

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidatka:

Martina Nartnik

**Izdelava modela Riverware za reko Savo in
analiza možnosti črpanja iz akumulacije HE
Medvode v akumulacijo HE Mavčiče**

Diplomska naloga št.: 55

Mentor:
prof. dr. Mitja Brilly

Somentor:
doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ljubljana, 23. 6. 2006

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana MARTINA NARTNIK izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom
»IZDELAVA MODELA RIVERWARE ZA REKO SAVO IN ANALIZA MOŽNOSTI
ČRPANJA VODE IZ AKUMULACIJE HE MEDVODE V AKUMULACIJO HE
MAVČIČE«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, junij 2006

Martina Nartnik

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004.42: 627.81 (043.2)
Avtor:	Martina Nartnik
Mentor:	prof. dr. Mitja Brilly
Somentor:	viš. pred.mag. Andrej Kryžanowski
Naslov:	Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče
Obseg in oprema:	79 str., 16 graf., 18 pregl., 11 sl.
Ključne besede:	program RiverWare, hidroelektrarna Mavčiče, hidroelektrarna Medvode, model črpanja, vršna energija, proizvodnja električne energije

Izvleček

V prvem delu diplomske naloge je predstavljena uporaba programa RiverWare za izračun proizvodnje električne energije na zgornji verigi savskih elektrarn, ki obsega hidroelektrarne Moste, Završnica, Mavčiče in Medvode. Izdelala sem model za hidroelektrarno Moste, izvedena je bila primerjava rezultatov dosežene moči in proizvedene električne energije iz programa RiverWare, ter moči in energije dobljenih na savskih elektrarnah. Primerjava je pokazala prevelika odstopanja med rezultati. Zaradi tega in neustreznih metod dinamike obratovanja se je programski paket RiverWare izkazal za neprimernega.

V drugem delu sem v programu Excel izdelala model črpanja. Model prikazuje delovanje hidroelektrarne Mavčiče z dnevno akumulacijo s funkcijo črpanja. Elektrarna Medvode omogoča obratovanje hidroelektrarn v verigi v dnevnem obratovalnem režimu. Ideja je namreč ta, da naj bi se v nočnem času, v času nižje porabe električne energije, črpala voda iz kompenzacijskega bazena Zbilje v gorvodno ležeči akumulacijski bazen hidroelektrarne Mavčiče. Črpanje poteka pri dotokih v akumulacijski bazen elektrarne Mavčiče od $15 \text{ m}^3/\text{s}$ do $57 \text{ m}^3/\text{s}$. Primerjava proizvodnje električne energije iz modela in obstoječega stanja je pokazala, da se ob upoštevanju črpanja proizvede manj električne energije, vendar je ta dražja, ker se je lahko povečala proizvodnja v času konic.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 004.42: 627.81 (043.2)
Author: Martina Nartnik
Supervisor: prof. dr. Mitja Brilly
Co - supervisor: Andrej Kryžanowski, M.Sc. Civil Eng.
Title: Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče
Notes: 79 p., 16 graf., 18 tab., 11 fig.
Key words: software RiverWare, hydro power plant Mavčiče, hydro power plant Medvode, pumping model, peak energy, electricity production

Abstract

The first part of the graduation thesis presents the application of RiverWare program for the calculation of electricity production in the upper chain of Sava power stations, which comprises the following hydro power plants: Moste, Završnica, Mavčiče and Medvode. I made a model for the hydro power plant Moste, compared the results of power and electricity produced by RiverWare program, as well as power and energy produced by Sava power stations. The comparison showed too high deviations between the results. This was the reason, as well as inadequate methods of operational dynamics, that the RiverWare program package was demonstrated inadequate.

In the second part I made a pumping model in Excel program. The model shows the operation of HPP Mavčiče with daily accumulation with pumping function. HPP Medvode operates in the run – of – river regime and in tandem with the Mavčiče HPP during peak power demand. The idea is that during night time, when electricity consumption is lower, water would be pumped from the compensating reservoir Zbilje into the upstream storage reservoir of the HPP Mavčiče. Pumping is carried out at inflow into the storage reservoir of the HPP Mavčiče from 15 m³/s to 57 m³/s. The comparison of electricity production from the model and the actual state showed that less energy is produced in relation to pumping; however, it is more expensive as the production could be increased in the peak time.

POSVETILO IN ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Mitji Brilly-ju, somentorju mag. Andreju Kryžanowskemu ter vodji centra vodenja na savskih elektrarnah gospodu Mitji Dušaku.

Zahvalila bi se tudi svojim staršema, ki sta mi bila v oporo v času šolanja.

