

УДК 004:624

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.10>**Родченко Олександр Васильович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва та  
реконструкції аеропортів,  
Національний авіаційний університет,  
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7703-4936>  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57195996540>  
Web of Science ResearcherID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/F-4063-2018>  
E-mail: [oleksandr.rodchenko@npp.nau.edu.ua](mailto:oleksandr.rodchenko@npp.nau.edu.ua)

**Шевченко Олександра Володимирівна,**

доктор філософії, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва  
та реконструкції аеропортів,  
Національний авіаційний університет,  
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3804-7264>  
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57215914661>  
Web of Science ResearcherID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/AFV-7651-2022>  
E-mail: [oleksandra.shevchenko@npp.nau.edu.ua](mailto:oleksandra.shevchenko@npp.nau.edu.ua)

## КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

***Анотація.** Стаття присвячена питанню використання штучного інтелекту у комп'ютерних технологіях числового моделювання будівельних конструкцій. Штучний інтелект (ШІ) – це технологія, яка дозволяє машинам думати, навчатися та діяти незалежно. Його можна використовувати для автоматизації завдань і надання інформації для оптимізації будівельних процесів і проєктів. Проаналізовано роль штучного інтелекту в будівельній галузі, перераховані переваги його використання. Розглянуто спосіб використання ШІ ChatGPT для регресійного аналізу при проєктуванні жорстких аеродромних покриттів. Комп'ютерні технології числового моделювання будівельних конструкцій та штучний інтелект мають великий потенціал для вдосконалення будівництва та цивільної інженерії. За допомогою цих технологій можна досягти покращення у якості будівельних проєктів та забезпечити сталість і стійкість споруд у майбутньому. Але варто пам'ятати, що комп'ютерні технології та ШІ мають бути використані як допоміжний інструмент, а не як заміна для людської експертизи і професійної кваліфікації.*

***Ключові слова:** комп'ютерні технології, штучний інтелект, будівельні конструкції, метод скінченних елементів, квазілінійна регресія, метод найменших квадратів, жорстке аеродромне покриття.*

### **Rodchenko Oleksandr, Shevchenko Oleksandra. COMPUTER TECHNOLOGIES FOR NUMERICAL MODELLING OF BUILDING CONSTRUCTIONS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

***Abstract.** The paper is devoted to the issue of using artificial intelligence in computer technologies for numerical modeling of building constructions. Artificial intelligence (AI) is a technology that allows machines to think, learn and act independently. It can be used to automate tasks and provide information to optimize construction processes and projects. The role of artificial intelligence in the construction industry is analyzed, the advantages of its use are listed. The method of using AI ChatGPT for regression analysis in airfield rigid pavement design is considered. Computer technologies for numerical modelling of building constructions and artificial intelligence have great potential for improving the building and civil engineering. With these technologies, engineers can improve as construction projects and ensure the sustainability and stability of structures in the future. But it should be remembered that computer technologies and AI should be used as an auxiliary tool, not as a replacement for human expertise and professional qualification.*

***Key words:** computer technologies, artificial intelligence, building constructions, finite element method, quasi-linear regression, method of least squares, airfield rigid pavement.*

**Вступ.** У сучасному світі комп'ютерні технології і штучний інтелект проникають у всі сфери нашого життя, і будівельна галузь не є винятком. Використання комп'ютерного моделювання та штучного інтелекту в проєктуванні та аналізі будівельних конструкцій будівель та споруд аеропортів має значний вплив на ефективність, безпеку та стійкість споруд, а також забезпечує швидкість та точність процесу. Штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання, також грають важливу роль у числовому моделюванні будівельних конструкцій. Завдяки алгоритмам нейронних мереж та глибокому навчанню, комп'ютери можуть «навчитися» розпізнавати та аналізувати складні закономірності у поведінці конструкцій. Одним із прикладів застосування комп'ютерного моделювання та штучного інтелекту є віртуальне тестування будівельних конструкцій перед їхньою фізичною реалізацією. Замість проведення дорогих та часом небезпечних експериментів на макетах чи прототипах, інженери можуть використовувати комп'ютерні моделі для вивчення різних сценаріїв навантажень, виявлення слабких місць та вдосконалення конструкцій до їхнього втілення у реальному житті. Це дозволяє зменшити витрати та збільшити швидкість процесу проєктування та будівництва. Однак, варто відзначити, що комп'ютерні технології числового моделювання та штучний інтелект не можуть повністю замінити інженера у будівельній галузі. Процес проєктування та будівництва все ще потребує фахівців зі знаннями та досвідом, які використовують комп'ютерні технології як потужний інструмент. Людський фактор вносить творчість, інтуїцію та професійну експертизу у процес моделювання та аналізу будівельних конструкцій аеропортів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Ідея штучного інтелекту виникла на початку 1940-х років. Зараз ШІ використовується в багатьох сферах людського життя [1–5].

