



Получена: 11.06.2024 г.

Приета: 03.10.2024 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ В ТЕХНИЧЕСКАТА ДИАГНОСТИКА НА ЯЗОВИРИ

М. Маврова-Гиргинова¹

Ключови думи: язовирна стена, изкуствени невронни мрежи, идентификация

РЕЗЮМЕ

Интегрирането на изкуствения интелект (ИИ) в строителното инженерство, особено в областта на управлението на сигурността на язовирни стени, става все по-значимо поради сложността на аналитичното математическо моделиране и ограниченията на физическите модели. ИИ, по-специално изкуствените невронни мрежи, подпомагат задачи като прогнозиране на хоризонталните премествания на короната на язовирни стени и диагностициране на поведението им по време на експлоатация. Тази технология, както е показано в статията, предлага решения за оптимизиране на проектирането, управление на сигурността в условия на ограничена информация и анализ на безопасността при експлоатация, като дава възможност на инженерите да вземат информирани решения през целия жизнен цикъл на хидротехническите съоръжения. Макар че човешкият опит остава от съществено значение, ИИ ще предложи нови възможности за динамично моделиране въз основа на управлявани от ИИ сензорни мрежи, което ще доведе до революция в областта на строителното инженерство.

Въведение

Навлизането на изкуствения интелект във всяка област и човешка дейност е обективен процес, който закономерно засяга и строителното инженерство. Техническата диагностика на язовирни стени е обект на интелигентни приложения, особено в

¹ Мария Маврова-Гиргинова, доц. д-р инж., кат. „Хидротехника и хидромелиорации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: margir_fhe@uacg.bg

аспектите на сигурността. И това е така, защото изграждането на аналитичен математически модел с използване на априорни знания за обекта на изследване, т.е. на физически модел за симулиране на поведението на язовирните стени в експлоатация, е трудно и в повечето случаи невъзможно. В такъв случай се прилага експерименталният подход, наречен още идентификация, в основата на който стои обработката на входно-изходни данни за изследваната система (обект), а идентификация с помощта на ИИ води до създаване на по-точни прогнозни модели [1].

Проектирането и анализът на язовирни стени изискват експертни познания [2] и опитни инженери, на които ИИ може да предложи например да намери оптимална геометрия [3, 4], включително източниците на несигурност, които могат да бъдат скрити за човека [5], както и много други полезни приложения.

В това изследване са включени примери за приложение на ИИ и по-специално на изкуствени невронни мрежи във фазите Проектиране и Експлоатация на хидротехнически съоръжения:

- Първият пример е посветен на задачата за прогнозиране на проектните хоризонтални премествания на короната на язовирна стена въз основа на числен конструктивен анализ в различни сценарии на експлоатация. По този начин да бъдат определени проектни статични характеристики, които да бъдат включени в проекта за техническа експлоатация на съоръжението и използвани в програмата за мониторинг.
- Вторият пример решава задачата за техническа диагностика на поведението на язовирна стена в експлоатация, по данни от вече събрани натурни измервания на хоризонталните премествания на короната на стената, за определяне на експериментални статични характеристики [6].

1. Статични характеристики за диагностика по хоризонтални премествания

В техническата диагностика параметрите на диагностика са изходни за разглежданата система. Това са параметри на породените от нейното функциониране физически и химически процеси. При язовирните стени такива са филтрацията на вода, деформирането на съоръжението, разпределението на температурите, параметри на износване, корозия и така нататък. От гледна точка на техническата диагностика, топлината и водата например са природни агенти, които постоянно контролират техническото състояние на стената – плътност, водоплътност и други. По изменението на диагностичните параметри може да се предскаже настъпването на повреда и тя да бъде предотвратена с намаляване на експлоатационния товар и ремонт.

Всеки елемент на дадена система от хидротехнически съоръжения функционира като многофакторен обект, тоест параметрите на диагностика, определящи състоянието му, зависят от два и повече фактора. Задачата за превръщане на събраните от мониторинга данни в значими показатели – индикатори за настоящо и бъдещо поведение на системата, налага приемането на подходящи методи за обработка на информацията, за идентификация и количествено оценяване на сигурността, което по същество е предметът на теорията на идентификация на системите. В [6] идентификацията се определя като намиране на модел на обекта въз основа на ограничен брой измервания на входните и изходните величини, които могат да бъдат подложени на случайни смущения. Процесът на идентификация има итеративен характер и се повтаря с натрупване на нови данни от измервания. Моделирането на

„статиката“ и „динамиката“ на обектите са две страни на една и съща задача: създаване на математическо описание с цел оптимално управление на обектите. Докато чрез изследване на статиката се цели да се определи установеният режим на обекта, изучаването на динамиката му (на преходни процеси) създава предпоставки за управление, което да поддържа установения режим.