Diplomsko nalogo posvečam pokojnemu očetu, ki mi je bil vzgled s svojo voljo do življenja in dela.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	IZDELAVA MODELA V PROGRAMU RIVERWARE	2
2.1	Program RiverWare	2
2.2	Model Moste	3
2.2.1	Splošni podatki in karakteristike o hidroelektrarni Moste	3
2.2.2	Izdelava modela Moste v programu Riverware	4
2.2.3	Primerjava rezultatov izračunanih na sedežu savskih elektrarn in v programu Riverware	15
3	ANALIZA MOŽNOSTI ČRPANJA VODE IZ AKUMULACIJE HE MEDVODE V AKUMULACIJO HE MAVČIČE	25
3.1	Hidroelektrarna Mavčiče	25
3.2	Hidroelektrarna Medvode	26
3.3	Klasifikacija hidroelektrarn	29
3.3.1	Hidroelektrarne z dnevno izravnavo	30
3.4	Model črpanja	31
3.4.1	Zgradba modela črpanja	33
3.4.1.1	Analiza dodatnega dotoka v Zbiljsko jezero	33
3.4.1.2	Elementi modela črpanja	40
3.4.1.3	Enačbe za izračun modela črpanja	43
3.4.1.4	Karakteristike črpalnega agregata	50
3.4.1.5	Določitev količine črpanja v enem letu in proizvodnje električne energije hidroelektrarne Mavčiče v obdobju črpanja	51
3.4.1.6	Rezultati modela črpanja	56
3.4.1.7	Analiza vrednosti proizvodnje električne energije	74

3.4.1.8	Ocena investicije črpalnega agregata	76
3.5	Zaključek	77
VIRI		79

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vrednosti dodatnega dotoka od leta 1988 – 2005	34
Grafikon 2: Krivulja trajanja pretokov za HE Mavčiče (povpr. obdobje 2002 – 2005)	52
Grafikon 3: Srednji pretok obravnavanega časovnega obdobja	55
Grafikon 4: Krivulja črpanja hidroelektrarne Mavčiče	57
Grafikon 5: Dinamika obratovanja HE Mavčiče (II. obdobje)	65
Grafikon 6: Nihanje gladine v akumulacijskem bazenu HE Mavčiče (II. obdobje)	65
Grafikon 7: Dinamika obratovanja HE Medvode (II. obdobje)	66
Grafikon 8: Nihanje gladine vode v kompenzacijskem bazenu HE Medvode (II. obdobje)	66
Grafikon 9: Dinamika polnjenja in praznjenja bazena HE Mavčiče (II. obdobje)	67
Grafikon 10: Dinamika polnjenja in praznjenja bazena HE Medvode (II. obdobje)	67
Grafikon 11: Dinamika obratovanja HE Mavčiče (X. obdobje)	71
Grafikon 12: Nihanje gladine akumulacijskega bazena HE Mavčiče (X. obdobje)	71
Grafikon 13: Dinamika obratovanja HE Medvode (X. obdobje)	72
Grafikon 14: Nihanje gladine kompenzacijskega bazena HE Medvode (X. obdobje)	72
Grafikon 15: Dinamika polnjenja in praznjenja akumulacijskega bazena HE Mavčiče (X. obdobje)	73
Grafikon 16: Dinamika polnjenja in praznjenja kompenzacijskega bazena HE Medvode (X. obdobje)	73

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razmerje med višino gladine vode v akumulacijskem bazenu in njej pripadajočim volumnom (angl. elevation volume table) (vir: Inštitut za hidravlične raziskave, 1998)	6
Preglednica 2: Neto padec pri maksimalnem pretoku skozi turbine(angl. net head vs max turbine release); (vir SEL d.o.o.)	8
Preglednica 3: Razmerje med maksimalnim kontroliranim prelivom in višino zgornje vode (angl. pool elevation vs max regulated spill); (vir SEL d.o.o.)	9
Preglednica 4: Primerjava rezultatov proizvedene električne energije za obdobje od 1. januarja 2005 do 31. marca 2005	15
Preglednica 5: Primerjava rezultatov doseženih moči za obdobje od 1. januarja 2005 do 31. marca 2005	18
Preglednica 6: Primerjava rezultatov za hidrološko leto 2005	20
Preglednica 7: Vrednosti dodatnega dotoka	35
Preglednica 8: Tabelarični prikaz izračuna višine gladine zgornje vode in bruto volumna za hidroelektrarno Mavčiče	46
Preglednica 9: Tabelarični prikaz izračuna višine gladine zgornje vode in bruto volumna za hidroelektrarno Medvode	47
Preglednica 10: Dotok v akumulacijski bazen Mavčiče, pri katerem ni mogoče črpati	53
Preglednica 11: Spodnja meja črpanja (HE Medvode)	54
Preglednica 12: Obravnavana obdobja s časom trajanja	55
Preglednica 13: Primerjava proizvodnje električne energije hidroelektrarne Mavčiče	59
Preglednica 14: Prvi del modela črpanja - HE Mavčiče ($Q_{dotMav} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)	63
Preglednica 15: Drugi del modela črpanja - HE Medvode ($Q_{dotMav} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)	64
Preglednica 16: Prvi del modela črpanja HE Mavčiče ($Q_{dotMav} = 56 \text{ m}^3/\text{s}$)	68
Preglednica 17: Drugi del modela črpanja HE Medvode ($Q_{dotMav} = 56 \text{ m}^3/\text{s}$)	70
Preglednica 18: Primerjava proizvodnje električne energije HE Mavčiče s finančnega vidika	75

