

Здружение Македонски комитет за големи брани
Macedonian Committee on Large Dams

Зборник на трудови Proceedings

Conference on topic

**Dam engineering
during energy
transition and
aging hydrotechnics
infrastructure**

Конференција на тема

**Инженерството
за брани во услови
на енергетска
транзиција и остарена
хидротехничка
инфраструктура**

Конференција на тема: Инженерството за брани во услови на енергетска транзиција и остарена хидротехничка инфраструктура, Скопје, 18-19.10.2024
Conference on topic: Dam engineering during energy transition and aging hydrotechnics infrastructure, Skopje, 18-19.10.2024

Конференција на тема:
Инженерството за брани во услови на
енергетска транзиција и остарена
хидротехничка инфраструктура
Скопје, 18-19.10.2024

Conference on topic:
Dam engineering during energy
transition and aging hydrotechnics
infrastructure
Skopje, 18-19.10.2024

18-19.10.2024 го динa
18-19.10.2024

Скопје, Р.С. Македонија
Skopje, R.N. Macedonia



Здружение Македонски комитет за големи брани
Macedonian Committee on Large Dams

Зборник на трудови
Proceedings

КОНФЕРЕНЦИЈА НА ТЕМА:

**ИНЖЕНЕРСТВОТО ЗА БРАНИ ВО УСЛОВИ НА
ЕНЕРГЕТСКА ТРАНЗИЦИЈА И ОСТАРЕНА
ХИДРОТЕХНИЧКА ИНФРАСТРУКТУРА**

CONFERENCE ON TOPIC:

**DAM ENGINEERING DURING ENERGY
TRANSITION AND AGING HYDROTECHNICS
INFRASTRUCTURE**

18.10÷19.10. 2024 год.
18.10÷19.10. 2024

Скопје, Р.С. Македонија
Skopje, R.N. Macedonia

ОРГАНИЗАТОР

Здружение Македонски комитет за големи брани

ORGANIZED BY

Macedonian Committee on Large Dams

ИЗДАВАЧ

Здружение Македонски комитет за големи брани

PUBLISHED BY

Macedonian Committee on Large Dams

ЗА ИЗДАВАЧОТ

Проф. д-р Љупчо Петковски

Претседател на Здружение Македонски комитет
за големи брани**FOR THE PUBLISHER**

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD

President of Macedonian Committee on
Large Dams**ТЕХНИЧКА ОБРАБОТКА**

Фросина П. Георгиевска, Стевчо Митовски

TECHNICAL PREPARATION BY

Frosina P. Georgievska, Stevcho Mitovski

УРЕДНИК

Проф. Д-р Љупчо Петковски

ЛЕКТУРА

Тања Стевановска Цветковска

EDITOR

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD

PROOFREADER

Tanja Stevanovska Cvetkovska

ПЕЧАТЕЊЕ

Промедиа - Скопје

ТИРАЖ

70 примероци

МЕСТО И ГОДИНА НА ОБЈАВУВАЊЕ

Скопје, 2024

ФОТОГРАФИЈА НА НАСЛОВНА СТРАНА

Брана „Маврово“

PRINTED BY

Promedia - Skopje

PRINTING RUN

70 copies

LOCATION AND DATE OF PUBLISHING

Skopje, 2024

COVER PHOTO

‘Mavrovo’ dam

© Сите права се заштитени. Публикацијата не смее да биде преведувана или копирана во целина или во делови без писмена дозвола на издавачот.

© All rights reserved. The publication can not be translated or copied at full or any part of it without written permission from the publisher.

CIP - Каталогизација во публикација Национална и универзитетска
библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

627.8.04/.09(497.7)(062)

621.311.21(497.7)(062)

ЗБОРНИК на трудови / Конференција на тема: инженерството за брани во услови на енергетска
транзиција и остарена хидротехничка инфраструктура, 18.10-19.10.2024 год., Скопје, Р. С. Македонија ;
[уредник Љупчо Петковски] = Proceedings / Conference on topic: dam engineering during energy transition
and aging hydrotechnics infrastructure, 18.10-19.10.2024, Skopje, R. N. Macedonia ; [editor Ljupcho
Petkovski]. - Скопје : Здружение Македонски комитет за големи брани = Skopje : Macedonian committee on
large dams, 2024 (Скопје : Промедиа ; Skopje :
Promedia). - [200] стр. : илустр. ; 21 см

Фусноти кон текстот. - Текст на мак. и англ. јазик. - Библиографија кон трудовите

ISBN 978-608-4953-03-6

а) Брани -- Хидротехнички аспекти -- Хидроенергетски аспекти -- Македонија -- Собири

COBISS.MK-ID 64549381

ОРГАНИЗАЦИОНЕН ОДБОР / ORGANIZING BOARD

Проф. д-р Љупчо Петковски

Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј” во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R. N. Macedonia

М-р Славко Милевски

АД Електрани на Република Северна Македонија, ХЕС Црн Дрим

Slavko Milevski, MSc

AD Power Plants of Republic of North Macedonia, HES Crn Drim

Вонр. проф. д-р Стевчо Митовски

Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј” во Скопје, Р.С. Македонија

Assoc. prof. Stevcho Mitovski, PhD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Проф. д-р Драги Дојчиновски

Институт за земјотресно инженерство и инженерска сеизмологија, Универзитет “Св. Кирил и Методиј” во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Dragi Dojchinovski, PhD

Institute for Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R. N. Macedonia

Игор Николоски

Градежен Институт Македонија АД Скопје, Р.С. Македонија

Igor Nikoloski

Civil Engineering Institute Macedonia AD Skopje, R.N. Macedonia

Д-р Драган Димитриевски

ГЕИНГ Кребс унд Кифер Инт., Скопје, Р.С. Македонија

Dragan Dimitrievski, PhD

GEING Krebs und Kiefer Int., Skopje, R.N. Macedonia

Ѓорѓи Чакаровски

Чакар&Партнерс, Скопје, Р.С. Македонија

Gjorgji Chakarovski

Chakar&Partners, Skopje, R.N. Macedonia

Лидија Зафировска

Рудник „Булмак“, Пробиштип

Lidija Zafirovska

Mine ‘Bulmak’, Probishtip

Шпресим Ибраими

Институт за земјотресно инженерство и климатски промени, Скопје

Shpresim Ibraimi

Institute for earthquake engineering and climate changes, Skopje

Илија Кондински

ЈП Стрежево – Битола, Р.С. Македонија

Ilija Kondinski

JSC Strezhevo – Bitola, R.N. Macedonia

Вонр. проф. д-р Игор Пешевски

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Assoc. prof. Igor Peshevski, PhD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Здравко Јаковлевски

