Система кількісних показників післяаварійної працездатності конструктивних систем пошкодженої будівлі

System of Quantitative Indicators of the Post-Accident Performance of the Structural Systems of a Damaged Building

Віталій Томенко [A]
Corresponding author: кандидат технічних наук, доцент, докторант, e-mail: firech1996@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7139-9141

Марина Томенко [B]
кандидат педагогічних наук, доцент, судовий експерт, e-mail: marina_tomenko@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2354-9106

Іван Несен [A]
PhD, доцент кафедри, e-mail: Nesen921@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5847-4805

Ігор Ножко [A]
кандидат педагогічних наук, доцент, викладач, e-mail: nogko1991@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1554-0088

Денис Коломієць [A]
ад'юнкт, e-mail: kolomiiets.denys_2025phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-8626-4861

Vitalii Tomenko [A]
Corresponding author: PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Candidate, e-mail: firech1996@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7139-9141

Maryna Tomenko [B]
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Forensic Expert, e-mail: marina_tomenko@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2354-9106

Ivan Nesen [A]
PhD, Associate Professor of the Department, e-mail: Nesen921@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5847-4805

Ihor Nozhko [A]
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Teacher, e-mail: nogko1991@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1554-0088

Denys Kolomiiets [A]
PhD Student, e-mail: kolomiiets.denys_2025phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-8626-4861

[A] Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна
[B] Черкаське відділення Київського науково-дослідного інституту судових експертиз, м. Черкаси, Україна

[A] National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine
[B] Cherkasy Branch of the Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, Cherkasy, Ukraine

Received: August 31, 2026 | Revised: October 11, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК 614.8:624.01:519.8,

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.46

Мета роботи. Розробити систему кількісних показників післяаварійної працездатності конструктивних систем пошкодженої будівлі для обґрунтування оперативних рішень у сфері цивільного захисту.

Метод дослідження. Застосовано системний аналіз, нормування показників, методи нелінійного механічного та термомеханічного моделювання, оцінювання структурної живучості й надійності, а також аналіз чутливості. Використано п'ять опублікованих контрольних сценаріїв та окремий умовний сценарій для демонстрації запропонованого підходу.

Результати дослідження. Сформовано шестикомпонентну систему показників, що характеризує інтегральне пошкодження, залишкову несучу здатність, структурну живучість, оперативну придатність, імовірність вторинного обвалення та фактичний запас вогнестійкості. Запропоновано некомпенсаційне правило прийняття рішень, яке унеможливлює приховування критичного стану одного показника за допомогою сприятливих значень інших показників. Продемонстровано узгоджену зміну опублікованих показників у контрольних сценаріях та застосування шестикомпонентної системи на умовному прикладі.

Теоретична цінність дослідження. Обґрунтовано необхідність розмежування фізично різних характеристик післяаварійного стану та їх некомпенсаційного оцінювання.

Практична цінність дослідження. Запропонований підхід створює методологічну основу для зонування пошкоджених будівель, визначення умов доступу рятувальників, оцінки потреби у стабілізації конструкцій та організації моніторингу.

Purpose. To develop a system of quantitative indicators for assessing the post-accident performance of structural systems in damaged buildings to support operational decision-making in civil protection.

Method. The study employs systems analysis, indicator normalization, nonlinear mechanical and thermomechanical modeling approaches, structural robustness and reliability assessment, and sensitivity analysis. Five previously published reference scenarios and a separate hypothetical scenario are used to demonstrate the proposed approach.

Findings. A six-component indicator system has been developed to characterize integral damage, residual load-bearing capacity, structural robustness, operational suitability, secondary-collapse probability, and actual fire-resistance reserve. A non-compensatory decision-making rule is proposed to prevent favorable values of other indicators from concealing a critical condition in any individual component. Consistent changes in previously published indicators are demonstrated across the reference scenarios, while the application of the six-component system is illustrated using a hypothetical example.

Theoretical implications. The study substantiates the need to distinguish between physically distinct characteristics of post-accident structural conditions and to assess them using a non-compensatory approach.

Practical implications. The proposed approach provides a methodological basis for hazard zoning in damaged buildings, determining rescue personnel access conditions, identifying structural stabilization requirements, and organizing structural monitoring.

Оригінальність дослідження. Запропоновано взаємоузгоджену систему показників із некомпенсаційною логікою підтримки оперативних рішень.
Обмеження дослідження. Результати мають концептуально-методологічний характер і потребують експериментального калібрування та польової валідації.
Тип статті: теоретико-методологічна.

Originality/value. A coordinated system of quantitative indicators incorporating non-compensatory logic for operational decision support is proposed.
Limitations/future research. The findings are conceptual and methodological in nature and require experimental calibration and field validation.
Article type: Conceptual and methodological research article.

Ключові слова: пошкодження, живучість, надійність, обвалення, вогнестійкість, безпека, рятування.

Key words. damage, robustness, reliability, collapse, fire resistance, safety, rescue.

Вступ

Після вибуху, локального ударного впливу, пожежі, втрати опори, пошкодження конструктивного вузла або виникнення комбінованої надзвичайної ситуації конструктивна система будівлі переходить у просторово неоднорідний стан, характеристики якого змінюються в часі. Для забезпечення ефективного реагування на надзвичайні ситуації необхідно оцінювати не лише досягнення граничного стану окремими конструктивними елементами, а й можливість безпечного доступу рятувальників, допустиму тривалість їхнього перебування, потребу у стабілізації конструкцій, організації повторного моніторингу та визначенні умов припинення аварійно-рятувальних робіт. Результати чисельного моделювання локальних динамічних впливів свідчать, що зі збільшенням ступеня пошкодження змінюються не лише деформаційні характеристики конструкцій, а й залишкова несуча здатність та показники, які мають значення для прийняття оперативних рішень [1].

Оцінювання технічного стану бетонних конструкцій після пожежі також потребує комплексного використання результатів візуального обстеження, інструментальних вимірювань і розрахункового аналізу [2]. Методи оцінювання надійності конструкцій (reliability-based assessment) підтверджують необхідність розмежування залишкової несучої здатності, невизначеності вихідних даних і рівня конструктивної безпеки [3]. Дослідження залізобетонних елементів, пошкоджених унаслідок пожежі, показують, що достовірне визначення їхньої залишкової несучої здатності має враховувати температурний вплив, подальше охолодження та незворотні зміни фізико-механічних властивостей матеріалів [4].

У сфері оцінювання вогнестійкості конструкцій розрахунково-експериментальні та чисельні методи дають змогу визначати температурний стан і механічну реакцію конструктивних елементів. Зокрема, експериментально-розрахунковий підхід до дослідження вогнезахищених залізобетонних конструкцій забезпечує можливість зіставлення виміряних і розрахункових температур та оцінювання відповідності встановленим критеріям вогнестійкості [5]. Програмні комплекси чисельного моделювання поведінки конструкцій в умовах пожежі, зокрема SAFIR, дозволяють відтворювати взаємопов’язані теплові та механічні процеси [6]. Водночас імовірнісне термомеханічне моделювання демонструє істотну залежність результатів оцінювання від невизначеності вихідних параметрів [7]. Проте зазначені підходи, розглянуті окремо, не забезпечують одночасного оцінювання ступеня пошкодження, структурної живучості, оперативної придатності та ймовірності вторинного обвалення конструктивної системи.

Для забезпечення цивільного захисту особливого значення набуває встановлення безпосереднього зв'язку між результатами технічного діагностування пошкоджених конструкцій та організацією аварійно-рятувальних робіт. У цьому контексті конструктивну зону пошкодженої будівлі доцільно розглядати не лише як об'єкт будівельної механіки, а й як складову оперативного середовища, у межах якого результати інженерного оцінювання мають бути основою для прийняття обґрунтованих рішень. Залежно від установленого рівня небезпеки та достатності вихідних даних такі рішення можуть передбачати дозвіл на доступ, обмеження доступу, проведення лише невідкладних аварійних робіт, заборону доступу або необхідність повторного обстеження.

