандаи кори конструкция дар ҳудуди 4,6% таъмин менамояд.

5. Муқаррар гардид, ки паҳноӣ ҳадди қушодашавии тарқишҳо ба андозаи 0,30 мм, ки барои конструкцияҳои оҳанубетонии асли ҳамчун қимати ниҳонӣ иҷозатдодашуда қабул мегардад, бе гузаронидани бозҳисобкунии мувофиқи миқёсӣ ба болорҳои моделӣ татбиқ шуда наметавонад. Зеро ҳангоми миқёси моделсозии 1:4 қимати мазкур ба марҳилаи ҳолати ҳаддӣ мувофиқ буда, амалан вайроншавии унсурро тавсиф медиҳад. Бинобар ин, зарурати моделсозии паҳноӣ қушодашавии тарқишҳо ҳамчун параметри алоҳидаи ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии болори оҳанубетонии моделӣ асоснок карда шуд.

6. Дар асоси қонуниятҳои таҷрибавии муайяншуда, ки дар банди 5 оварда шудааст, барои муайян намудани паҳноӣ эквивалентии кушодашавии тарқишҳо дар болорҳои оҳанубетонии моделӣ вобастагии эмпирикӣ пешниҳод гардид. Муқаррар карда шуд, ки дар доираи кори диссертатсионӣ ба қимати ҳаддии паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо барои болорҳои оҳанубетонии моделӣ қимати 0,16 мм мувофиқат мекунад; дар ин ҳолат хатой нисбат ба натиҷаҳои таҷрибавӣ 5,88%-ро ташкил дод.

7. Арзёбии техникаро иқтисодӣ нишон дод, ки истифодаи болорҳои оҳанубетонии моделӣ хоҳишҳои назарраси хароҷотро барои гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ таъмин менамояд. Тибқи ҳисобҳои харҷномавии дар доираи кори диссертатсионии мазкур иҷрошуда, хароҷоти умумӣ барои тайёр намудани намунаҳои моделӣ 2,19%-и хароҷоти тайёр намудани болорҳои аслиро ташкил медиҳад, ки самаранокии иқтисодии моделсозии физикиро ҳангоми нигоҳ доштани эътимоднокии илмӣ натиҷаҳои ҳосилшаванда тасдиқ менамояд.

8. Муқаррар гардид, ки истифодаи унсури милагии КЭ210 ва унсури ҳачмии КЭ236 ҳангоми моделсозии ададии ғайрихаттӣ мутаносибан болорҳои оҳанубетонии аслӣ ва моделӣ бо назардошти хусусиятҳои воқеии масолеҳҳо имкони ҳосил намудани параметрҳои ҳолати шиддатнокиро шаклтағйирро, ки ба натиҷаҳои таҷрибавӣ наздик мебошанд, таъмин менамояд. Истифодаи усули наздикшавӣ пай дар пай дар модели милагии болори аслӣ ва усули боргузориҳои зинавӣ дар модели ҳачмии болори моделӣ имкон дод, ки кори конструксияҳо дар доираи масъалагузори аз ҷиҳати физикӣ ғайрихаттӣ боэътимод инъикос карда шавад.

9. Бо усули ададӣ эътимоднокии формулаи эмпирикии таҳияшуда барои пешгӯии паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо дар болорҳои оҳанубетонии аслӣ аз рӯи натиҷаҳои озмоишҳои моделӣ тасдиқ карда шуд. Натиҷаҳои ҳосилшуда имконияти истифодаи вобастагии мазкурро барои арзёбии муқовимати конструксияҳо ба пайдошавӣ ва кушодашавии тарқишҳо ҳангоми моделсозии физикӣ тасдиқ менамоянд.

ТАВСИЯҲО ОИД БА ИСТИФОДАИ АМАЛИИ НАТИҶАҲО

Мавод ва методҳои дар кори диссертатсионӣ пешниҳодшуда имконият медиҳанд, ки конструкцияҳои оҳанубетонӣ дар шакли моделӣ, бо риояи принципҳои назарияи монандӣ, бо мақсади пешгӯии ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирии конструкцияи асли таҳқиқ карда шаванд. Усули таҳияшуда метавонад барои омӯзиши кори гиреҳҳои конструкцияҳои яклухти оҳанубетонӣ, инчунин унсурҳои, ки кори онҳо ҳалли дақиқи аналитикӣ надорад, истифода гардад.

