



## АНАЛИЗА НА КАПАЦИТЕТОТ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГИЈА КАЈ ПОВЕЌЕАКУМУЛАЦИСКИ ВОДОСТОПАНСКИ СИСТЕМ

Фросина Пановска<sup>1</sup> Стевчо Митовски<sup>2</sup> Љупчо Петковски<sup>3</sup>

### Резиме

Во согласност со Водостопанската основа од 1973 година, по долниот тек на Црна Река во Мариовско и Тиквешкијата е предвидена изградба на три големи хидросистеми: „Чебрен“, „Галиште“ и „Тиквеш“ – како најнизводна акумулација. Од планираните три системи, изграден е само „Тиквеш“ во далечната 1969 година. ХС „Тиквеш“ обезбедува вода примарно за хидромелиорациите во Тиквешко Поле, а веднаш низводно од браната се наоѓа и прибранската хидроцентрала „Тиквеш“, каде што се произведува електрична енергија од 1969 година. Кон реализација на овие капитални објекти во нашата република, голем број студии и проекти низ годините ја докажуваат техничката и економската изводливост на овие проекти. Во овој реферат, со примена на симулациски математички модел се разгледува производството на електрична енергија на еден комплексен водостопански систем во долниот тек на Црна Река, со вклучување на хидросистеми „Чебрен“ и „Галиште“ како планирани системи и хидросистемот „Тиквеш“ – како систем во функција.

**Клучни зборови:** водостопански системи, повеќенаменски системи, Црна Река, Чебрен, Галиште, Тиквеш, електрична енергија.

## ANALYSIS OF ELECTRICITY PRODUCTION CAPACITY AT MULTI RESERVOIR WATER RESOURCES SYSTEM

Frosina Panovska<sup>1</sup>, Stevcho Mitovski<sup>2</sup>, Ljupcho Petkovski<sup>3</sup>

### Summary

According to the Water Master Plan of 1973, in the lower basin of Crna Reka in Mariovo and Tikvesh regions, construction of three large hydro systems is planned: Chebren, Galishte and Tikvesh – as furthest down the river. From all three planned, only Tikvesh is build, back in 1969. The hydro system Tikvesh provides water primarily for irrigation of Tikvesh region, and right downstream from the dam the powerhouse is located where electricity is produced ever since 1969. Many studies and technical documentation that prove technical and economy feasibility of this system, has been prepared throughout the years. In this paper, with implementation of simulation mathematical models, prospective electricity production is estimated of a complex water resources system in the lower basin of Crna Reka, by implementing Chebren and Galishte as planned system, and Tikvesh – as the existing one.

**Key words:** water resources system, multipurpose systems, Crna Reka, Chebren, Galishte, Tikvesh, electricity

<sup>1</sup> М-р, дипл. град. инж., УКИМ Градежен факултет – Скопје, [frosinapanovska@yahoo.com](mailto:frosinapanovska@yahoo.com)

<sup>2</sup> Доцент д-р, дипл. град. инж., УКИМ Градежен факултет – Скопје, [smitovski@gf.ukim.edu.mk](mailto:smitovski@gf.ukim.edu.mk)

<sup>3</sup> Редовен професор, д-р, дипл. град. инж., УКИМ Градежен факултет – Скопје, [petkovski@gf.ukim.edu.mk](mailto:petkovski@gf.ukim.edu.mk)

## 1. ВОВЕД

Во време кога побарувачката за електричната енергија постојано е во пораст, а користењето на конвенционалните ресурси за производство на електрична енергија предизвикуваат еколошки проблеми, сè поголем притисок се става на хидроенергијата како една од најчистите извори на енергија [1]. Во Република Македонија, околу една третина од вкупното годишно производство на електрична енергија доаѓа од хидроенергија [2]. Но, ни половина од хидроенергетскиот потенцијал во земјава не е искористен досега.

Голем број хидросистеми во државата се изградени во време кога водата ја имало во изобилие, а потрошувачката била скромна, па истите се градени како еднонаменски системи (водоснабдителни системи, системи за наводнување, системи за заштита од поплави и др.). Денес, поради зголемениот притисок врз водните ресурси, потребно е да се најде алатка преку која ќе се направи анализа на пренамена на еднонаменските во повеќенаменски системи, а новопланираните ќе се планираат исклучиво како повеќенаменски системи. Во двата случаи – подобрување на ефикасноста на старите или изградба на сосема нови водостопански системи - се потребни силни анализи во однос на капацитетот за производство на електрична енергија.

Анализи од овој тип се прават со симулациски модели – математички модели кои го репродуцираат однесувањето на хидроцентралите под одреден хидролошки влез и физички параметри (капацитет на доведен орган на ХЕЦ, инсталираност на турбина, капацитет на преливен орган, темелен испуст, итн.) [3]. Симулациските модели почнуваат интензивно да се развиваат во средината на 90-тите години на минатиот век, а нивниот напредок го следи напредокот на сметачките машини и технологиите. Голем број софтверски пакети се развиени за изработка на општи симулациски модели, како MITSIM, WEAP, RIBASIM, HEC ResSim.

Во овој реферат во детали е опишан симулацискиот модел направен за хидропотенцијалот на Црна Река во нејзиниот долен тек, со примена на софтверскиот пакет HEC ResSim. Во моделот, како влезни параметри се внесени мерени податоци за протеците на реката на три мерни места – Расимбегов мост, Галиште и Тиквеш - потоа во моделот се внесени физички параметри на системите, онака како што се планирани во најновата техничка документација или како што се изведени, и последно – во моделот е внесена оперативната политика под која треба да работи една хидроцентрала. Црна Река е една од најголемите притоки на реката Вардар, со средногодишен протек од  $Q_{aver}=30 \text{ m}^3/\text{s}$  пред влез во Тиквешко Езеро и басен со големина од  $5890 \text{ km}^2$  во југозападниот дел од земјава. Во 1968 година е изградена првата хидроцентрала на Црна Река – ХЕЦ „Тиквеш“, со инсталирана моќност од  $Q_{ins}=4 \times 36 \text{ m}^3/\text{s}$  и  $P_{ins}=113 \text{ MW}$ . Концептот за искористување на хидроенергијата од Црна Река датира уште од почетоките на XX век, а детални технички параметри за водостопанските системи долж реката се дадени во Водостопанската основа од 1973 година. Во истата е предвидено во долниот тек на Црна Река да се изградат три каскадни акумулации со брани и прибрански хидроцентрали – „Чебреш“, како најузводна, „Галиште“ и „Тиквеш“ [4]. Денешните технички решенија за долниот тек на Црна Река се изменети по однос на првичните поради промената на пазарот на електрична струја како и зголемената потрошувачка. Но, ни едно од предвидените технички решенија не е изведено сè уште, освен хидросистемот „Тиквеш“, кој е изведен како прв од предвидените каскади.

Целта на овој реферат е да го нагласи значењето на овие објекти со приказ на можното производство на електрична енергија на годишно ниво.

