

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 Radovich, 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



ОПЕРАТИВНО УПРАВУВАЊЕ СО ХЕЦ СО ПРИМЕНА НА СИМУЛАЦИСКИ МОДЕЛ

Стевчо Митовски¹, Фросина Пановска Георгиевска², Љупчо Петковски³

Резиме

По поплавата на градот Скопје во далечната 1962 година, експертите од Македонија го подготвија планот за изградба на браната „Козјак“ како заштита од големи поплави кои потекнуваат од сливот на река Треска. Првите студии и идејни проекти за браната „Козјак“ се изработени во далечната 1962 година, додека главниот проект е завршен во 1989 година. Изградбата на браната започнала во 1994 година, а завршила десет години подоцна, со пуштање на хидроцентралата Козјак во 2004 година. Главна намена на хидросистемот „Козјак“ е заштита на градот Скопје од катастрофални поплави, но и производство на електрична енергија. Проценетото производство изнесува 130 GWh годишно. Во овој реферат се прикажани резултати од симулациски модел на акумулацијата „Козјак“ со придружните објекти со цел да се согледа производството на електрична енергија при зададен влезен хидрограм од долга низа на мерени податоци од 30 години. Анализите покажуваат дека максималната реализирана моќност на системот изнесува $P = 55,40$ MW наспроти инсталираната моќност од $P_{ins} = 82$ MW, со средногодишно производство на електрична енергија од 120 GWh, а најголемиот протек кој минува низ централата изнесува $Q = 66,04$ m³/s наспроти инсталираниот капацитет од $Q_{ins} = 100$ m³/s.

Клучни зборови: ХЕЦ, Козјак, брана, акумулација, енергија

OPERATIONAL MANAGEMENT OF HPP WITH APPLICATION OF SIMULATION MODEL

Stevcho Mitovski¹, Frosina Panovska Georgievska², Ljupcho Petkovski³

Summary

After the flood of the city of Skopje in the distant 1962, experts from Macedonia prepared the plan for the construction of the Kozjak dam as a protection against floods originating from the Tresca river basin. The first studies and preliminary designs for the Kozjak dam were made in the distant 1962, while the detailed design was completed in 1989. The construction of the dam began in 1994, and ended ten years later, with the commissioning of the Kozjak hydroelectric plant in 2004. The main purpose of the Kozjak hydrosystem is to protect the city of Skopje from catastrophic floods, but also to produce electricity. The estimated production is 130 GWh per year. This report presents the results of a simulation model of the Kozjak reservoir and the appurtenant structures in order to understand the production of electricity at a given input hydrograph from a long series of measured data of 30 years. Analyses show that the maximum realized power of the system is $P = 55.40$ MW against the installed power of $P_{ins} = 82$ MW, with an average annual electricity production of 120 GWh, and the largest flow passing through the plant is $Q = 66.04$ m³/s against the installed capacity of $Q_{ins} = 100$ m³/s.

Key words: HPP, Kozjak, dam, reservoir, energy

¹Вонреден професор, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Градежен факултет, smitovski@gf.ukim.edu.mk

²Асистент, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Градежен факултет, spanovska@gf.ukim.edu.mk