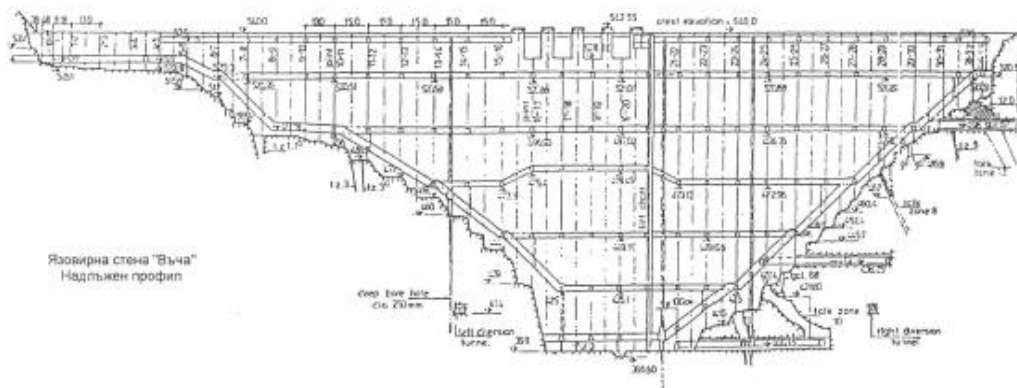
Основното изискване към данните, необходими за идентификация на статиката на обектите, е да бъдат събрани при установени режими на процесите, тоест интервалът на дискретизация по време между отделните данни да бъде значителен, така че преходните процеси при изменение на входните променливи да са приключили. Организацията на техническата експлоатация и мониторинг на язовирни стени у нас предполага заснемане по геодезичен път в интервал между 15 и 30 дни, което прави данните подходящи за идентификация на статиката на обектите, в условията на пасивен експеримент.

По въпроса за избор на подходящи модели гъвкавостта на статистическите методи при установяване на реакцията на параметрите на диагностика от изменението на входните фактори определя тяхната приложимост за получаване на статични, а при наличие на експеримент, съобразен с изискванията на идентификация на динамиката, на динамични характеристики на параметри на диагностика. Недостатъците на използването им при пасивен експеримент обаче произтичат от невъзможността да бъде доказана адекватността на получаваните модели.

Ето защо за идентификация на статични характеристики, които да се ползват за оценка на състоянието по време на експлоатация, методът на изкуствените невронни мрежи е удобен и с определени предимства по отношение на неговата толерантност към умерен шум и неравна стъпка по време в наборите от данни.

2. Обект на изследване

Обект на моделиране в примера е най-високата язовирна стена в България – язовирна стена Въча. Тя е изградена на река Въча на 17 km от град Кричим и на 5 km над язовир Кричим създава водохранилище с максимален обем 226 120 000 m³ вода. Проектант на хидровъзела „Въча“ е НИППИЕС Енергопроект. Строителството му е изпълнено от ДСО Хидрострой, започнато през месец август 1968 година, завършено през юни 1975 година.



Фиг. 1. Надлъжен профил на язовирна стена „Въча“

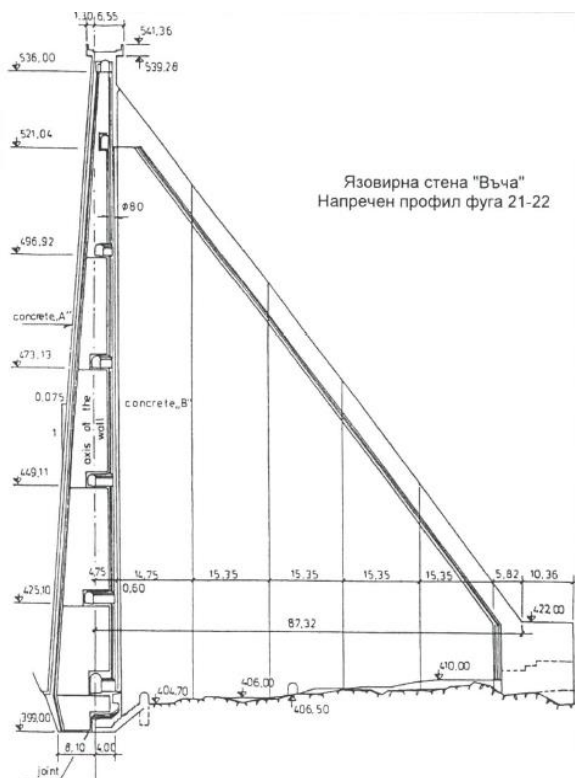
Язовирна стена Въча е бетоново-гравитачна с разширени фуги (виж фиг. 1). Нейната максимална височина е 144,5 m, а дължината по короната 420 m. Напречният профил на стената е показан на фиг. 2.

