

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА  
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»



ЕКОЛОГІЯ. ДОВКІЛЛЯ.  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ - 2025  
Колективна монографія

ПОЛТАВА 2025

**КОМПЛЕКСНІ РЕСУРСОЩАДНІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ  
ЗАХИСНИХ СПОРУД ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ**

**Усенко І. С.**, кандидат технічних наук, доцент,  
**Усенко Д. В.**, доктор філософії

*Національний університет «Полтавська політехніка  
імені Юрія Кондратюка», Україна*

**COMPLEX RESOURCE-SAVING AND ENERGY-EFFICIENT  
TECHNOLOGIES FOR THE RESTORATION AND  
MODERNIZATION OF CIVIL PROTECTION STRUCTURES**

**Usenko I. S.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;  
**Usenko D. V.**, PhD in Technical Sciences

*National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»,  
Ukraine*

**Анотація.** У монографії розглянуто сучасні ресурсощадні та енергоефективні технології для відновлення та модернізації захисних споруд цивільного захисту. Представлено результати досліджень фізико-механічних властивостей самоущільнюваного бетону з переробленими матеріалами, а також ефективність застосування технології 3D-друку у відновлювальних процесах. Особливу увагу приділено оцінці енерговитрат і екологічної стійкості, а також розроблено рекомендації щодо впровадження інноваційних технологій для зменшення викидів CO<sub>2</sub> та оптимізації використання ресурсів. Робота спрямована на підвищення надійності та швидкості відновлення пошкоджених об'єктів критичної інфраструктури.

**Ключові слова:** *ресурсощадні технології, енергоефективність, відновлення споруд, цивільний захист, самоущільнюваний бетон, перероблені матеріали, 3D-друк, екологічна стійкість*

**Abstract.** The monograph examines modern resource-saving and energy-efficient technologies for the restoration and modernization of civil protection structures. The study presents the results of research on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete with recycled materials, as well as the effectiveness of using 3D printing technology in recovery processes. Special attention is given to the assessment of energy consumption and environmental sustainability, with recommendations developed for implementing innovative technologies to reduce CO<sub>2</sub> emissions and optimize resource use. The work aims to improve the reliability and

speed of restoring damaged critical infrastructure facilities.

**Keywords:** *resource-saving technologies, energy efficiency, structure restoration, civil protection, self-compacting concrete, recycled materials, 3D printing, environmental sustainability*

Сучасні виклики, зумовлені як природними, так і антропогенними факторами, зокрема військовими конфліктами, сприяли підвищенню уваги до швидкого відновлення пошкодженої інфраструктури. Захисні споруди цивільного захисту повинні забезпечувати високий рівень безпеки для населення та критично важливих об'єктів інфраструктури. При цьому зростає потреба у впровадженні ресурсоощадних та енергоефективних технологій, які можуть значно зменшити фінансові витрати, час на будівництво та негативний вплив на довкілля.

Ресурсоощадні рішення у відновленні споруд, зокрема використання вторинних матеріалів, таких як перероблена пластмаса в самоущільнюваному бетоні, дозволяють підвищити стійкість конструкцій та сприяють екологічній безпеці [3]. Одночасно з цим, адитивні технології, такі як 3D-друк бетонних конструкцій, демонструють значний потенціал для підвищення продуктивності будівельних процесів та скорочення витрат ресурсів [2]. Незважаючи на те, що технології 3D-друку активно розвиваються, їх широкомасштабне впровадження залишається обмеженим через ряд технічних, економічних та організаційних бар'єрів [1].

Важливим аспектом є також необхідність інтеграції принципів енергозбереження у процеси реконструкції та модернізації. Використання новітніх технологій із оптимізацією енергоспоживання сприятиме підвищенню ефективності захисних споруд, забезпечуючи при цьому дотримання екологічних стандартів [4].

Новизна даного дослідження полягає у комплексному підході до відновлення та модернізації захисних споруд цивільного захисту шляхом упровадження ресурсоощадних і енергоефективних технологій. Уперше здійснено порівняльний аналіз ефективності традиційних та інноваційних підходів до будівництва з акцентом на довговічність конструкцій, швидкість відновлення та мінімізацію впливу на довкілля.