KAZALO SLIK

Slika 1: Delovno okolje programa RiverWare	5
Slika 2: Pogovorno okno objekta hidroelektrarne Moste	10
Slika 3: Simulacijska kontrolna tabela	12
Slika 4: Pogovorno okno analiza zagona modela (angl. model run analysis)	13
Slika 5: Detajlno “dispatch” okno	14
Slika 6: Hidroelektrarna Mavčiče (vir: http://www2.pfmb.uni-mb.si/tehnika (8.3.2006))	26
Slika 7: Hidroelektrarna Medvode (vir: http://www.geoservis.si/instrumenti/hds/cyra-hidroelektrarna.htm (7.4.2006))	28
Slika 8: Dnevni dotok in njegova izraba v hidroelektrarni (vir: Goljevšček, 1962)	30
Slika 9: Sistem hidroelektrarn Mavčiče in Medvode z dodatnim dotokom vode (ΔQ in Q_1) v Zbiljsko jezero	38
Slika 10: Betonska cev na brežini Zbiljskega jezera	39
Slika 11: Močilo v neposredni bližini Zbiljskega jezera	39

OKRAJŠAVE

SEL d.o.o. Savske elektrarne Ljubljana d.o.o.

HE hidroelektrarna

SIT slovenski tolarji

EUR evro

1 UVOD

V današnjem času je zaradi naftne krize električna energija postala pravo bogastvo. Skoraj na vsakem koraku zasledimo članek, morda pogovor ali celo javno razpravo o proizvodnji električne energije. Poznamo različne načine pridobivanja električne energije: termoelektrarne na plin, premog ali uran, elektrarne, ki izkoriščajo plimovanje vode ali moč vetra, sončno obsevanje in nenazadnje ne smemo spregledati hidroelektrarn (rečne, akumulacijske in črpalne), ki poleg zadnjih treh, predstavljajo okolju prijazen način pridobivanja električne energije.

Slovenija kot članica Evropske elektroenergetske interkonekcije, se preko omenjene evropske institucije vključuje v odprti trg električne energije. Zato mora izvajati ukrepe, ki zagotavljajo sigurnost obratovanja ter zanesljivost dobave kvalitetne električne energije. Od skrbnika omrežja se zahteva, da sta si poraba in proizvodnja vsak trenutek v ravnotežju. Zaradi zagotavljanja sistemskih storitev v slovenskem elektroenergetskem sistemu imajo hidroelektrarne izredno veliko vlogo. V primeru zgornje verige savskih elektrarn, elektrarni Mavčiče in Medvode s svojima akumulacijama omogočata dnevno izravnavo in sodelujeta v sistemskih regulacijah v dnevnem obsegu, ki jih povzroča neenakomerna poraba električne energije. Edino hidroelektrarna Moste, elektrarna s tedensko akumulacijo, sodeluje v sistemskih regulacijah v tedenskem obsegu.

Poleg osnovne energetske vloge in zagotavljanja sistemskih storitev v elektroenergetskem sistemu imajo hidroelektrarne tudi druge pomembne družbene vloge kot npr.: večnamenska raba akumulacijskih bazenov hidroelektrarn, kamor štejemo vodooskrbo, namakanje, vodarske ureditve, varstvo pred poplavami, rekreacijo in turizem.

V nadaljevanju diplomske naloge bo izdelan model s katerim bom analizirala možnosti črpanja vode iz akumulacije hidroelektrarne Medvode v akumulacijo hidroelektrarne Mavčiče. Pričakujem, da bo voda načrpana v nočnem času vplivala na povečanje proizvodnje v času vršnega obratovanja, v katerem je povečano povpraševanje po električni energiji.

- 2 Nartnik, M. 2006. Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče.
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.
-

2 IZDELAVA MODELA V PROGRAMU RIVERWARE

2.1 Program RiverWare

Program RiverWare predstavlja novo modelirno orodje rek in akumulacijskih sistemov, ki je zamenjal predhodno specifično opredeljene programske modele, z novimi, bolj fleksibilnimi modeli, pri katerih ni potreben razvoj nove programske opreme s strani vodnih upravljaljskih organizacij. Program RiverWare je izdelala Univerza v Koloradu s pomočjo Uprave za vode reke »Tennessee« in USBR (U.S. Bureau of Reclamation). Program je zasnovan na objektno – orientirani tehniki programiranja. Prednost tega načina programiranja je v tem, da omogoča lažjo in bolj neposredno predstavitev realnega problema v programu z objekti, ki imajo svoje lastnosti in obnašanje. Omenjena tehnika omogoča razvijalcem programske opreme razmeroma enostavno nadgradnjo ali prilagoditev posameznih programskih objektov poljubnega dela.