По отношение на инженерно-геоложките условия, основата на стената е изградена от биотитови и амфибол-биотитови гнайси. По своите физико-механични характеристики основата на язовирната стена се разделя на два участъка – участъкът, обхващащ левия бряг и котловината на стената до блок 23, който притежава сравнително добри физико-механически показатели и е по-слабо засегнат от тектонски нарушения, и участъкът в десния скат от блок 23 нагоре, където геоложките условия са значително по-неблагоприятни, тектонската обработка на скалния масив е по-интензивна, вследствие на което са влошени физико-механичните показатели на скалния масив.

3. Допустими хоризонтални премествания на короната

Мониторинг върху поведението на преместванията на тялото и основата на стената се осъществява по геодезичен път и с прави и обратни отвеси. Тук насочваме вниманието си към движението на короната на стената, регистрирано геодезически. За измерване на вертикалните и хоризонталните премествания на язовирната стена и терена в непосредствена близост до нея е изградена геодезическа измерителна система.

По короната на язовирната стена са разположени 30 визирни марки, а нивелачни репери са стабилизирани в блокове 8, 14, 21, 24, 28, 30 и по въздушния откос на стената.



Фиг. 2. Напречен профил на язовирна стена „Въча“, фуга 21 – 22

Началните измервания са извършени от екип на НИППИЕС Енергопроект през месец юни 1975 г., а редовните наблюдения започват от месец февруари 1976 г. Предписаните тогава като допустими и действително измерените максимални хоризонтални премествания на короната на стената са дадени в приложената табл. 1.

Таблица 1. Язовирна стена Въча. Допустими по НОПТУ¹ и измерени максимални хоризонтални премествания на короната

Местоположение/Вид	Допустими премествания, mm	Измерени максимални премествания, mm
За централни блокове	30	12
За блокове 24, 25, 26	40	6,7
За блокове в крилата	10	5,1

4. Проектни статични характеристики (ANN surrogate model)

Във фазата на проектиране, построяването на статични характеристики по параметър за диагностика хоризонтални премествания на короната на стената, е решено с използване на изкуствена невронна мрежа като сурогатен (заместителен) модел на анализ на напрегнато и деформирано състояние (НДС) по метода на крайните елементи (МКЕ).

При моделиране на НДС на блок 24 на стената във фаза проектиране са приети предпоставките от проекта на НИППИЕС Енергопроект както следва:

- язовирната стена е съоръжение от първи клас;
- обемното тегло на бетона е $23,5 \text{ kN/m}^3$;
- хидростатичният воден натиск, изчисляван при дълбочина на водата, е $136,80 \text{ m}$;
- натиск от наноси по триъгълна диаграма от кота 460 надолу при прието обемно тегло на наносите 14 kN/m^3 ;
- филтрационен противонатиск, изчисляван по триъгълна диаграма, с пълна стойност на напора при водния откос и стойност нула в началото на размерните fugи;
- товари за степен на земетръс осма;
- коефициент на триене по контакта бетон скала $f = 0,65$;
- сцепление между бетон и скалната основа 200 kN/m^2 ;
- физически модел на Теория на еластичността.

Числен модел за конструктивен анализ по МКЕ е създаден с програмата SAP2000. За идентифициране на проектни статични характеристики на поведението на блок 24 от стената са изпълнени 120 симулации на числения модел при различни експлоатационни сценарии на натоварване с вариране на T – средномесечната температура на въздуха и на H – котата на водното ниво в язовирното езеро.