## 2. ПРИМЕНЕТИ МЕТОДИ

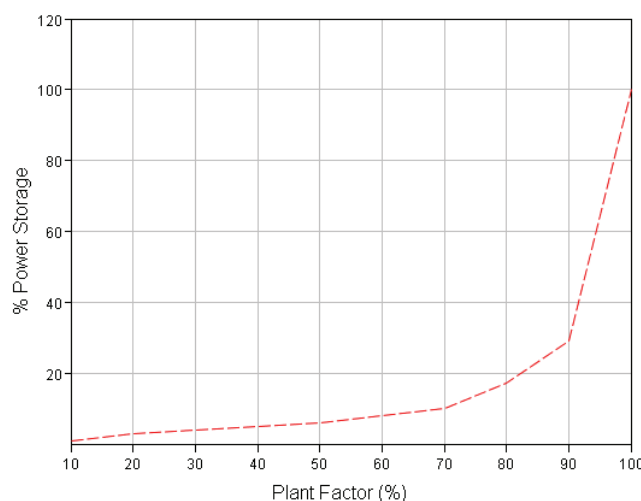
Применети се симулациски математички модели за анализите. Симулацискиот модел претставува математички модел на системот, во кој описот на системот е даден преку логички зависности и математички релации [3]. Симулациските модели во реалност претставуваат поедноставена верзија на прототипот или реалниот водостопански систем. Но, погодноста во користењето на системи од овој тип е примената на различни влезни параметри, промена на физичките параметри или оперативните правила, и согледување на одговорот на системот пред негово имплементирање на реалниот водостопански систем [3].

HEC ResSim е применет како софтвер за креирање на симулациските модели. Софтверот се состои од три основни модули: (1) Watershed Setup, или генерална конфигурација на системот, (2) Reservoir Network, каде што се внесуваат сите физички параметри на системот, се создаваат оперативни политики, и (3) Simulation Module, каде што се повикуваат создадените модели со претходните два модули и се спроведува анализата и се согледуваат излезните резултати.

Разработени се три модели. Со цел споредба на резултатите со иницијалната состојба, т.е. постојната состојба на системот, првиот модел – Алтернатива 0 е направена само за хидросистемот „Тиквеш“ со браната, акумулацијата и хидроцентралата. Вториот модел – Алтернатива 1 претставува надградба на првиот, при што покрај „Тиквеш“ се вклучени и хидросистемите „Галиште“ и „Чебрен“. Во Алтернатива 2, акумулацијата Чебрен е поделена на две помали акумулации, а целиот систем се состои од ХС Скочивир, ХС Чебрен, ХС Галиште и ХС Тиквеш [5].

За сите модели се направени подалтернативи со анализа на капацитетот на производството на хидроцентралите со промена на оперативните политики. Имено, со цел истражување на оптималната оперативна политика, применети се три различни зависности за работата на хидроцентралите во зависност од наполнетоста во акумулацијата: (1) Low non-linear, (2) Linear, и (3) High non-linear.

Оперативното правило „Low non-linear“ претставува зависност меѓу работата на хидроцентралата и наполнетоста во акумулацијата, при што хидроцентралата работи со полн капацитет и при ниски наполнетости во акумулацијата (слика 1).



Слика 1. Оперативно правило „Low non-linear“.

Оперативното правило „Linear“ претставува линеарна зависност меѓу наполнетоста на акумулацијата и работата на хидроцентралата (слика 2).



Билансната равенка за системот е:

$$V1_i = V1_{i-1} + X1_i - [Y1_i + Y1_i^N + Y1_i^{isp}] \quad \dots(1)$$

Истекувањата од акумулацијата се:

$$Y1_i = Y1_i^{preliv} + Y1_i^{ispust} + Y1_i^{HEC} \quad \dots(2)$$

$$Y1_i^N \leq PN_i \quad \dots(3)$$

$$Y1_i^{isp} = f(Z_{akum}, T) \quad \dots(4)$$

,при што:

$X1_i$	- хидролошки влез во акумулацијата во $i$ -тиот временски чекор,
$Y1_i^{isp}$	- загуби на вода од акумулацијата поради испарување,
$Y1_i^{HEC}$	- протек на вода низ доводниот орган на ХЕЦ,
$Y1_i^{preliv}$	- вода која прелива,
$Y1_i^{ispust}$	- протек низ темелен испуст,
$Y1_i^N$	- испорачани количини на вода за мелиорациите,
$PN_i$	- потреби за вода за мелиорациите,
$Y2_i$	- вкупни истекувања од акумулацијата „Тиквеш“ во $i$ -тиот временски чекор,
$V1_i$	- волумен на вода во акумулацијата во $i$ -тиот временски чекор.

Како влезен хидролошки параметар се внесени мерени дотекувања на Црна Река на мерно место Тиквеш, во периодот од 1946 до 2005 година (60-годишни низи). Бидејќи во моделот се користат мерени податоци, истиот претставува детерминистички симулациски модел. Временскиот чекор во анализите е еден ден.

За потребите за наводнување на Тиквешко Поле се користени низи на податоци од испорачани количини на вода во периодот од 2005 до 2012 година. Наводнувањето се случува само во одреден дел од годината – во вегетациониот период на растенијата, од март до септември. Просечните вредности од потребите за наводнување изнесуваат од 2 до 8 m<sup>3</sup>/s на ден.

## 2.2. Физички карактеристики во моделот

Елементи за кои се дефинирани физички карактеристики во моделот, се: (1) акумулација „Тиквеш“, (2) ХЕЦ „Тиквеш“ со доводен орган, (3) преливник, (4) довод за мелиорациите и (5) темелен испуст.

Акумулацијата „Тиквеш“ е дефинирана преку крива на површини и крива на волумени.

Капацитетот на хидроцентралата се дефинира преку неколку параметри:

- А) капацитет на доводен орган,
- Б) инсталирана моќност на турбините,
- В) губитоци на енергија низ доводниот орган,
- Г) промена на коефициент на корисно дејство во зависност од протекот,
- Д) крива на протек за одводна вада.

Сите овие податоци му се потребни на моделот за математички да го пресмета производството на електрична енергија во секој временски чекор, во согласност со равенството:

$$E = \frac{\rho g Q H t}{\eta} = \dots [W] \quad \dots(5)$$

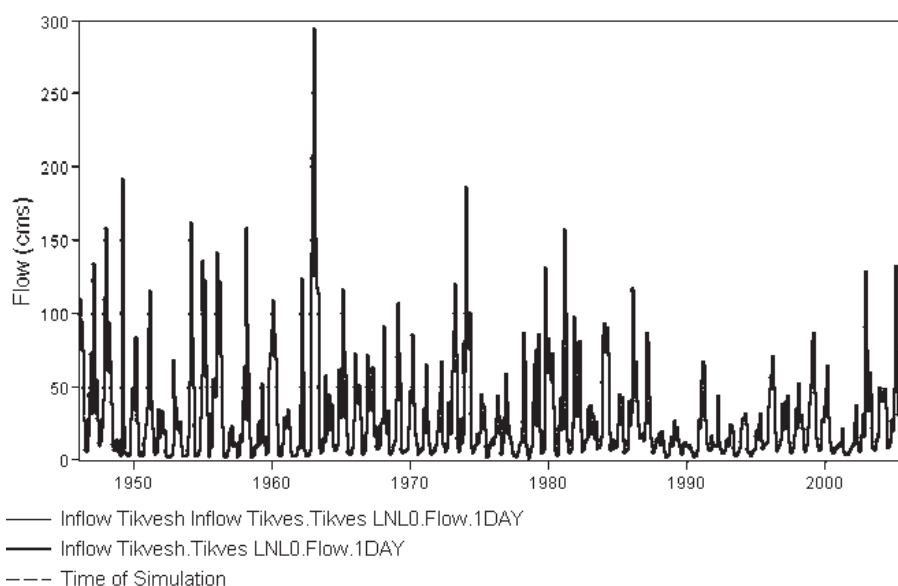
при што:

E - произведена електрична енергија во Watt,

$Q$  - протек во  $m^3/s$ ,  
 $H$  - нето пад во  $m$ ,  
 $t$  - временски чекор, во  $hrs$ ,  
 $\eta$  - коефициент на корисно дејство.