МГМ Инженеринг, Скопје, Р.С. Македонија

Zdravko Jakovlevski

MGM Inzenering, Skopje, R.N. Macedonia

Даниел Цеков

АДИНГ АД Скопје, Р.С. Македонија

Daniel Cekov

ADING AD Skopje, R.N. Macedonia

Орце Мангаровски

ДГ БЕТОН АД Скопје, Р.С. Македонија

Orce Mangarovski

DG BETON AD Skopje, R.N. Macedonia

Љубе Димов

АД Водостопанство на Р.С. Македонија

Ljube Dimov

AD Water economy in R.N. Macedonia

Илбер Мирта

Министерство за животна средина и просторно планирање на Р.С. Македонија

Iber Mirta

Ministry of Environment and Physical Planning of R.N. Macedonia

Борче Гоцевски

Рудник САСА, Македонска Каменица, Р.С. Македонија

Borche Gocovski

SASA Mine, Makedonska Kamenica, R.N. Macedonia

Никола Горгиев

Рудник БУЧИМ Радовиш, Р.С. Македонија

Nikola Gorgiev

BUCHIM Mine Radovish, R.N. Macedonia

Љупчо Георгиевски

Рудник БУЛМАК Радовиш, Р.С. Македонија

Nikola Gorgiev

BULMAK Mine Radovish, R.N. Macedonia

Блашко Димитров

Комора на овластени архитекти и инженери, Скопје, Р.С. Македонија

Blashko Dimitrov

Chamber of certified engineers and architects, Skopje, R.N. Macedonia

Љупчо Благоевски

ЈП Злетовица, Пробиштип, Р.С. Македонија

Ljupcho Blagoevski

PE Zletovica, Probishtip, R.N. Macedonia

Методија Граматковски

ЈП Стрежево – Битола, Р.С. Македонија

Metodija Gramatkovski

PE Strezhevo – Bitola, R.N. Macedonia

Панче Иванов

ЈП Лисиче, Р.С. Македонија

Panche Ivanov

PE Lisiche, R.N. Macedonia

Ванчо Ангелов

Геохидро консалтинг – Скопје, Р.С. Македонија

Vancho Angelov

Geohidro konsalting – Skopje, R.N. Macedonia

Добре Тасевски

СИНТЕК Специфик, Р.С. Македонија

Dobre Tasevski

SINTEK Specifik, R.N. Macedonia

Теодор Цоневски

ГТИ, Скопје, Р.С. Македонија

Teodor Conevski

GTI, Skopje, R.N. Macedonia

Снежана Мартулкова

Министерство за животна средина и просторно планирање на Р.С. Македонија

Snezhana Martulkova

Ministry of Environment and Physical Planning of R.N. Macedonia

Александар Сапунџиовски

Министерство за земјоделство, шумарство и водостопанство на Р.С. Македонија

Aleksandar Sapundziovski

Ministry of Agriculture, Forestry and Water Economy of R.N. Macedonia

Јосиф Каевски

ХЕИ Скопје, Р.С. Македонија

Josif Kjaevski

HEI Skopje, R.N. Macedonia

Д-р Станислава Додева

Швајцарска амбасада во Скопје, Р.С. Македонија

Stanislava Dodeva, PhD

Swiss Cooperation Office, R.N. Macedonia

Вонр. проф. д-р Маријана Лазаревска

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Assoc. prof. Marijana Lazarevska, PhD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Проф. д-р Грозде Алексовски

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Grozde Aleksovski, PhD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Вонр. проф. д-р Јован Б. Папиќ

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Assoc. prof. Jovan B. Papic, PhD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Вонр. проф. д-р Гоце Тасески

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Assoc. prof. Goce Taseski, PhD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Фросина Пановска Георгиевска

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Frosina Panovska Georgievska

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

ПОЧЕСЕН ОДБОР / HONORARY BOARD

Цветан Трипуновски, Министер

Министерство за земјоделство, шумарство и водостопанство на Р.С. Македонија

Cvetan Tripunovski, Minister

Ministry of Agriculture, Forestry and Water Economy of R.N. Macedonia

Александар Николоски, Министер

Министерство за транспорт и врски на Р.С. Македонија

Aleksandar Nikoloski, Minister

Ministry of transport and connections of R.N. Macedonia

Izet Mexhiti, Министер

Министерство за животна средина и просторно планирање на Р.С. Македонија

Izet Mexhiti, Minister

Ministry of Environment and Physical Planning of R.N. Macedonia

Филип Филиповски, Главен извршен директор

АД Водостопанство на Р. С. Македонија

Filip Filipovski, CEO

AD Water economy in R.N. Macedonia

Лазо Узунчев, Генерален директор

АД ЕСМ, Р.С. Македонија

Lazo Uzunchev, CEO

AD ESM, R.N. Macedonia

Проф. д-р Дејан Мираковски, Ректор

Универзитет Гоце Делчев, Штип, Р.С. Македонија

Prof. Dejan Mirakovski, PhD, Rector

Goce Delechev University, Shtip R.N. Macedonia

Проф. д-р Горан Марковски, Декан

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Goran Markovski, PhD, Dean

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Проф. д-р Влатко Шешов, Директор

Институт за земјотресно инженерство и инженерска сеизмологија, Универзитет “Св. Кирил и Методиј” во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Vlatko Sheshov, PhD, Director

Institute for Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R. N. Macedonia

Крис Колбурн, Генерален директор

Рудник САСА, Македонска Каменица, Р.С. Македонија

Chris Colburn, CEO

SASA Mine, Makedonska Kamenica, R.N. Macedonia

Илија Горанов, Генерален директор

Рудник БУЛМАК Радовиш, Р.С. Македонија

Ilija Goranov, CEO

BULMAK Mine Radovish, R.N. Macedonia

Проф. д-р Љубомир Танчев

Почесен претседател на ЗМКГБ

Prof. Ljubomir Tanchev, PhD

Honorary president of MACOLD

Илија Андонов – Ченто Заслужен член на ЗМКТБ Pija Andonov – Chento Honorary member of MACOL
--

Нестор Ангеловски
Заслужен член на ЗМКТБ
Nestor Angelovski
Honorary member of MACOLD

Проф. Наум Гапковски
Заслужен член на ЗМКТБ
Prof. Naum Gapkovski
Honorary member of MACOLD

Проф. Станислав Миловановиќ
Заслужен член на ЗМКТБ
Prof. Stanislav Milovanovic
Honorary member of MACOLD

Проф. Коста Талаганов
Заслужен член на ЗМКТБ
Prof. Kosta Talaganov
Honorary member of MACOLD

Славчо Михајловски
Заслужен член на ЗМКТБ
Slavcho Mihajlovski
Honorary member of MACOLD

РЕДАКЦИСКИ ОДБОР / EDITORIAL BOARD

Проф. д-р Љупчо Петковски, Претседател на ЗМКГБ

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD, President of MACOLD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Проф. д-р Емилија Беднарова, Претседател на Словачкиот комитет за големи брани

Технички Универзитет во Братислава, Словачка

Prof. Emilia Bednarova, PhD, President on Slovak Committee on Large Dams

Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Проф. д-р Хасан Тосун

Факултет за инженерство и архитектура, Универзитет во Османгази, Ескисехир, Турција

Prof. Hasan Tosun, PhD

Faculty of Engineering and Architecture, Osmangazi University, Eskisehir, Turkey

Проф. д-р Алтан Абдуламит, Претседател на Романскиот комитет за големи брани

Технички Универзитет во Букурешт, Романија

Prof. Altan Abdulamit, PhD, President on Romanian Committee on Large Dams

Technical University in Bucharest, Romania

Проф. д-р Џорџ Дуњас, Претседател за Здружението за големи брани во Грција

Империјал Колеџ Лондон, Англија; Здружение за големи брани во Грција

Prof. George Dounias, PhD, President on Greek Committee of Large Dams

Imperial College of Science and Technology, London, UK; Greek Committee of Large Dams

Доц. д-р Андреј Крижановски

Факултет за градежништво и геодезија, Универзитет во Љубљана, Словенија

Assoc. prof. Andrej Kryžanowski, PhD

Faculty of engineering and geodesy, University in Ljubljana, Slovenia

Проф. д-р Тина Дашиќ

Градежен факултет, Универзитет во Белград, Србија

Prof. Tina Dasic, PhD

Civil Engineering Faculty, University of Belgrade, Serbia

Проф. д-р Димитар Кислиаков, Претседател на Бугарскиот комитет за големи брани

Универзитет по архитектура, градежништво и геодезија, Бугарија

Prof. Dimitar Kisliakov, PhD, President on Bulgarian Committee of Large Dams

University of Architecture, Civil engineering and Geodesy, Bulgaria

Проф. д-р Зекирија Идризи

Универзитет Мајка Тереза, Р.С. Македонија

Prof. Zekirija Idrizi, PhD

Mother Teresa University, R.N. Macedonia

Проф. д-р Благоја Голомеов

Факултет за технички и природни науки, Универзитет Гоце Делчев, Штип, Р.С. Македонија

Prof. Blagoja Golomeov, PhD

Faculty of technical and natural sciences, University Goce Delchev, Shtip, R.N. Macedonia

Проф. д-р Илиос Вилос

Технички факултет, Универзитет Св. Климент Охридски во Битола, Р.С. Македонија

Prof. Ilios Vilos, PhD

Technical faculty, University Ss Clement of Ohrid, R.N. Macedonia



ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ВЛИЈАНИЕТО НА ОПЕРАТИВНИТЕ ПАРАМЕТРИ ПРИ УПРАВУВАЊЕ СО ХЕЦ СО ПРИМЕНА НА МОДЕЛ БАЗИРАН НА МАШИНСКО УЧЕЊЕ

Фросина Пановска Георгиевска¹, Стевчо Митовски², Љупчо Петковски³

Резиме

Низ историјата на човештвото, паралелно со напредокот на цивилизациите, несомнено напредувале и методите за анализа на конструкциите во градежништвото. Од камено доба, до изградбата на Пирамидите во Египет, изградбата на Вавилонската кула, канализацијата и водоводот во Рим, Кинескиот ѕид, Акрополот во Атина, до изградбата на браната „Три клисури“ во Кина со неверојатна височина од 181 m и должина во круната од 2.335 m, дојдовме до момент во историјата на градежништвото кога градбите достигнаа неверојатни големини, со нови материјали од карбонски влакна, челик и бетон, задржувајќи ја својата стабилност, пркосејќи им на временските услови и на гравитацијата. Алатка од поново време којашто наоѓа примена несомнено во секој сектор од градежништвото е користењето на алатките од машинско учење – гранка на вештачката интелигенција. Машинското учење нуди можности во градежништвото за оптимизација на објектите, анализа на безбедноста на објектите, анализа на чинењето и оптимизација на трошоците за објектите, како и помош во секојдневното управување со нив во реално време. Во овој реферат е опишана примената на алатките од машинско учење со анализи во апликацијата SOLDIER во анализа на производството на електрична енергија на ХЕЦ „Козјак“.