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

1. ВОВЕД

1.1. ХИДРОЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМ „КОЗЈАК“

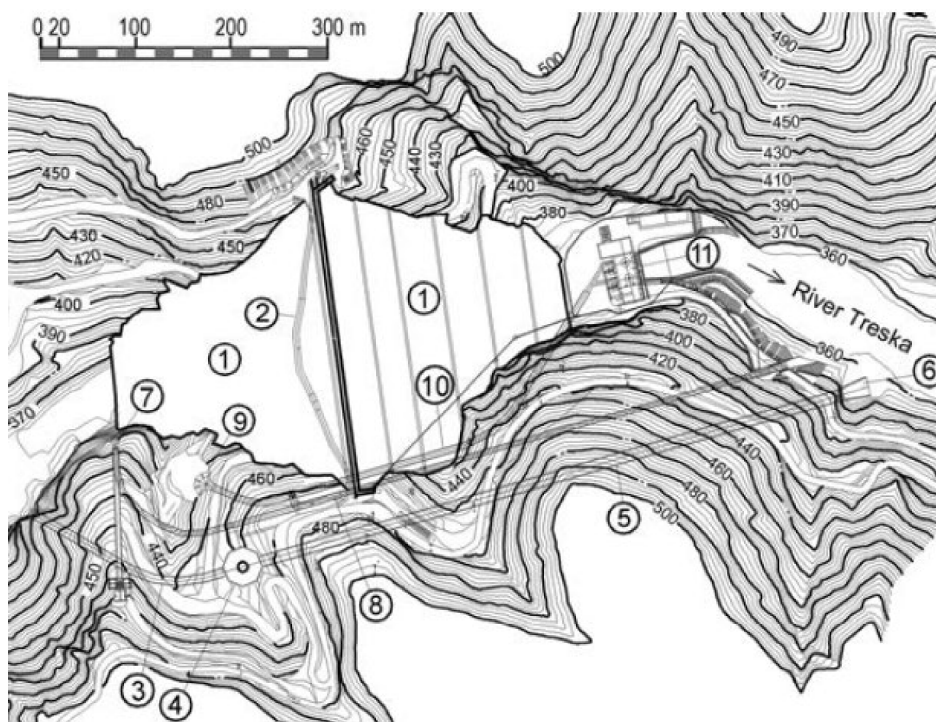
Поплавата во градот Скопје во 1962 година која му претходеше на земјотресот од 1963 година било главна причина инженерската фела во Македонија да почне сериозно да размислува за стратегија за заштита на градот од катастрофални поплави. Како што сведочат скопјани, прелевањето низ преливникот на браната Матка изнесувало $73 \text{ m}^3/\text{s}$, а машинската хала на централата била поплавена, додека езерото било преполно со донесени трупци дрвја. Како резултат на полавата во Скопје четири лица се удавиле [1].

Искористувањето на водните сили на реката Треска одамна претставувало предизвик за инженерите и стопанството во РС Македонија. Во далечната 1930 година е изработен среднорочен план за развој на Р Македонија и Програма за изградба на електроенергетски објекти за периодот од 1935 до 1990 година, по што изградбата на ХЕЦ „Козјак“ била потврдена како приоритетна по изградбата на ТЕ „Битола“. Во Студијата за регулација и контрола на реката Вардар, изработена од „Норконсулт“ - Норвешка во 1969 година за потребите на Обединетите нации, а во рамките на Програмата за развој, со изградбата на браната и ХЕЦ „Козјак“ се предвидени две намени на системот: (1) заштита од поплави на градот Скопје, и (2) производство на електрична енергија.

За реализацијата на активностите за инвестиционо-техничката документација, при Електро Скопје се формирал Сектор за инвестиции и градба на извори. Врз основа на добиените резултати од теренските и од лабораториските испитувања од страна на ЕМО - Охрид изработен е главен проект за браната „Козјак“, со придружни објекти и ХЕЦ „Козјак“. Главни носители на теренските и на лабораториските испитувања беа Геолошки завод – Скопје, Градежен институт Македонија и ИЗИИС – Скопје. Во 1990 година е извршена ревизија на целокупната документација за браната и ХЕЦ „Козјак“ од страна на Енергопроект – Белград, со заклучок дека се исполнети сите проектни критериуми и може да се започне со градба. По обезбедување на средствата за изградба, на 31.08.1994 година, претседателот на Р Македонија, Киро Глигоров, го постави камен-темелникот за изградба на брана со ХЕЦ „Козјак“. Првото полнење на акумулацијата било во декември 2003 година, додека ХЕЦ „Козјак“ е пуштена во експлоатација во 2004 година.