Моделираната хидроцентрала е со 4 турбини, секоја со инсталирана моќност од 28.23 MW – идентично на реалната инсталираност на ХЕЦ „Тиквеш“.

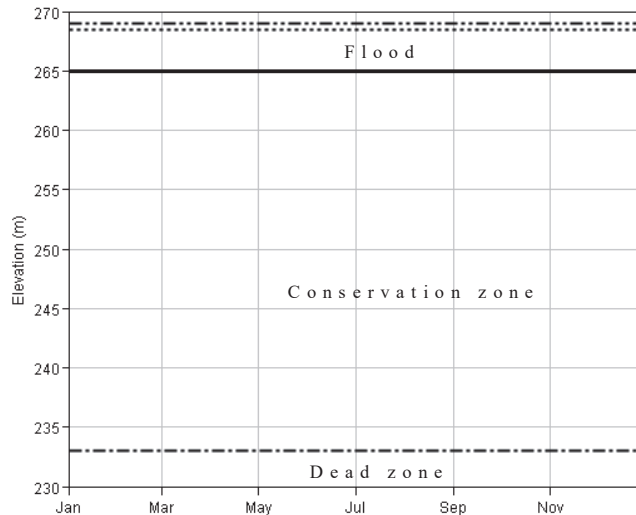
Капацитетот на преливникот е дефиниран преку крива на пропусна моќност на преливникот, кој има максимален капацитет да прими  $Q_{10\ 000} = 2150 m^3/s$  со преливна височина од  $H_p = 3.5m$ . Преливниот раб се наоѓа на кота на нормално ниво  $H = 265 m.n.v.$  Максималното водно ниво во акумулацијата изнесува  $H_{max} = 268.5 m.n.v.$ , а круната се наоѓа на  $H_{kruna} = 270 m.n.v.$



Слика 5. Хидрограм на мерени протечи на мерно место Тиквеш, Црна Река, во периодот 1946 - 2005.

Симулацискиот модел, покрај физички карактеристики, за спроведување на анализата потребно е да има дефинирани оперативни политики за работа. Најпрво, акумулацијата се дели во неколку зони, а за секоја зона се дефинираат посебни правила. Со креирање на моделот, софтверот дефинира од почеток три зони на акумулацијата: (1) Flood zone – зона над кота на прелевање, (2) Conservation zone – зона за која се дефинираат режимите за работа на водостопанскиот систем, во согласност со потребите на водокорисниците. Така, во оваа зона ќе се дефинираат правила за работа на хидроцентралата и доводниот орган на мелиорациите, во случајот на Алтернатива 0; (3) Dead zone – зона на мртов простор, во кој не може да се дефинираат никакви правила бидејќи тој ја претставува зоната предвидена за пополнување на акумулацијата со нанос.

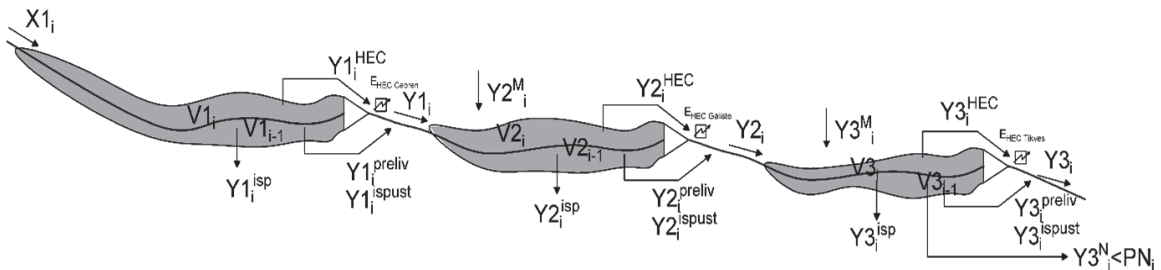
За акумулацијата „Тиквеш“, зона (1) е дефинирана над кота на нормално ниво 265 m.n.v. и под кота на круна 270 m.n.v. Во оваа зона се дефинираат правила за активирање на преливникот и темелниот испуст со цел брзо празнење на акумулацијата и доведување на истата до кота на нормално ниво 265 m.n.v. Зона (2) е дефинирана под кота на нормално ниво 265 m.n.v. и над кота на минимално ниво од 233 m.n.v. Во оваа зона се дефинираат правила за работа на хидроцентралата и на доводниот орган на мелиорациите. Зона (3) се наоѓа под 233 m.n.v. (Слика 12)



Слика 12. Дефинирање на зони во акумулацијата во HEC ResSim.

## 2.2. Алтернатива 1

Во моделот именуван како Алтернатива 1, моделот Алтернатива 0 е надополнет со уште два хидросистеми – „Чебрен“ и „Галиште“. Шематски приказ на моделот е прикажан на Слика . „Чебрен“ е прв во низата каскади, со најголема акумулација од  $555 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Акумулацијата „Галиште“ почнува веднаш низводно од Чебрен, со големина на акумулацијата од  $256 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Најнизводна акумулација во каскадата е „Тиквеш“, со карактеристики идентични како во Алтернатива 0.



Слика 7. Шематски приказ на моделот Алтернатива 1.

За вклучување на меѓусебна работа на акумулациите во каскада, во HEC ResSim се повикува оперативното правило Tandem Operation Rule. Со повикување на ова правило, узводната акумулација „работи“ во насока на постигнување билансна равенка на низводната акумулација [5].

$$V1_i = V1_{i-1} + X1_i - [Y1_i + Y1_i^{isp}] \quad \dots(6)$$

$$V2_i = V2_{i-1} + X2_i^M - [Y2_i + Y2_i^{isp}] \quad \dots(7)$$

$$V3_i = V3_{i-1} + X3_i^M - [Y3_i + Y3_i^N + Y3_i^{isp}] \quad \dots(8)$$

Излезите од акумулациите се дефинирани како:

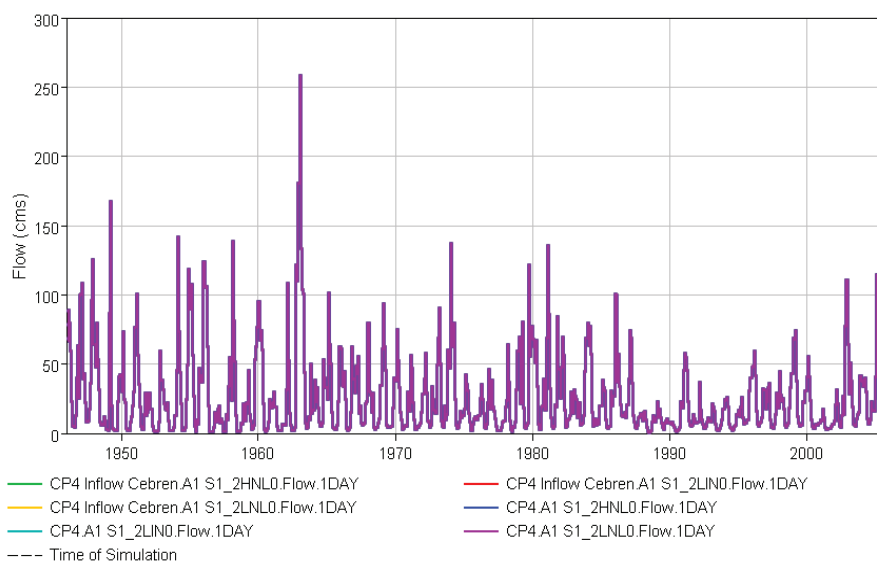
$$Y1_i = Y1_i^{preliv} + Y1_i^{ispust} + Y1_i^{HEC} \quad \dots(9)$$

$$Y2_i = Y2_i^{preliv} + Y2_i^{ispust} + Y1_i^{HEC} \quad \dots(10)$$

$$Y3_i = Y3_i^{preliv} + Y3_i^{ispust} + Y3_i^{HEC} \quad \dots(11)$$

$$Y3_i^N \leq PN_i \quad \dots(12)$$

$$Y_{1,2,3}^{isp} = f(Z_{akum}, T) \quad \dots(13)$$

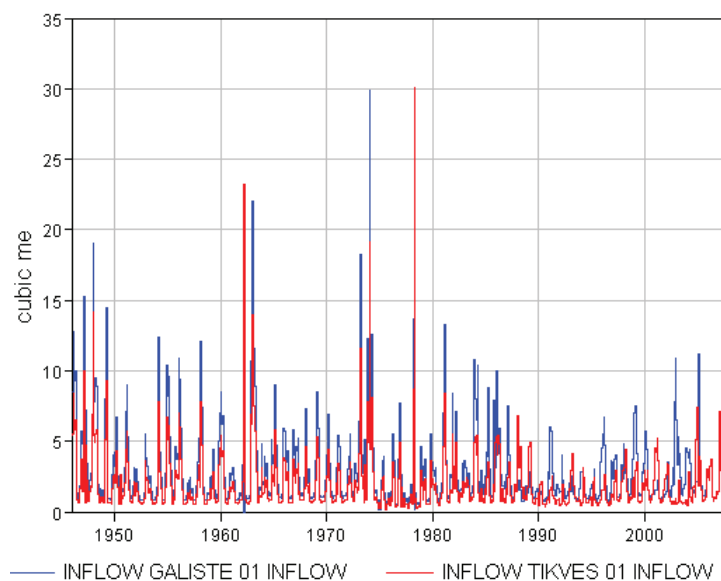


Слика 13. Хидрограм на мерени протекувања за акумулација Чебрен, за периодот од 1946 до 2005 година.

Хидролошкиот влез во акумулацијата „Чебрен“ претставуваат повторно мерени дотекувања на мерно место Расимбегов мост на Црна Река, во периодот од 1946 до 2005 година (Слика 13). За акумулацијата „Галиште“ и за „Тиквеш“, исто така, постојат мерени податоци од протекувањата, но бидејќи тие се состојат во протеците мерени на мерно место Расимбегов мост за акумулацијата „Чебрен“, во овој модел, за „Галиште“ и за „Тиквеш“, хидролошкиот влез претставува само дотекот од меѓуслив пресметан како:

$$Q_{GALISTE}^{BASIN} = Q_{GALISTE}^{GAUGED FLOW} - Q_{CEBREN}^{GAUGED FLOW} \quad \dots(14)$$

$$Q_{TIKVES}^{BASIN} = Q_{TIKVES}^{GAUGED FLOW} - Q_{GALISTE}^{GAUGED FLOW} \quad \dots(15)$$



Слика 9. Хидрограм на дотекувања од меѓуслив за „Галиште“ и за „Тиквеш“ (1946 - 2005).



### 2.2.1. Физички карактеристики на моделот

Физичките параметри на системот се дадени во Табела 1. Параметрите за акумулацијата и за хидроцентралата „Тиквеш“ се идентични на тие во Алтернатива 1, т.е. одговараат на постојната состојба на системот. Инсталираната моќност за ХЕЦ „Чебрен“ и за ХЕЦ „Галиште“ е земена соодветно на податоците од Водостопанската основа од 1973 година. За двата системи примарен и единствен водокорисник во моделот е производство на електрична енергија. Наводнување е вклучено за хидросистемот „Тиквеш“.

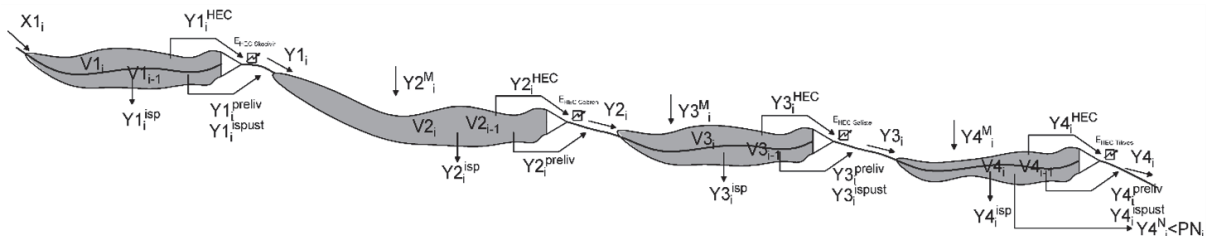
Дефинирани се зони, идентично како во Алтернатива 1, за секој од акумулациите одделно во согласност со параметрите дадени во Табела 1.

Табела 1. Физички параметри на моделот Алтернатива 1.

Систем	Физички параметри		
Тиквеш	Кота на нормално ниво	265	[mNV]
	Кота на минимално ниво	233	[mNV]
	Запремнина на корисен простор	310 10 <sup>6</sup>	[m <sup>3</sup> ]
	Кота на круна на брана	269	[mNV]
	Инсталираност на ХЕЦ	115.32	[MW]
		144	[m <sup>3</sup> /s]
Галиште	Кота на нормално ниво	392	[mNV]
	Кота на минимално ниво	342	[mNV]
	Запремнина на корисен простор	256 10 <sup>6</sup>	[m <sup>3</sup> ]
	Кота на круна на брана	398	[mNV]
	Инсталираност на ХЕЦ	190.83	[MW]
		180	[m <sup>3</sup> /s]
Чебрен	Кота на нормално ниво	565	[mNV]
	Кота на минимално ниво	515	[mNV]
	Запремнина на корисен простор	555 10 <sup>6</sup>	[m <sup>3</sup> ]
	Кота на круна на брана	567	[mNV]
	Инсталираност на ХЕЦ	324.48	[MW]
		231	[m <sup>3</sup> /s]