За останні десятиліття будівельна галузь зазнала величезних змін. Від ручного паперового документообігу до оцифрованого робочого процесу, від 2D ручних креслень до 3D форм із використанням різноманітного високотехнологічного програмного забезпечення,

галузь швидко розвивається. Відомо, що будівельний сектор генерує величезну кількість даних, які потрібно збирати щодня та аналізувати. Саме в цьому ключову роль будуть відігравати штучний інтелект і алгоритми машинного навчання. За допомогою ШІ аналіз даних займає всього кілька секунд. Завдяки розширенню обчислювальної потужності в останні роки ШІ тепер можна використовувати в будівельній галузі. Важливо зазначити, що хоча штучний інтелект приносить значні успіхи у будівництві, він не замінює людський досвід. Натомість він доповнює навички інженерів, автоматизуючи трудомісткі завдання, надаючи розуміння на основі даних і розширюючи можливості для інноваційних та ефективних конструктивних рішень [1; 4; 5].

Штучний інтелект (ШІ) – це технологія, яка дозволяє машинам думати, навчатися та діяти незалежно. Його можна використовувати для автоматизації завдань і надання інформації для оптимізації будівельних процесів і проєктів. ШІ також можна використовувати для виявлення потенційних загроз безпеці до їх виникнення, покращуючи безпеку на робочому місці [4; 5].

Штучний інтелект має звільнити людство від роботи, на яку насправді не вистачає часу або яка часто повторюється, тому люди можуть зосередитися на інших завданнях. Оскільки ми майже напевно зіткнемося з нестачею кваліфікованих працівників у будівельній галузі, нам доведеться покладатися на ШІ. Найбільш кращим і ефективним підходом є співпраця, в якій досвідчені інженери-будівельники використовують передові можливості штучного інтелекту в суворій відповідності з міжнародними нормами та галузевими правилами [4].

Штучний інтелект революціонує різні аспекти будівельної інженерії, надаючи нові інструменти та можливості, які покращують процеси проєктування, аналізу та будівництва. Алгоритми ШІ можуть швидко генерувати й оцінювати численні альтернативи конструктивних рішень, а технологія машинного навчання допомагає передбачати структурну поведінку та рекомендувати відповідні модифікації шляхом навчання моделей на величезних обсягах даних, зменшуючи потребу в масштабному фізичному

тестуванні. Інструменти генеративного проектування на основі штучного інтелекту автоматично генерують кілька варіантів конструктивного рішення, у тому числі з нетрадиційними та ефективними геометріями, які розширюють межі традиційних інженерних підходів. Робототехніка та автономні транспортні засоби автоматизують процеси проектування. Роботи, оснащені алгоритмами ШІ, можуть скоротити час і витрати на будівництво, підвищуючи якість і безпеку [5].

Завдяки штучному інтелекту людство зможе будувати більш ефективно та передбачувано в майбутньому. Технології штучного інтелекту можуть революціонізувати спосіб проектування та аналізу будівель і споруд інженерами, підвищивши точність, ефективність і можливості прийняття рішень [4; 5]. Використовуючи технології ШІ, інженери зможуть оптимізувати проекти, аналізувати складні структурні системи та приймати рішення на основі даних [5; 6].