Метою роботи є розроблення комплексних ресурсоощадних та енергоефективних технологій для відновлення та модернізації захисних споруд цивільного захисту, що сприятиме зменшенню витрат, часу на відновлення та екологічного впливу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-дослідницькі завдання:

– проаналізувати сучасний стан відновлення захисних споруд та

визначити основні проблеми у цьому напрямі;

- дослідити потенціал використання адитивних технологій у будівництві та їхню ефективність для різних типів конструкцій;

- вивчити вплив перероблених матеріалів, таких як пластмасові добавки, на властивості будівельних конструкцій;

- розробити рекомендації щодо впровадження технологій, орієнтованих на збереження ресурсів та енергозбереження у процесах реконструкції;

- порівняти результати застосування інноваційних технологій із традиційними методами, з урахуванням впливу на навколишнє середовище та довговічності споруд.

Таким чином, розділ монографії спрямований на вирішення актуальних наукових та практичних завдань у сфері екологічно орієнтованого відновлення інфраструктури.

Об'єктами дослідження є захисні споруди цивільного захисту, що піддаються впливу різних руйнівних факторів, зокрема бойових дій, стихійних лих або техногенних катастроф. Особливу увагу надано дослідженню технологій, спрямованих на ресурсоощадне та енергоефективне відновлення цих споруд, що дозволяє знизити витрати на будівництво, час на відновлення та негативний вплив на довкілля. Дослідження базується на застосуванні новітніх матеріалів, таких як самоущільнюваний бетон із вторинними компонентами, а також технологій 3D-друку, які забезпечують швидке створення конструкцій складної форми з мінімальними затратами ресурсів.

Матеріальна база дослідження включає різноманітні будівельні матеріали та технології. Одним із ключових компонентів є самоущільнюваний бетон із додаванням перероблених пластмас, які представлені у вигляді полімерних волокон або гранул. Застосування таких матеріалів дозволяє підвищити механічні характеристики бетону, зокрема його міцність, тріщиностійкість і довговічність, а також сприяє зниженню обсягів використання природних ресурсів та відходів у будівництві. Дослідження підтверджують, що бетон із такими добавками зберігає високу плинність, що спрощує процес формування елементів конструкцій навіть складної форми без застосування механічної вібрації під час заливки.

Другою важливою технологією дослідження є 3D-друк бетонних конструкцій. Ця технологія передбачає пошарове нанесення спеціально розроблених бетонних сумішей за допомогою роботизованих систем. Для досягнення оптимальних результатів досліджено параметри друку, зокрема товщину шару, швидкість подачі матеріалу та тиск у системі. Експериментально встановлено, що швидкотверднучі суміші з

контрольованим складом забезпечують високу якість та точність друку, а також дозволяють уникнути дефектів, пов'язаних із нерівномірним твердінням. Переваги 3D-друку включають скорочення часу на відновлення об'єктів, зменшення витрат на опалубку та оптимізацію використання матеріалів [1].

Із метою підвищення енергоефективності будівельних процесів досліджено впровадження технологій із низьким енергоспоживанням, зокрема альтернативні методи твердіння бетону. Зниження енергетичних витрат досягається також завдяки застосуванню матеріалів із покращеними теплоізоляційними характеристиками. Окрім того, оптимізація складу бетонних сумішей за рахунок зменшення частки цементу дозволяє зменшити обсяги викидів CO<sub>2</sub> під час виробництва будівельних матеріалів, що відповідає сучасним екологічним стандартам і вимогам сталого розвитку.

Методологія дослідження базується на кількох етапах. На першому етапі проведено теоретичний аналіз сучасних технологій відновлення захисних споруд, що включає огляд наукових публікацій і нормативних документів. Зокрема, розглянуто міжнародний досвід використання перероблених матеріалів та технологій адитивного виробництва в будівництві. На другому етапі проведено експериментальні дослідження з метою оцінення фізико-механічних властивостей матеріалів, їх стійкості до навантажень і зносу. Доследи зі створення елементів методом 3D-друку дозволили визначити ключові параметри процесу, які впливають на якість і довговічність кінцевих конструкцій [1].