### 2.3. Алтернатива 2

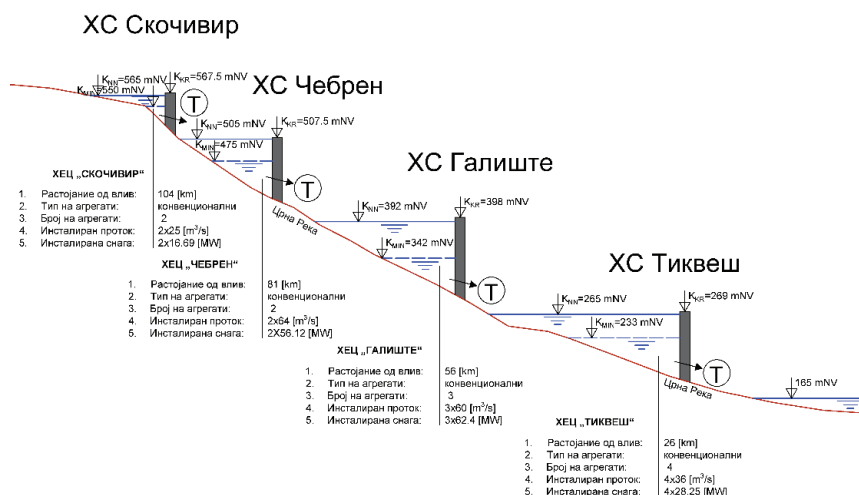
Симулацискиот модел за Алтернатива 2 е креиран како каскаден систем со четири акумулации вдолж долниот тек на Црна Река: Тиквеш, Галиште, Чебрен и Скочивир (Слика ). Оваа алтернатива се разликува во однос на Алтернатива 1 по тоа што браната „Чебрен“ е пониска за 60 m во однос на истата во Алтернатива 1, додека спротиводно од акумулацијата „Чебрен“ е моделирана и браната со акумулација „Скочивир“ во системот.



Слика 10. Шематски приказ на конфигурацијата на системот за Алтернатива 2.

Браната „Чебрен“ е со височина  $H=132.50$  m, со кота на круна на брана  $K_{KR}= 507.5$  mNV. Кај акумулацијата „Чебрен“, со корисен волумен од  $V_{kor}= 555 \times 10^6$  m<sup>3</sup> во

алтернатива 1 (т.н. висок Чебрѐн), со намалувањето на висината на браната се намалува и корисниот простор на акумулацијата во рамки на Алтернатива 2 и изнесува  $V_{kor}=150 \times 10^6 \text{ m}^3$ . На сметка на намалувањето на висината на браната „Чебрѐн“, спротивводно од преградното место на околу 20 km е предвидена изведба на уште една брана – „Скочивир“. Висината на браната е предвидено да биде  $H_{K\_SKOCIVIR}=77.50 \text{ m}$  со волумен на корисен простор од  $V_{KOR}=7.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



Слика 11. Надолжен профил на конфигурацијата Алтернатива 2 за хидроенергетско искористување на водите од долниот тек на Црна Река.

Останатите хидросистеми што влегуваат во оваа конфигурација – „Тиквеш“ и „Галиште“ - ги имаат истите карактеристики како и во Алтернатива 1. Краток опис на физичките параметри на системот е даден во **Error! Reference source not found..**

Билансните равенки за конфигурацијата на симулацискиот модел за Алтернатива 2 се дадени во продолжение:

$$V1_i = V1_{i-1} + X1_i - [Y1_i + Y1_i^{isp}] \quad \dots(16)$$

$$V2_i = V2_{i-1} + X2_i^M - [Y2_i + Y2_i^{isp}] \quad \dots(17)$$

$$V3_i = V3_{i-1} + X3_i^M - [Y3_i + Y3_i^{isp}] \quad \dots(18)$$

$$V4_i = V4_{i-1} + X4_i^M - [Y4_i + Y4_i^N + Y4_i^{isp}] \quad \dots(19)$$

Излезот од акумулациите е еднаков на:

$$Y1_i = Y1_i^{preliv} + Y1_i^{ispust} + Y1_i^{HEC} \quad \dots(20)$$

$$Y2_i = Y2_i^{preliv} + Y2_i^{ispust} + Y1_i^{HEC} \quad \dots(21)$$

$$Y3_i = Y3_i^{preliv} + Y3_i^{ispust} + Y3_i^{HEC} \quad \dots(22)$$

$$Y4_i = Y4_i^{preliv} + Y4_i^{ispust} + Y4_i^{HEC} \quad \dots(23)$$

$$Y4_i^N \leq PN_i \quad \dots(24)$$

$$Y1,2,3,4_i^{isp} = f(Z_{akum}, T) \quad \dots(25)$$

при што:

$X1_i$  – хидролошки влез во акумулација „Скочивир“ во  $i$ -тиот момент,

$X2,3,4_i^M$  – хидролошки влез од меѓуслив во акумулација Чебрѐн, Галиште и Тиквеш во  $i$ -тиот момент,

$Y1,2,3,4_i^{isp}$  – губитоци на вода поради испарување од слободна водна површина во  $i$ -тиот момент за акумулација Скочивир, Чебрѐн, Галиште и Тиквеш,

$Y_{1,2,3,4}^{HEC_i}$  – количина на вода низ доведен орган за ХЕЦ Скочивир, Чебрен, Галиште и Тиквеш во  $i$ -тиот момент,

$Y_{1,2,3,4}^{preliv_i}$  – количина на вода која прелева низ преливниците на ХС Скочивир, Чебрен, ХС Галиште и ХС Тиквеш во  $i$ -тиот момент,

$Y_{4_i}^N$  – испорачани количини на вода за наводнување на ХМС „Тиквешко Поле“ во  $i$ -тиот момент,

$PN_i$  – потребни количини на вода за наводнување на ХМС „Тиквешко Поле“ во  $i$ -тиот момент,

$Y_{1,2,3,4_i}$  – вкупни истекувања од акумулација Скочивир, Чебрен, Галиште и Тиквеш низводно од преградното место, во  $i$ -тиот момент,

$V_{1,2,3,4_i}$  – наполнетост во акумулацијата Скочивир, Чебрен, Галиште и Тиквеш во  $i$ -тиот момент.

### 2.3.1. Физички параметри на системот

Инсталираноста на ХЕЦ „Тиквеш“ е идентична како и во претходните разработени алтернативи –  $P_{INS} = 4 \times 28.8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Идентично како во Алтернатива 1, инсталираноста на ХЕЦ „Галиште“ е задржана на  $P_{INS} = 3 \times 60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Инсталираноста на ХЕЦ „Чебрен“ е драстично намалена во споредба со претходната алтернатива и во овој модел таа изнесува  $P_{INS} = 2 \times 64 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Инсталираноста на ХЕЦ „Скочивир“ е идентична како инсталираноста на ХЕЦ „Чебрен“ –  $P_{INS} = 2 \times 60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Табела 2. Физички карактеристики на системите за Алтернатива 2.