V seminarski nalogi z naslovom Program RiverWare za podporo odločanju pri integriranem upravljanju z vodami s podnaslovom program RiverWare, je podrobneje obravnavana zgradba, lastnosti ter načini upravljanja omenjenega programskega paketa.

V uvodu je predstavljen razvoj programa. Sledi predstavitev objektov, ki jih vsebuje program ter postopki upravljanja s posameznimi objekti. Nato so opisane vrste atributov (angl. slots) vsakega objekta. Temu poglavju sledi zelo kratko poglavje, ki opisuje določitev časov izvajanja modela. Nato sta dva bolj obsežna poglavja o simulaciji in simulaciji s pravili, ki poleg optimizacije predstavljata tri možne načine reševanja zgrajenih modelov. Na koncu so podane sklepne ugotovitve obravnavanega dela.

2.2 Model Moste

2.2.1 Splošni podatki in karakteristike o hidroelektrarni Moste

Hidroelektrarna Moste je bila zgrajena leta 1952 kot derivacijska hidroelektrarna s tedensko akumulacijo. Derivacijska pomeni, da se strojni del hidroelektrarne ne nahaja v sklopu z jezovno zgradbo. Skupaj s starejšo hidroelektrarno Završnica hidroelektrarna Moste sestavlja enoten energetski sistem. Elektrarna Moste obratuje kot prva v verigi zgornje savskih elektrarn. HE (hidroelektrarna) Moste obratuje s tedensko akumulacijo na reki Savi. Elektrarna Moste s tedensko akumulacijo med delavniki vozi v trapeznem delu dnevnega diagrama, medtem ko čez vikend vodo nabira. V primeru zelo visokih voda, obratuje tudi ponoči ali čez vikend. Pri zelo nizkih pretokih obratuje nekaj ur dnevno tudi čez vikend, kajti če bi se voda čez vikend akumulirala v akumulacijskem bazenu bi se posledično dodatno osiromašili nizki dotoki dolvodnih elektrarn.

Pregrada hidroelektrarne Moste je betonska, ločno-težnostnega tipa in leži v najožjem delu savskega kanjona ter z 60 m (SEL (Savske elektrarne Ljubljana), 2002) višine predstavlja najvišjo pregrado v Sloveniji. Na pregradi se nahajajo štiri prelivna polja s prevodnostjo 570 m³/s (SEL, 2002). Na tem območju reke Save je ocenjena srednje visoka voda 13,6 m³/s (SEL, 2002), stoletna visoka voda znaša 400 m³/s, medtem ko tisočletna visoka voda znaša 700 m³/s (SEL, 2002).

V sklopu hidroelektrarne se nahaja akumulacijski bazen prostornine 6240000 m³ (SEL, 2002), katerega koristni volumen znaša 3240000 m³ (SEL, 2002). Za zagotovitev tesnjenja akumulacijskega bazena so izdelali tesnilno zaveso v širini 351 m (SEL, 2002) in globini 120 m (SEL, 2002).

Vtočni objekt v hidroelektrarno se nahaja na levem boku pregrade. Dolžina dovodnega rova do strojnice znaša 840 m (SEL, 2002).

Za odvajanje oz. evakuacijo vršnih voda ter praznjenje akumulacije, je ob desnem boku pregrade namenjen temeljni izpust v dolžini 1,5 km (SEL, 2002) in premera 4 m (SEL, 2002).

Kar se tiče strojne opreme, hidroelektrarno Moste sestavljajo agregati 1, 2, 3 nazivne moči 13,5 MW (SEL, 2002), ter agregat 4, nazivne moči 8 MW (SEL, 2002). Instalirani pretok pri agregatih 1, 2 in 3 je $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ($3 \times 9,5 \text{ m}^3/\text{s}$), pri agregatu 4 je $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Agregat 4, je bil dodatno vgrajen leta 1977, deluje na vodo iz Završnice in obratuje samo v konicah. V primeru, da agregat 4 ni na voljo, se upravljavci hidroelektrarne Moste poslužijo starih agregatov hidroelektrarne Završnica.

Nominalna kota zgornje vode znaša 524,75 m (SEL, 2002), nominalna kota spodnje vode je 454,30 m in če se vrednosti med seboj odštejeta, se dobi bruto padec, ki znaša 70,45 (SEL, 2002) m. Pri dejanskem padcu je potrebno upoštevati višino izgube padca zaradi praznjenja bazena, izgube padca v dovodnih napravah ter izgube padca zaradi porasta spodnje vode in odtočne izgube.