Окремою методологічною проблемою є використання єдиного інтегрального показника для оцінювання безпеки пошкодженої конструктивної системи. Застосування середньозваженої згортки різнорідних показників допускає математичну компенсацію, за якої критично низьке значення одного параметра може бути приховане високими значеннями інших. Для прийняття рішень щодо доступу рятувальників такий підхід може призводити до необґрунтованого оцінювання небезпечної конструктивної зони як допустимої для виконання робіт. Узагальнений компенсаторний індекс можна представити у вигляді формули (1).

$$J = \sum_{i=1}^{m} w_i\, x_i, \qquad w_i \geq 0, \qquad \sum_{i=1}^{m} w_i = 1 \tag{1}$$

Мета дослідження полягає в розробленні фізично розмежованої системи кількісних показників післяаварійної працездатності конструктивних систем пошкодженої будівлі та обґрунтуванні правил їх спільної некомпенсаційної інтерпретації для підтримки оперативних рішень у сфері цивільного захисту.

Для досягнення поставленої мети передбачено визначити фізичний зміст і принципи нормування кожного показника; виконати перевірку їхньої розмірнісної узгодженості та граничних значень; проаналізувати взаємозв’язки й невзаємозамінність показників; перевірити узгодженість показників пошкодження та залишкової несучої здатності на основі опублікованої контрольної серії; здійснити порівняльний аналіз раніше опублікованих показників структурної живучості Ω_s та оперативної надійності $R_{op(pub)}$; сформувати вектор післяаварійного стану конструктивної системи та запропонувати правила його некомпенсаційної інтерпретації для визначення класів оперативного доступу; окреслити вимоги до подальшого калібрування показників та їх експериментальної і польової валідації.

Огляд літератури

Проблематика прогресуючого обвалення та структурної робастності свідчить, що реакцію конструктивної системи на локальну відмову не можна зводити до несучої здатності окремого елемента. В огляді [8] систематизовано експериментальні та чисельні підходи до дослідження прогресуючого обвалення й наголошено на ролі альтернативних шляхів передавання навантаження. У дослідженні [9] показано доцільність оцінювання робастності залізобетонних каркасів на системному рівні з урахуванням нелінійної реакції після локальної втрати елемента.

У роботі [10] запропоновано показник опору за поступового збільшення вертикального навантаження як кількісну міру робастності під час аналізу прогресуючого обвалення. У дослідженні [11] наголошено на необхідності термінологічного розмежування непропорційного та прогресуючого обвалення, а також на відповідних процедурах оцінювання. Автори [12] сформулювали ризик-орієнтовану концепцію робастності, яка передбачає розмежування прямих і непрямих наслідків локального пошкодження. У роботі [13] продемонстровано системний характер перерозподілу зусиль у залізобетонних каркасно-стінових системах під час моделювання прогресуючого обвалення.

Оскільки дані про фактичний післяаварійний стан часто є неповними та невизначеними, особливого значення набуває аналіз поширення невизначеності. У роботі [14] обґрунтовано метод латинського гіперкуба як інструмент аналізу складних систем із багатьма невизначеними параметрами. У дослідженні [15] показано, що оцінювання ризику потребує розмежування ймовірності, невизначеності, наслідків та знань, на яких ґрунтується оцінка. Порівняння ризик-орієнтованих індексів робастності [16] засвідчило, що різні індекси можуть по-різному ранжувати ті самі сценарії, а отже, не є взаємозамінними.

Під час оцінювання стану конструкцій після пожежі необхідно враховувати фазу охолодження. У роботі [17] показано, що залізобетонна колона може втратити несучу здатність уже після завершення інтенсивного нагрівання. Отже, припинення теплового впливу не означає автоматичного відновлення безпечного стану. На прикладі пошкодженого

пожежею транспортного об’єкта [18] продемонстровано значення поєднання діагностики, оцінювання властивостей матеріалів і конструктивного аналізу. У дослідженні [19] також запропоновано інтегрований підхід, який поєднує візуальне обстеження, неруйнівні та лабораторні методи з аналізом конструкцій. В огляді [20] систематизовано механізми деградації бетону за високих температур і пояснено, чому його залишкові характеристики після охолодження не можна прирівнювати до початкових.

У роботі [21] показано необхідність оцінювання традиційних припущень щодо проєктування пожежної безпеки з позицій надійності, особливо за значної невизначеності параметрів. У дослідженні [22] розглянуто ймовірнісний час настання відмови залізобетонного каркаса за сценарію пожежі після землетрусу, що обґрунтовує доцільність відокремлення часового прогнозу від статичної оцінки міцності. Повномасштабні випробування [23] засвідчують залежність робастності від фактичної зв’язності та альтернативних механізмів роботи всієї конструктивної системи.

Термінологічний аналіз прогресуючого обвалення [24] також вказує на ризики змішування різних фізичних характеристик в одному показнику. Дослідження нерегулярних залізобетонних будівель із поступовим збільшенням вертикального навантаження [25] показало, що підсилення окремих механізмів не завжди однаково впливає на загальну стійкість до прогресуючого руйнування. У роботі [26] встановлено залежність залишкової міцності залізобетонних стін від температурних впливів і спричинених ними пошкоджень. На прикладі багатоповерхової сталевої будівлі зі в’язевою системою [27] продемонстровано можливість кількісного оцінювання прогресуючого обвалення та обґрунтування заходів із підсилення конструкцій.

Автори [28] запропонували ризик-орієнтований індекс робастності, який враховує спектр ризиків і еволюцію проміжних пошкоджень. Цей результат підтверджує важливість урахування розвитку пошкоджень, проте сам по собі не доводить необхідності саме шестикомпонентної системи. В огляді експериментальних досліджень [29] узагальнено результати випробувань залізобетонних систем на прогресуюче обвалення та визначено роль конструктивної конфігурації, зв’язків і розташування вилученого елемента. У роботі [30] розмежовано робастність і резилієнтність як пов’язані, але відмінні властивості конструкцій щодо екстремальних впливів.

Дослідження 2025–2026 рр. розвивають підходи до оперативного післяаварійного оцінювання із застосуванням цифрових технологій. У роботі [31] запропоновано уніфіковану систему збирання даних для оцінювання конструкцій після катастроф із різними рівнями деталізації. У дослідженні [32] на прикладі повномасштабної залізобетонної будівлі поєднано дистанційне спостереження, LiDAR, цифрові двійники та конструктивний аналіз для оцінювання стану після втрати критичних елементів. Ці результати засвідчують актуальність використання різних джерел даних і прозорих процедур підтримки рішень, але не усувають потреби в розмежуванні фізично відмінних показників та їх некомпенсаційній інтерпретації.

Отже, виявлена методологічна прогалина полягає не у відсутності окремих показників, а в недостатньому опрацюванні їх узгодженого застосування у завданнях цивільного захисту. Така система має одночасно зберігати фізичні відмінності між пошкодженням, силовим резервом, живучістю, часовою придатністю, ймовірністю обвалення та вогнестійкістю; забезпечувати узгоджену нормовану інтерпретацію; виключати компенсацію критичного стану одного компонента сприятливими значеннями інших; підтримувати рішення щодо доступу рятувальників.

Методологія дослідження

Методологічну основу дослідження становлять системний аналіз, підходи нелінійного механічного та термомеханічного моделювання, оцінювання структурної робастності й

надійності, аналіз невизначеності та нормування різнорідних показників безпеки. Для подальшого аналізу невизначеності параметрів і чутливості можуть застосовуватися методи Монте-Карло та латинського гіперкуба. Водночас під час інтерпретації ризику необхідно розмежовувати ймовірність, невизначеність і наслідки.

Систему показників сформовано відповідно до чотирьох принципів: фізична інтерпретованість; безрозмірність або нормованість; однозначно визначений бажаний напрям зміни; неможливість повної взаємної компенсації показників під час ухвалення рішень щодо безпеки.