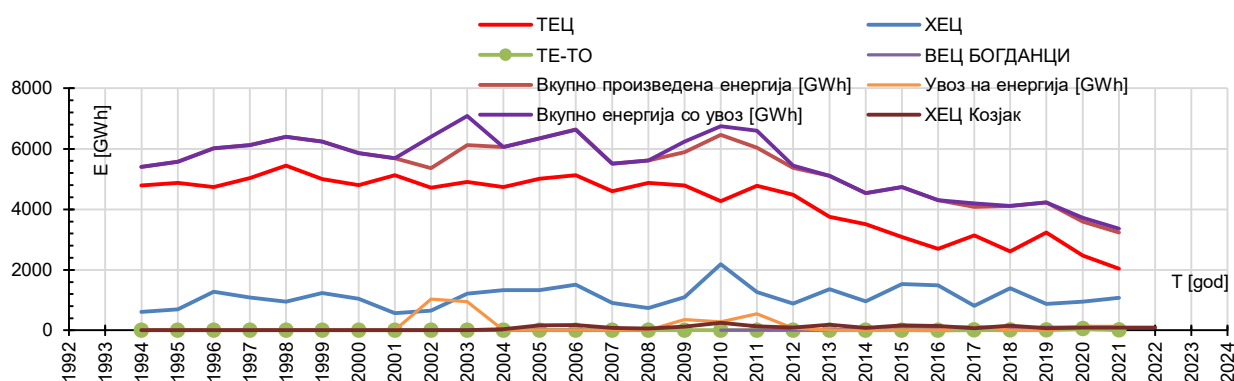
1.2. ОПИС НА ХЕС „КОЗЈАК“

Акумулацијата Козјак е најголемата акумулација во земјава, со вкупен волумен од $550 \times 10^6 \text{ m}^3$, 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 $190 \times 10^6 \text{ m}^3$. Браната „Козјак“ е камено-земјена брана, со потпорни тела од нафрлан камен, преодни филтерски зони од песок и наклонето јадро од глина. Јадрото и филтрите се фундирани на карпа, додека потпорните тела се потпираат на депонираниот речен нанос. Круната на браната е на кота 471.1 mnv, со што се обезбедува кота на нормално ниво во акумулацијата на кота 459.0 mnv. Конструкциската височина на браната изнесува $H_k=130\text{m}$. Преливникот е димензиониран на максимално протекување при појава на поплавен бран од $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Темелниот испуст претставува засебен тунел со три затворачи – два на влез во тунелот (ремонтен и работен) и таблест затворач 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 $P_{\text{ins}} = 82 \text{ MW}$. Основата на ХЕС „Козјак“ е прикажана на слика 1.



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 [2].

По вклучувањето на ХЕЦ „Козјак“ во електродистрибутивната мрежа на РС Македонија во 2004 година, истиот генерира електрична енергија во просек 122 GWh/год. Процентуално, тоа претставува 11 % од вкупното производство на електрична енергија од хидроцентралите, т.е. 3 % од целокупното производство на електрична енергија во земјава (слика 2).



Слика 2. Реализирано производство на електрична енергија со енергетските капацитети во РС Македонија за период од 1992 до 2022 година [3]

Оваа година хидроцентралата „Козјак“ одбележува 20 години од пуштањето во експлоатација. Во согласност со достапните податоци за реализираното производство, во 2004 година е реализирано најмалото годишно производство од 44,3 GWh/год, додека најголемото е реализирано во 2010 година и изнесува 251 GWh/год.

Со цел да се согледаат во целост можностите на ХЕС „Козјак“ и капацитетот за производство на електрична енергија, креиран е симулациски модел за системот. Симулацискиот модел претставува математички модел базиран на принципот на билансирање на водите – хидролошкото дотекување во акумулацијата е еднакво на сумата на истекувањето и

акумулираната вода. Моделот е креиран со примена на софтверскиот пакет HEC ResSim [4], при што аналитичките пресметки се направени со дневен временски чекор за период од 30 години. Во продолжение е даден опис на моделот, како и детален приказ на излезните големини и заклучоци од спроведената аналитичка пресметка.

2. ОПИС НА МОДЕЛОТ

За согледување на хидроенергетските перформанси на ХЕЦ „Козјак“, креиран е симулациски модел на системот со придружните објекти, при што главен акцент во зададеното оперативно правило е максимизација на производството на електрична енергија.



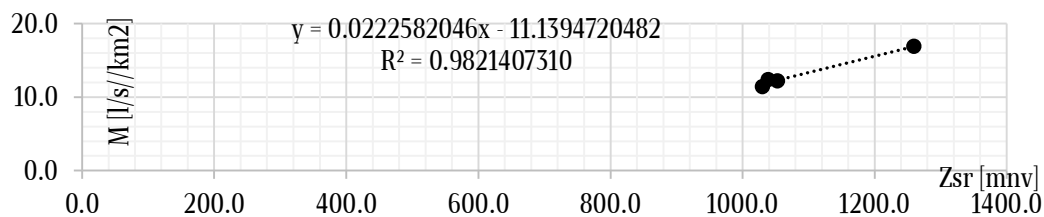
Слика 3. Приказ на креираниот модел во софтверот HEC ResSim.

Моделот е креиран со софтверска поддршка на HEC ResSim, кој претставува отворен софтвер, развиен од страна на Инженерскиот корпус на Армијата на САД (USACE Army Corps of Engineers) [4]. Софтверот се користи за спроведување студии на комплексни водостопански системи од аспект на планирање и управување, задавање влезни податоци и исполнување на потребите за вода преку излезните големини од системите.