Методикаи гузаронидани озмоишҳои моделии болорҳои оҳанубетонӣ, инчунин тартиби муайян намудани хусусиятҳои физикию механикии бетон ва арматура метавонанд ҳангоми гузаронидани машғулиятҳои лабораторӣ аз ҷанни «Конструкцияҳои оҳанубетонӣ», инчунин ҳангоми иҷрои корҳои илмӣ таҳқиқотӣ дар соҳаи омӯзиши таҷрибавии конструкцияҳои сохтмонӣ истифода карда шаванд.

Тартиби пешниҳодшудаи ҳисоби адабии аз ҷиҳати физикӣ ғайрихаттӣ бо усули боргузориҳои пай дар пай, яъне усули зинавӣ, ва усули наздикшавиҳои пай дар пай, яъне усули итератсионӣ, метавонанд ҳангоми таҳлили биноҳо ва иншоот барои арзёбии ҳолати воқеии конструкцияҳо дар асоси ҳисобҳои санҷишӣ бо назардошти борҳои таъсиркунанда истифода шаванд.

Бо назардошти афзоиши шумораи аҳолии Ҷумҳурии Тоҷикистон, зиёдшавии ҳиссаи аҳолии шаҳр, зарурати истифодаи оқилонаи қитъаҳои замин ва ҷаҳолнокии баланди сейсмикии ҳудуди ҷумҳурӣ, ҳангоми таҳияи ҳалҳои лоиҳавӣ барои биноҳо ва иншооти нодир, баландошӯна, бисёрравоқа, бино ва иншооти дорои аҳамияти махсуси масъулиятнок, озмоиши моделҳои физикӣ дар марҳилаи пешазлоиҳавӣ дар асоси принципҳои назарияи монандӣ ҳамчун самти афзалиятнокӣ илмӣ арзёбӣ мегардад. Аҳамияти махсуси методикаи пешниҳодшуда дар он ифода меёбад, ки он имконият медиҳад ҳолати шиддатнокӣ шаклтағйирӣ, хусусияти кори системаи конструктивӣ ва асоснокии ҳалҳои лоиҳавии қабулшаванда дар шароити зичии баланди сохтмони шаҳрӣ ва талаботи баланди сейсмикӣ пешакӣ арзёбӣ карда шаванд.

РҰЙХАТИ АДАБИЁТ

1. Алабужев П. М., Геронимус В. В., Минкевич Л. М., Шеховцов Б. А. Теория подобия и размерностей. Моделирование. М.: Высш. шк., 1968. 206 с.
2. Амаян Р.О. Некоторые задачи статистического моделирования строительных конструкций: автореф. дис. канд. техн. наук. – Ереван: Ереванский политехнический институт, 1969. – 20 с.
3. Архипов В. А., Березиков А. П. Основы теории инженерно–физического эксперимента. Томск: Томск политехнич. ун–т, 2008. 206 с.
4. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1984 – 439 с.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.
6. Иванов И.Е., Ерещенко В.Е. Методы подобия физических процессов: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2015.– 144 с.
7. Иванов М.Г. Размерность и подобие: учеб. пособие. – Долгопрудный, 2013. – 68 с.
8. Кирпичев М.В. Теория подобия – М.: 1953. – 94 с.
9. Клайн С. Дж. Подобие и приближённые методы. – М.: Мир, 1968. – 302 с.
10. Крамаренко Н.В. Методы подобия в механике. Анализ уравнений: учебное пособие – Новосибирск: Изд–во НГТУ, 2018. – 124 с.
11. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. Новосибирск: Изд–во СО РАН, 1986. 295 с.
12. Мастаченко В.Н. О переходе от параметров модели к параметрам оригинала. – Труды МИИТ, №369, 1971.
13. Мастаченко В.Н. Надежность моделирования строительных конструкций. –М.: Стройиздат, 1974. – 84 с.
14. Мастаченко В.Н. К вопросу вычисления вероятности подобия при моделировании конструкций. – Труды МИИТ, №427, 1973 – с.78–83.
15. Монахенко Д.В. Предельная теорема аффинности и ее применение при моделировании задач строительной механики. – Л.: Изд–во ЛИИЖТа, 1968.–с. 173–179.
16. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. – Ереван: Изд–во АН Арм. ССР, 1965. – 303 с.
17. Назаров А. Г. О механическом подобии твёрдых тел и его применении к исследованию строительных конструкций и сейсмостойкости сооружений. Сообщение. — Известия АН Армянской ССР. Сер. технических наук. 1961. Т. XIV, № 1. С. 1–16.
18. Назаров А.Г., Шагинян С.А. Руководство по исследованию механических свойств строительных конструкций на моделях. Издательство АН АрмССР, Ленинакан. 1966.
19. Новицкий В.В. Экспериментальные исследования строительных конструкций на моделях методом муаров. – Л.: Стройиздат, "Моделирование строительных конструкций", 1971.
20. Покровский Г.И., Федоров И.С. Центробежное моделирование в строительном деле. –М.: Стройиздат, 1968.
21. Поляков Л.П., Файнбург В.М. Моделирование строительных конструкций. – К.: Будівельник, 1975. – 160 с.
22. Прис Б. В., Дэвис Д. Д. Моделирование железобетонных конструкций // Минск.: Высш. шк. – 1974.
23. Романов О.Я., Ходосов В.В. Моделирование при проектировании сложных технических систем. – СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2006. – 60 с.
24. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ СССР. – М.: Стройиздат, 1979. – 87 с.