Hidroelektrarna Završnica obratuje že od leta 1914. Sestavlja jo akumulacijski bazen koristne prostornine 135000 m^3 (SEL, 2002), ki se nahaja na potoku Završnica. Akumulacijski bazen preko tlačnega cevovoda napaja agregat 4, ter dva stara završniška agregata 5 in 6 nazivne moči 1 MW (SEL, 2002).

Elektrarni Moste in Završnica sta vodeni lokalno s komandne sobe, medtem kot je agregat 4, ki je bil leta 2001 obnovljen, daljinsko voden iz centra vodenja v Medvodah.

2.2.2 Izdelava modela Moste v programu Riverware

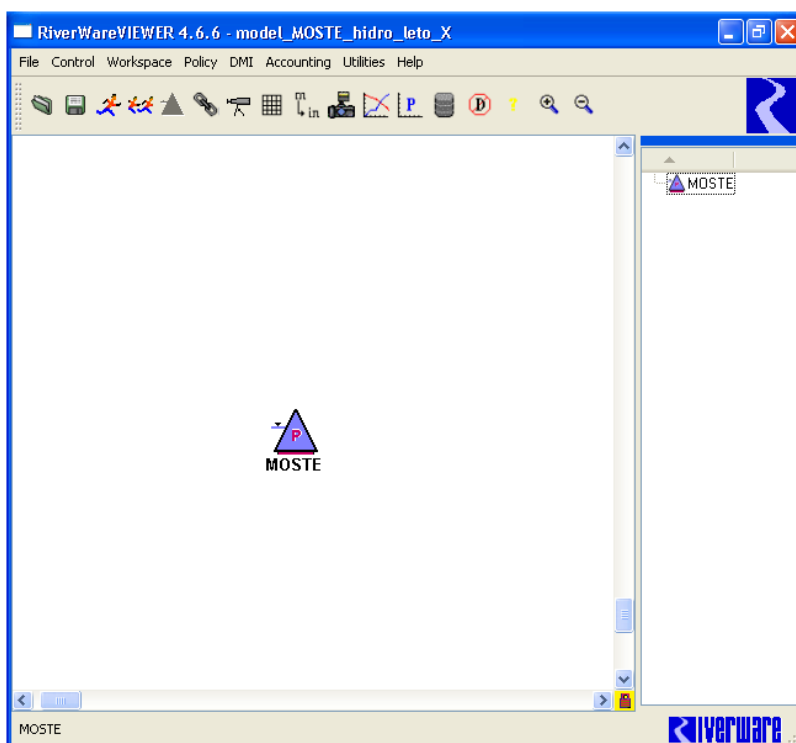
V programu RiverWare sem naredila model hidroelektrarne Moste z dvema različnima obdobjema trajanja. Pri vsakemu izmed teh dveh obdobj sem naredila še dve varianti.

Prvo obdobje traja od 1. januarja 2005 do 31. marca 2005. Pri prvi varianti sem pri atributu tlačnih izgub (angl. head loss) vstavila dejanske tlačne izgube ter podala sem izkoristek delovanja elektrarne za vsak dan posebej. Čas od 1. januarja do 31. marca 2005 sem si izbrala zato, ker so bili v tem času zelo nizki pretoki in ni bilo nobenega prelivanje preko prelivnih polj. Pri drugi varianti tlačnih izgub nisem podala, ker sem jih upoštevala pri višini spodnji

vode. V program sem vstavila povprečni izkoristek delovanja hidroelektrarne za trimesečno obdobje, ki znaša 0,70 (SEL, 2002 – 2005)

Drugo obdobje obsega hidrološko leto 2005. Za to obdobje sem prav tako naredila dve varianti. Pri prvi varianti sem podala povprečno tlačno izgubo za celotno hidrološko leto, medtem ko sem pri drugi varianti tlačne izgube upoštevala pri višini spodnje vode. Izkoristek delovanja hidroelektrarne sem pri obeh variantah upoštevala letno povprečje.

Podatki s katerimi sem določila model so vzeti iz mesečnih energetskih poročil dobljenih na sedežu savskih elektrarn v Medvodah. V program sem vstavila dnevne vrednosti in si za časovni korak izbrala en dan. V programu sem za hidroelektrarno Moste izbrala tip objekta »level power reservoir«, ki predstavlja hidroelektrarno z akumulacijskim bazenom in obenem omogoča izračun proizvodnje električne energije. Na sliki 1, se lahko vidi delovno okolje z orodno vrstico in ikonami s katerimi se upravlja programski paket RiverWare.