Об'єктом аналізу є конструктивна зона пошкодженої будівлі, для якої на певний момент часу можуть бути доступні відомості про локальні пошкодження, силовий стан, зв'язність і прогнозований часовий резерв, а за наявності відповідних моделей — імовірнісні та пожежно-інженерні характеристики. Заданий інтервал визначає часовий горизонт оперативного прогнозування. Потенційними джерелами інформації є результати технічного обстеження, дистанційної діагностики, сенсорного моніторингу та верифікованого чисельного моделювання.

Для часткової обчислювальної демонстрації використано опубліковану серію сценаріїв $S1 - S5$, що характеризує стан дев'ятиповерхової залізобетонної каркасної будівлі після локального динамічного впливу [1]. У першоджерелі наведено інтегральний показник пошкодження D, коефіцієнт залишкової несучої здатності R_{res}, індекс структурної живучості Ω_s та композиційний індекс оперативної надійності $R_{op(pub)} = R_{res}(1 - D)\Omega_s$. За умови нормування ваг D є сумісним із запропонованим D_{int}, а R_{res} має той самий фізичний зміст. Водночас опублікований Ω_s не ототожнюється з новим V_{str}, а $R_{op(pub)}$ — з новим часовим індексом T_{op}. Отже, сценарії $S1 - S5$ використано для контролю D_{int} і R_{res} та для порівняльного аналізу Ω_s і $R_{op(pub)}$. Значення V_{str}, T_{op}, P_{col} і K_{fi} за цими сценаріями не визначалися.

Сценарії $S1 - S5$ розглянуто як контрольний ряд для перевірки узгодженості напрямів зміни опублікованих показників. З огляду на обмежену кількість сценаріїв $(n = 5)$ статистичного тестування залежностей не проводили. Аналіз чутливості концептуально розмежовано за інтенсивністю та локалізацією пошкодження, оскільки однаковий сумарний рівень пошкодження може спричиняти різні системні наслідки залежно від конструктивної ролі пошкодженого елемента.

Результати дослідження

1. Формування вектора післяаварійного стану

Для конструктивної зони Z_j у момент часу t та для заданого інтервалу оперативного прогнозу Δt вводиться вектор післяаварійного стану:

$$\boldsymbol{Y}_{PA,j}(t, \Delta t) = \left[D_{int,j},\ R_{res,j},\ V_{str,j},\ T_{op,j},\ P_{col,j},\ K_{fi,j}\right]^T \quad (2)$$

Компоненти вектора мають однакову безрозмірну форму представлення, однак відображають різні фізичні властивості системи. Тому однакова математична розмірність не є підставою для їх взаємної заміни або автоматичного усереднення.

2. Інтегральний показник пошкодження D_{int}

Показник D_{int} характеризує зважену сукупність локальних пошкоджень елементів у межах конструктивної зони. Для N елементів:

$$D_{int,j} = \sum_{e=1}^{N} \omega_e\, d_e, \qquad 0 \le d_e \le 1, \qquad \omega_e \ge 0, \qquad \sum_{e=1}^{N} \omega_e = 1 \quad (3)$$

де d_e – нормована міра локального пошкодження e-го елемента;

ω_e – коефіцієнт його структурної значущості.

За таких умов $0 \le D_{int,j} \le 1$. Зростання D_{int} відповідає погіршенню стану.

Ваговий коефіцієнт дозволяє відрізняти дефект однакового геометричного обсягу в другорядному елементі від пошкодження ключової колони або вузла.

Локальна диференціальна чутливість інтегрального пошкодження до зміни d_e має кінцевий вираз

$$\frac{\partial D_{int,j}}{\partial d_e} = \omega_e \tag{4}$$

Отже, сама структура D_{int} формально враховує конструктивну значущість локалізації пошкодження.

3. Коефіцієнт залишкової несучої здатності R_{res}

R_{res} характеризує збережений силовий резерв і визначається відношенням фактичної залишкової несучої здатності до референтного значення:

$$R_{res,j} = \min\left\{1; \frac{R_{fact,j}}{R_{ref,j}}\right\}, \qquad 0 \le R_{res,j} \le 1 \tag{5}$$

Для порівняння деградації доцільно використовувати $R_{ref} = R_{initial}$, а для оперативної перевірки – необхідну несучу здатність у відповідній аварійній розрахунковій ситуації. Значення R_{res} не є показником видимого пошкодження: конструкція може мати локальний дефект, але тимчасово зберігати значний системний резерв завдяки перерозподілу зусиль.

4. Індекс структурної живучості V_{str}

V_{str} характеризує здатність системи після початкового локального пошкодження зберігати альтернативні шляхи передавання навантаження і обмежувати поширення відмови. Після нормування часткових ознак до інтервалу $[0; 1]$ консервативний кінцевий вираз запропоновано у вигляді нижньої огинаючої:

$$V_{str,j} = \min\left\{\bar{A}_{alt,j};\ \bar{C}_{conn,j};\ \bar{R}_{red,j};\ 1 - \bar{L}_{prog,j}\right\}, \qquad 0 \le V_{str,j} \le 1 \tag{6}$$

де $\bar{A}_{alt}$ – нормована забезпеченість альтернативних шляхів навантаження;
$\bar{C}_{conn}$ – нормована збереженість вузлової зв'язності;
$\bar{R}_{red}$ – нормована резервованість;
$\bar{L}_{prog}$ – нормована схильність до прогресування локальної відмови.

Оператор $\min$ реалізує некомпенсаційний принцип уже на рівні показника: критична втрата вузлової зв'язності не повинна приховуватися достатньою резервованістю іншої частини системи.

5. Індекс оперативної придатності T_{op}

У запропонованій системі T_{op} принципово не трактується як статистична ймовірність безвідмовної роботи. Його фізичний зміст – достатність консервативно прогнозованого безпечного часового резерву для виконання конкретного оперативного завдання:

$$T_{op,j} = q_{D,j} \min\left\{1; \frac{\tau_{safe,j}}{\tau_{op}}\right\}, \qquad 0 \le q_{D,j} \le 1 \tag{7}$$

де τ_{safe} – консервативно оцінений інтервал часу до досягнення найближчої стоп-умови або критичного стану;
τ_{op} – потрібна тривалість конкретної операції;
q_D – коефіцієнт достатності, актуальності та якості даних.

Якщо $\tau_{safe} \ge \tau_{op}$ і дані достатні, часовий резерв для заданої операції є достатнім. Якщо $\tau_{safe} < \tau_{op}$, індекс відображає дефіцит часу.

Для ненасиченої області $\tau_{safe} < \tau_{op}$ чутливість має кінцеві вирази

$$\frac{\partial T_{op,j}}{\partial \tau_{safe,j}} = \frac{q_{D,j}}{\tau_{op}} > 0, \qquad \frac{\partial T_{op,j}}{\partial \tau_{op}} = -q_{D,j}\frac{\tau_{safe,j}}{\tau_{op}^2} < 0 \tag{8}$$

Отже, одна й та сама конструктивна зона може мати різний T_{op} для короткочасної

евакуації і для тривалих робіт зі стабілізації. Це операційний, а не статистичний показник.

6. Імовірність вторинного обвалення P_{col}

На відміну від T_{op}, показник P_{col} має окрему імовірнісну постановку через функцію граничного стану. Функцію системного граничного стану визначено як

$$g(\mathrm{X}, \xi) = R_{sys}(\mathrm{X}, \xi) - S_{eff}(\mathrm{X}, \xi) \tag{9}$$

Тоді імовірність вторинного обвалення визначається кінцевим виразом

$$P_{col,j} = \Pr\{g(\mathrm{X}, \xi) \le 0 \mid \mathrm{X}_{obs}, Q\}, \qquad 0 \le P_{col,j} \le 1 \tag{10}$$

де R_{sys} – системна опірність;
S_{eff} – ефективний аварійний вплив;
X_{obs} – доступні спостереження;
Q – інформація про якість даних;
ξ – випадкові та епістемічно невизначені параметри.