Клучни зборови: ХЕЦ, Козјак, брана, акумулација, енергија, машинско учење, SOLDIER

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS IN HPP MANAGEMENT USING A MODEL BASED ON MACHINE LEARNING

Frosina Panovska Georgievska¹, Stevcho Mitovski², Ljupcho Petkovski³

Summary

Throughout the history of mankind, in parallel with the progress of civilizations, the techniques and methods for analyzing constructions in construction have undoubtedly progressed. From the Stone Age, to the construction of the pyramids in Egypt, the construction of the Tower of Babel, the sewers and waterworks in Rome, the Great Wall of China, the Acropolis in Athens, to the construction of the Three Gorges Dam in China with an incredible height of 181m and a crown length of 2335m, we have come at a moment in construction history where buildings have reached incredible sizes, with new materials of carbon fiber, steel and concrete, maintaining their stability, defying the weather and gravity. As a tool of the latest date that finds application in undoubtedly every sector of construction, it represents the use of tools from machine learning - a branch of artificial intelligence. It is a tool that offers opportunities in construction for building optimization, building safety analysis, cost analysis and cost optimization for buildings, as well as help in their daily management in real time. This report describes the application of machine learning tools with analysis in the SOLDIER application in the analysis of electricity production at the Kozjak HPP.

Key words: HEP, Kozjak, dam, reservoir, energy, machine learning, SOLDIER

¹Асистент, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Градежен факултет, fpanovska@gf.ukim.edu.mk

²Вонреден професор, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Градежен факултет, smitovski@gf.ukim.edu.mk

³Редовен професор, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Градежен факултет, petkovski@gf.ukim.edu.mk

1. ВОВЕД

Низ историјата на човештвото, паралелно со напредокот на цивилизациите, несомнено напредувале и техниките и методите за анализа на конструкциите во градежништвото. Од камено доба, до изградбата на Пирамидите во Египет, изградбата на Вавилонската кула, канализацијата и водоводот во Рим, Кинескиот сид, Акрополот во Атина, до изградбата на браната „Три клисури“ во Кина со неверојатна височина од 181 m и должина во круната од 2.335 m, дојдовме до момент во историјата на градежништвото кога градбите достигнаа неверојатни големини, со нови материјали од карбонски влакна, челик и бетон, задржувајќи ја својата стабилност, пркосејќи им на временските услови и на гравитацијата.

Алатка од поново време којашто наоѓа примена несомнено во секој сектор од градежништвото е користењето на алатките од машинско учење – гранка на вештачката интелигенција. Станува збор за алатка која нуди можности во градежништвото за оптимизација на објектите, анализа на безбедноста на објектите, анализа на чинењето и оптимизација на трошоците за објектите, како и помош во секојдневното управување со нив во реално време. Во согласност со речникот од „Кембриџ“ [1], алатките од машинско учење се дефинирани како „процес на извршување задачи од страна на компјутерите, детерминиран со учење од постојна низа податоци, без да има потреба од внесување на наредби од страна на човекот“. Од инженерска гледна точка, машинското учење претставува еден процес на формирање на математичка зависност помеѓу одредени варијабли кои ни се од интерес во анализите.

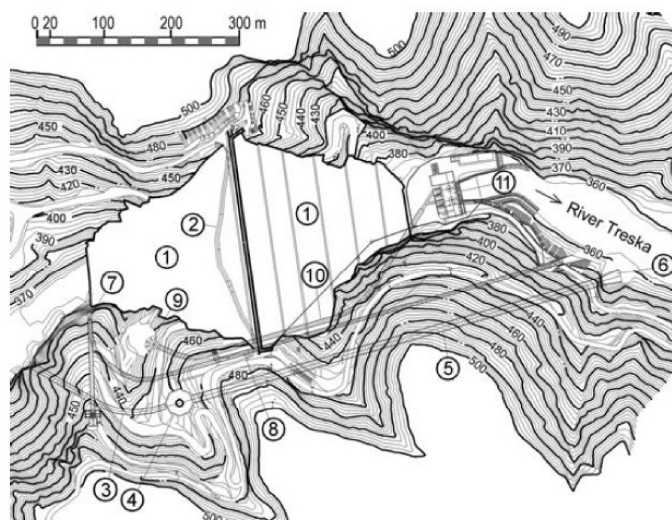
Несомнено, овие алатки од машинско учење може да се применат и во инженерството со брани и акумулации, како и со управување со водостопанските системи. Како комплексни системи со детерминиран излез и стохастички влез, алатките од машинско учење може да помогнат во сите фази – од планирање, изградба и користење со управување на водостопанските системи.

Во овој реферат е опишана примената на алатките од машинско учење со анализи во апликацијата SOLDIER во донесување одлуки во управување со сложен водостопански систем. Анализа на случај е подготвена за производството на електрична енергија од ХЕЦ „Треска“ во РС Македонија. Покрај апликацијата SOLDIER, за генерирање на влезни и излезни податоци во управувањето со системите – податоци со кои се тренира моделот во SOLDIER - применет е софтверот HEC ResSim.

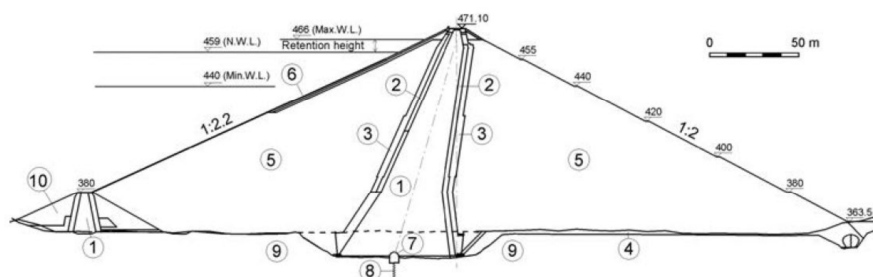
2. ОПИС НА ХИДРОСИСТЕМОТ КОЗЈАК

Акумулацијата „Козјак“ претставува една од најголемите вештачки акумулации во земјава со вкупен волумен од $550 \times 10^6 \text{ m}^3$, со корисен волумен од $260 \times 10^6 \text{ m}^3$, простор резервиран за заштита од поплави од $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ и мртов простор од $190 \times 10^6 \text{ m}^3$. Акумулацијата е формирана со изградба на камено-земјена брана со глинено јадро закосено кон возводната страна. Максималната височина на браната од kota на фундаирање до круна изнесува 126 m. Преливникот е димензиониран на максимален дотек од $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, кој претставува вршен дотек на една од двете симултани поплави за кои е предвиден да врши заштита системот Козјак – ретензиониот простор би ја прифатил првата поплава, додека преливникот безбедно би ја евакуирал втората поплава – двете со поединечен вршен дотек од $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Темелниот испуст претставува засебен тунел со три затвораи – два на влез во тунелот (ремонтен и работен) и таблест затвораи на излез од тунелот. Хидроцентралата е опремена со две Францис турбини со вертикална оска, секоја со инсталиран капацитет од $50 \text{ m}^3/\text{s}$ и моќност од 41 MW. Вкупниот инсталиран капацитет на хидроцентралата изнесува $Q_{\text{ins}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ и $P_{\text{ins}} = 82 \text{ MW}$.