Slika 1: Delovno okolje programa RiverWare

V model nisem mogla vključiti hidroelektrarne Završnica, ker nisem imela na voljo dovolj podatkov, s katerimi bi določila obratovanje omenjene hidroelektrarne. Podatke, ki sem jih imela na voljo so bili: dnevna razlika med višino gladine vode v bazenu ob 00.00, višina vode v bazenu ob 24.00, ter količina proizvedene električne energije, katero odčitavajo s števca, ki jim prikazuje dnevne vrednosti proizvedene električne energije.

Za izdelavo modela v programu RiverWare sem uporabila naslednje vhodne podatke (angl. input values):

- *inflow*; predstavlja dotok v akumulacijski bazen. Na savskih elektrarnah ga beležijo vsako polno uro. V program sem vstavila dnevno vrednost, izračunano kot povprečje urnih vrednosti,
- *pool elevation*; predstavlja višino gladine v akumulacijskem bazenu. V poročilih se navaja relativna vrednost (višina bazena izražena v centimetrih). Zato sem morala vse odčitane relativne vrednosti preračunati na absolutne vrednosti z enačbo 1:

$$H_{abs} = H_{nom.k.zg.v.} - h_{bazen} \quad (1)$$

H_{abs} [m] ... absolutna vrednost zgornje vode

$H_{nom.k.zg.v.}$ [m] ... nominalna kota zgornje vode

h_{bazen} [m] ... relativna višina bazena

Nato sem iz urnih vrednosti, izračunala povprečne dneve vrednosti,

- *elevation volume table*; predstavlja razmerje med višino gladine vode v akumulacijskem bazenu in pripadajočim volumnom, katero je zapisano v tabelarični obliki (preglednica 1).

Preglednica 1: Razmerje med višino gladine vode v akumulacijskem bazenu in njej pripadajočim volumnom (angl. elevation volume table) (vir: Inštitut za hidravlične raziskave, 1998)

POOL ELEVATION [m]	VOLUME [m ³]
518.75	66973
519.00	172232
519.25	279022
519.50	387412
519.75	497476
520.00	609295

»se nadaljuje ... «

»... nadaljevanje«

520.50	838551
520.75	956184
521.00	1075966
521.25	1198020
521.50	1322480
521.75	1449494
522.00	1579227
522.25	1711860
522.50	1847597
522.75	1986667
523.00	2129328
523.25	2275874
523.50	2426640
523.75	2582014
524.00	2742446
524.25	2908464
524.50	3080696
524.75	3259897

- *minimum power elevation*; je višina gladine vode v akumulacijskem bazenu, pri kateri je še možna proizvodnja električne energije. Vrednost določim po enačbi 2:

$$H_{\min} = H_{\text{nom.k.zg.v.}} - h_{\text{max.rel.k.}} = 524,75\text{m} - 6,25\text{m} = 518,50\text{m} \quad (2)$$

H_{\min} [m] ... najmanjša višina zgornje vode, pri kateri je še dovoljena proizvodnja električne energije

$H_{\text{nom.k.zg.v.}}$ [m] ... nominalna kota zgornje vode

$h_{\text{max.rel.k.}}$ [m] ... maksimalno dovoljeno znižanje višine zgornje vode

- *power plant cap fraction*; predstavlja izkoristek delovanja agregata. Agregat predstavlja strojni del hidroelektrarne. V osnovi so si praviloma vsi enaki. Sestavljeni so iz naslednjih elementov: turbina, rotor in stator v katerem se proizvaja električna energija, ki se preko stikališča prenaša naprej v električno omrežje. Strojni del hidroelektrarn se praviloma razlikuje predvsem po tipu turbine. Tip turbine zavisi instaliranega padca elektrarne. Kaplanov tip turbine uporabljamo za zelo majhne padce od 5 m do 25 m (Goljevšček, 1962), hitre in ekspresne Francisove turbine za instalirane padce od 25 m do 250 m (Goljevšček, 1962), za padce od 250 m do 350 m (Goljevšček, 1962) so najprimernejše

počasi tekoče Francisove turbine, za padce, ki so večji od 400 m, pridejo v poštev samo še Peltonove turbine.

Hidroelektrarni Moste in Završnica imata vgrajeno Francisov tip turbine (SEL, 2002), saj znaša instalirani padec Most 70,45 m in Završnice 177,20 m (SEL, 2002)

- *plant efficiency value*; je izkoristek delovanj elektrarne. Program je narejen tako, da obravnavani atribut od uporabnika programskega paketa RiverWare zahteva, da poda le eno vrednost izkoristka elektrarne. V mesečnih energetskih poročilih, so podane urne vrednosti, na koncu vsakega dneva je podana še dnevna vrednost, ki je izračunana kot povprečje urnih vrednosti. Zaradi tega sem morala iz dnevni vrednosti izračunati povprečje izkoristka delovanja hidroelektrarne za obdobje v katerem se bo izvajal model; v mojem primeru od 1. januarja 2005 do 31. marca 2005 ter za hidrološko leto 2005.
- *net head vs max turbine release*, predstavlja soodvisnostno razmerje med dejanskim (neto) padcem višine hidroelektrarne in njem pripadajočim maksimalnim pretokom skozi turbine. Atribut je potrebno podati v tabelarični obliki (preglednica 2).