Якщо імовірнісна модель не сформована або статистичні дані недостатні, P_{col} має залишатися невизначеним, а не замінюватися евристичним числом чи функцією інших індексів.

7. Коефіцієнт фактичного запасу вогнестійкості K_{fi}

Для конструктивних зон, стан яких залежить від попереднього або можливого повторного теплового впливу, вводиться коефіцієнт фактичного запасу вогнестійкості:

$$\eta_{fi,j} = \frac{t_{fi,fact,j}}{t_{fi,req,j}}, \qquad K_{fi,j} = \min\{1; \eta_{fi,j}\}, \qquad 0 \le K_{fi,j} \le 1 \tag{11}$$

Значення $\eta_{fi} > 1$ доцільно зберігати у розширеному протоколі як характеристику надлишкового запасу, тоді як у нормованому векторі K_{fi} обмежується одиницею. Така нормалізація не підміняє повний термомеханічний розрахунок і не дозволяє визначати K_{fi} без реконструкції фактичної температурно-часової історії.

Узагальнену фізико-операційну інтерпретацію компонентів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Фізичний зміст та операційна інтерпретація показників

Показник	Фізичний зміст	Діапазон і бажаний напрям	Операційна інтерпретація
D_{int}	Зважений рівень пошкодження конструктивної зони	0…1; ↓	Локалізація та інтенсивність пошкодження
R_{res}	Збережений силовий резерв	0…1; ↑	Потреба у розвантаженні, підпорах або підсиленні
V_{str}	Здатність локалізувати початкову відмову	0…1; ↑	Схильність до непропорційного/прогресуючого руйнування
T_{op}	Достатність прогнозованого безпечного часу для заданої операції	0…1; ↑	Часова допустимість перебування рятувальників
P_{col}	Імовірність досягнення системного граничного стану обвалення	0…1; ↓	Імовірнісна стоп-умова
K_{fi}	Нормований фактичний запас вогнестійкості	0…1; ↑	Післяпожежна/повторна теплова безпека

Джерело: розроблено авторами.

8. Розмірнісна та гранична перевірка

Усі компоненти Y_{PA} є безрозмірними. Для D_{int} це випливає з безрозмірності d_e та ω_e; для R_{res}, T_{op} і K_{fi} – з відношення однорідних фізичних величин; V_{str} формується з нормованих складових; P_{col} за визначенням є імовірністю. Безпечний граничний стан векторно відповідає

$$D_{int} \to 0, \quad R_{res} \to 1, \quad V_{str} \to 1, \quad T_{op} \to 1, \quad P_{col} \to 0, \quad K_{fi} \to 1 \qquad (12)$$

Для критичної механічної деградації очікуваний напрям переходу має вигляд

$$D_{int} \to 1, \quad R_{res} \to 0, \quad V_{str} \to 0, \quad T_{op} \to 0, \quad P_{col} \to 1 \qquad (13)$$

Для K_{fi} критичний стан залежить від конкретної пожежної постановки та заданого $t_{fi,req}$, тому нульове значення не нав'язується як єдина фізична межа. Гранична перевірка підтверджує відсутність суперечностей у бажаних напрямах зміни показників.

9. Контрольна серія $S1 - S5$

Контрольну серію $S1 - S5$ взято з параметричного чисельного дослідження післяаварійного стану дев'ятиповерхової залізобетонної каркасної будівлі після локального динамічного впливу [1]. У першоджерелі максимальні переміщення зростали від 14 до 118 мм, D – від 0,12 до 0,74, тоді як R_{res} зменшувався від 0,93 до 0,29, Ω_s – від 0,88 до 0,12, а опублікований композиційний R_{op} – від 0,72 до 0,01. У цій роботі D та R_{res} використовуються як безпосередньо сумісні контрольні величини, а Ω_s і R_{op} зберігають значення саме раніше опублікованих показників і не підміняють нові V_{str} та часовий R_{op}. Контрольні значення наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Контрольні значення опублікованих показників для сценаріїв $S1 - S5$

Сценарій	u_{max}, мм	D	R_{res}	Ω_s	$R_{op(pub)}$
S1	14	0,12	0,93	0,88	0,72
S2	28	0,24	0,82	0,73	0,45
S3	47	0,41	0,66	0,51	0,20
S4	76	0,58	0,47	0,29	0,06
S5	118	0,74	0,29	0,12	0,01

Джерело: розроблено авторами.

Значення V_{str}, нового T_{op}, P_{col} та K_{fi} для контрольної серії $S1 - S5$ не визначалися. Їх не інтерполювали з D, R_{res}, Ω_s або $R_{op(pub)}$, оскільки це створило б методичне змішування різних математичних постановок. Для V_{str} потрібне окреме калібрування нормованих складових живучості; для T_{op} – дані про τ_{safe}, τ_{op} і якість даних; для P_{col} – імовірнісний аналіз функції граничного стану; для K_{fi} – термомеханічна реконструкція пожежного впливу.

У межах $S1 - S5$ максимальне переміщення зросло у 8,43 раза, D – у 6,17 раза, R_{res} зменшився приблизно на 68,8 %, опублікований Ω_s – на 86,4 %, а $R_{op(pub)}$ – на 98,6 %. Останні два відсотки характеризують чутливість саме раніше опублікованих показників і не можуть трактуватися як кількісно підтверджена деградація нового V_{str} або T_{op}.

Зміна сценаріїв за безпеково орієнтованими опублікованими компонентами 1−D, R_{res}, Ω_s та $R_{op(pub)}$ показана на рис. 1. Площа профілю радарної діаграми послідовно скорочується від S1 до S5, демонструючи багатокомпонентну деградацію саме опублікованого контрольного набору; цей рисунок не є валідацією нових V_{str} та T_{op}.

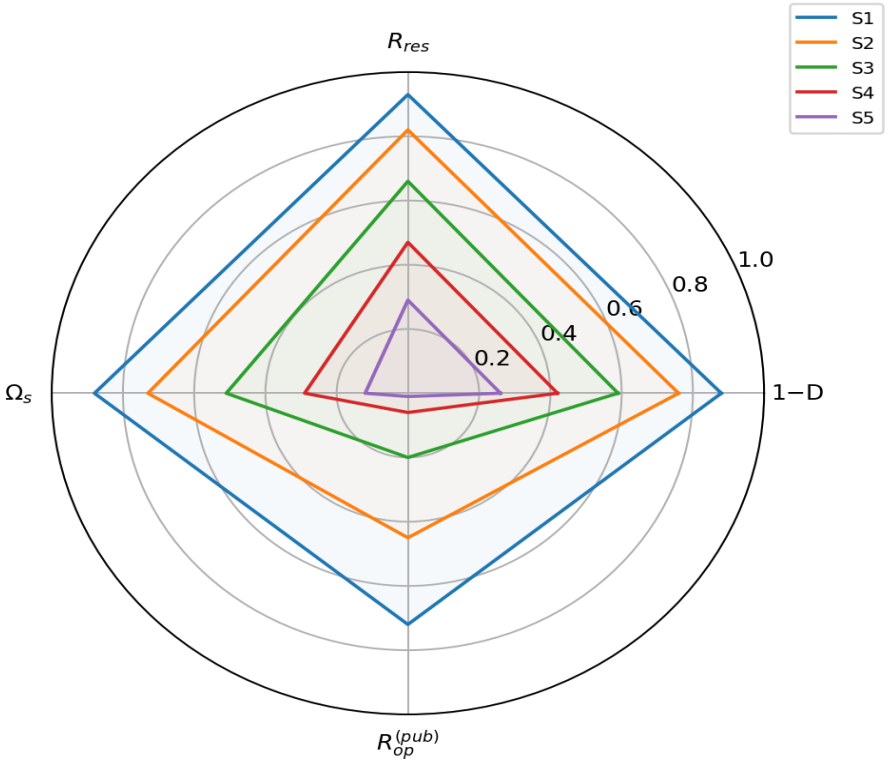


Рисунок 1. Радарна діаграма сценаріїв $S1 - S5$ за опублікованими показниками $1 - D$, R_{res}, Ω_s, $R_{op(pub)}$

Джерело: побудовано авторами.