25. Санников Р.Х. Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента: учебное пособие. – Уфа: УГНТУ, 2010. – 253 с.
26. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1987.–447 с.
27. Стратегия развития строительной отрасли Республики Таджикистан на период до 2030 года, утверждённой постановлением Правительства Республики Таджикистан от 27 апреля 2022 г. № 203.
28. СНиП 82–02–95. Бетоны. Правила подбора состава. – М.: Минстрой России, 1995. – 48 с.
29. СНиП РТ 52–03–2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Душанбе: ГУП «Научно–исследовательский институт „Строительство и архитектура“», 2021. – 135 с.
30. Тарасов А.М., Бобров Ф.Ю., Пряхин Д.В. Применение физического моделирования при строительстве мостов и других сооружений // Вестник мостостроения. – 2007. – № 1. – С. 21–26.
31. Тирский Г.А. Анализ размерностей // Соросовский образовательный журнал. — 2000. – Т. 7, № 6. – С. 82–87.
32. Тирский Г.А. Подобие и физическое моделирование // Соросовский образовательный журнал. –2001. –Т. 7, № 8. –С. 122–127.
33. Хантли Г. Анализ размерностей. М.: Мир, 1970. 176 с.
34. Чемодуров В.Т., Литвинова Э.В. Физическое и математическое моделирование строительных систем: учебное пособие. – Москва: ИНФРА–М, 2021. – 196 с. DOI: 10.12737/1014191.
35. Шаповалов Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкции. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
36. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
37. Эйгенсон Л.С. Моделирование. – М.: Советская наука, 1952 – 372 с.

РҶҶҲАТИ ИНТИШОРОТИ АСОСӢ АЗ РҶҶӢИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ

Мақолаҳо дар нашрияҳои тавсияшудаи ҚОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон

[1–М]. **Махмадиев У.М.** Экспериментальное исследование напряжённо деформированного состояния натуральных железобетонных балок / И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев // Светоч науки. – 2025. – № 2. – С. 29–41. – EDN WDXOAJ.

[2–М]. **Махмадиев У. М.** Размерный анализ и критерии подобия в задачах моделирования железобетонных конструкций / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев // Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2025. – Т. 68, № 5. – С. 489–495. – EDN DAҮРАК.

[3–М]. **Махмадиев У. М.** Применение мелкозернистого бетона при физическом моделировании железобетонных конструкций / И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 4(68). – С. 177–183. – EDN OXYZNM.

[4–М]. **Махмадиев У. М.** Экспериментальные исследования моделей железобетонных балок на основе теории подобия / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев [и др.] // Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2025. – Т. 68, № 6. – С. 578–587. – EDN HUCYС.

[5–М]. **Махмадиев У. М.** Экспериментальные исследования железобетонных балок с целью определения коэффициентов подобий. // Политехнический вестник. (серия инженерные исследования) – №2–(58) 2022, – Душанбе: Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, 2022. – 164 с. – С. 132–142, ISSN 2520–2227.

[6–М]. **Махмадиев У. М.** Применение нелинейного закона деформирования бетона в ПК ЛИРА–САПР 2022 на основе результатов экспериментальных исследований / У. М. Махмадиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2026. – № 1(73). – С. 239–246. – DOI 10.65599/ENG7748. – EDN ССBAVD.

Мақолаҳо дар маводи конференсияҳо ва дигар маҷаллаҳо

[7–М]. **Махмадиев У. М.** О моделировании железобетонной балки. // международный научный журнал «Молодой ученый» №48 (443), декабрь 2022 г. (стр. 31–38) , URL: <https://moluch.ru/archive/443/97222/> ISSN 2072–0297.