За изработка на симулацискиот модел на ХЕЦ „Козјак“, потребно е да се дефинираат: (1) хидрограм на дотек во акумулација, (2) физички карактеристики на акумулацијата, (3) потреби за вода, и (4) оперативни правила за управување со системот.

2.1. ВЛЕЗНИ ГОЛЕМИНИ

Хидролошкото дотекување, како влезна големина во акумулацијата Козјак е усвоено во корелација со регистрираните хидролошки протекувања во мерна станица Св. Богородица, како најнизводна мерна станица во подсливот и се наоѓа пред вливот на р. Треска во р. Вардар. Имено, изработен е математички модел во кој се воспоставени зависимости помеѓу осреднетата надморска височина на подсливот до секоја мерна станица и сливната површина до нејзиниот профил. На овој начин е добиена зависност помеѓу просечното истекување и осреднетата надморска височина за подсливот на река Треска (слика 3).



Слика 3. Формирање на математичка зависност помеѓу сливните површини и просечната надморска височина до секоја мерна станица во сливот на река Треска.

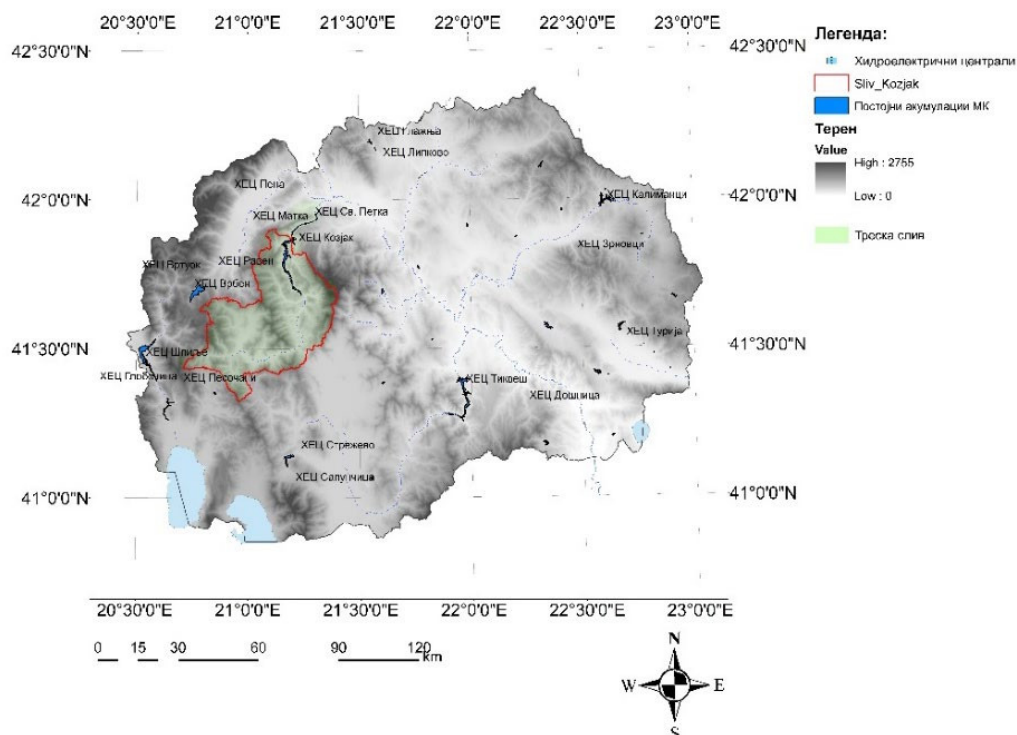
Со позната средна надморска височина на сливното подрачје до преградното место на брана „Козјак“, како и сливната површина прикажана на слика 4, може да се определи коефициентот на корелација со најнизводните регистрирани хидролошки големини во сливот. Осреднетата надморска височина на сливот изнесува 1049,65 mnv, додека сливната површина изнесува 1709,56 km². Просечното истекување до профилот на брана „Козјак“ изнесува:

$$M_{Kozjak} = 0.0222582046 * 1049,65 - 11.1394720482 = 12,22 \frac{l}{s/km^2}$$

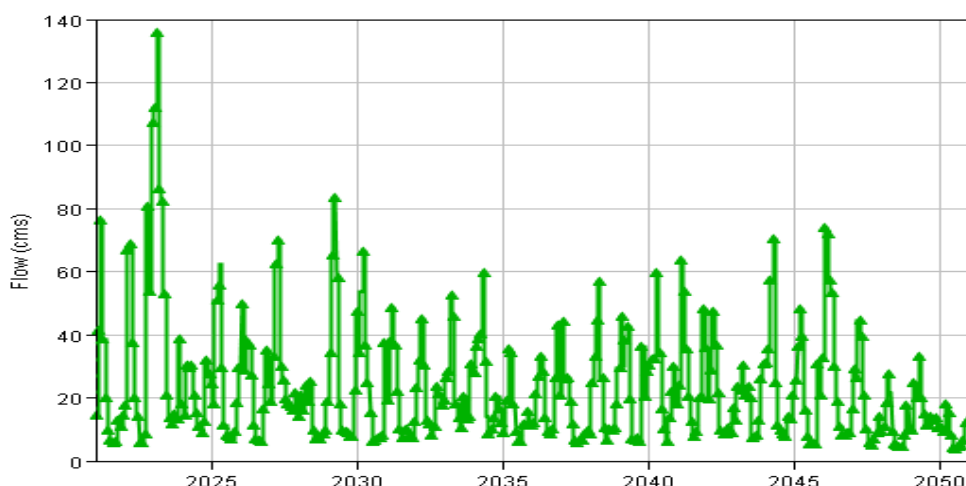
Понатаму, пресметан е коефициент на корелација помеѓу просечното истекување и големината на сливните површини помеѓу профилот на брана „Козјак“ и профилот на најнизводната мерна станица Св. Богородица:

$$K_i = \frac{Q_i}{Q} = \frac{F_i * M_i}{F * M} = \frac{1709,56 * 26,91}{12,41 * 1880} = 0,90$$

Со добиениот коефициент, определена е хидролошка серија на дотекувања за профилот на брана „Козјак“ (слика 5), кој се добива во однос на регистрираната хидролошка серија на протекувања во м.с. Богородица, модифицирана со пресметаниот коефициент. Со извршената пресметка, просечното дотекување во акумулацијата изнесува $Q_{sr}=21,26 \text{ m}^3/\text{s}$. Еколошки гарантираното протекување, како услов за исполнување на еколошкиот критериум, се проценува во дијапазон (15÷20)% од средногодишното дотекување, усвоена на ред големина $Q_{egr}=3,74 \text{ m}^3/\text{s}$.



Слика 4. Локација на сливот до профил на брана „Козјак“, креиран во ArcMap, со користење на податоци од Copernicus програмата на ЕУ [5].



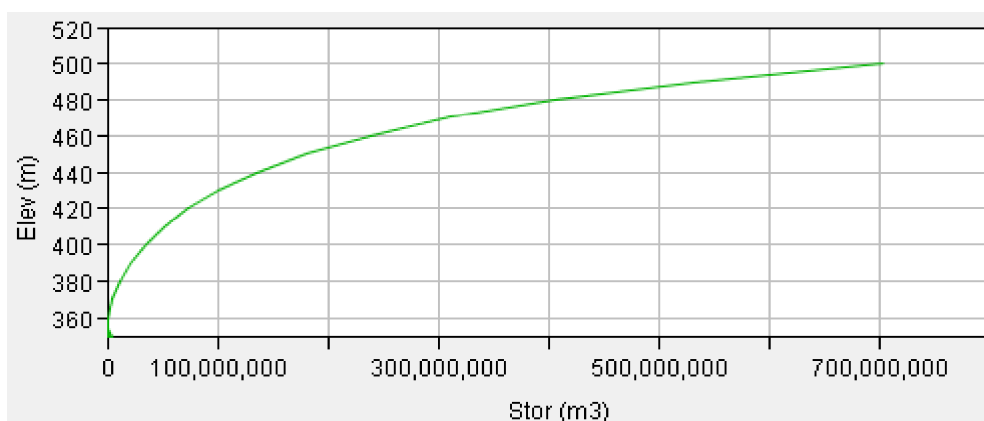
Слика 5. Хидролошки серии на дотекување во акумулација „Козјак“

2.2. ФИЗИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА АКУМУЛАЦИЈАТА И ОБЈЕКТИТЕ

Како физички карактеристики за акумулацијата, во моделот се внесуваат топографските криви на акумулацијата (линија на површина и линија на волумен, Слика 5). Покрај овие карактеристики, потребно е да се дефинираат и котите во акумулацијата – кота на минимално работно ниво, кота на нормално ниво и кота на максимално ниво (табела 2).