Штучний інтелект у будівельній сфері може: прискорити та автоматизувати процес проектування, цим самим підвищити ефективність і та продуктивність; збільшити знання (підвищення продуктивності за рахунок скорочення часу, витраченого на пошук спеціальної інформації, допомагає інженерам бути в курсі останніх стандартів і технологій); зменшити кількість помилок в інженерних проектах; поліпшити співпрацю; автоматизація повторюваних завдань допоможе інженерам співпрацювати ефективніше; підвищити точність виконання інженерних проектів. Штучний інтелект також допомагає підвищити ефективність і якість будівельних робіт, автоматизувати багато важких, повторюваних завдань і покращити оцінку тривалості проекту, а також керувати та вирішувати численні проблеми [4; 5].

Використання штучного інтелекту в інженерних проектах дає численні переваги. По-перше, це підвищує точність і ефективність. Алгоритми ШІ можуть обробляти величезні обсяги даних і виконувати складні обчислення набагато швидше, ніж люди. Ця можливість дозволяє інженерам аналізувати та оптимізувати проекти за короткий час [7–10].

Крім того, технології ШІ сприяють значній економії часу та коштів. Автоматизуючи такі завдання, як обробка та аналіз даних, інженери можуть зосередитися на прийнятті рішень на вищому рівні [11; 12]. Крім того, важливу роль відіграють структурний аналіз і оптимізація конструктивних рішень за допомогою ШІ [5].

ШІ також забезпечує прогнозне технічне обслуговування та виявлення несправностей. Шляхом постійного моніторингу структурних даних алгоритми ШІ можуть виявляти ранні попереджувальні ознаки структурної деградації або дефектів [13]. Цей проактивний підхід до технічного обслуговування може запобігти катастрофічним збоєм, скоротити час простою та подовжити термін служби конструкцій. Технології ШІ також змінили процес оптимізації конструкції [4; 5].

Удосконалення роботизованого будівництва відкриває ще одну можливість для штучного інтелекту в будівельній інженерії. Роботи, оснащені алгоритмами штучного інтелекту, можуть допомогти у складних будівельних завданнях, таких як монтаж складних конструкцій або виконання перевірок якості. Ця інтеграція штучного інтелекту та робототехніки спрощує процес будівництва та підвищує ефективність [5].

Федеральна авіаційна адміністрація (ФАА) США починаючи з 2017 року проводить дослідження використання ШІ при вирішенні інженерних задач з проектування жорстких аеродромних покриттів [3; 8; 9; 15–17]. Метою цього дослідження є розробка методів проектування жорстких аеродромних покриттів на основі машинного навчання (МН). Модель машинного навчання розроблена як альтернатива методу скінченних елементів, що використовується у програмі FAARFIELD [3; 7; 18; 19], та пропонується до використання у новій програмі ANNFAA [20] для швидкого обчислення критичних напружень в цементобетоні, зумовлених колісним навантаженням від літаків і впливом температури. Модель призначена для проектування жорстких аеродромних покриттів на дію основних опор повітряних суден зі злітною вагою понад 45,35 тон.

Для навчання моделі ШІ була розроблена база даних, що містить понад 127 тисяч рішень із вхідними даними та результатами, що були попередньо отримані за допомогою методу скінченних елементів. База даних містить різні комбінації параметрів жорсткого аеродромного покриття, температурних навантажень та параметрів шасі літака, що були введені в FEAFAA для визначення розподілу напружень на верхній поверхні цементобетонної плити. Дослідники розробили новий метод штучних нейронних мереж (ANN), який передбачає динамічну функціональну оцінку на неперервній області [1; 3; 8–10, 13–17, 20; 21]. Модель ґрунтується на модульному методі глибокого навчання [3]. Операція навчання виконувалася з використанням алгоритму зворотного поширення помилок (backpropagation) та числового оптимізаційного алгоритму ADAHESSIAN [3]. Моделі, побудовані за допомогою нового методу, суттєво точніше за попередні техніки машинного навчання для схожих проблем. Отримана модель є єдиною моделлю з одним інтерфейсом для всіх типів шасі в наборі даних. Модель машинного навчання була скомпільована у NET-сумісну бібліотеку, придатну для використання в програмі, подібній до FAARFIELD [3].