[8–М]. **Махмадиев У. М.** Экспериментальные исследования модели железобетонных балок [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60–летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. – С. 213–216.

[9–М]. **Махмадиев У. М.** Теоретические основы и инженерное применение теории подобия при моделировании строительных конструкций / И. К. Каландарбеков, У. М. Махмадиев, И. И. Каландарбеков // Наука–основа инновационного развития : Материалы X Международной научно–практической конференции, Душанбе, 17–18 апреля 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 163–168. – EDN SFNZOO.

Патентҳо, шаҳодатномаҳои муаллифӣ ва бақайдгирии давлатии захираҳои иттилоотӣ

[10–М]. **Махмадиев У. М.** Стенд для моделирования сейсмических воздействий на физические модели зданий и сооружений [Текст]/ Махмадиев У.М., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Малый патент Республики Таджикистан №1453, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан от 04.12.2023 г.

АННОТАЦИЯ

диссертации **Махмадизода Усмонали Муродали** на тему «**Экспериментальные исследования железобетонных балок методами физического моделирования**», представленной на соискание учёной степени доктора философии (PhD), доктора по специальности **6D072900 - Строительство (6D072902 - Строительные конструкции, здания и сооружения)**.

Ключевые слова: железобетонная балка, физическое моделирование, модельная конструкция, натурная конструкция, напряжённо-деформированное состояние, теория подобия, коэффициенты подобия, критерии подобия, размерный анализ, прогиб, трещинообразование, ширина раскрытия трещин, нелинейное деформирование, численное моделирование, ЛИРА-САПР.

Цель диссертационной работы заключается в научном обосновании и экспериментальной реализации методики физического моделирования железобетонных балок, направленной на определение коэффициентов и критериев подобия, обеспечивающих достоверный перенос параметров напряжённо-деформированного состояния с модельных образцов на натурные конструкции.

Полученные результаты и их новизна заключаются в разработке экспериментально обоснованной методики физического моделирования железобетонных балок, базирующейся на положениях теории подобия и размерного анализа. В работе установлены закономерности изменения напряжённо-деформированного состояния натуральных и модельных железобетонных балок при статическом нагружении, включая стадии упругой работы, трещинообразования, развития деформаций и разрушения. Определены коэффициенты и критерии подобия, обеспечивающие переход от параметров физической модели к параметрам натурной конструкции по нагрузке, изгибающему моменту, прогибам, деформациям и ширине раскрытия трещин. Научная новизна исследования состоит в обосновании комплексного коэффициента подобия, учитывающего разномодульность материалов, физически нелинейный характер деформирования бетона и арматуры, изменение жёсткости сечения после трещинообразования и стадийность работы изгибаемого железобетонного элемента. Экспериментально обоснована необходимость масштабного учёта ширины раскрытия трещин как одного из определяющих параметров напряжённо-деформированного состояния железобетонных балок при физическом моделировании. Предложена эмпирическая зависимость для определения ширины раскрытия трещин натурной железобетонной балки по результатам испытаний модельного образца с учётом критерия силового подобия и коэффициента геометрического масштабирования. Достоверность результатов подтверждена сопоставимостью данных натуральных и модельных испытаний железобетонных балок, а также согласованностью основных параметров напряжённо-деформированного состояния в сходственных точках измерения. Дополнительно выполнена верификация полученных зависимостей с использованием метода физически нелинейного численного моделирования в ПК ЛИРА-САПР 2022.

Рекомендации по использованию: разработанная методика рекомендуется для экспериментального исследования железобетонных конструкций с применением физических моделей, оценки их напряжённо-деформированного состояния, трещиностойкости и деформативности, а также для верификации численных моделей в научно-исследовательских, проектных и образовательных организациях строительного профиля.

Основные результаты диссертационной работы внедрены в деятельность ОАО «САННИОСП», ГУП «НИИ “Строительство и архитектура”», Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, а также в учебный процесс ТТУ имени академика М.С. Осими.

Область применения: промышленное и гражданское строительство, экспериментальные исследования строительных конструкций, физическое моделирование железобетонных элементов, численное моделирование, расчёт и проектирование железобетонных конструкций, оценка их надёжности, трещиностойкости и деформативности.