Додатково використано методи математичного моделювання для оцінки розподілу напружень у конструкціях. Це дозволило проаналізувати вплив геометрії елементів та складу матеріалів на міцність споруд. Особливу увагу надано оцінці енергоефективності різних варіантів технологій відновлення, зокрема шляхом порівняння енергоспоживання при використанні традиційних і інноваційних підходів. Для цього було створено моделі, які враховують витрати енергії на кожному етапі будівельного процесу.

Завершальним етапом стало порівняння отриманих результатів із даними для традиційних методів будівництва. Це дозволило зробити висновки щодо доцільності впровадження ресурсоощадних і енергоефективних рішень у масштабних проєктах відновлення пошкоджених об'єктів. Оцінка ефективності цих рішень проводилася за критеріями скорочення часу відновлення, зниження витрат на матеріали та зменшення впливу на довкілля. Результати дослідження формують основу для розроблення рекомендацій із практичного впровадження

технологій у сфері цивільного захисту та екологічно сталого будівництва.

Результати проведених досліджень підтвердили ефективність застосування сучасних ресурсощадних і енергоефективних технологій для відновлення та модернізації захисних споруд цивільного захисту. У сучасних умовах особливого значення набуває інтеграція інноваційних підходів до будівництва, що включають використання самоущільнюваного бетону з переробленими матеріалами та технологій адитивного виробництва, таких як 3D-друк. Такі рішення дозволяють не лише прискорити процеси відновлення, а й суттєво знизити витрати на матеріали та енергію, а також скоротити негативний вплив на довкілля.

Дослідження використання самоущільнюваного бетону з переробленими пластмасовими добавками показали значні переваги цього матеріалу. За результатами експериментів встановлено, що додавання полімерних волокон покращує механічні характеристики бетону, зокрема його міцність на стиск і стійкість до утворення тріщин [3]. Крім того, застосування вторинних матеріалів сприяє скороченню обсягів відходів та підвищенню екологічної ефективності будівництва, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

Важливою частиною дослідження є оцінка можливостей технології 3D-друку, яка передбачає автоматизоване пошарове нанесення будівельної суміші за допомогою спеціалізованого обладнання. Ця технологія дає змогу значно скоротити час виконання робіт і зменшити залежність від людського фактора, що підвищує безпеку на будівельних майданчиках. Проведені експерименти підтвердили, що за умов дотримання оптимальних параметрів друку – таких як швидкість подачі матеріалу, товщина шару та тиск у системі – можна досягти високої точності та якості конструкцій [7].

Ще одним важливим аспектом дослідження є питання енергоефективності. Зниження енергетичних витрат у будівництві досягається за рахунок оптимізації складу сумішей і впровадження методів твердіння бетону з мінімальним споживанням енергії. Зокрема, скорочення частки цементу у суміші дозволяє зменшити викиди CO<sub>2</sub>, що має велике значення для зниження впливу будівельної галузі на клімат. Впровадження теплоізоляційних матеріалів також підвищує загальну енергоефективність будівельних споруд [2].

Порівняння результатів експериментальних досліджень із даними для традиційних методів будівництва вказує на суттєві переваги інноваційних технологій. Встановлено, що використання ресурсозберігаючих рішень сприяє зменшенню загальних витрат на будівництво та підвищенню довговічності об'єктів. Проте, було

виявлено певні обмеження впровадження цих технологій. Основними проблемами залишаються відсутність розвинутої нормативної бази та необхідність додаткових досліджень щодо адаптації технологій до різних умов експлуатації [3].

Таким чином, результати досліджень підтверджують ефективність запропонованих підходів для відновлення пошкодженої інфраструктури цивільного захисту. Подальші дослідження мають бути зосереджені на удосконаленні технологічних процесів, оптимізації матеріалів і розширенні можливостей застосування інноваційних рішень у різних регіонах.

Одним із ключових напрямів дослідження є визначення механічних характеристик будівельних матеріалів, які використовуються для відновлення та модернізації захисних споруд цивільного захисту. Основний акцент зроблено на властивостях самоущільнюваного бетону з переробленими пластиковими добавками, а також на ефективності технологій 3D-друку бетонних конструкцій.