Целиот хидросистем во основа е прикажан на слика 1, додека карактеристичен попречен профил на браната е прикажан на слика 2.

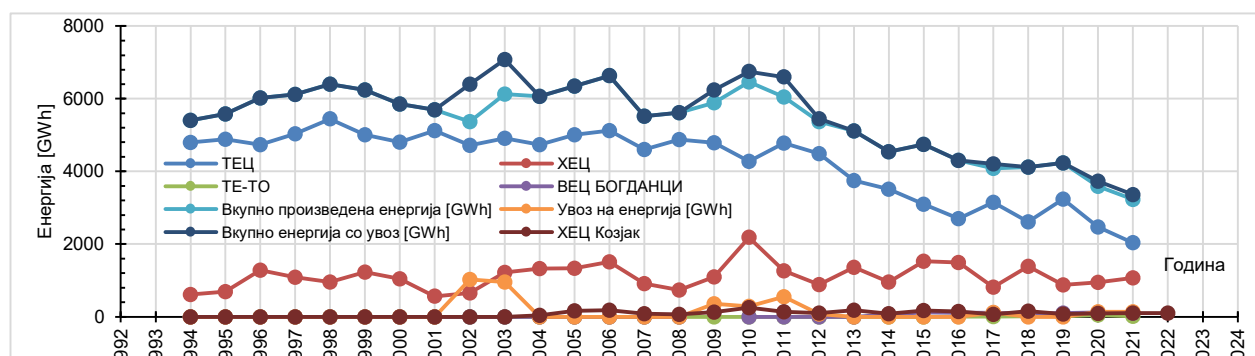


Слика 1. Основа на брана „Козјак“ и придружни објекти, (1) брана, (2) инјекциона галерија, (3) опточен тунел, (4) шахтен преливник, (5) тунел на преливник, (6) ски-отскок на преливник, (7) влезна градба на темелен испуст, (8) тунел на темелен испуст, (9) влезна градба на доведен цевковод до хидроцентрала, (10) доведен цевковод до хидроцентрала, (11) одводна вада [1].



Слика 2. Централен попречен пресек на брана „Козјак“, (1) глинено јадро, (2) прв филтерски слој, (3) втор филтерски слој, (4) речен мил, (5) тело на брана од варовник, (6) заштита на спротиводна косина со крупен камен, (7) инјекциона галерија, (8) инјекциона завеса, (9) подлога под брана од варовник, (1) чакал во возводниот загат [1].

Откако ХЕЦ „Козјак“ стана дел од електродистрибутивната мрежа на РС Македонија во 2004 година, истиот во просек додава 122 GWh/годишно во мрежата. Процентуално, тоа претставува 11 % од вкупното производство на електрична енергија од хидроелектрични центри, т.е. 3 % од целокупното производство на електрична енергија во земјава (слика 2).



Слика 3. Реализирано производство на електрична енергија од страна на Електрани на Македонија во периодот од 1992 до 2002 година [2]

3. ОПИС НА ПРИМЕНЕТИТЕ СОФТВЕРСКИ АЛАТКИ

3.1. АПЛИКАЦИЈА SOLDIER

Апликацијата SOLDIER креирана од страна на Институтот CIMNE во Барселона, Шпанија, претставува алатка за анализа на однесувањето на браните со примена на машинско учење. Апликацијата работи со примена на регресивни низи, т.е. формирање математичка зависност помеѓу повеќе варијабли врз основа на претходно познати податоци [3].

Апликацијата досега е користена за изработка на модели за анализа на однесувањето на повеќе брани во Европа, активно се користи во рамки на проектот DOLMEN, кој е фокусиран на примената на методологии за дефинирање на динамички прагови за предупредување во експлоатација на брани со акумулации за различни намени. Апликацијата ја добила и наградата на Verbund во натпревар за иновативни предизвици во 2017 година [4].

3.2. СОФТВЕР HEC RESSIM

HEC-ResSim е софтвер кој се користи за моделирање на комплексни управувачки задачи за еден или повеќе акумулациони водостопански системи, со цел задоволување на потребите на еден или повеќе водокорисници. Со помош на софтверот може да се моделира однесувањето на акумулациите за одбрана од поплави, планирање на водостопанските системи со цел обезбедување на количини на вода за водоснабдување на населението, определување на капацитетот на акумулации за енергетско искористување на водите, како и комбинации на оперативни политики и приоритизирање на повеќе водокорисници според нивните потреби.

HEC-ResSim се состои од: (1) кориснички интерфејс (GUI-Graphical User Interface), (2) математички програм во позадина кој го симулира управувањето со акумулациите, (3) датотеки за зачувување на податоци од симулациите и (4) алатки за обработка на излезните резултати. HEC-ResSim користи податочен систем за зачувување на податоците HEC-DSS (Data Storage System), преку кој се задаваат податоци за системите со временска рамка (доток во акумулација, ниво на вода, количини на вода за различни потреби итн.) [5].

HEC-ResSim нуди три модули преку кои се дефинира симулациониот модел:

- Модул за дефинирање на елементите присутни во симулациониот модел и нивната меѓусебна поврзаност – подесување на сливно подрачје Watershed Setup (дефинирање на реки, притоки, акумулации, насипи, канали);
- Модул за дефинирање на физичките параметри на елементите – Reservoir Network;
- Модул за симулирање на дефинираниот систем – Simulation Model.

За потребите на истражувачкиот труд, со помош на HEC ResSim се креирани голем број влезни и излезни податоци кои се употребуваат како податоци со кои се „храни“ моделот во SOLDIER кој ќе креира зависност помеѓу различните варијабли – дотекување во акумулација, ниво на вода во акумулација, потреби за вода, истекување од акумулација.

3. ВЛЕЗНИ ПОДАТОЦИ ВО МОДЕЛИТЕ СО МАШИНСКО УЧЕЊЕ

Главна цел на ова истражување е определување на зависноста помеѓу производството на електрична енергија и останатите параметри на водостопанското управување. Како главни варијабли влегуваат:

- Хидролошки серии на дотекувања во акумулацијата, дефинирани како хидрограм на дотек за период од 2020 до 2050 година (слика 4)
- Протекувања низ хидроцентралата за период од 2020 до 2050 година (слика 4)
- Производство на електрична енергија за период од 2020 до 2050 година (слика 6)
- Реализирана моќност за период од 2020 до 2050 година (слика 6)
- Варијации на водното ниво во акумулацијата за период од 2020 до 2050 година (слика 5).

Наведените хидрограми се добиени со симулациони анализи во софтверот HEC ResSim, со временски чекор во моделите од еден ден. Временскиот период на анализа е 30 години – од 2020 до 2050 година.

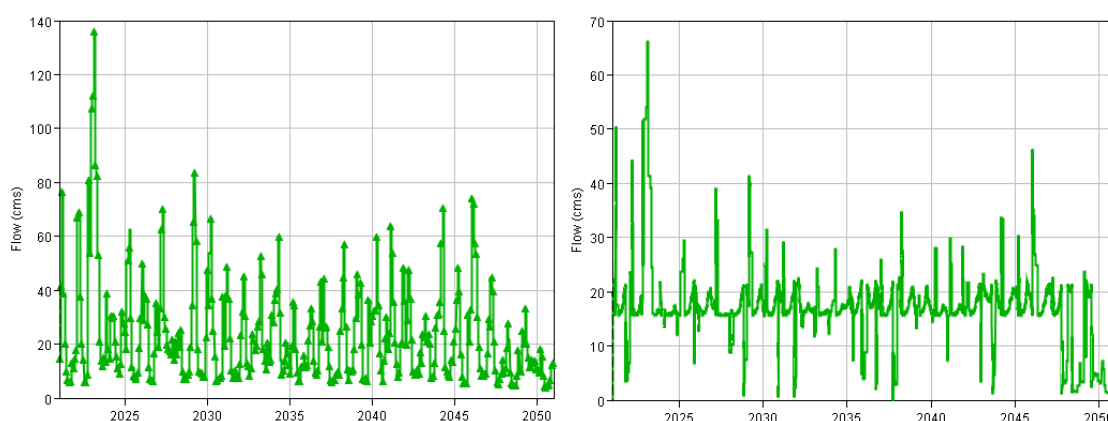
За изработка на симулациониот модел, потребно е да се дефинираат: (1) хидрограм на дотекување во секоја акумулација; (2) физички карактеристики на акумулацијата; (3) потреби за вода; и (4) оперативни правила за управување со системот.