АННОТАТСИЯИ

диссертатсияи Маҳмадизода Усмоналӣ Муродалӣ дар мавзуи «Таҳқиқоти таҷрибавии болорҳои оҳанубетонӣ бо истифода аз методҳои моделкунонии физикӣ», барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа (PhD), доктор аз рӯи ихтисоси **6D072900 – Сохтмон (6D072902 – Конструксияҳои сохтмонӣ, биноҳо ва иншоот)**.

Калимаҳои калидӣ: болори оҳанубетонӣ, моделсозии физикӣ, конструксияи моделӣ, конструксияи аслӣ, ҳолати шиддатнокию шаклтағйирӣ, назарияи монандӣ, зарибҳои монандӣ, меъёрҳои монандӣ, таҳлили андозавӣ, хашиш, тарқишпайдошавӣ, паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо, шаклтағйирии ғайрихаттӣ, моделсозии ададӣ, ЛИРА-САПР.

Мақсади кори диссертатсионӣ аз асосноккунии илмӣ ва татбиқи таҷрибавии методикаи моделсозии физикии болори оҳанубетонӣ иборат мебошад, ки ба муайян намудани зарибҳо ва меъёрҳои монандӣ равона гардида, интиқоли бозътимоди параметрҳои ҳолати шиддатнокию шаклтағйириро аз намунаҳои моделӣ ба конструксияҳои аслӣ таъмин менамояд.

Натиҷаҳои бадастомада ва наwgонии онҳо аз таҳияи методикаи аз ҷиҳати таҷрибавӣ асоснокшудаи моделсозии физикии болорҳои оҳанубетонӣ иборат буда, методикаи мазкур ба муқаррароти назарияи монандӣ ва таҳлили андозавӣ асос ёфтааст. Дар кори диссертатсионӣ қонуниятҳои тағйирёбии ҳолати шиддатнокию шаклтағйирии болорҳои оҳанубетонии аслӣ ва моделӣ ҳангоми боргузори статикӣ, аз ҷумла дар марҳилаҳои кори чандирӣ, пайдошавии тарқишҳо, афзоиши шаклтағйириҳо ва вайроншавӣ, муқаррар карда шудаанд. Зарибҳо ва меъёрҳои монандӣ муайян гардидаанд, ки гузаришро аз параметрҳои модели физикӣ ба параметрҳои конструксияи аслӣ аз рӯи қувва, моменти ҳамкунанда, хашишҳо, шаклтағйириҳо ва паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо таъмин менамоянд. Навгонии илмии таҳқиқот аз асоснок намудани зариви маҷмуавии монандӣ иборат аст, ки гуногунмодулии масоҳеҳҳо, хусусияти аз ҷиҳати физикӣ ғайрихаттии шаклтағйирии бетон ва арматура, тағйирёбии саҳтии буриш пас аз пайдоиши тарқишҳо ва хусусияти марҳилавии кори унсурӣ ҳамшавандаи оҳанубетониро ба инобат мегирад. Зарурати баҳисобгирии микёсии паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо яке аз параметрҳои муайянкунандаи ҳолати шиддатнокию шаклтағйирии болорҳои оҳанубетонӣ ҳангоми моделсозии физикӣ ба таври таҷрибавӣ асоснок карда шудааст. Барои муайян намудани паҳноӣ кушодашавии тарқишҳо дар болори оҳанубетонии аслӣ аз рӯи натиҷаҳои озмоиши намунаи моделӣ, бо назардошти меъёри монандии қуввавӣ ва зариви микёсбандии геометрӣ, вобастагии эмпирикӣ пешниҳод шудааст. Эътимоднокии натиҷаҳо дар асоси муқоисаи натиҷаи озмоишҳои таҷрибавии болорҳои оҳанубетонии аслӣ ва моделӣ, инчунин бо мувофиқати параметрҳои асосии ҳолати шиддатнокию шаклтағйирӣ дар нуқтаҳои ҳаммонанди ҷенкунӣ тасдиқ карда шудааст. Илова бар ин, санҷиши вобастагиҳои ҳосилшуда бо истифодаи усули моделсозии ададии аз ҷиҳати физикӣ ғайрихаттӣ дар барномаи ҳисобии ЛИРА-САПР 2022 иҷро карда шуд.

Тавсияҳо оид ба истифода: методикаи таҳияшуда барои таҳқиқоти таҷрибавии конструксияҳои оҳанубетонӣ бо истифодаи моделҳои физикӣ, арзёбии ҳолати шиддатнокию шаклтағйирӣ, тарқиштоварӣ ва шаклтағйирпазирии онҳо, инчунин барои санҷиши моделҳои ададӣ дар ташкилотҳои илмию таҳқиқотӣ, лоиҳавӣ ва таълимии самти сохтмон тавсия дода мешавад.