Табела 2. Карактеристични коти и волумени за профил на брана „Козјак“.

Статус на акумулација	Акумулација	Znn	Zmax	Zkr	Vk	Qsr,d
		[mnv]	[mnv]	[mnv]	[106m3]	[m3/s]
Постоечка	Козјак	459.00	466.00	471.10	550.00	21.26



Слика 5. Линија на волумен за акумулација „Козјак“

Придружните и хидроенергетските објекти се моделираат со своите реални физички карактеристики. ХЕЦ „Козјак“ претставува прибранска хидроцентрала со две Франсисови турбини со вертикална оска, секоја со инсталиран капацитет од 50 m³/s и снага од 41 MW. Вкупниот инсталиран капацитет на хидроцентралата е даден преку инсталираното протекување $Q_{ins}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ и инсталираната снага $P_{ins}=82 \text{ MW}$. Низводно од ХЕЦ „Козјак“ е поставена акумулацијата „Св. Петка“, и во моделот како низводно ниво во одводна вада е усвоено нормалното работно ниво на „Св. Петка“, $Z_{nn}=357,3 \text{ mnv}$.

Преливниот објект е моделиран со својот максимален капацитет од 1500 m³/s, додека за темелниот испуст е предвидено испуштање на големините на еколошки гарантираното протекување во услови кога хидроцентралата не е во оперативна состојба.

2.3. ОПЕРАТИВНИ ПРАВИЛА ЗА УПРАВУВАЊЕ СО ХЕЦ

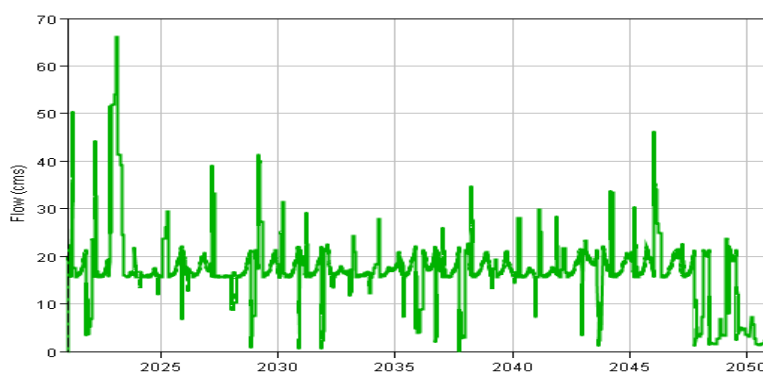
Мртвиот простор претставува зона со која стопанисувачот не може да управува, т.е. водата во зоната на мртвиот простор е неискористена. Овој простор се наоѓа под котата на мртов простор $Z_{mp}=432.0$ mnnv.

Единствено со корисниот волумен на акумулацијата е овозможено да се управува со водите, помеѓу коти (432.0÷459.0) mnnv. Во оваа зона дефинирано е приоритетно оперативно правило за производство на електрична енергија преку спецификација на побарувачка за месечно производство на 10200 MWh енергија, во текот на целата година. Понатаму, во услови кога хидроцентралата нема да работи, дефинирано е оперативно правило за вклучување на темелниот испуст и испуштање на еколошки гарантираното протекување низводно од акумулацијата.

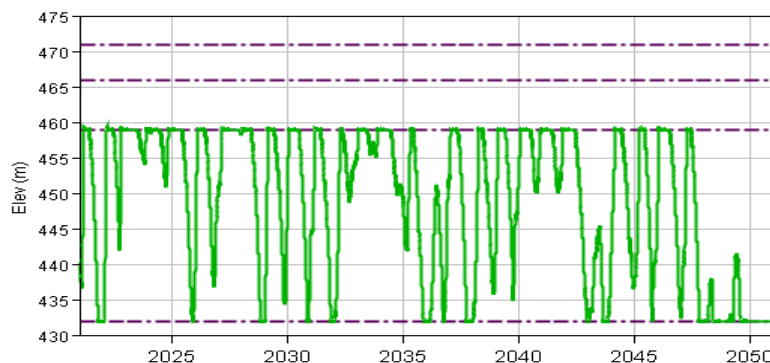
Над котата на нормалното ниво $Z_{nn}=459.0$ mnnv, па сè до котата на максималното ниво од 466.0 mnnv, просторот се одржува празен, т.е. резервиран е во случај на појава на поплавен бран. Во зоната над 466.0 mnnv, предвидено е да се стави во функција преливниот орган.