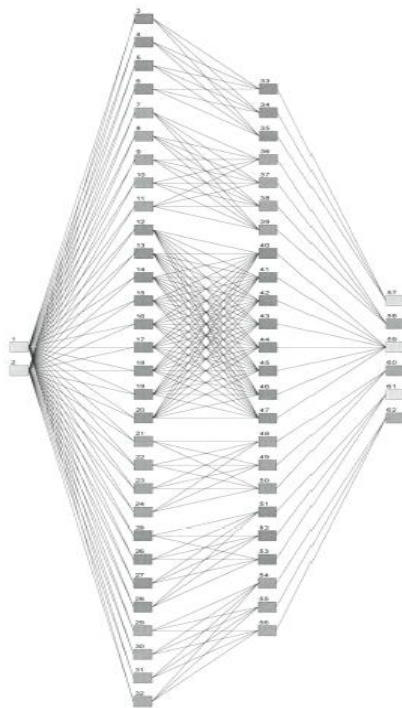
¹ Научна организация за производството на труда и управлението (НОПТУ).

В случая използваме изкуствена невронна мрежа с отлични свойства на нелинеен апроксиматор, за да послужи като заместващ модел на МКЕ анализа на НДС по отношение на параметър на диагностика: хоризонтално преместване на короната на стената $u = f(T, H)$. Многослойният перцептрон с архитектура 2-15-8-1 използва двуполусна сигмоидна активираща функция за невроните в скритите и изходния слой и има обучаваща извадка от 108 опита и контролна от 12 опита [7].

Резултатите показват, че изчисленото от перцептрона преместване на короната на бл. 24 е много близо до стойността, получена от МКЕ анализа. Средната квадратична грешка в обучаващата извадка е 0,0035 или от 0,35 %, а в контролната тестова извадка достига 0,0096 или до 1 %. Този резултат показва, че обучената невронна мрежа успешно замества конструктивния анализ и предсказва с достатъчна точност очакваните хоризонтални премествания при зададени стойности на входните фактори средномесечна температура на въздуха и водно ниво в язовира.

5. Експериментални статични характеристики

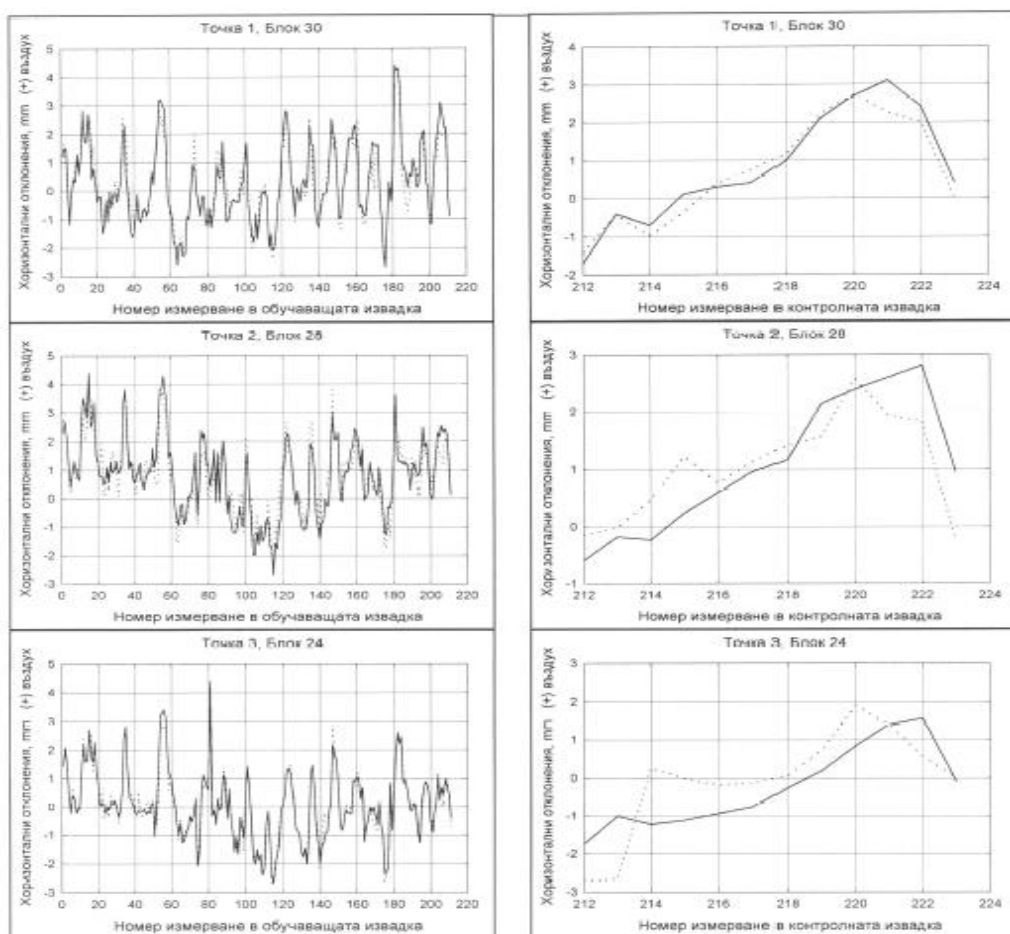
Дали обаче такива премествания ще регистрират геодезистите при реално измерване? Отговорът би трябвало да бъде положителен, но в действителност по-скоро не е, защото тази проектна статична характеристика $u = f(T, H)$ е създадена „преди стената да бъде построена“, т.е. преди да има натурни наблюдения върху поведението ѝ. Едва след първото завиряване на язовира съществуват условия за идентификация на реалната статическа схема и калибриране на модела за определяне на НДС, както това е направено за блок 24 от язовирна стена „Въча“ в [8].