**Матеріали та метод.** Однією зі сфер, де ШІ має глибокий вплив, є регресійний аналіз. Розглянемо модель парної квазілінійної регресії (регресія нелінійна за факторами, але лінійна за оцінюваними параметрами). Припустимо, що маємо результати  $n$  пар незалежних спостережень. Суть задачі полягає у визначенні згладжувальної кривої, що „найкращим” чином проходить через задану множину точок. Найпоширенішим методом при розв’язанні подібних задач є метод найменших квадратів [6], що відноситься до числових методів.

Парну квазілінійну регресію можна записати [6]:

$$\hat{y} = a\varphi(x) + b,$$

де  $\hat{y}$  – показник;  $a$ ,  $b$  – невідомі параметри;  $\varphi(x)$  – фактор.

Шляхом заміни  $z_i = \varphi(x_i)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) парна квазілінійна регресія приводиться до лінійної

$$\hat{y} = a + b.$$

Принцип методу найменших квадратів для парної квазілінійної регресії полягає в знаходженні параметрів регресії  $a$  та  $b$ , для яких сума квадратів відхилень дослідних значень показника від згладжувальних буде мінімальною [6]:

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b)^2 \rightarrow \min.$$

Невідомі параметри  $a$ ,  $b$  визначаються за формулами [6]

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n z_i y_i - \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n z_i \right)^2};$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n z_i}{n}.$$

Для оцінки адекватності парної квазілінійної регресії спостережуваним або табличним даним можна використати критерій Фішера [6]

$$F_p = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot (n - 2).$$

де  $n$  – кількість значень фактора,  $R$  – коефіцієнт кореляції.

Для надійної ймовірності  $p=0,95$  і числа ступенів свободи  $k_1 = 1; k_2 = n - 1$  знаходиться табличне значення критерію Фішера  $F_T$  [6]. Отримане розрахункове значення порівнюється з табличним при цьому, якщо  $F_p > F_T$ , то з надійністю  $p=0,95$  можна вважати, що розглянута математична модель адекватна експериментальним або статистичним даним в іншому випадку з надійністю  $p=0,95$  розглянуту парну квазілінійну регресію не можна вважати адекватною [6].

**Результати.** Визначимо невідомі параметри парної квазілінійної регресії  $\hat{y} = a\varphi(x) + b$  для табличних даних чинних норм з проектування аеродромів, що використовуються для визначення згинального моменту у цементобетонній плиті жорсткого аеродромного



покриття при дії одноколійної опори повітряного судна. Для вирішення цієї задачі використано два способи: програма Microsoft Excel та ChatGPT.

ChatGPT – це мовна модель, розроблена компанією OpenAI на основі архітектури Generative Pre-trained Transformer, що призначена для генерації тексту, схожого на людську мову, на основі вхідних даних, які вона отримує. ChatGPT здатний виконувати широкий спектр завдань, пов'язаних з розумінням та генерацією природної мови, включаючи відповіді на питання, створення текстів, коротких програмних кодів за допомогою різних мов програмування, надання інформації і ведення текстових розмов.

ChatGPT було навчено на величезній кількості текстових даних і він може надавати відповіді на різні теми. ChatGPT не завжди може надавати абсолютно точну або актуальну інформацію, особливо щодо швидкозмінюваних тем.

Запит для визначення невідомих параметрів регресії у ChatGPT:

«Визначити вручну значення параметрів нелінійної регресії  $y=a*\ln(x)+b$  при  $x=0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.30, 0.32, 0.34, 0.36, 0.38, 0.40, 0.42, 0.44, 0.46, 0.48$ ;  $y=0.2714, 0.2545, 0.2402, 0.2278, 0.2169, 0.2072, 0.1984, 0.1904, 0.1831, 0.1763, 0.1700, 0.1641, 0.1586, 0.1534, 0.1485, 0.1438, 0.1395, 0.1353, 0.1313, 0.1275$ ».