Preglednica 2: Neto padec pri maksimalnem pretoku skozi turbine(angl. net head vs max turbine release); (vir SEL d.o.o.)

NET HEAD [m]	MAX TURBINE RELEASE [m ³ /s]
56.00	23.85
57.00	24.27
58.00	24.70
59.00	25.12
60.00	25.55
61.00	25.98
62.00	26.40
63.00	26.83
64.00	27.25
65.00	27.68
66.00	28.11
67.00	28.53
68.00	28.96
69.00	29.38
70.00	29.81
70.45	30.00

- *regulated spill table*; v tabelarni obliki predstavlja razmerje med višino gladine vode v akumulacijskem bazenu in njej pripadajočim maksimalnim prelivom. V modelu, ki ima časovno obdobje trajanja od 1. 1. 2005 do 31.3. zaradi nizkih pretokov, ni bilo potrebno določiti omenjene tabele, medtem ko jo je za hidrološko leto 2005 bilo potrebno določiti (preglednica 3).

Preglednica 3: Razmerje med maksimalnim kontroliranim prelivom in višino zgornje vode (angl. pool elevation vs max regulated spill); (vir SEL)

POOL ELEVATION [m]	MAX REGULATED SPILL [m ³ /s]
524.75	0
525.00	7
525.50	32
526.00	78
526.50	145
527.00	206
527.50	286
528.00	372

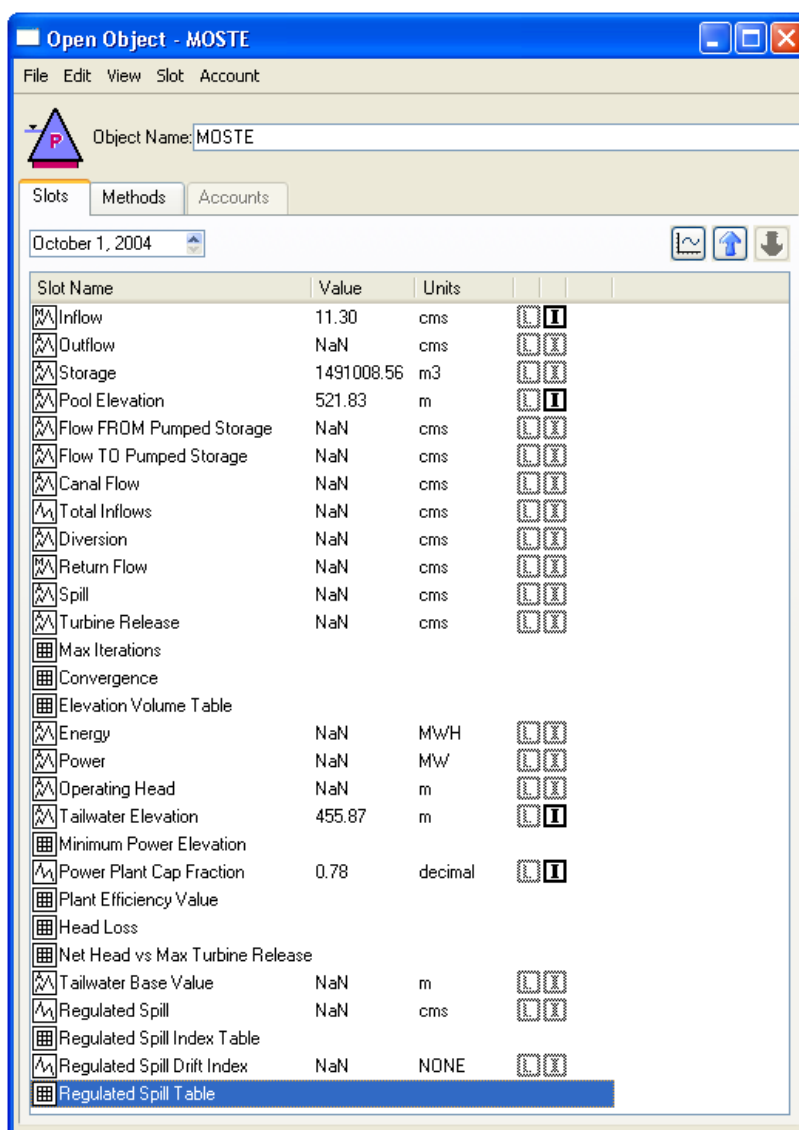
- *head loss*; so tlačne izgube oz. izgube, ki nastanejo na grabljah, dovodnih rovih, tlačnih cevovodih in v napravah, ki služijo za dovod vode k turbinam. Pri hidroelektrarni Moste so izgube odvisne od dotoka v hidroelektrarno. Minimalne vrednosti se gibljejo okrog 50 cm, medtem ko maksimalne vrednosti dosežejo tudi velikostni red 7 metrov. Ker gre za atribut, kjer je potrebno določiti skalarno vrednost, sem morala podobno kot pri izkoristku delovanja hidroelektrarne, tudi tukaj izračunati povprečne vrednosti.