		Алт. 2		
Систем	Физички параметри			
Тиквеш	Кота на нормално ниво	265	[mNV]	
	Кота на минимално ниво	233	[mNV]	
	Запремина на корисен простор	$310 \cdot 10^6$	[m <sup>3</sup> ]	
	Кота на круна на брана	269	[mNV]	
	Инсталираност на ХЕЦ		115.32	[MW]
			144	[m <sup>3</sup> /s]
Галиште	Кота на нормално ниво	392	[mNV]	
	Кота на минимално ниво	342	[mNV]	
	Запремина на корисен простор	$256 \cdot 10^6$	[m <sup>3</sup> ]	
	Кота на круна на брана	398	[mNV]	
	Инсталираност на ХЕЦ		190.83	[MW]
			180	[m <sup>3</sup> /s]
Чебрен	Кота на нормално ниво	505	[mNV]	
	Кота на минимално ниво	475	[mNV]	
	Запремина на корисен простор	$150 \cdot 10^6$	[m <sup>3</sup> ]	
	Кота на круна на брана	507.5	[mNV]	
	Инсталираност на ХЕЦ		112.24	[MW]
			128	[m <sup>3</sup> /s]
Скочивир	Кота на нормално ниво	565	[mNV]	
	Кота на минимално ниво	550	[mNV]	
	Запремина на корисен простор	$7.29 \cdot 10^6$	[m <sup>3</sup> ]	
	Кота на круна на брана	567.50	[mNV]	
	Инсталираност на ХЕЦ		69.6	[MW]
			120	[m <sup>3</sup> /s]

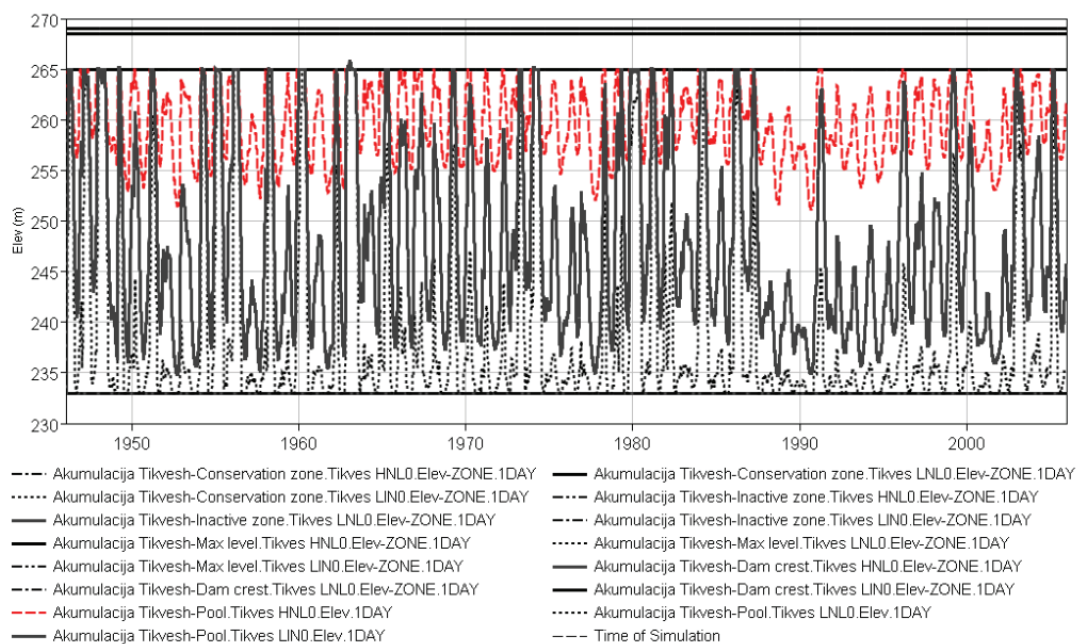
### 3. РЕЗУЛТАТИ ОД АНАЛИЗИТЕ

HEC ResSim како софтвер дава повеќе параметри како излезни резултати од анализите. Параметри кои ни се од интерес со овие анализи, а ќе бидат во продолжение дискутирани, се: (1) производство на електрична енергија [MWh/day, MWh/year], (2) ангажирана моќност [MW], и (3) одржувано водно ниво во акумулациите [м.н.в.].

#### 3.1. Алтернатива 0

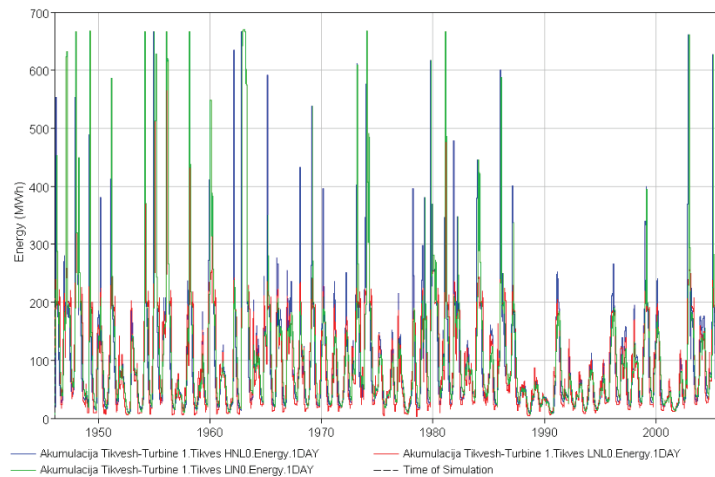
Во овој модел се спроведени анализи за акумулацијата „Тиквеш“, со водокорисници: (1) наводнување на Тиквешко Поле, и (2) производство на електрична енергија. Резултати од анализите ќе се коментираат само за оперативното правило за работата на хидроцентралите – High Non Linear, со чијашто имплементација се обезбедува најголемо производство на електрична енергија од споредените три оперативни политики.

Со примена на оперативното правило High Non Linear, водното ниво во акумулацијата „Тиквеш“ во просек се одржува на кота 259.95 m.n.v (Слика). На дневно ниво, во просек ангажираната моќност на централата изнесува  $P_{aver}=18.84$  MW, а производството на електрична енергија изнесува  $E_{aver}=452.28$  MWh/day. На годишно ниво, производството на електрична енергија е околу 160 GWh/year. Со примена на оперативните правила Low non linear и Linear, производството на електрична енергија на годишно ниво е  $E_{aver}=149.4$  GWh/year и  $E_{aver}=156.6$  GWh/year, соодветно.

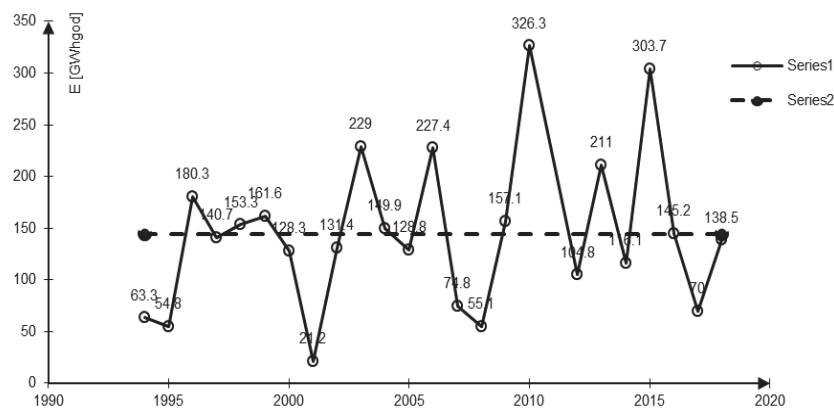


Слика 12. Варијации на водното ниво во акумулацијата „Тиквеш“ со примена на оперативните правила (1) Low non Linear, (2) Linear, (3) High non linear.