3. ИЗЛЕЗНИ ГОЛЕМИНИ

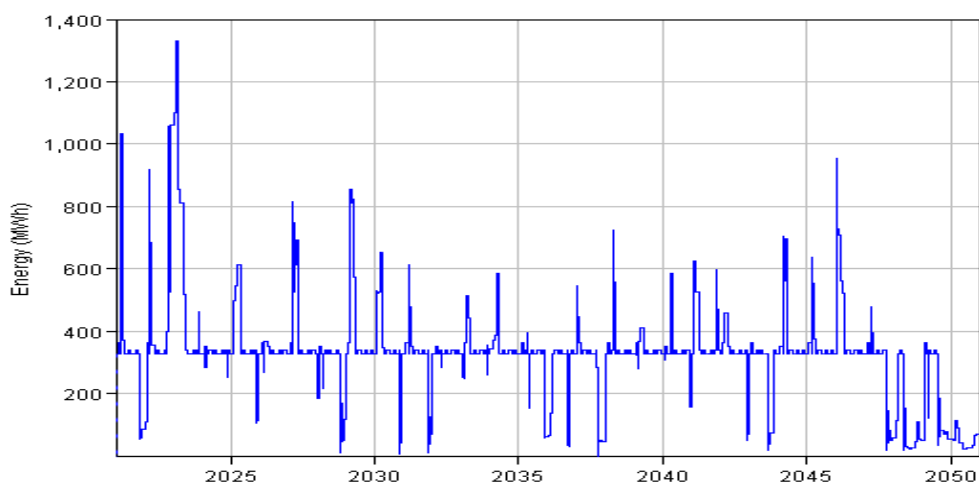
Од спроведена анализа, во продолжение е даден приказ на излезните големина од моделот од аспект на производство на електрична енергија. На слика 6 се дадени големините на регулираните протекувања низ ХЕЦ во тек на разгледуваниот период, додека на слика 7 е прикажана варијацијата на нивото на вода, во согласност со зададеното оперативно правило. На слика 8 е прикажано средногодишното производство на електрична енергија со ХЕЦ „Козјак“, $E_{sr}=120.1$ GWh/год, додека на слика 9 е прикажана ангажираната снага на ХЕЦ „Козјак“ во тек на разгледуваниот период.



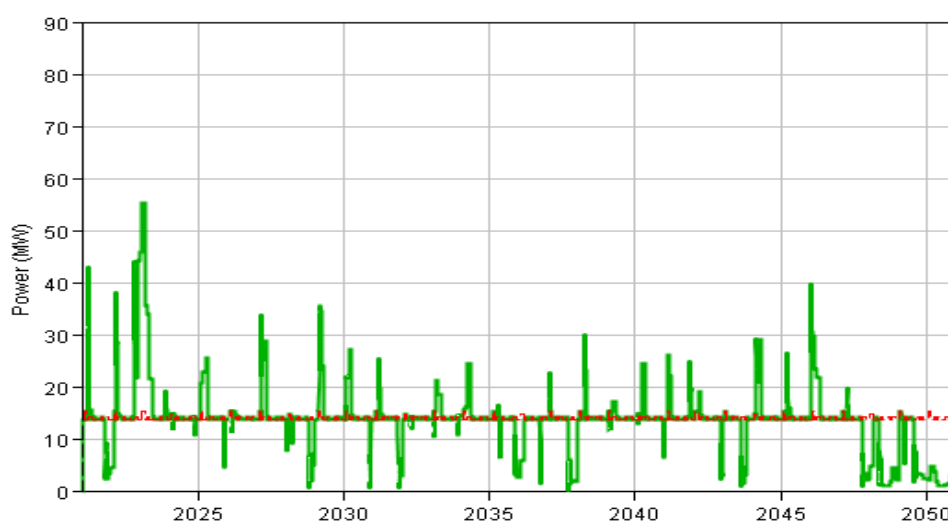
Слика 6. Протекување низ ХЕЦ, $Q_{енер} = 17$ m³/s.



Слика 7. Варијација на водното ниво во акумулација Козјак за разгледуваниот период, $Z_{sr}=448,93$ mnnv



Слика 8. Средно годишно производство на електрична енергија со ХЕЦ „Козјак“, $E_{sr}=120,08$ GWh/год.