Після першого запиту ChatGPT надав загальні теоретичні відомості про визначення параметрів регресії методом найменших квадратів та навів порядок розв'язку задачі.

Після повторного запиту ChatGPT надав відповідь у вигляді програмного коду мовою Python. Для запуску даного програмного коду та отримання відповіді було використано онлайн ресурс [replit.com](https://replit.com).

Результати порівняльного розрахунку наведено у табл. 1, результати співпадають.

Таблиця 1

**Параметри парної квазілінійної регресії**

Параметр	Microsoft Excel	ChatGPT
a	-0,091722	-0,091722
b	0,059764	0,059764

**Висновки.** Комп'ютерні технології числового моделювання будівельних конструкцій та штучний інтелект мають великий потенціал для вдосконалення будівельної галузі. Вони дозволяють інженерам та архітекторам швидше та точніше аналізувати конструкції, вдосконалювати їх ефективність та забезпечувати безпеку під час експлуатації. За допомогою цих технологій можна досягти значного покращення у якості будівельних проєктів та забезпечити сталість і стійкість споруд у майбутньому. Однак, важливо пам'ятати, що комп'ютерні технології та ШІ мають бути використані як допоміжний інструмент, а не як заміна для людської експертизи та професійної кваліфікації.

Використання ШІ в проєктуванні будівельних конструкцій зробить революцію в галузі, дозволивши інженерам створювати безпечніші та ефективніші конструкції.

Майбутнє використання ШІ має великі перспективи для інтеграції штучного інтелекту з іншими технологіями та постійного вдосконалення методів проєктування конструкцій.

Штучний інтелект також передбачає стратегічне планування. Це може допомогти будівельним компаніям оптимізувати використання ресурсів, керувати часовими рамками та загалом досягти кращої ефективності.

Технології штучного інтелекту призводять до автоматизації системи та кращих конкурентних переваг, ніж звичайні підходи.

Звичайно, штучний інтелект не обов'язково працює як ізольований інструмент. За потреби він має потенціал для інтеграції та вдосконалення людських ресурсів та інших цифрових технологій, таких як будівельне інформаційне моделювання (BIM).

Чат-бот зі штучним інтелектом ChatGPT можна використовувати для регресійного аналізу, але у більшості випадків він не надає відразу потрібну відповідь у вигляді числових значень, тому запит необхідно повторювати і для подальших розрахунків використовувати розроблену ChatGPT програму. Наполягати на тому, щоб ChatGPT виконав будь-які математичні розрахунки власними ресурсами не варто, оскільки в його основу закладено мовні моделі, і навіть при простих арифметичних розрахунках він може видавати неправильні відповіді.