Траєкторія у просторі $D - R_{res} - \Omega_s$ на рис. 2 демонструє одночасний перехід опублікованого контрольного ряду від області малих пошкоджень і високого Ω_s до області значної деградації; ця траєкторія не є розрахунком нового V_{str}.

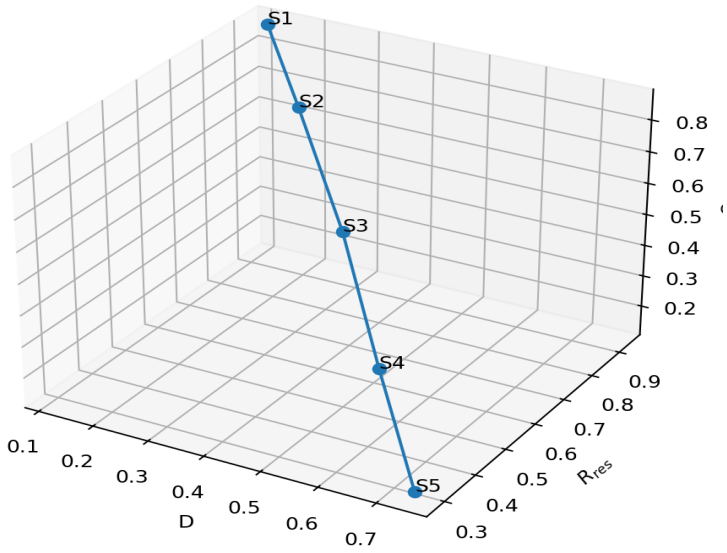


Рисунок 2: Траєкторія опублікованого контрольного ряду $S1 - S5$ у просторі $D - R_{res} - \Omega_s$

Джерело: побудовано авторами.

10. Аналіз чутливості до інтенсивності та локалізації пошкодження

Чутливість необхідно аналізувати окремо за інтенсивністю і локалізацією. Для параметра інтенсивності I використовується нормована скінченно-різницева оцінка

$$S_i^I = \frac{I_{ref}}{Y_{i,ref}} \frac{\Delta Y_i}{\Delta I} \tag{14}$$

Для локалізації пошкодження k при однаковій або близькій сумарній інтенсивності впливу доцільно використовувати

$$S_{i,k}^{loc} = \frac{Y_i^{(k)} - Y_i^{ref}}{\Delta d_k} \tag{15}$$

Таке розділення є критичним: однаковий D_{int} може формуватися різними просторовими конфігураціями дефектів, але мати різні наслідки для V_{str} та P_{col} через різну роль пошкоджених елементів у глобальній системі.

11. Безпеково орієнтований вектор і некомпенсаційні правила доступу

Для уніфікації напряму “більше = небезпечніше” формується вектор часткової небезпеки z_{PA}:

$$z_{PA,j} = \left[D_{int,j};\ 1 - R_{res,j};\ 1 - V_{str,j};\ 1 - T_{op,j};\ P_{col,j};\ 1 - K_{fi,j}\right]^T \tag{16}$$

Вектор z_{PA} може використовуватися для візуалізації, ранжування та передачі до просторової карти небезпек, але не замінює первинний Y_{PA} і не скасовує перевірку критичних стоп-умов.

Формальне некомпенсаційне правило для фізично встановлених критичних станів запропоновано у вигляді індикаторної функції

$$STOP_j = \mathbb{I}(C_j), \qquad C_j = C_D \vee C_R \vee C_V \vee C_O \vee C_P \vee C_F \tag{17}$$

де $C_D = (D_{int,j} \geq D_{int,crit})$; $C_R = (R_{res,j} \leq R_{res,min})$; $C_V = (V_{str,j} \leq V_{str,min})$; $C_O = (T_{op,j} \leq T_{op,min})$; $C_P = (P_{col,j} \geq P_{col,crit})$; $C_F = (K_{fi,j} \leq K_{fi,min})$; $\mathbb{I}(\cdot) = 1$, якщо виконується хоча б одна з наведених критичних умов, і $\mathbb{I}(\cdot) = 0$ – в іншому випадку.

За $STOP_j = 1$ автоматичне віднесення конструктивної зони до класу “доступ дозволено” виключається незалежно від сприятливих значень інших показників; пріоритет надається дистанційному обстеженню, стабілізації, розвантаженню конструкцій або зміні тактики аварійно-рятувальних робіт.

Критично недостатні або суперечливі дані не прирівнюються до фізично встановленої стоп-умови. Для інформаційної недостатності застосовується окреме правило

$$Q_j < Q_{min} \quad \Rightarrow \quad C_{access,j} = \text{“повторне обстеження”} \tag{18}$$

Тобто невідомий стан не класифікується як безпечний, але методично відрізняється від ситуації, коли критична небезпека вже встановлена. До експериментального калібрування порогів наведена нижче схема має концептуальний характер і не є готовим нормативним алгоритмом оперативного допуску. Узагальнену логіку наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Концептуальна логіка переведення вектора стану у клас оперативного доступу до калібрування порогів

Умова	Клас доступу	Типове рішення для цивільного захисту
$STOP = 0$; усі показники в допустимих межах; дані достатні	Доступ дозволено	Контрольований вхід; поточний моніторинг
$STOP = 0$; один або кілька показників у попереджувальній зоні	Доступ обмежено	Скорочення часу; контроль деформацій; резервний маршрут

Умова	Клас доступу	Типове рішення для цивільного захисту
Значний ризик без абсолютної стоп-умови, але є невідкладна аварійна необхідність	Лише аварійні роботи	Стабілізація; мінімальний склад; короткий час; безперервний контроль
$STOP = 1$	Доступ заборонено	Дистанційне обстеження; підпори/розвантаження; зміна тактики
$Q < Q_{min}$ або дані суперечливі	Повторне обстеження	Не вважати зону безпечною; повторна діагностика

Джерело: розроблено авторами.

Числові пороги $D_{int,crit}$, $R_{res,min}$, $V_{str,min}$, $T_{op,min}$, $P_{col,crit}$ та $K_{fi,min}$ у цій роботі свідомо не задаються як універсальні константи. Вони мають калібруватися за типом конструктивної системи, сценарієм аварії, допустимим рівнем ризику, даними випробувань і вимогами конкретного оперативного регламенту.

12. Ілюстративний повний сценарій I1

Для усунення методологічного розриву між шестикомпонентною постановкою та частковою серією $S1 - S5$ наведено умовний сценарій I1. Його числові значення задано виключно для демонстрації послідовності "шість компонентів → некомпенсаційне правило → клас доступу"; вони не є експериментальними, не отримані з $S1 - S5$ і не мають нормативного значення.

Для I1 прийнято: $D_{int} = 0{,}44$; $R_{res} = 0{,}63$; $V_{str} = 0{,}36$; $\tau_{safe} = 18$ хв; $\tau_{op} = 25$ хв; $qD = 0{,}85$, звідки за (7) $T_{op} = 0{,}612$; $P_{col} = 0{,}08$ умовно задано як результат окремої імовірнісної моделі граничного стану; $t_{fi,fact} = 42$ хв і $t_{fi,req} = 60$ хв, звідки за (11) $K_{fi} = 0{,}70$.

Лише для перевірки логіки алгоритму використано демонстраційні пороги: $D_{int,crit} = 0{,}60$; $R_{res,min} = 0{,}50$; $V_{str,min} = 0{,}40$; $T_{op,min} = 0{,}60$; $P_{col,crit} = 0{,}10$; $K_{fi,min} = 0{,}60$. Ці пороги є умовними й не можуть застосовуватися для реальних рішень без калібрування та валідації.