Слика 9. Ангажирана снага со ХЕЦ „Козјак“, $P_{sr} = 13,71$ MW

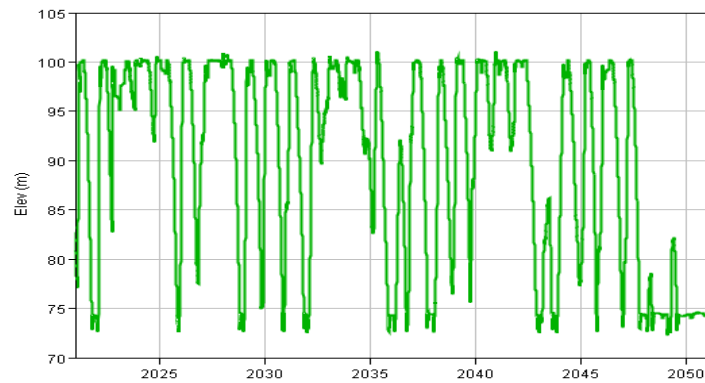
Во согласност со излезните резултати, нивото на вода во акумулацијата се одликува со варијации во тек на разгледуваниот период, со просечно ниво 448,93 mnnv. Максимално ниво кое се достигнува со симулациското моделирање изнесува 459,42 mnnv, додека минималното е на кота 431,83 mnnv.

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

Просечната реализирана снага на ХЕЦ изнесува 13,71 MW, додека максималната изнесува 55,39 MW. За споредба, инсталираната снага на ХЕЦ изнесува 82 MW.

ХЕЦ во оперативна состојба работи со просечен нето-пад од 89,93m. Најголемиот нето-пад изнесува 100,98 m, а најмалиот – 72,33 m.

Од спроведената аналитичка студија се согледува дека во текот на разгледуваниот период ХЕЦ не може да ги постигне во целост проектираните карактеристики, а котата во акумулацијата се одликува со варијации и е под котата на нормално ниво. Сценарио кое е интересно да се разгледа е користењето на резервираниот простор за ретензија на поплавниот бран (волумен од $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ и максимално зголемен пад за 7m) за зголемено производство на електрична енергија.



Слика 9. Варијации на нето-падот за генерирање електрична енергија во ХЕЦ во тек на разгледуваниот период, $H_{sr} = 72,33$ m

ЗАКЛУЧОЦИ

Креиран е симулациски модел за ХЕЦ „Козјак“ со цел да се согледаат перформансите на ХЕС од аспект на генерирање електрична енергија, за зададена хидролошка серија на дотекувања во акумулацијата, проценета според хидролошки модел и зададено оперативно правило со побарувачка за производство на електрична енергија на месечно ниво, за разгледуваниот период од 30 години. Со спроведената егзекуција на симулацискиот модел се издвојуваат следните заклучоци за оперативноста на ХЕЦ:

- Енергетските параметри на ХЕЦ (ангажирана снага и производство на електрична енергија) се во корелација со протекувањето низ турбината и варијацијата на нивото на вода во акумулацијата.
- Нивото на вода во акумулацијата се одликува со варијации во тек на разгледуваниот период, при што подолг период се во зона под котата на нормално ниво во акумулацијата.
- ХЕЦ достигнува до максимално инсталирано протекување од $66 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Максималната анагажирана снага на ХЕЦ изнесува $55,39 \text{ MW}$, додека инсталираната снага на ХЕЦ е 82 MW .
- Средногодишното производство на електрична енергија од ХЕЦ изнесува 120.08 GWh/год , што е приближно на големината на средногодишно производство од 130 GWh/год , за период 1992 - 2022 година, што укажува на добро совпаѓање на пресметаната и реално произведената електрична енергија.
- Оперативното правило за управување со ХЕЦ е соодветно усвоено, во согласност со големините на пресметаната средногодишна и реално произведената средногодишна електрична енергија.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Весник Нова Македонија, 1962 година, сабота 17 ноември, број 5777, стр. 2
- [2] Tanchev, Lj. (2014) Dams and appurtenant hydraulic structures, 2nd edition, CRC Press
- [3] Годишни извештаи на ЕСМ, 1992 – 2022 година, web: https://www.esm.com.mk/?page_id=530
- [4] US Army Corps of Engineers, HEC ResSim 3.3 User's Manual, web: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/documentation.aspx>
- [5] European Copernicus Program, www.land.copernicus.eu
- [6] Водостопанска основа на Р. Македонија, Книга Е: Енергетика, 1973.