За споредба на добиените резултати за производството на електрична енергија, користени се податоци за средногодишното производство на електрична енергија од страна на ХЕЦ „Тиквеш“ за периодот од 1994 до 2016 година (Слика ). Имено, според резултатите од симулацискиот модел, средногодишното производство на електрична енергија изнесува 160 GWh/year, додека средна вредност од испорачаните количини на електрична енергија за периодот од 1994 до 2016 година изнесува 150 GWh/year, со флукуации во годишното производство во зависност од хидролошките услови.



Слика 13. Производство на електрична енергија по тубина за ХЕЦ „Тиквеш“ за 60 години симулиран временски период.



Слика 14. Средногодишно производство на електрична енергија од страна на ХЕЦ „Тиквеш“ [2].

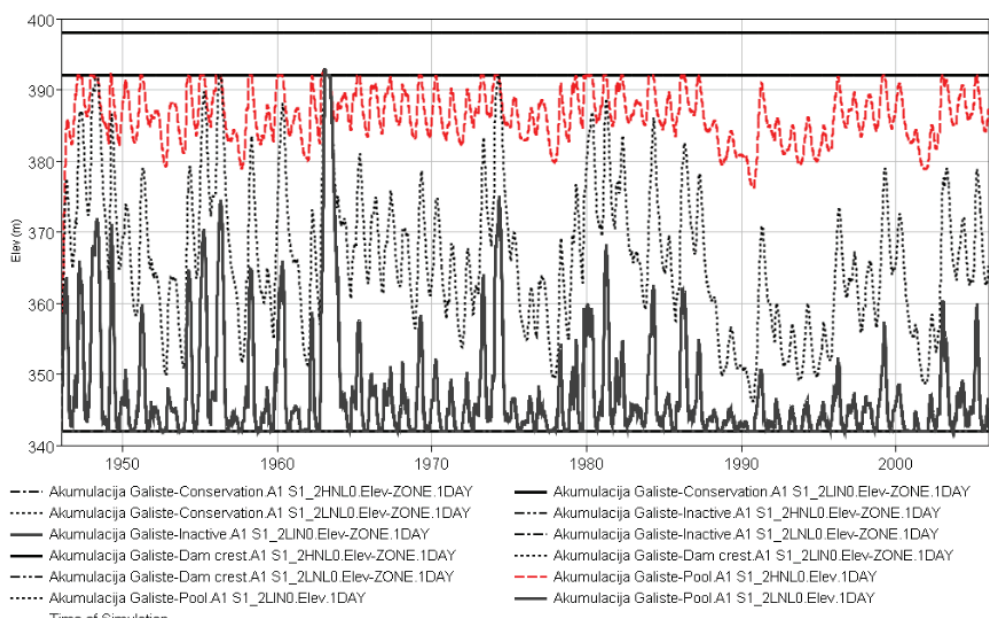
### 3.2. Алтернатива 1

Симулацискиот модел Алтернатива 1 се состои од три каскадни акумулации со хидроцентрали: „Чебрен“, „Галиште“ и „Тиквеш“. Централите се опремени со конвенционални агрегати и нивните физички карактеристики се во детали опишани во поглавјето 0. Резултати од анализите ќе се коментираат само за оперативното правило за работата на хидроцентралите – High Non Linear, со чијашто имплементација се обезбедува најголемо производство на електрична енергија од споредените три оперативни политики.

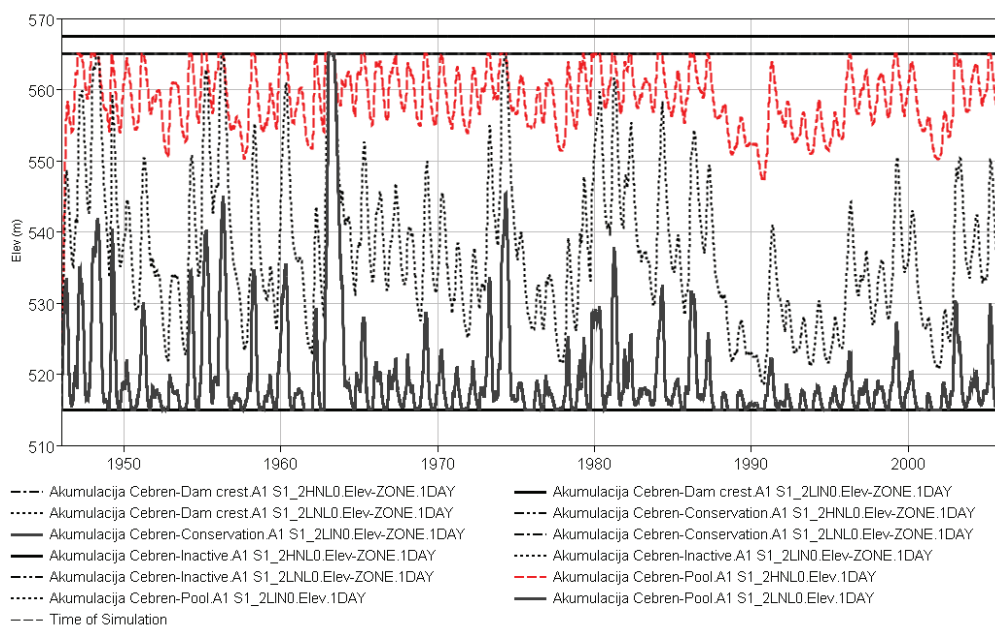
На Слика и на Слика се дадени варијации на водното ниво во акумулациите „Чебрен“ и „Галиште“ респективно, при различни оперативни политики на работа на хидроцентралите. Највисоки вредности се одржуваат со примена на оперативното правило High Non Linear, со просечно одржано ниво од 386.31 м.н.в за „Галиште“ и 558.68 м.н.в за „Чебрен“. За „Тиквеш“ просечно одржано ниво е 260.90 м.н.в. Производството на електрична енергија во просек на годишно ниво изнесува

$E_{aver}=243.1$  GWh/year за ХЕЦ „Чебрен“,  $E_{aver}= 196.7$  GWh/year за ХЕЦ „Галиште“ и  $E_{aver}= 153.1$  GWh/year за „Тиквеш“. Со вклучување на ХЕЦ „Чебрен“ и ХЕЦ „Галиште“ во енергетскиот систем во Македонија на годишно ниво ќе се добијат дополнителни 439 GWh енергија:

$$E_{Chebren} + E_{Galiste} = 243.1 + 196.7 = 439.8 \text{ GWh/year} \quad \dots(26)$$



Слика 15. Варијации на водното ниво во акумулацијата „Галиште“.



Слика 16. Варијации во водното ниво на акумулацијата „Чебрен“.

### 3.3. Алтернатива 2

Во оваа алтернатива се моделирани четири каскадни акумулации со хидроцентрали: Скочивир, Чебрен, Галиште и Тиквеш. За секоја акумулација се направени модели за секоја оперативна политика за хидроцентралите одделно, а резултати ќе се коментираат само за High Non Linear.

Акумулацијата „Скочивир“, со волумен на корисен простор од  $V_{kor} = 7.29 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , претставува прва во каскадата акумулации во долниот тек на Црна Река. На Слика е даден приказ на промената на водното ниво во акумулацијата, со примена на оперативните правила High Non Linear за работата на хидроцентралата. Во просек, нивото во акумулацијата во текот на 60 години анализиран период изнесува 500.64 mNV.

На годишно ниво, просечната произведена електрична енергија од ХЕЦ „Скочивир“ изнесува  $E_{\text{SKOCIVIR}} = 81.73 \text{ GWh/year}$ .