Фиг. 3. Архитектура 2-30-26-6 на невронната мрежа

Статичната характеристика на параметри за диагностика, определени по геодезичен път, а именно хоризонтални премествания на 6 точки от короната на язовирна стена Вьча, е получена въз основа на моделиране отново с прави невронни мрежи. Архитектурата 2-30-26-6 на перцептрона, обучаван с експериментални данни за поведението на хоризонталните отклонения на точките от короната, е показана на фиг. 3. Той се състои от 2 неврона във входния слой, съответстващи на входните параметри кота водно ниво в язовира и средномесечна температура на въздуха, два скрити слоя и изходен, съставен от 6 неврона, отговарящи за реакциите – хоризонтални премествания на шестте наблюдавани точки от короната на стената, разположени върху блокове № 8, 14, 21, 24, 28, 30. Видът на активиращата функция за невроните в скритите и изходния слой е определен отново като двуполусна сигмоидна функция. Използваният алгоритъм за обучение е този на Левенберг – Маккуарт. Обучаващата извадка съдържа 211 опита, а контролната 12 опита от натурни геодезически измервания.

Резултатите от симулацията на получения невронен модел в обучаваща и контролна извадка са показани на фиг. 4.



Фиг. 4. Експериментална статична характеристика в обучаваща и контролна извадка: сравнение на измерените хоризонтални премествания (с плътна линия) с получените по модела

Прогнозираната от модела реакция на съоръжението показва добро приближение до експерименталните данни, като средната квадратична грешка по отделните изходи е от 0,006 до 0,0605 или от 0,6 % до 6 %. Експерименталната статична характеристика по хоризонтални отклонения на короната „вода – въздух“, получена от нелинейния мрежов модел без отчитане на фактора време, потвърждава близкия до цикличен и стационарен характер на поведение на контролните блокове на язовирна стена Вьча.

Заклучения и бъдещо развитие

В заключение можем да обобщим, че използването на методи от ИИ за решаване на задачи в строителната наука и практика, като част от дигиталната трансформация на строителството, изисква както познаване на технологиите в сферата на ИИ, така също и развиване на нашето инженерно мислене и въвеждане в употреба на съвременни комуникационни технологии като например Интернет на нещата (IoT) с дистанционни системи за измерване.

В представените анализи за целите на оценка на сигурността проследихме еволюцията на статичните характеристики на параметри за диагностика на състоянието на язовирна стена, където:

- проектните статични характеристики могат да се ползват за контрол в периода на първо завиряване на езерото;
- след първото завиряване следва да се идентифицира реалната статическа схема и физическия модел на поведение на тялото на съоръжението, с отчитане на особености и подобрения в геоложката основа. След калибриране на модела за определяне на НДС и определяне на запасите на сигурност, следва да се идентифицират нови статични характеристики за оценка на поведението на язовирната стена;
- натрупването на данни от натурни измервания върху реалния обект дава възможност за създаване на експериментални статични характеристики за напреднала експлоатация;
- при въвеждане на дистанционни системи за измерване и отстраняване на ограниченията на стъпката по време могат да бъдат поставени нови задачи – за идентификация на поведението на язовирната стена по динамични характеристики на параметри на диагностика.