Таблиця 4. Ілюстративне проходження всіх шести компонентів у сценарії I1

Компонент	Значення I1	Умовний поріг	Результат перевірки
D_{int}	0,44	< 0,60	допустимо
R_{res}	0,63	> 0,50	допустимо
V_{str}	0,36	> 0,40	критична умова
T_{op}	0,612	> 0,60	допустимо
P_{col}	0,08	< 0,10	допустимо
K_{fi}	0,70	> 0,60	допустимо

Джерело: розроблено авторами.

Оскільки для V_{str} виконується демонстраційна критична умова $V_{str} \leq V_{str,min}$, індикатор STOP набуває значення 1 і за концептуальною логікою табл. 3 сценарій I1 відноситься до класу "доступ заборонено". Приклад показує роботу некомпенсаційного правила: сприятливі значення решти п'яти компонентів не компенсують критичної втрати структурної живучості. Цей результат є лише ілюстрацією алгоритмічної узгодженості, а не підтвердженням реальних порогів.

Обговорення

Отримані результати свідчать, що фізично різні характеристики післяаварійного стану конструктивної системи можуть змінюватися узгоджено, однак це не означає можливості їх взаємної заміни. Контрольну серію сценаріїв $S1 - S5$ використано для демонстрації спільної тенденції погіршення раніше опублікованих показників D, R_{res}, Ω_s та $R_{op(pub)}$. Водночас отримані

результати не є статистичним підтвердженням універсальних залежностей між цими показниками та не забезпечують кількісної валідації запропонованих індексів V_{str} і T_{op}. Такий підхід узгоджується з результатами досліджень системного характеру структурної робастності [8], а також із висновками про те, що різні ризик-орієнтовані індекси можуть забезпечувати неоднакове ранжування тих самих сценаріїв пошкодження [16].

Особливе значення для забезпечення цивільного захисту має розмежування індексу оперативної придатності T_{op} та ймовірності вторинного обвалення P_{col}. Ототожнення T_{op} зі статистичною ймовірністю безвідмовної роботи призводило б до методологічної суперечності, оскільки два компоненти вектора післяаварійного стану характеризували б імовірнісні події без належного обґрунтування відповідних статистичних моделей. Запропоноване визначення T_{op} через співвідношення прогнозованого безпечного часу, необхідної тривалості виконання аварійно-рятувальних робіт та коефіцієнта якості вихідних даних усуває зазначену неоднозначність і забезпечує безпосередню оперативну інтерпретацію цього показника. Такий підхід концептуально узгоджується з дослідженнями часу настання відмови конструктивних систем за складних аварійних сценаріїв [22], проте не замінює імовірнісного оцінювання їхньої надійності. Імовірність вторинного обвалення P_{col} залишається самостійною характеристикою, визначення якої потребує формування функції граничного стану та статистичного опису невизначених параметрів.

Важливим аспектом запропонованого підходу є врахування асиметрії наслідків помилкових рішень. У традиційних задачах ранжування використання агрегованого показника може спричинити неправильне визначення пріоритетності об'єктів. Натомість під час організації аварійно-рятувальних робіт помилкове віднесення небезпечної конструктивної зони до категорії допустимого доступу може створювати безпосередню загрозу життю та здоров'ю рятувальників. Застосування некомпенсаційного правила спрямоване на обмеження можливості таких помилок, оскільки критичне значення будь-якого з показників D_{int}, R_{res}, V_{str}, T_{op}, P_{col} або K_{fi} не може компенсуватися сприятливими значеннями інших компонентів. Водночас фактична ефективність цього правила щодо зменшення частоти помилкових рішень потребує окремої перевірки. Запропонована логіка відповідає загальним принципам ризик-орієнтованого оцінювання, згідно з якими невизначеність і потенційні наслідки небезпечних подій необхідно враховувати окремо, не приховуючи їх в узагальненому середньому показнику [15].

Аналіз контрольної серії $S1 - S5$ показав, що опублікований композиційний індекс оперативної надійності $R_{op(pub)}$ характеризується більш інтенсивним відносним зниженням, ніж коефіцієнт залишкової несучої здатності R_{res}. Це пояснюється математичною структурою композиційного індексу $R_{res}\ (1 - D)\ \Omega_s$, який одночасно враховує декілька характеристик конструктивної системи. Проте зазначена закономірність не підтверджує аналогічної кількісної поведінки нового індексу T_{op}, оскільки у першоджерелі [1] не визначалися прогнозований безпечний час τ_{safe}, необхідна тривалість виконання операції τ_{op} та коефіцієнт якості даних q_D. Отже, T_{op} є самостійним показником, який потребує незалежного калібрування та польової валідації. Для конструкцій, пошкоджених унаслідок пожежі, доцільність урахування часового чинника додатково обґрунтовується можливістю відкладеної втрати несучої здатності під час охолодження [17]. Водночас ці результати підтверджують лише концептуальну необхідність урахування часової складової, але не є кількісною валідацією запропонованого індексу оперативної придатності.

Попри зазначені переваги, запропонована система має низку методологічних обмежень. Насамперед індекс структурної живучості V_{str} потребує калібрування нормованих складових з урахуванням особливостей різних конструктивних схем, характеру пошкоджень і механізмів перерозподілу навантажень. Коефіцієнт q_D, який використовується для визначення T_{op}, має ґрунтуватися на формалізованій процедурі оцінювання якості, актуальності та повноти вихідних

даних, а не на довільно встановлених експертних значеннях. Визначення ймовірності вторинного обвалення P_{col} потребує відповідної імовірнісної моделі, тоді як оцінювання фактичного запасу вогнестійкості K_{fi} передбачає реконструкцію температурно-часової історії конструкції та врахування змін її фізико-механічних характеристик. Крім того, контрольна серія $S1 - S5$ не забезпечує кількісної валідації нових показників V_{str} і T_{op}, оскільки їхні математичні визначення відрізняються від раніше опублікованих Ω_s та $R_{op(pub)}$ [1].

Для подальшої експериментальної та польової валідації запропонованої системи доцільно розробити багаторівневу програму досліджень. Вона має передбачати проведення лабораторних випробувань конструктивних елементів і систем із контрольованими пошкодженнями; зіставлення розрахункових значень R_{res} з експериментально визначеною залишковою несучою здатністю; перевірку чутливості V_{str} до локалізації вилучених або ослаблених елементів; статистичне калібрування P_{col}; термомеханічну перевірку K_{fi}; проведення полігонних випробувань із фіксацією фактичної тривалості аварійно-рятувальних операцій для оцінювання T_{op}. Окремим напрямом має стати перевірка частоти помилково безпечних класифікацій конструктивних зон та порівняння результатів некомпенсаційного оцінювання з результатами альтернативних методів підтримки ухвалення рішень. Реалізація такої програми дозволить визначити достовірність, чутливість і практичну придатність запропонованих показників та створити передумови для переходу від концептуально-обчислювальної демонстрації до експериментально обґрунтованої системи підтримки оперативних рішень.

Перспективним напрямом практичного застосування запропонованої шестикомпонентної системи є її інтеграція з динамічною просторовою картою небезпек пошкодженої будівлі. За такого підходу кожна конструктивна зона характеризуватиметься не єдиним узагальненим показником, а сукупністю взаємопов’язаних, проте фізично відмінних характеристик із зазначенням часу останнього оновлення та рівня достовірності вихідних даних. Це забезпечить можливість визначати конкретні чинники, що обмежують проведення аварійно-рятувальних робіт, зокрема значний ступінь пошкодження, недостатній залишковий силовий резерв, втрату структурної живучості, дефіцит безпечного часу, підвищену ймовірність вторинного обвалення, недостатній запас вогнестійкості або інформаційну невизначеність. У перспективі така система може підвищити прозорість та обґрунтованість оперативних рішень щодо доступу рятувальників, необхідності стабілізації конструкцій, організації повторного моніторингу та вибору безпечної тактики виконання аварійно-рятувальних робіт.