**References:**

1. Abambres, M., & Ferreira, A. (2017). Application of ANN in Pavement Engineering: State-of-Art. *Mechanical Engineering eJournal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3351973>
2. Abed, A., Thom, N.H., Campos-Guereta, I., & Airey, G. (2022). Improved Multi-layer Analysis of Pavement Response Using Neural Networks to Optimize Numerical Integration. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00255-x>
3. Ali Z. Ashtiani, Thomas Paniagua, Timothy Parsons, and Greg Foderaro (2022). Machine Learning Solutions for Top-Down Cracking Design of Airport Rigid Pavement [online]. Final Report DOT/FAA/TC-22/44, Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center, Aviation Research Division, Atlantic City, International Airport, New Jersey. Available from Internet: <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Pavement-Papers-Publications/Airport-Pavement-Detail/machine-learning-solutions-for-top-down-cracking-design-of-airport-rigid-pavement>
4. Hadi Salehi, Rigoberto Burgueño. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering, *Engineering Structures*, Volume 171, 2018, 170–189. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>
5. Hooda, Y., Kuhar, P., Sharma, K., & Verma, N.K. (2021). Emerging Applications of Artificial Intelligence in Structural Engineering and Construction Industry. *J Phys Conf Ser* 2021. 1950. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1950/1/012062>
6. John Wolberg (2006). *Data Analysis Using the Method of Least Squares*. Springer, Berlin, Heidelberg. 250 p. [https://doi.org/10.1007/3-540-31720-1\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-31720-1_2)
7. Karpov, V., Stepanchuk, O., Dubyk, O., Rodchenko, O., & Prentkovskis, O. (2023). Improvement of Methodology of Calculation and Assessment of Transport and Operational Condition of Airfield Pavement (on the Example of Airport Pavements of Kyiv and Mykolaiv International Airports). In: Prentkovskis, O., Yatskiv (Jackiva), I., Skačkauskas, P., Maruschak, P., Karpenko, M. (eds) *TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2022. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3\\_79](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_79)
8. Kaya, O., Rezaei-Tarahomi, A., Ceylan, H.I., Gopalakrishnan, K., Kim, S., & Brill, D.R. (2018). Neural Network-Based Multiple-Slab Response Models for Top-Down Cracking Mode in Airfield Pavement Design. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000035>
9. Kaya, O. (2022). Development of Neural Network-Based Asphalt Mix Design Parameters Prediction Tool. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 12793 – 12804. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07579-7>
10. Jing, C., Zhang, J., & Song, B. (2020). An innovative evaluation method for performance of in-service asphalt pavement with semi-rigid base. *Construction and Building Materials*, 235, 117376. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117376>
11. Lapenko, O.I., Shevchenko, O.V., & Masud, N.N. (2018). Compression work of steel reinforced concrete columns. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 2018, 7(3), pp. 229–331. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14408>
12. Makhinko A., & Makhinko N. (2020). To the Calculation of the Optimal Level of Reliability by Using Economic Indicators / *Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 47, P. 251-259. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_32)
13. Phark, C., Kim, W., Yoon, Y., Shin, G.A., & Jung, S. (2018). Prediction of issuance of emergency evacuation orders for chemical accidents using machine learning algorithm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.021>
14. Phark, C., Kim, S., & Jung, S. (2022). Development to Emergency Evacuation Decision Making in Hazardous Materials Incidents Using Machine Learning. Processes. <https://doi.org/10.3390/pr10061046>
15. Rezaei-Tarahomi, A., Kaya, O., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., Kim, S., & Brill, D.R. (2017). Sensitivity quantification of airport concrete pavement stress responses associated with top-down and bottom-up cracking. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10, 410–420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.001>
16. Rezaei-Tarahomi, A., Kaya, O., Ceylan, H.I., Kim, S., Gopalakrishnan, K., & Brill, D.R. (2017). Development of rapid three-dimensional finite-element based rigid airfield pavement foundation response and moduli prediction models. *Transportation geotechnics*, 13, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.011>
17. Rezaei Tarahomi, A., Kaya, O., Ceylan, H.I., Gopalakrishnan, K., Kim, S., & Brill, D.R. (2020). ANNFAA: artificial neural network-based tool for the analysis of Federal Aviation Administration's rigid pavement systems. *International Journal of Pavement Engineering*, 23, 400–413. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1748627>
18. Rodchenko, O. (2017). Computer technologies for concrete airfield pavement design. *Aviation*, 21(3), 111–117. <https://doi.org/10.3846/16487788.2017.1379439>

19. Salsilli, R., Wahr, C., Delgadillo, R., Huerta, J., & Sepúlveda, P. (2015). Field performance of concrete pavements with short slabs and design procedure calibrated for Chilean conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 16, 363–379. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943129>
20. Tarahomi, A.R., Kaya, O., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., Sunghwan Kim, S., & Brill, D.R. (2022). ANNFAA: artificial neural network-based tool for the analysis of Federal Aviation Administration's rigid pavement systems. *International Journal of Pavement Engineering*, 23. 2, 400–413. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1748627>
21. Yang, X., Jinchao, G., Ling, D., You, Z., Lee, V.C., Hasan, M.R., & Cheng, X. (2021). Research and applications of artificial neural network in pavement engineering: a state-of-the-art review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.005>