Натиҷаҳои асосии кори диссертатсионӣ дар фаъолияти ҶСК «САНИИОСП», КВД «Пажӯҳишгоҳи илмию таҳқиқотии “Сохтмон ва меъморӣ”», Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ, инчунин дар раванди таълими Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ татбиқ гардидаанд.

Соҳаи татбиқ: сохтмони саноатӣ ва шахрвандӣ, таҳқиқоти таҷрибавии конструксияҳои сохтмонӣ, моделсозии физикии унсурҳои оҳанубетонӣ, моделсозии ададӣ, ҳисоб ва лоиҳакашии конструксияҳои оҳанубетонӣ, арзёбии эътимоднокӣ, тарқиштоварӣ ва шаклтағйирпазирии онҳо.

ABSTRACT

of the dissertation by **Makhmadizoda Usmonali Murodali** on the topic “**Experimental studies of reinforced concrete beams using physical modelling methods**”, submitted for the degree of Doctor of Philosophy (PhD), Doctor in the specialty **6D072900 – Construction (6D072902 – Structural Engineering, Buildings and Structures)**.

Keywords: reinforced concrete beam, physical modelling, model structure, full-scale structure, stress-strain state, theory of similarity, similarity coefficients, similarity criteria, dimensional analysis, deflection, cracking, crack opening width, nonlinear deformation, numerical modelling, LIRA-SAPR.

The aim of the dissertation is the scientific substantiation and experimental implementation of a methodology for physical modelling of reinforced concrete beams, aimed at determining similarity coefficients and criteria that ensure the reliable transfer of stress-strain state parameters from model specimens to full-scale structures.

The obtained results and their novelty consist in the development of an experimentally substantiated methodology for physical modelling of reinforced concrete beams, based on the principles of similarity theory and dimensional analysis. The study establishes the regularities of changes in the stress-strain state of full-scale and model reinforced concrete beams under static loading, including the stages of elastic behaviour, cracking, development of deformations, and failure. Similarity coefficients and criteria have been determined, ensuring the transition from the parameters of the physical model to the parameters of the full-scale structure in terms of load, bending moment, deflections, strains, and crack opening width. The scientific novelty of the research consists in substantiating a complex similarity coefficient that takes into account the difference in the moduli of materials, the physically nonlinear nature of concrete and reinforcement deformation, changes in section stiffness after cracking, and the staged behaviour of a flexural reinforced concrete element. The necessity of considering the scale effect of crack opening width as one of the determining parameters of the stress-strain state of reinforced concrete beams in physical modelling has been experimentally substantiated. An empirical relationship is proposed for determining the crack opening width of a full-scale reinforced concrete beam based on the test results of a model specimen, taking into account the criterion of force similarity and the geometric scaling coefficient. The reliability of the results is confirmed by the comparability of data obtained from full-scale and model tests of reinforced concrete beams, as well as by the consistency of the main parameters of the stress-strain state at corresponding measurement points. Additionally, the obtained relationships were verified using the method of physically nonlinear numerical modelling in the LIRA-SAPR 2022 software package.

Recommendations for use: the developed methodology is recommended for experimental studies of reinforced concrete structures using physical models, for assessing their stress-strain state, crack resistance, and deformability, as well as for the verification of numerical models in research, design, and educational organisations in the field of construction.

The main results of the dissertation were introduced into the activities of SANIIOSP OJSC, State Unitary Enterprise NII Construction and Architecture, Institute of Geology, Seismic Construction and seismology of NANT, as well as into the educational process of TTU named after academician M.S. Osimi.

Field of application: industrial and civil construction, experimental studies of building structures, physical modelling of reinforced concrete elements, numerical modelling, analysis and design of reinforced concrete structures, assessment of their reliability, crack resistance and deformability.

Подписано к печати 4.07.2026 г.
Формат 60x84/16. Гарнитураи Times New Roman.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии ТТУ имени академика М.С.Осими
г. Душанбе, 734042, проспект академиков Раджабовых, 10а

Ба чоп 4.07.2026 с. ичозат дода шуд.
Андозаи 60x84/16. Гарнитураи Times New Roman.
Қоғазӣ офсетӣ. Теъдоди нашр 100 нусха.
Нашриёти ДТТ ба номи академик М.С.Осимӣ ш. Душанбе,
734042, хиёбони академик Раҷабовҳо, 10а