Хидролошките серии на дотекувања се еднакви на мерени податоци во периодот од 1961 до 1990 година во м.с. Св. Богородица, соодветно приспособени во согласност со сливното подрачје до профилот на брана „Козјак“ и осреднетата надморска височина [7]. Хидрограмот на дотек во акумулацијата е прикажан на слика 4, со средногодишен дотек во акумулацијата од $Q_{sr} = 21,26 \text{ m}^3/\text{s}$.

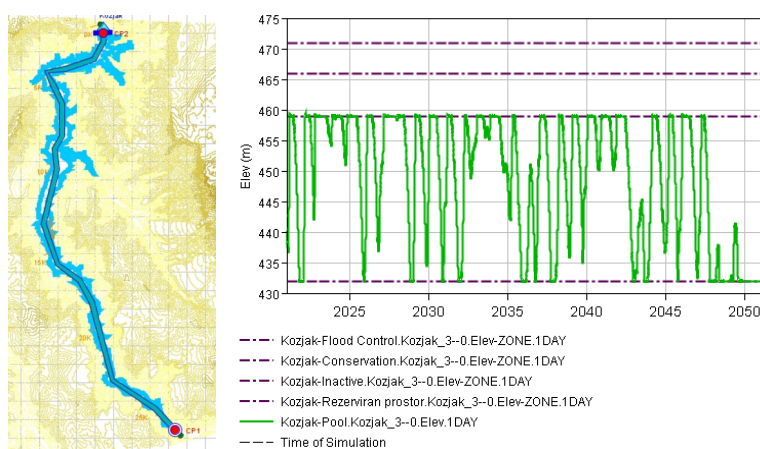
Под физички карактеристики на акумулацијата се подразбира дефинирање на волуменскиот простор во акумулацијата преку кривите на површини и волумени. Понатаму, потребно е да се дефинираат и зоните во акумулацијата: мртвиот простор, кориниот волумен, ретензиониот волумен. Овие параметри се наведени во табела 1.

Табела 1. Карактеристични коти и волумени за профил на брана „Козјак“ [6].

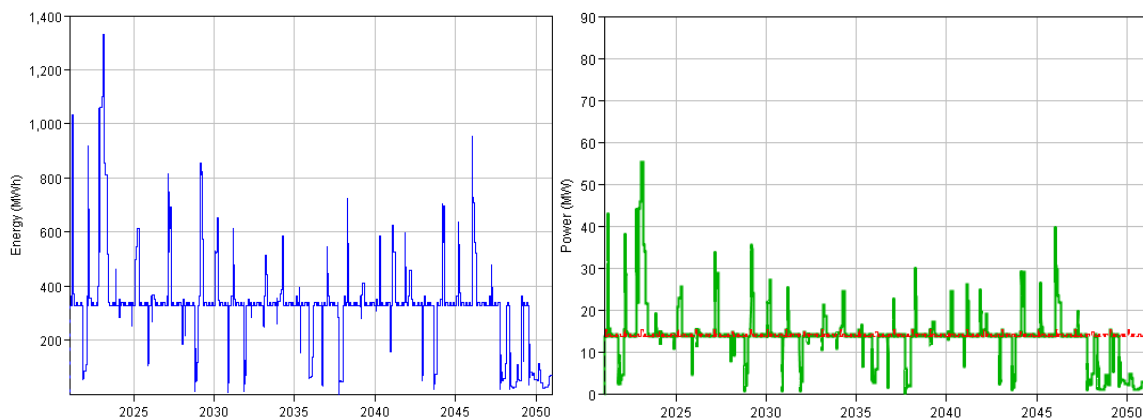
Статус на акумулација	Акумулација	K_{nn}	K_{max}	K_{kr}	V_k	$Q_{sr,d}$
		[mnv]	[mnv]	[mnv]	[10^6 m^3]	[m^3/s]
Постоечка	Козјак	459.00	466.00	471.10	550.00	21.26



Слика 4. Хидрограм на дотек во акумулација „Козјак“ $Q_{sr} = 21,26 \text{ m}^3/\text{s}$ (графикон лево) и хидрограм на протек низ хидроцентрала (графикон десно) $Q_{ener} = 17 \text{ m}^3/\text{s}$ [6].



Слика 5. Варијација на водното ниво во акумулација „Козјак“ за разгледуваниот период од 30 години, $Z_{sr} = 448,93 \text{ mnv}$ [6]



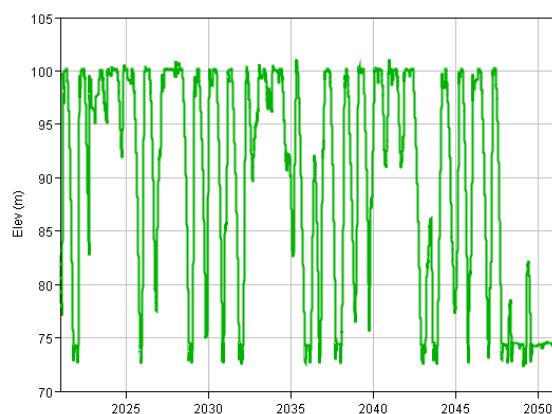
Слика 6. Производство на електрична енергија $E_{sr} = 328,98$ MWh/den (графикон лево) и реализирана моќност во хидроцентралата $P_{sr} = 13,71$ (графикон десно) [6]

Во согласност со излезните резултати од симулациониот модел, просечното ниво во акумулација „Козјак“ за целиот анализиран период изнесува 448,93 mnnv. Максимално ниво кое се достигнува во симулацијата изнесува 459,42 mnnv, додека минималното ниво е на кота 431,83 mnnv [6].

Во однос на производството на електрична енергија, со моделот се добива дека годишното производство на енергија од ХЕЦ „Козјак“ изнесува 328,98 MWh/den или 120,08 GWh/годишно. Низ хидроцентралата во просек минувале $17 \text{ m}^3/\text{s}$, додека најголема вредност на протекот кој е енергетски искористен изнесува $66 \text{ m}^3/\text{s}$. За споредба, инсталираниот капацитет на двете турбини изнесува $100 \text{ m}^3/\text{s}$ [6].

Просечната реализирана моќност од хидроцентралата изнесува 13,71 MW, а најголемата – 55,39 MW. За споредба, инсталираната моќност во хидроцентралата изнесува 82 MW.

Хидроцентралата работи со просечен нето-пад од 89,93 m. Најголемиот нето-пад изнесува 100,98 m, а најмалиот – 72,33 m [6].



Слика 7. Варијации на нето падот со кој се генерира електрична енергија во хидроцентралата, $H_{sr} = 72,33\text{m}$ [6].

4. ИЗЛЕЗНИ РЕЗУЛТАТИ ОД АНАЛИЗИТЕ ВО SOLDIER

Во продолжение се дадени излезните резултати од моделите со машинско учење, при што со податоците од симулациониот модел е спроведен аналитички пристап за зависноста на варијаблите и нивното влијание врз производството на електрична енергија во ХЕЦ „Козјак“.

Со поврзувањето на варијаблите ќе се овозможи да се согледа следното:

1. Производството на електрична енергија во корелација со хидролошката серија на дотекување во акумулацијата

2. Производството на електрична енергија во корелација со реализираната моќност
3. Производството на електрична енергија во корелација со протекот низ хидроцентралата.

Интересно во овие анализи е тоа што математичката корелација која се формира во процесот на „учење“ помеѓу варијаблите и целните параметри претставува алатка која може да се користи во иднина со познавање на само една варијабла за добивање на целниот параметар, т.е. не мора да се знаат сите внатрешни врски во формирањето на целниот параметар. Ова директно влијае врз брзината на донесување одлуки без директно да се влијае во реалниот или планираниот систем. Станува збор за ефикасна алатка која, доколку подготвена со богата база на податоци, може да замени голем број скапи физички, па и математички сложени модели.

Бидејќи станува збор за модели базирани на машинско учење, потребно е да се дефинира процент од податоците кој ќе се користи како тренинг и процент кој ќе се користи за тестирање на добиените резултати. Во моделите е применет принципот на користење на 75 % од податоците за тренинг на моделот и 25 % за тестирање на добиените резултати.