Висновки

Обґрунтовано недоцільність використання єдиного компенсаторного скалярного індексу для оцінювання післяаварійної працездатності конструктивної системи. Пошкодження, залишкова несуча здатність, структурна живучість, часовий резерв, імовірність вторинного обвалення та вогнестійкість мають різний фізичний зміст і по-різному впливають на оперативні рішення.

Запропоновано шестикомпонентний $\mathrm{Y}_{PA} = \left[D_{int}, R_{res}, V_{str}, T_{op}, P_{col}, K_{fi}\right]^T$ вектор післяаварійного стану та здійснено розмірнісну й граничну перевірку його складових. Для кожного показника V_{str} визначено бажаний напрям зміни, а для оцінювання структурної живучості та перевірки критичних станів передбачено некомпенсаційні оператори.

Уточнено математичне визначення T_{op} як детермінованого нормованого індексу достатності прогнозованого безпечного часу для виконання конкретної операції з урахуванням якості даних. Цей індекс T_{op} не є статистичною ймовірністю. Показник P_{col} виокремлено як імовірнісну характеристику вторинного обвалення, що визначається через функцію граничного стану.

Аналіз контрольної серії $S1 - S5$ засвідчив узгоджену зміну опублікованих показників: D збільшився з 0,12 до 0,74, R_{res} зменшився з 0,93 до 0,29, Ω_s — з 0,88 до 0,12, а $R_{op(pub)}$ — з

0,72 до 0,01. Ці результати використано лише як порівняльну базу та часткову обчислювальну демонстрацію; вони не підтверджують валідності нових V_{str} і T_{op}. Значення P_{col} та K_{fi} для цієї серії не визначали й не відновлювали евристичними способами.

Запропоновано некомпенсаційне правило визначення умов доступу: досягнення критичного стану хоча б за одним показником виключає автоматичне віднесення конструктивної зони до класу “доступ дозволено”. Недостатність інформації $Q < Q_{min}$ відокремлено від установленої фізичної небезпеки; за таких умов передбачено клас “повторне обстеження”.

Практичний результат дослідження полягає у формуванні концептуальної кількісної основи для подальшого розроблення, калібрування та валідації системи попереднього зонування пошкоджених будівель, визначення потреби у стабілізації або розвантаженні конструкцій, допустимої тривалості перебування рятувальників, порядку повторного моніторингу та умов оперативного доступу.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють, що використовували ШІ для перевірки правопису та пошуку ресурсів.

Список використаних джерел

1. Томенко В. І., Томенко М. Г., Мельник Р. П., Мельник О. Г. Параметричне чисельне дослідження післяаварійного стану залізобетонної каркасної будівлі після локального динамічного впливу. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2026. № 21. С. 69–77. DOI: https://doi.org/10.52363/2518-1777-2026-21-7.
2. Jovanović B., Caspeele R., Lombaert G., Reynders E., Van Coile R. State-of-the-art review on the post-fire assessment of concrete structures. Structural Concrete. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 5370–5387. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.202201108.
3. Molkens T., Van Coile R., Gernay T. Assessment of damage and residual load bearing capacity of a concrete slab after fire: applied reliability-based methodology. Engineering Structures. 2017. Vol. 150. P. 969–985. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.078.
4. Kodur V. K. R., Agrawal A. A numerical approach for evaluating residual capacity of fire damaged concrete members. Revista ALCONPAT. 2020. Vol. 10, No. 2. P. 230–242. DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.483.
5. Kovalov A., Purdenko R., Otrosh Y., Tomenko V., Rashkevich N., Shcholokov E., Pidhornyy M., Zolotova N., Suprun O. Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 5, No. 1(119). P. 53–61. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219.
6. Franssen J.-M., Gernay T. Modeling structures in fire with SAFIR: theoretical background and capabilities. Journal of Structural Fire Engineering. 2017. Vol. 8, No. 3. P. 300–323. DOI: https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010.
7. de Souza R. C. S., Andreini M., La Mendola S., Zehfuß J., Knaust C. Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete structures. Fire Safety Journal. 2019. Vol. 104. P. 22–33. DOI: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005.

8. Adam J. M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. Engineering Structures. 2018. Vol. 173. P. 122–149. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082.
9. Fascetti A., Kunnath S. K., Nisticò N. Robustness evaluation of RC frame buildings to progressive collapse. Engineering Structures. 2015. Vol. 86. P. 242–249. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.008.
10. Khandelwal K., El-Tawil S. Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis. Engineering Structures. 2011. Vol. 33, No. 9. P. 2653–2661. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.013.
11. Starossek U., Haberland M. Disproportionate collapse: terminology and procedures. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2010. Vol. 24, No. 6. P. 519–528. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000138.
12. Baker J. W., Schubert M., Faber M. H. On the assessment of robustness. Structural Safety. 2008. Vol. 30, No. 3. P. 253–267. DOI: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.11.004.
13. Bao Y., Kunnath S. K. Simplified progressive collapse simulation of RC frame–wall structures. Engineering Structures. 2010. Vol. 32, No. 10. P. 3153–3162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.06.003.
14. Helton J. C., Davis F. J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. Reliability Engineering & System Safety. 2003. Vol. 81, No. 1. P. 23–69. DOI: https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9.
15. Aven T. Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 253, No. 1. P. 1–13. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023.
16. Beck A. T., Ribeiro L. da R., Costa L. G. L., Stewart M. G. Comparison of risk-based robustness indices in progressive collapse analysis of building structures. Structures. 2023. Vol. 57. Article 105295. P. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105295.
17. Gernay T. Fire resistance and burnout resistance of reinforced concrete columns. Fire Safety Journal. 2019. Vol. 104. P. 67–78. DOI: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.007.
18. Felicetti R. Assessment of a fire-damaged concrete overpass: the Verona bus crash case study. Journal of Structural Fire Engineering. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 293–306. DOI: https://doi.org/10.1108/JSFE-06-2021-0039.
19. Stochino F., Mistretta F., Meloni P., Carcangiu G. Integrated approach for post-fire reinforced concrete structures assessment. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017. Vol. 61, No. 4. P. 677–699. DOI: https://doi.org/10.3311/PPci.9830.
20. Khoury G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. Progress in Structural Engineering and Materials. 2000. Vol. 2, No. 4. P. 429–447. DOI: https://doi.org/10.1002/pse.51.
21. Van Coile R., Caspeele R., Taerwe L. Reliability-based evaluation of the inherent safety presumptions in common fire safety design. Engineering Structures. 2014. Vol. 77. P. 181–192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.007.
22. Moradi M., Tavakoli H., Abdollahzade G. Probabilistic evaluation of failure time of reinforced concrete frame in post-earthquake fire scenario. Structural Concrete. 2024. Vol. 25, No. 5. P. 3487–3504. DOI: https://doi.org/10.1002/suco.202300353.
23. Buitrago M., Makoond N., Moragues J. J., Sagaseta J., Adam J. M. Robustness of a full-scale precast building structure subjected to corner-column failure. Structures. 2023. Vol. 52. P. 824–841. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.146.
24. Kiakojouri F., Sheidaii M. R., De Biagi V., Chiaia B. Progressive collapse of structures: a discussion on annotated nomenclature. Structures. 2021. Vol. 29. P. 1417–1423. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.006.