В примерите видяхме тенденцията на развитие на инженерните задачи като функция на данните, с които разполагаме: от оценка на максимално допустимата стойност, през статични характеристики на параметри на диагностика до (бъдещи) модели на динамиката (в нестационарните режими на обекта на диагностика). Въпреки че човешките инспекции и измервания ще останат от съществено значение за откриване на потенциални опасности, идентификация на динамиката може да бъде осъществена с наблюдения в реално време, например с мрежа от сензори, както е показано в [9 – 11]. Мониторингът в реално време може да подобри оценката на работата на язовирните стени, като намали трудоемкото събиране на данни и разшири възможностите за анализ на диагностични параметри на филтрационния поток и деформираното състояние на съоръжението и неговата основа.

Благодарности

Настоящата публикация е направена по договор № БН-272/23, финансиран от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Emmert-Streib, F., Yang, Z., Feng, H., Tripathi, S., Dehmer, M.* An Introductory Review of Deep Learning for Prediction Models with Big Data. // *Frontiers in Artificial Intelligence*, 2020, 3, DOI: [10.3389/frai.2020.00004](https://doi.org/10.3389/frai.2020.00004).
2. *Filkov, P., Bogdanova, S., Naydenov, N.* Strukturirane na GIS bazi dannii za napoitelni sistemi. // *Godishnik na UASG*, 2018, 51 (11): 41 – 54.
3. *Fanelli, A., Fanelli, M. A.* Optimal Proportioning of Arch Gravity Dams: The Automatic Generation of a Simplified Starting Geometry. // *Dam Engineering*, 1992, III(4).
4. *Hamidian, D., Seyedpoor, S. M.* Shape optimal design of arch dams using an adaptive neuro-fuzzy inference system and improved particle swarm optimization. // *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34 (6): 1574 – 1585, DOI: [10.1016/j.apm.2009.09.001](https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.09.001).
5. *Abdollahi, A., Amini, A., Hariri-Ardebili, M. A.* An uncertainty-aware dynamic shape optimization framework: Gravity dam design. // *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 108402. DOI: [10.1016/j.res.2022.108402](https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108402).
6. *Vuchkov, I.* Eksperimentalni izsledvania i identifikatsia. Tehnika, 1990.
7. *Haykin, S. S.* Neural networks and learning machines. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2009.
8. *Mavrova-Guirguinova, M. I.* Model selection of dam behavior during the first filling. Proceedings of First International Conference on Concrete and Development C and D 1, 2001, 203 – 212.
9. *Clarkson, L., Williams, D., Seppälä, J.* Real-time monitoring of tailings dams. // *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. Taylor & Francis, 2021, 15 (2): 113 – 127, DOI: [10.1080/17499518.2020.1740280](https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1740280).
10. *Ren, Q., Li, M., Kong, T., Ma, J.* Multi-sensor real-time monitoring of dam behavior using self-adaptive online sequential learning. // *Automation in Construction*, 2022, 140, p. 104365. DOI: [10.1016/j.autcon.2022.104365](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104365).
11. *Chelidze, T., Matcharashvili, T., Abashidze, V., Kalabegishvili, M., Zhukova, N.* Real time monitoring for analysis of dam stability: Potential of nonlinear elasticity and nonlinear dynamics approaches. // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2013, 7 (2): 188 – 205, DOI: [10.1007/s11709-013-0199-5](https://doi.org/10.1007/s11709-013-0199-5).

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN TECHNICAL DIAGNOSTICS OF DAMS

M. Mavrova-Guirguinova¹

Keywords: dam, artificial neural networks, identification

ABSTRACT

The integration of artificial intelligence (AI) into civil engineering, particularly in the domain of dam management, is becoming increasingly prominent due to the complexity of analytical mathematical modeling and the limitations of physical models. AI, particularly artificial neural networks, aids in tasks such as predicting horizontal displacements of dam crowns and diagnosing their behavior during operation. This technology offers solutions for design optimization, uncertainty management, and safety analysis in operation, enabling engineers to make informed decisions throughout the lifecycle of hydraulic engineering facilities. While human expertise remains essential, AI will offer new avenues for dynamic modeling based on AI-driven sensor networks, revolutionizing the field of civil engineering.

¹ Maria Mavrova-Guirguinova, Assoc. Prof. Dr. Eng, Dept. “Hydraulic, Irrigation and Drainage Engineering”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: margir_fhe@uacg.bg