Проведені експерименти показали, що додавання перероблених полімерних матеріалів до бетонної суміші дозволяє підвищити її міцність та тріщиностійкість. Основним показником міцності є стискальна міцність  $\sigma_c$ , яка обчислюється за формулою:

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A}, \quad (1)$$

де  $F_{max}$  – максимальне навантаження, що витримує зразок,  $A$  – площа перерізу зразка [3].

Додатково оцінюється розтягувальна міцність  $\sigma_t$ , яку визначають за формулою:

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l}, \quad (2)$$

де  $P$  – прикладене навантаження,  $d$  – діаметр зразка,  $l$  – його довжина [3].

Використання пластикових волокон сприяє підвищенню стійкості бетону до розтріскування внаслідок пластичних деформацій. Згідно з даними, отриманими під час випробувань, впровадження полімерних добавок дозволяє досягти приросту міцності на 10-15% у порівнянні з традиційним бетоном [4].

**Таблиця 1 – Результати досліджень**

| Уміст полімерів, % | Міцність на стиск, МПа | Міцність на розтяг, МПа |
|--------------------|------------------------|-------------------------|
| 0                  | 40                     | 4,5                     |
| 5                  | 44                     | 5,0                     |
| 10                 | 46                     | 5,2                     |

Технологія 3D-друку передбачає пошарове нанесення матеріалу. Важливим параметром є товщина шару  $h_{layer}$ , яка впливає на загальну міцність конструкції. Параметр оптимізується для збереження балансу між швидкістю друку та якістю поверхні. Для визначення впливу швидкості друку на міцність використовується формула:

$$\sigma_{3D} = \alpha \cdot v_{print}^{-\beta}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – експериментальні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу та умов друку,  $v_{print}$  – швидкість подачі матеріалу [1].

Тести показали, що при збільшенні швидкості друку понад 100 мм/с якість шарів знижується через недостатнє зчеплення між ними. Це зумовлено тим, що верхній шар не встигає інтегруватися з нижнім через надто швидке його твердіння.

**Таблиця 2 – Дані результату друку**

| Швидкість друку, мм/с | Міцність на стиск, МПа | Дефекти у зразках, % |
|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 50                    | 48                     | 2                    |
| 100                   | 45                     | 5                    |
| 150                   | 38                     | 12                   |

Важливою характеристикою є товщина шару, яка визначає рівномірність навантаження у конструкції. Встановлено, що оптимальна товщина шару становить 10-15 мм для збереження міцності на рівні, не менше 90% від аналогічного литого бетону [1].

Використання перероблених полімерів позитивно впливає на стійкість до тріщиноутворення. Завдяки модифікації складу бетону досягається кращий розподіл напружень у зразках, що знижує ймовірність раптового руйнування конструкцій. Параметр тріщиностійкості  $\sigma_{crack}$  можна визначити за рівнянням:

$$\sigma_{crack} = \frac{K \cdot \Delta L}{E \cdot d}, \quad (4)$$

де  $K$  – коефіцієнт жорсткості матеріалу,  $\Delta L$  – подовження зразка,  $E$  – модуль пружності матеріалу,  $d$  – початкова довжина зразка [3].

Дані експериментів свідчать, що за наявності полімерних волокон критичні деформації суттєво знижуються, що робить матеріал більш довговічним. Порівняльні дослідження зразків різного складу показують, що використання добавок дозволяє зменшити кількість тріщин на 30-40% у порівнянні з контрольними зразками.

Аналіз механічних характеристик матеріалів показав суттєві відмінності між традиційним бетоном, самоущільнюваним бетоном із переробленими полімерними добавками та матеріалом, що використовується для технології 3D-друку. Традиційний бетон має стискальну міцність близько 40 МПа і розтягувальну міцність 4,5 МПа. Однак, цей матеріал менш стійкий до утворення тріщин і потребує використання опалубки під час будівництва. Водночас самоущільнюваний бетон із полімерними добавками продемонстрував покращені характеристики: його міцність на стиск становить 46 МПа, а тріщиностійкість зросла на 30%.