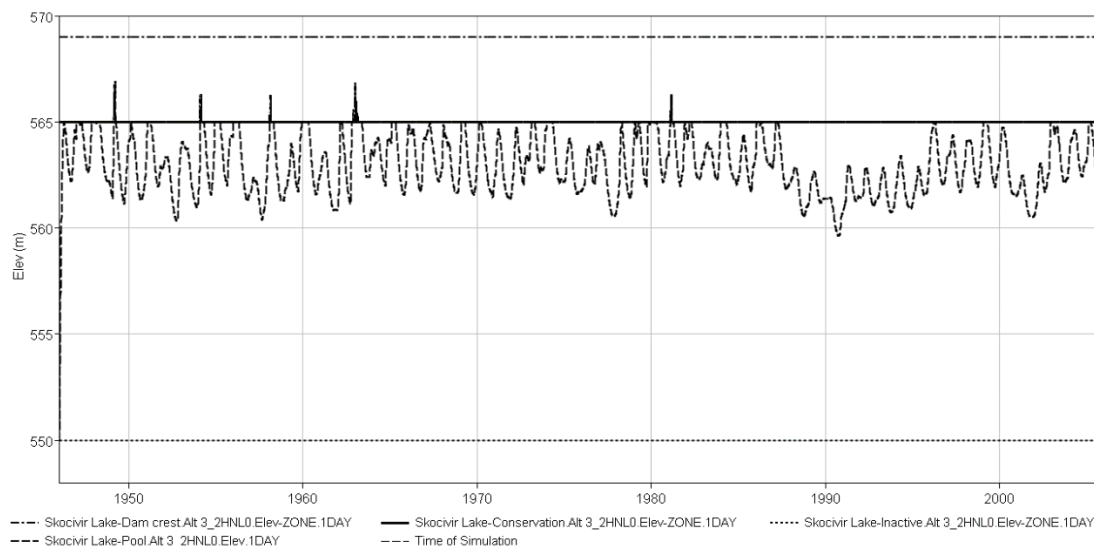
Акумулацијата „Чебрен“, во рамки на Алтернатива 2, има волумен на корисен простор од  $V_{\text{kor}} = 150 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , кој е значително намален во однос на корисниот простор на акумулацијата во Алтернатива 1. Просечното водно ниво за анализираниот временски период изнесува  $500.64 \text{ m.n.v.}$  Средногодишното производство на електрична енергија во ХЕЦ „Чебрен“, со намален инсталиран капацитет од  $P_{\text{ins}} = 2 \times 60 \text{ m}^3/\text{s}$ , изнесува  $E_{\text{gen\_T1}} = 239.56 \text{ MWh/day}$  и  $E_{\text{gen\_T2}} = 201.07 \text{ MWh/day}$ .

Просечното водно ниво во акумулација „Галиште“ изнесува  $H_{\text{aver}} = 385.69 \text{ mNV}$ . Средногодишното производство на електрична енергија од страна на трите турбогенераторски блокови во ХЕЦ „Галиште“ изнесува  $E_{\text{aver}} = 196.02 \text{ GWh/god}$ .

Просечно одржано водно ниво во акумулацијата „Тиквеш“ изнесува  $260.53 \text{ m.n.v.}$ , а просечното годишно производство, според анализите во симулацискиот модел, се очекува да биде  $E_{\text{aver}} = 155.23 \text{ GWh/god}$ .

Со вклучување на ХЕЦ „Скочивир“, ХЕЦ „Чебрен“ и ХЕЦ „Галиште“ во енергетскиот систем во Македонија на годишно ниво ќе се добијат дополнителни  $439 \text{ GWh}$  енергија:

$$E_{\text{Skocivir}} + E_{\text{Chebren}} + E_{\text{Galistshte}} = 81.72 + 160.83 + 196.03 = 438.58 \text{ GWh/god} \quad \dots(27)$$



Слика 17. Промена на водното ниво во акумулацијата „Скочивир“ при оперативни правила High Non Linear.

## ЗАКЛУЧОК

Со цел анализа на капацитетите за производство на електрична енергија во долниот тек на Црна Река, со примена на симулациски модели во НЕС ResSim, предложени се две конфигурациски решенија – Алтернатива 1 и Алтернатива 2, а за споредба со моменталната (изградена) состојба направен е моделот Алтернатива 0, кој соодветствува на постојната состојба – ХЕЦ „Тиквеш“. Во Алтернатива 1 се моделирани три каскадни акумулации со хидроцентрали – Чебрен, Галиште и Тиквеш. Во Алтернатива 2 моделирани се четири каскадни акумулации со хидроцентрали – Скочивир, Чебрен, Галиште и Тиквеш, при што на сметка на намалување на акумулацискиот простор на „Чебрен“ и намалување на висината на браната, предвидена е четвртата брана – „Скочивир“, која е прва во каскадата.

За анализа на производството на електрична енергија применет е временски чекор од еден ден, а временската рамка е идентична на периодот на податоците од мерени протечи на реката – од 1946 до 2005 година, 60 години.

Применети се три различни оперативни правила за работа на хидроцентралите за да се пронајде оптималната зависност меѓу ангажираноста на хидроцентралата и заполнетоста во акумулацијата. Максимални вредности за производството на електрична енергија се добиваат со примена на оперативното правило High Non Linear, при што ангажираноста на хидроцентралата е висока само за високи водни нивоа во акумулацијата.

Во Алтернатива 0, каде што се разгледува хидросистемот „Тиквеш“ како единствен, производството на електрична енергија варира од 149 GWh/year за Low Non Linear оперативното правило, 154 GWh/year за Linear и 160 GWh/year за High non linear. Од сумарните резултати, може да се воочи дека само со промена на оперативните правила на постојните капацитети, на годишно ниво може да се добијат 10 GWh/year електрична енергија.

Со надградба на системот со ХЕЦ „Чебрен“ и ХЕЦ „Галиште“, како што е предвидено во Алтернатива 2, на годишно ниво производството на електрична енергија од овој систем ќе изнесува околу 440 GWh/year, без ХЕЦ „Тиквеш“.

Со конфигурацијата на системот како во Алтернатива 3, каде што место „висок“ Чебрен, предвидена е брана со акумулација „Скочивир“, на годишно ниво, без ХЕЦ „Тиквеш“, ќе се произведуваат околу 440 GWh/year.

Со споредба на добиените резултати од Алтернатива 1 и Алтернатива 2, не е можно да се оцени која алтернатива е оптимална по однос на производството на електрична енергија бидејќи и двете конфигурации даваат слично производство на електрична енергија на годишно ниво.

## КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. K. Jermar, Water resources and water management, Munich: ELSEVIER, 1987.
- [2] AD ELEM, “2016 Annual report on AD ELEM,” AD ELEM, Skopje, 2016.
- [3] L. Votruba, Analysis of water resources, Prague: Technical University of Prague, 1988.
- [4] ХЕП Скопје, Основен проект за енергетско искористување на Црна Река, Скопје, 1961.
- [5] F. Panovska, Simulation model of multi reservoir system for hydropower generation - master thesis, Skopje: Faculty of Civil Engineering in Skopje, 2019.
- [6] HEC Ressim 3.1, User's Manual, USACE, Hydrologic Engineering Center, 2013.