За оценување на подобноста на моделите, пресметана е средна апсолутна грешка (анг. 'mean absolute error – MAE'):

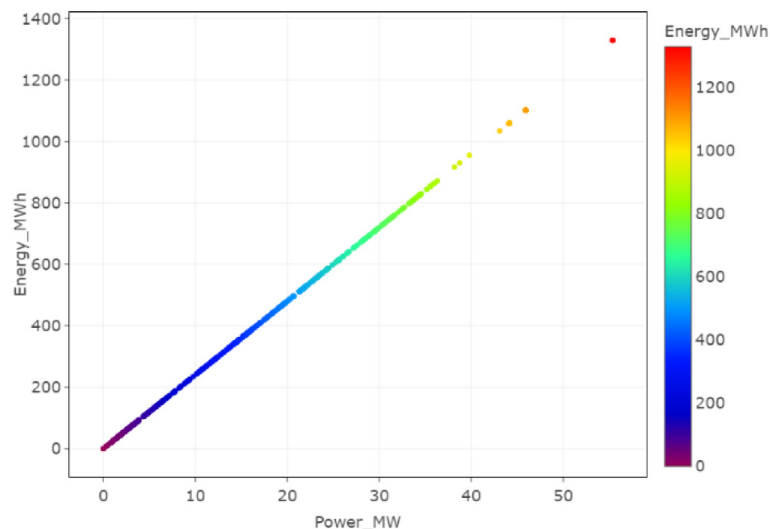
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - F(x_i)|}{N} \dots (1)$$

каде што N претставува број на податоци во тренинг-зоната или зоната за валидација, y_i се опсервираните излези и $F(x_i)$ се претпоставените вредности. Овој коефициент се мери во истата мерна единица како варијаблата што се претпоставува, и истата претставува интуитивна мерка за точноста на моделот [7].

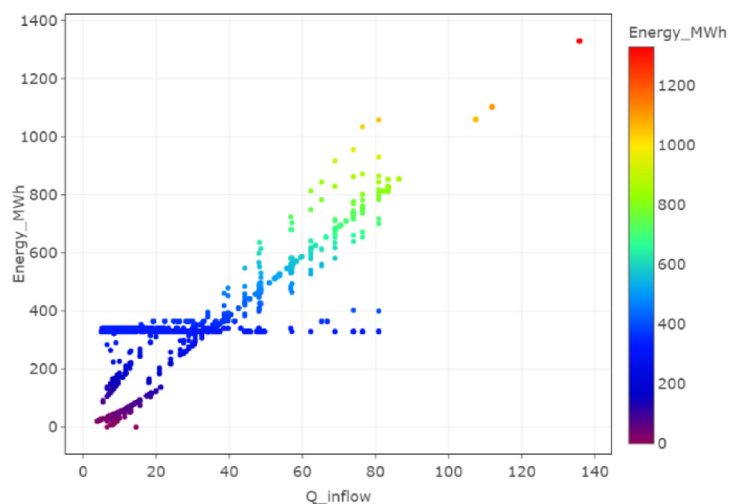
Покрај средната апсолутна грешка, пресметан е и коефициентот R^2 – коефициент за детерминација кој е дефиниран за сет од n – елементи со $y_1 \dots y_n$ резултати и нивните претпоставени вредности $y'_1 \dots y'_n$:

$$R^2(y, y') = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \right), \text{ каде } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N y_i \dots (2)$$

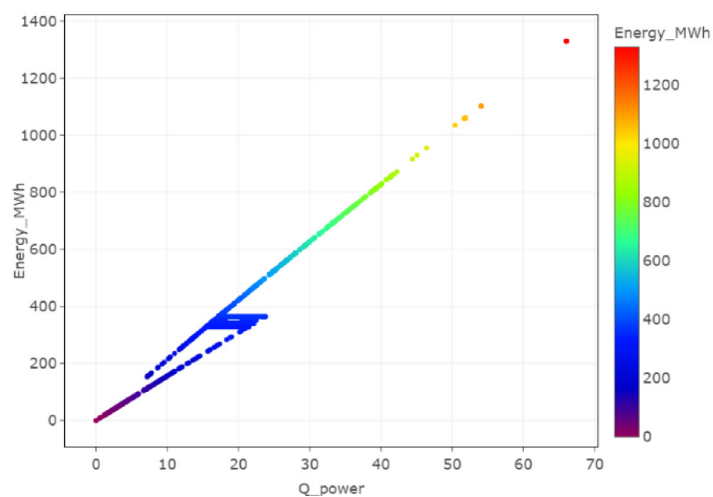
Целна вредност за коефициентот R^2 е 1, т.е. резултат блиску до 1 покажува дека моделот направил солидна математичка корелација помеѓу варијаблите, а резултат 0 покажува дека моделот не може да воспостави никаква корелација помеѓу варијаблите [8].



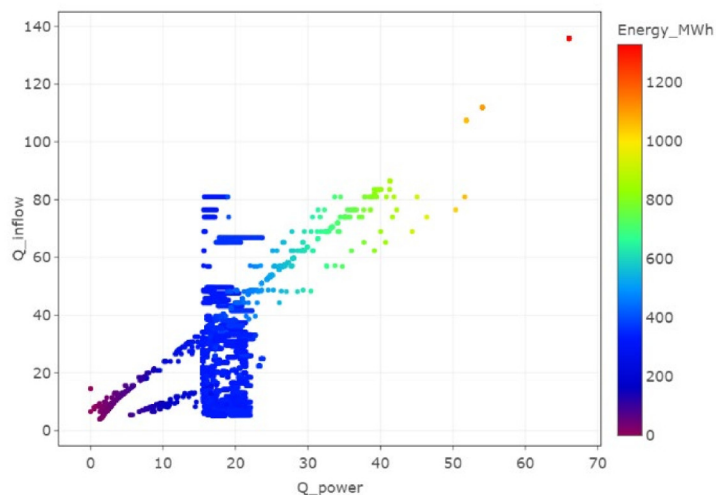
Слика 8. Влезни податоци во моделот – графикон со приказ на реализираната моќност (X) и произведената електрична енергија (Y)



Слика 9. Влезни податоци во моделот – графикон со приказ на дотекот во акумулацијата (X) и произведената електрична енергија (Y)



Слика 10. Влезни податоци во моделот – графикон со приказ на протекот низ хидроцентралата (X) и произведената електрична енергија (Y)

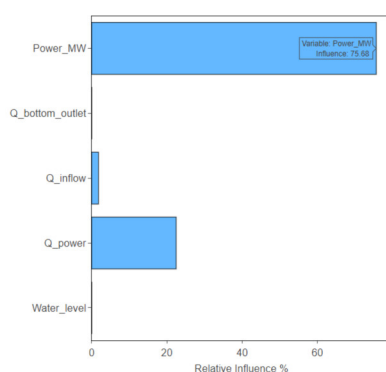


Слика 11. Влезни податоци во моделот – графикон со приказ на дотекот во акумулацијата (Y) и протекот низ хидроцентралата (X)

По дефинирањето на влезните податоци, моделот во SOLDIER дава информација за вредноста на параметрите MAE и R^2 кои зборуваат за точноста и приспособеноста на моделот. Имено, во согласност со резултатите за подготвениот модел, во процесот на тренирање вредноста на MAE е 3,25, додека на R^2 е 1. Во процесот на тестирање, MAE изнесува 8,57, додека R^2 изнесува 0,99. Двата параметри посочуваат на добро формирана математичка корелација помеѓу целниот параметар и варијаблите. Целниот параметар во конкретниот случај претставува производството на електрична енергија во Wu, додека варијаблите или условни параметри се: дотек во акумулација, протек низ ХЕЦ, варијација на водно ниво во акумулацијата, протек низ темелен испуст и реализирана моќност во MW.