**Таблиця 3 – Порівняння міцності матеріалів**

| Матеріал                           | Міцність на стиск, МПа | Міцність на розтяг, МПа | Тріщиностійкість (%) |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Традиційний бетон                  | 40                     | 4,5                     | 100                  |
| Самоущільнюваний бетон з полімером | 46                     | 5,2                     | 70                   |
| Бетон для 3D-друку                 | 45                     | 5,0                     | 80                   |

Бетон для 3D-друку, хоч і поступається за міцністю самоущільнюваному (45 МПа), забезпечує значні переваги в будівельних процесах завдяки автоматизації та швидкому створенню конструкцій. Усі інноваційні матеріали дозволяють скоротити час будівництва майже вдвічі, а також знижують потребу в робочій силі та витратах на опалубку, що робить їх економічно вигідними [3].

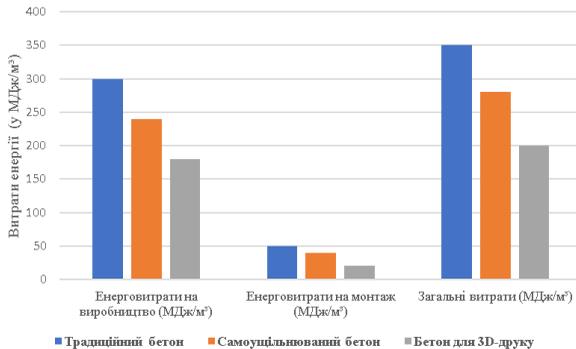
**Таблиця 4. Порівняння часу виконання робіт**

| Метод                   | Час будівництва (днів) | Вартість опалубки (%) | Потреба у робочій силі (%) |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Традиційне будівництво  | 120                    | 20                    | 100                        |
| Будівництво з 3D-друком | 60                     | 0                     | 50                         |

Результати аналізу механічних характеристик матеріалів підтверджують доцільність впровадження як самоущільнюваного

бетону з переробленими матеріалами, так і технології 3D-друку у відновленні захисних споруд. Ці матеріали мають високі експлуатаційні властивості, сприяють оптимізації будівельних процесів і відповідають сучасним вимогам екологічної стійкості [6].

Енергетичні витрати на будівництво є важливим показником ефективності технологій. Проведене дослідження дозволило оцінити загальне енергоспоживання при використанні різних методів будівництва. Для традиційного бетону енерговитрати на виробництво та монтаж становлять близько 350 МДж на кубічний метр, що обумовлено високою часткою енергозатратного цементу у складі суміші. Самоущільнюваний бетон демонструє зменшення загальних витрат до 280 МДж/м<sup>3</sup> завдяки оптимізації складу і зменшенню часу твердіння.



**Рисунок 1 – Енергоспоживання різних методів будівництва**

Найбільш енергоефективним виявився бетон для 3D-друку, де витрати знижені до 200 МДж/м<sup>3</sup> за рахунок мінімізації ручної праці та автоматизації процесів нанесення матеріалу. Таке зниження енергоспоживання сприяє зменшенню вартості будівництва та підвищенню його конкурентоспроможності [5].

Упровадження самоущільнюваного бетону з переробленими полімерними компонентами дозволяє зменшити ці показники до 450 кг/м<sup>3</sup> завдяки зниженню вмісту цементу та застосуванню вторинних матеріалів. Технологія 3D-друку забезпечує ще більше скорочення викидів – до 400 кг/м<sup>3</sup>, що пов'язано з ефективнішим використанням ресурсів та відсутністю відходів при формуванні конструкцій. Скорочення викидів на 25-33% є важливим фактором для зменшення екологічного навантаження, особливо в умовах глобальних зусиль щодо боротьби зі зміною клімату [3].

**Таблиця 5. Викиди CO<sub>2</sub> під час виробництва бетону**

| Тип бетону                | Викиди CO <sub>2</sub><br>(кг/м <sup>3</sup> ) | Скорочення порівняно з<br>традиційним (%) |
|---------------------------|--|---|
| Традиційний бетон         | 600  | 0   |
| Самоущільнюваний<br>бетон | 450  | 25  |
| Бетон для 3D-друку        | 400  | 33  |

Одним із ключових аспектів сталого розвитку є скорочення викидів парникових газів, зокрема CO<sub>2</sub>, який утворюється під час виробництва цементу. Для традиційного бетону викиди CO<sub>2</sub> становлять близько 600 кг на кубічний метр матеріалу.