25. Ebadi-Jamkhaneh M., Kontoni D.-P. N., Ebrahimi A. H. Assessment of different methods for enhancing progressive collapse resistance of irregular reinforced concrete buildings using pushdown analysis. Arabian Journal for Science and Engineering. 2024. Vol. 49. P. 13861–13883. DOI: https://doi.org/10.1007/s13369-024-08847-4.
26. Shadbahr E., Aminnejad B., Lork A. Determining post-fire residual compressive strength of reinforced concrete shear walls using the BAT algorithm. Structures. 2021. Vol. 32. P. 651–661. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.002.
27. Ferraioli M., Lavino A., Mandara A. Progressive collapse assessment and retrofit of a multistory steel braced office building. International Journal of Steel Structures. 2022. Vol. 22. P. 1086–1107. DOI: https://doi.org/10.1007/s13296-022-00626-x.
28. Praxedes C., Yuan X.-X., He X.-H.-C. A novel robustness index for progressive collapse analysis of structures considering the full risk spectrum of damage evolution. Structure and Infrastructure Engineering. 2022. Vol. 18, No. 3. P. 376–394. DOI: https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1851730.
29. Alshaikh I. M. H., Abu Bakar B. H., Alwesabi E. A. H., Akil H. M. Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: an overview. Structures. 2020. Vol. 25. P. 881–900. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.018.
30. Stochino F., Bedon C., Sagaseta J., Honfi D. Robustness and resilience of structures under extreme loads. Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. Article 4291703. P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1155/2019/4291703.
31. Alam M. S., Kijewski-Correa T., Roueche D. B., Mosalam K. M., Prevatt D. O., Robertson I. A unified framework for post-disaster hazard and structural assessment data collection across hazards and infrastructure typologies. Frontiers in Built Environment. 2025. Vol. 11. Article 1546616. DOI: https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1546616.
32. Bai Y., Sezen H., Yilmaz A., Qin R. Field monitoring and assessment of reinforced concrete building collapse using remote sensing and digital twins. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2026. Vol. 16. Article 21. DOI: https://doi.org/10.1007/s13349-025-01044-3.

References

1. Tomenko, V. I., Tomenko, M. H., Melnyk, R. P., & Melnyk, O. H. (2026). Parametric numerical study of the post-accident state of a reinforced concrete frame building after local dynamic impact. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 21, 69–77. https://doi.org/10.52363/2518-1777-2026-21-7 [in Ukrainian].
2. Jovanović, B., Caspeele, R., Lombaert, G., Reynders, E., & Van Coile, R. (2023). State-of-the-art review on the post-fire assessment of concrete structures. *Structural Concrete, 24*(4), 5370–5387. https://doi.org/10.1002/suco.202201108
3. Molkens, T., Van Coile, R., & Gernay, T. (2017). Assessment of damage and residual load bearing capacity of a concrete slab after fire: Applied reliability-based methodology. *Engineering Structures, 150*, 969–985. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.078
4. Kodur, V. K. R., & Agrawal, A. (2020). A numerical approach for evaluating residual capacity of fire damaged concrete members. *Revista ALCONPAT, 10*(2), 230–242. https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.483
5. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., & Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5*(1(119)), 53–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219
6. Franssen, J.-M., & Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering, 8*(3), 300–323. https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010

7. de Souza, R. C. S., Andreini, M., La Mendola, S., Zehfuß, J., & Knaust, C. (2019). Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete structures. *Fire Safety Journal, 104*, 22–33. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005
8. Adam, J. M., Parisi, F., Sagaseta, J., & Lu, X. (2018). Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures, 173*, 122–149. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082
9. Fascetti, A., Kunnath, S. K., & Nisticò, N. (2015). Robustness evaluation of RC frame buildings to progressive collapse. *Engineering Structures, 86*, 242–249. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.008
10. Khandelwal, K., & El-Tawil, S. (2011). Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis. *Engineering Structures, 33*(9), 2653–2661. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.013
11. Starossek, U., & Haberland, M. (2010). Disproportionate collapse: Terminology and procedures. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 24*(6), 519–528. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000138
12. Baker, J. W., Schubert, M., & Faber, M. H. (2008). On the assessment of robustness. *Structural Safety, 30*(3), 253–267. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.11.004
13. Bao, Y., & Kunnath, S. K. (2010). Simplified progressive collapse simulation of RC frame–wall structures. *Engineering Structures, 32*(10), 3153–3162. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.06.003
14. Helton, J. C., & Davis, F. J. (2003). Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety, 81*(1), 23–69. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9.
15. Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research, 253*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023
16. Beck, A. T., Ribeiro, L. da R., Costa, L. G. L., & Stewart, M. G. (2023). Comparison of risk-based robustness indices in progressive collapse analysis of building structures. *Structures, 57*, Article 105295, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105295
17. Gernay, T. (2019). Fire resistance and burnout resistance of reinforced concrete columns. *Fire Safety Journal, 104*, 67–78. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.007.
18. Felicetti, R. (2022). Assessment of a fire-damaged concrete overpass: The Verona bus crash case study. *Journal of Structural Fire Engineering, 13*(3), 293–306. https://doi.org/10.1108/JSFE-06-2021-0039.
19. Stochino, F., Mistretta, F., Meloni, P., & Carcangiu, G. (2017). Integrated approach for post-fire reinforced concrete structures assessment. *Periodica Polytechnica Civil Engineering, 61*(4), 677–699. https://doi.org/10.3311/PPci.9830.
20. Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials, 2*(4), 429–447. https://doi.org/10.1002/pse.51
21. Van Coile, R., Caspeele, R., & Taerwe, L. (2014). Reliability-based evaluation of the inherent safety presumptions in common fire safety design. *Engineering Structures, 77*, 181–192. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.007.
22. Moradi, M., Tavakoli, H., & Abdollahzade, G. (2024). Probabilistic evaluation of failure time of reinforced concrete frame in post-earthquake fire scenario. *Structural Concrete, 25*(5), 3487–3504. https://doi.org/10.1002/suco.202300353.
23. Buitrago, M., Makoond, N., Moragues, J. J., Sagaseta, J., & Adam, J. M. (2023). Robustness of a full-scale precast building structure subjected to corner-column failure. *Structures, 52*, 824–841. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.146

24. Kiakojouri, F., Sheidaii, M. R., De Biagi, V., & Chiaia, B. (2021). Progressive collapse of structures: A discussion on annotated nomenclature. *Structures, 29*, 1417–1423. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.006.
25. Ebadi-Jamkhaneh, M., Kontoni, D.-P. N., & Ebrahimi, A. H. (2024). Assessment of different methods for enhancing progressive collapse resistance of irregular reinforced concrete buildings using pushdown analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering, 49*, 13861–13883. https://doi.org/10.1007/s13369-024-08847-4.
26. Shadbahr, E., Aminnejad, B., & Lork, A. (2021). Determining post-fire residual compressive strength of reinforced concrete shear walls using the BAT algorithm. *Structures, 32*, 651–661. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.002.
27. Ferraioli, M., Lavino, A., & Mandara, A. (2022). Progressive collapse assessment and retrofit of a multistory steel braced office building. *International Journal of Steel Structures, 22*, 1086–1107. https://doi.org/10.1007/s13296-022-00626-x
28. Praxedes, C., Yuan, X.-X., & He, X.-H.-C. (2022). A novel robustness index for progressive collapse analysis of structures considering the full risk spectrum of damage evolution. *Structure and Infrastructure Engineering, 18*(3), 376–394. https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1851730.
29. Alshaikh, I. M. H., Abu Bakar, B. H., Alwesabi, E. A. H., & Akil, H. M. (2020). Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview. *Structures, 25*, 881–900. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.018.
30. Stochino, F., Bedon, C., Sagaseta, J., & Honfi, D. (2019). Robustness and resilience of structures under extreme loads. *Advances in Civil Engineering, 2019*, Article 4291703, 1–14. https://doi.org/10.1155/2019/4291703.
31. Alam, M. S., Kijewski-Correa, T., Roueche, D. B., Mosalam, K. M., Prevatt, D. O., & Robertson, I. (2025). A unified framework for post-disaster hazard and structural assessment data collection across hazards and infrastructure typologies. Frontiers in Built Environment, 11, Article 1546616. https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1546616.
32. Bai, Y., Sezen, H., Yilmaz, A., & Qin, R. (2026). Field monitoring and assessment of reinforced concrete building collapse using remote sensing and digital twins. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 16, Article 21. https://doi.org/10.1007/s13349-025-01044-3.

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.