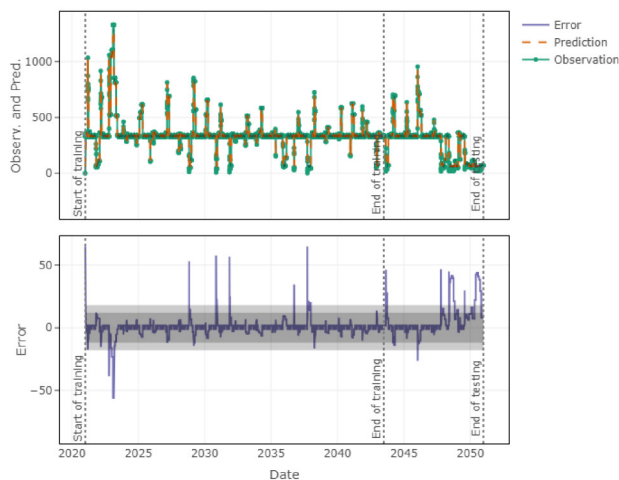
Од наведените условни варијаблите, секоја има посебно влијание врз формирањето на математичката врска, а процентуалниот удел може да се види на слика 12.

На слика 12 може да се воочи дека најголем удел во формирањето на математичката врска има параметарот „реализирана моќност“ со 75,68 % влијание, параметарот „протек низ хидроцентрала“ има влијание од 22,48 %, а останатите предиктори имаат влијание помало од 2 %.



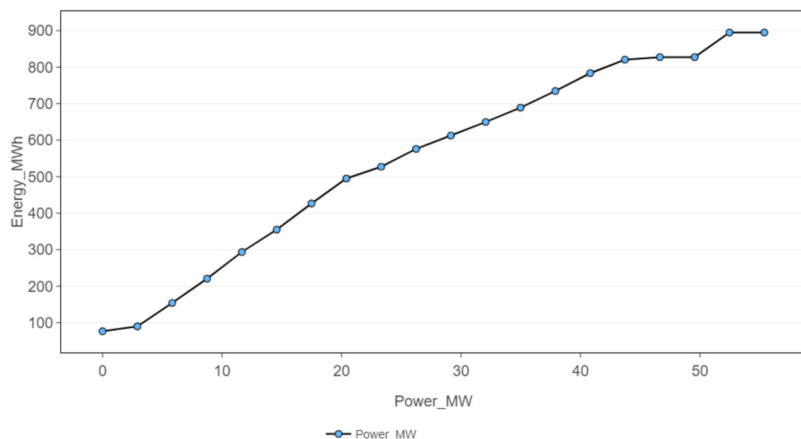
Слика 12. Процентуален удел на секој условен параметар во формирањето на математичката врска помеѓу целниот параметар и условните

За оценка на подобноста на моделот говорат и графиконите на слика 13, каде што може да се воочи реалната вредност на целниот параметар – произведена електрична енергија во MWh - споредено со предвидените вредности за целта. Имено, во согласност со дефинираните коридори за прифатлива грешка, може да се воочи дека на графиконот има 13 пикови надвор од коридорите, кои се јавуваат во екстремните вредности на условната варијабла – минималните (блиски вредности до 0 MWh) и максималните (вредност над 1.000 MWh).

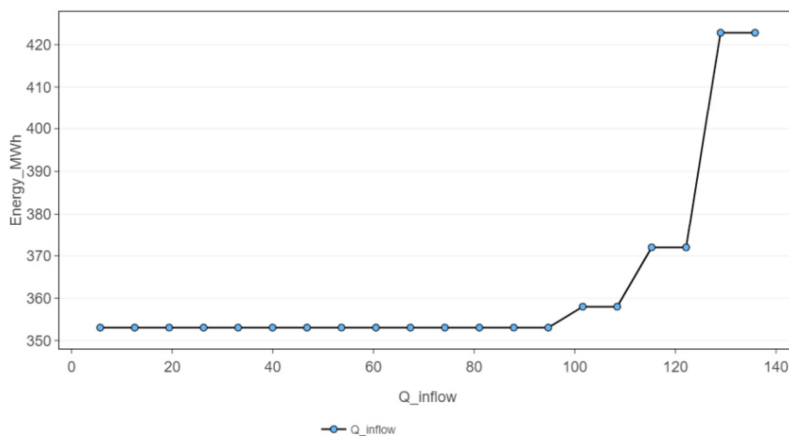


Слика 13. Графикон со приказ на реалната вредност на предикторот споредено со предвидената вредност по формирање на математичката врска (графикон горе) и приказ на процентот на грешка во предвидувањето со означени коридори во кои може да се толерира грешката (графикон долу)

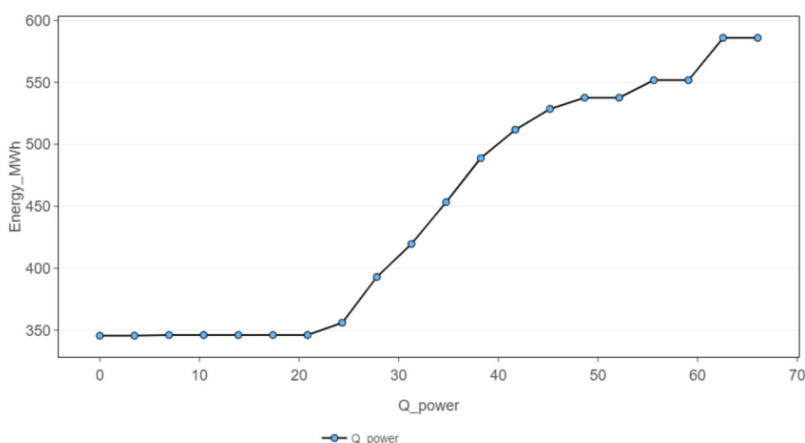
Како што следи, дадени се излезни 1D и 2D графикони за формираната вредност помеѓу целните и условните варијабли.



Слика 14. Корелација помеѓу реализираната моќност и производството на електрична енергија.



Слика 15. Корелација помеѓу дотекот во акумулацијата и производството на електрична енергија.



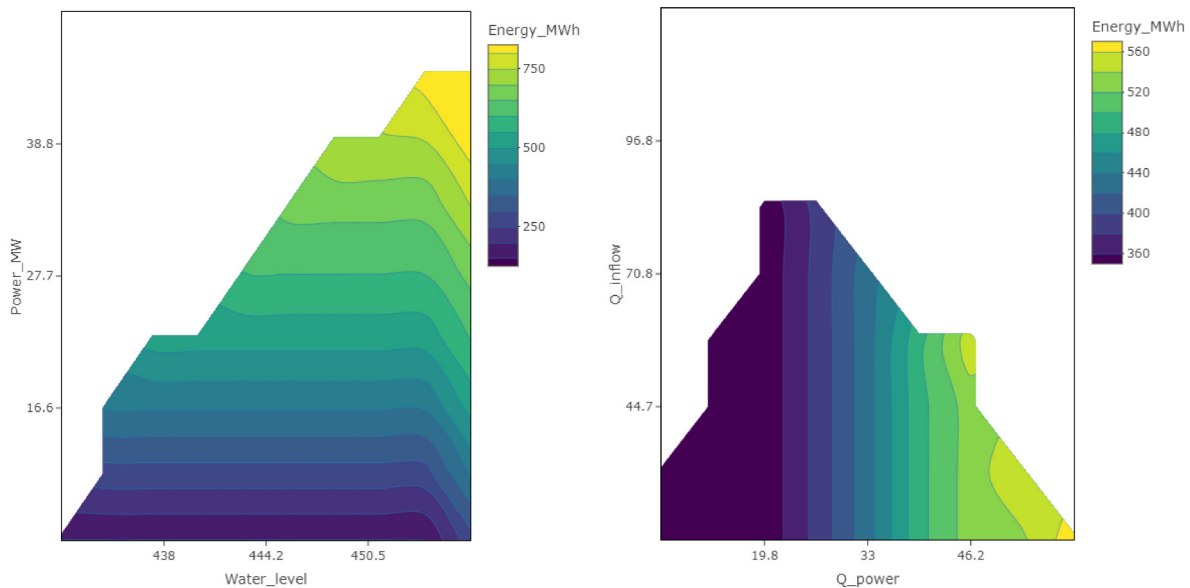
Слика 16. Корелација помеѓу протекот низ хидроцентралата и производството на електрична енергија.

Од 1D графиконите може да се заклучи следното:

- Со зголемување на реализираната моќност, се зголемува и производството на електрична енергија, како што е прикажано на слика 14.