Для оцінки екологічного впливу досліджено обсяги викидів CO<sub>2</sub> при виробництві різних типів бетону. Розрахунок зменшення викидів:

$$CO_2 = k \cdot \left( 1 - \frac{C_{alt}}{C_{stand}} \right) \quad (5)$$

Тут CO<sub>2</sub> – обсяг скорочення викидів внаслідок використання альтернативних технологій,  $k$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу матеріалів і технологій,  $C_{alt}$  – частка цементу в складі бетонної суміші при застосуванні альтернативних технологій,  $C_{stand}$  – частка цементу в традиційній суміші. Рівність (5) дозволяє кількісно оцінити екологічний ефект від впровадження ресурсоощадних рішень у будівництві. Чим нижча частка цементу  $C_{alt}$ , тим меншим є вплив на довкілля завдяки скороченню енергозатратного процесу його виробництва. Наприклад, якщо частка цементу в інноваційній суміші знижена на 30% порівняно з традиційною, обсяг викидів зменшується на аналогічний відсоток. Цей підхід є важливим для розробки екологічно орієнтованих будівельних технологій, які сприяють досягненню цілей сталого розвитку та зменшенню впливу будівельної галузі на кліматичні зміни.

Таким чином, застосування сучасних ресурсоощадних і енергоефективних технологій має значний потенціал для підвищення екологічної стійкості будівництва. Оптимізація матеріалів і технологічних процесів дозволяє не тільки скоротити витрати енергії та викиди шкідливих речовин, а й покращити експлуатаційні характеристики споруд, що є важливим для забезпечення довговічності та надійності об'єктів цивільного захисту.

Дана публікація присвячена розробці та впровадженню ресурсоощадних та енергоефективних технологій для відновлення і модернізації захисних споруд цивільного захисту. В результаті досліджень було встановлено, що використання самоущільнюваного бетону з переробленими полімерними добавками дозволяє значно

покращити механічні характеристики конструкцій, а технологія 3D-друку сприяє прискоренню будівельних процесів, оптимізації ресурсів та зниженню витрат. Особливу увагу надано екологічній стійкості: зменшенню енерговитрат і обсягів викидів CO<sub>2</sub>. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження цих технологій у масштабних проєктах відновлення критичної інфраструктури. Досягнення поставленої мети та вирішення наукових завдань свідчать про актуальність і перспективність отриманих результатів.

### ***Інформація про фінансування проєкту***

Робота виконана в рамках науково-технічної роботи «Ресурсоощадні технології прискореного відновлення пошкоджених будівель із влаштуванням захисних споруд цивільного захисту», яка фінансувалася за рахунок коштів державного бюджету України (шифр наукової роботи №109/25; державний реєстраційний номер: 0125U000895).

### **Використані інформаційні джерела:**

1. Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>

2. Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>

3. Faraj, R. H., Hama Ali, H. F., Sherwani, A. F. H., Hassan, B. R., & Karim, H. (2020). Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*, 30, 101283. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101283>

4. Liu, P., Yang, L., Gao, Z., Li, S., & Gao, Y. (2015). Fault tree analysis combined with quantitative analysis for high-speed railway accidents. *Safety Science*, 79, 344–357. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.06.017>

5. Altuwaim, A., & El-Rayes, K. (2018). Minimizing duration and crew work interruptions of repetitive construction projects. *Automation in Construction*, 88, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.024>

6. Le, T., Lim, S., Buswell, R. A., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Design and performance of an extrusion-based 3D printing system for cementitious materials. *Automation in Construction*, 21, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.05.005>

7. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2004). Potential Hazards in the Concrete Construction Industry. Retrieved from <https://www.osha.gov>

8. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2002). Cement Sustainability Initiative. Our agenda for action. Retrieved from <https://docs.wbcsd.org>