- Дотекот во акумулацијата има незначително влијание врз поголемо производство на електрична енергија, т.е. истото е константно – околу 352 MWh, сè додека не достигне вредност над 100 m³/s. Над оваа вредност дотекот драстично го зголемува производството на електрична енергија, како што е прикажано на слика 15.
- Протекот низ хидроцентралата влијае врз зголемување на производството на електрична енергија, но по вредности над 20 m³/s. До овие вредности производството на електрична енергија е константно, нешто помалку од 350 MWh. Ова може да се согледа на слика 16.

По 1Д графиконите, како што следи прикажани се и 2Д графикони на парцијална зависност на две варијабли во конкретизирањето на целиот параметар.



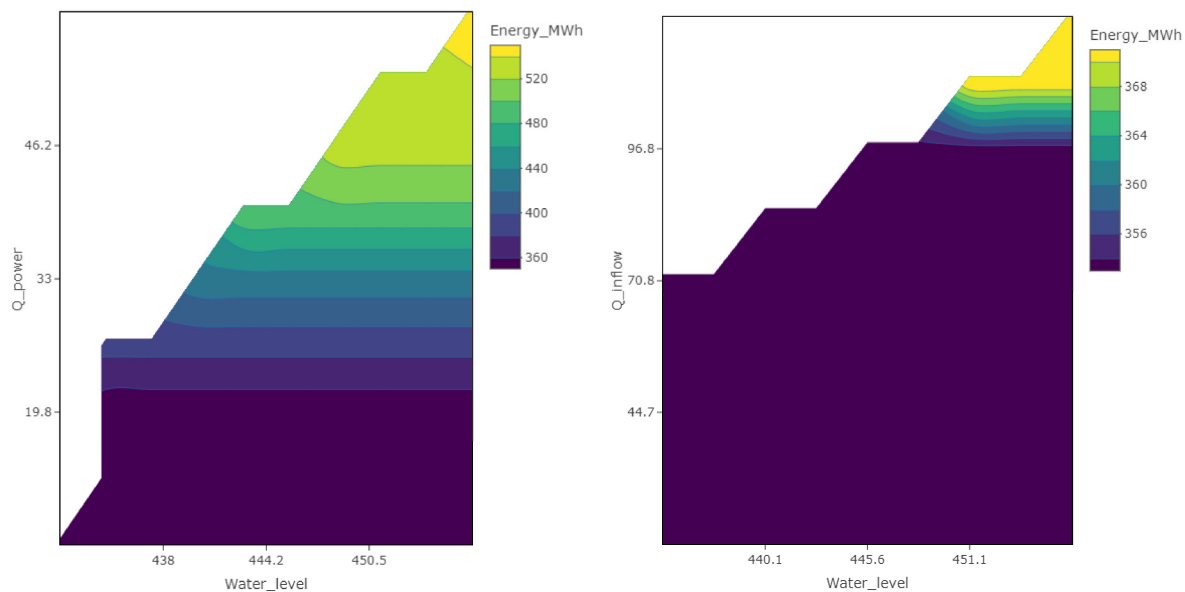
Слика 17. 2Д графикони за целната варијабла во однос на следните условни варијабли: ниво во акумулација и реализирана моќност (графикон лево), и дотек во акумулација и протек низ хидроцентралата (графикон десно).

Од 2Д графиконите на слика 17 може да се заклучи дека:

- Со зголемување на водното ниво во акумулацијата, како и зголемување на ангажираната моќност, производството на електрична енергија, исто така, е во пораст. Ова може да се согледа на левиот графикон.
- Дотекот во акумулацијата во комбинација со протекот низ хидроцентралата влијае во насока што со зголемување на протекот низ ХЕЦ се зголемува и производството на електрична енергија. Оваа законитост важи и за ниски вредности на дотеките во акумулацијата. Ова може да се согледа на десниот графикон.

Од 2Д графиконите на слика 18 може да се заклучи дека:

- Со пораст на водното ниво и зголемен протек низ хидроцентралата, производството на електрична енергија се зголемува (графикон лево).
- Со пораст на водното ниво во акумулацијата и пораст на дотекот во акумулацијата, производството на електрична енергија се зголемува (графикон десно).



Слика 18. 2Д графикони за целната варијабла во однос на следните условни варијабли: водно ниво во акумулација и протек низ хидроцентрала (графикон лево), и дотек во акумулација и водно ниво во акумулација (графикон десно).

ЗАКЛУЧОК

За да се разгледа можноста за примена на алатките од машинско учење во инженерството за брани, направено е истражување за производството на електрична енергија од хидросистемот ХЕЦ „Козјак“ во зависност од останатите параметри кои се дел од водостопанското управување со системот. Ова истражување е подготвено со изработка на симулационен модел со кој се добиваат низи на податоци за управување со системот – хидрограм на дотек во акумулација, флукуација на водно ниво во акумулација, излезен хидрограм од темелен испуст, протек низ хидроцентрала, реализирана моќност во хидроцентралата, како и произведена електрична енергија за целиот анализиран период од 30 години, со временски чекор во анализите од еден ден.

Понатаму, со овие добиени низи на податоци, во софтверот SOLDIER, кој прави математичка корелација помеѓу условните параметри со примена на Boosted Regression Trees методот, добиени се врските помеѓу условната и целната варијабла. Условни варијабли во моделот се: дотек во акумулација, протек низ ХЕЦ, варијација на водно ниво во акумулацијата, протек низ темелен испуст и реализирана моќност во MW. Целна варијабла е производството на електрична енергија во MWh.

Коефициентите MAE и R^2 зборуваат за добро оформена математичка корелација помеѓу условите и целната варијабла во текот на тренинг-периодот и периодот на тестирање. Во процесот на тренирање вредноста на MAE е 3,25, додека на R^2 е 1. Во процесот на тестирање MAE изнесува 8,57, додека R^2 изнесува 0,99.

Понатаму, анализирани се 1Д и 2Д графикони на поврзаноста помеѓу условите и таргетот. Од добиените резултати може да се заклучи следното:

- Со зголемување на реализираната моќност, се зголемува и производството на електрична енергија, како што е прикажано на слика 14.
- Дотекот во акумулацијата има незначително влијание врз поголемо производство на електрична енергија, т.е. истото е константно – околу 352 MWh, сè додека не достигне вредност над 100 m³/s. Над оваа вредност, дотекот драстично го зголемува производството на електрична енергија, како што е прикажано на слика 15.
- Протекот низ хидроцентралата влијае врз зголемување на производството на електрична енергија, но по вредности над 20 m³/s. До овие вредности производството

на електрична енергија е константно, нешто помалку од 350 MWh. Ова може да се согледа на слика 16.

- Со пораст на водното ниво и зголемен протек низ хидроцентралата, производството на електрична енергија се зголемува (графикон лево).
- Со пораст на водното ниво во акумулацијата и пораст на дотекот во акумулацијата, производството на електрична енергија се зголемува (графикон десно).

Она што може да се заклучи генерално е дека добиените корелации се очекувани и реални. Ова зборува за добро формирана математичка врска помеѓу условите и целната варијабла, и дава простор понатаму да се истражат сите меѓусебни врски во анализираниот систем.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tanchev, Lj. (2014) Dams and appurtenant hydraulic structures, 2nd edition, CRC Press
- [2] Годишни извештаи на ECM, 1992 – 2022 година, web: https://www.esm.com.mk/?page_id=530
- [3] SOLDIER: SOLution for Dam behavior Interpretation and safety Evaluation with boosted Regression trees, User's manual, 2023
- [4] Salazar, F., Irazábal, J. & Conde, A. (2024). SOLDIER: SOLution for Dam behavior Interpretation and safety Evaluation with boosted Regression trees. SoftwareX, 25, 101598.
- [5] US Army Corps of Engineers, HEC ResSim 3.3 User's Manual, web: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/documentation.aspx>
- [6] Митовски, С., Пановска Ф., Петковски, Љ. (2024) Оперативно управување со ХЕЦ со примена на симулационен модел, Зборник на трудови од конференцијата на тема: Инженерството за брани во услови на енергетска транзиција и остарена хидротехничка инфраструктура, ЗМКГБ, Скопје
- [7] F. Salazar, M. A. Toledo, E. Onate and B. Suarez, "Interpretation of dam deformation and leakage with boosted regression trees," Engineering Structures, 2015
- [8] M. A. Hariri-Ardebili and F. Pourkamali-Anaraki, "An Automated Machine Learning Engine with Inverse Analysis," Water, vol. 14, no. 3898, 2022