Na sliki 2 je prikazano okno, ki prikazuje vrste atributov za izbrani model. Pri posameznih atributih se v skrajnem desnem stolpcu vidi, s poudarjeno črko **I**, kateri so vhodni podatki.

Posamezne zahtevane konstante nimajo poleg pripisane nobene oznake.

V pogovornem oknu je razvidno, da nobeden izmed atributov ni povezan, kajti vse črke L, kar pomeni angleško »linked« so nepoudarjene.

- 10 Nartnik, M. 2006. Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče.
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.



Slika 2: Pogovorno okno objekta hidroelektrarne Moste

V modelu sem izbrala naslednje uporabniške metode:

- v kategoriji »plantPowerCalculation«, program računa moč in količino proizvedene električne energije, ki jo ustvari pretok vode skozi turbine. Ta kategorija metod od uporabnika zahteva, da je poznan celoten odtok iz akumulacijskega bazena. V tej kategoriji sem izbrala metodo »plantPowerEquation«, kateri izračun proizvedene energije in moči temelji na enačbi vodne moči (angl. water power equation)
- v kategoriji »powerReleaseCalculation« sem izbrala metodo »getPlantPowerEqnRelease«. S to metodo RiverWare računa pretok vode skozi turbine.

- v kategoriji »tailwaterCalculation«, se nanaša na izračun višine gladine spodnje vode. Spodnja voda predstavlja nivo vodne gladine takoj za pregrado V tej kategoriji sem izbrala metodo »TWValueOnly«, ki omogoča, da uporabnik sam poda višino gladine spodnje vode ali poveže atribut » tailwater base value« z višino zgornje vode z višino zajezne gladine (angl. backwater elevation).
- v primeru, če bi imeli prelivanje vode skozi zapornice bi v kategoriji »spillCalculation« izbrali metodo »regulatedSpillCalc«, ki računa vrednost nadzorovanega pretoka čez prelivna polja.

Ko sem definirala model (določila vse potrebne vhodne podatke, uporabniške metode ter izbrala simulacijo kot izbrani način reševanja modela) sem ga lahko zagnala. Dobila sem naslednje rezultate (angl. output):

- Energy [MWh]; količina proizvedene energije za izbrani dan
- Power [MW]; doseženo moč hidroelektrarne,
- Operating Head [m], neto padec,
- Outflow [m³/s], iztok iz hidroelektrarne,
- Turbine Release [m³/s], pretok skozi turbino. V primeru zelo visokih voda imamo še preliv. Glede na mesečna obratovalna poročila, ki sem jih imela na voljo za hidrološko leto 2005, ni prišlo nikdar do prelivanja preko prelivnih polj, medtem ko program RiverWare vedno znova javi napako, če mu ne podam karakteristik prelivanja. Namreč program RiverWare funkcionira po načelu, da vsa voda, ki priteče v akumulacijski bazen, ga tudi zapusti kot pretok skozi turbine ali skozi turbine in še čez prelivna polja. V primeru dotokov v akumulacijski bazen, ki so velikostnega reda okrog 70 m³/s, pride velikokrat do omenjenih odstopanj med programom RiverWare in načinom obratovanja hidroelektrarne Moste.

Slika 3. prikazuje simulacijsko kontrolno tabelo, kjer lahko uporabnik programa RiverWare poljubno določi, katere attribute bo vstavil v tabelo in nato poljubno spreminja izgled tabele. Simulacijska kontrolna tabela je podana za hidrološko leto 2005. V tem primeru je časovna os podana vertikalno, lahko bi jo podala tudi horizontalno. V tabeli je prikazan časovni korak na vsakih sedem dni. Če bi želeli videti, vsak časovni korak posebej, se klikne na črni trikotnik in odpre se cel teden (slika 3, časovnih korak 13.11. 2004).

- 12 Nartnik, M. 2006. Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče.
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

Več o upravljanju s simulacijsko kontrolno tabelo je predstavljeno v seminarju z naslovom Program RiverWare za podporo odločanju pri integriranem upravljanju z vodami s podnaslovom program RiverWare (2005).

Timestep	MOSTE .Inflow cms [Last]	MOSTE .Energy MWH [Last]	MOSTE .Operating Head m [Last]	MOSTE .Outflow cms [Last]	MOSTE .Pool Elevation m [Last]	MOSTE .Power MW [Last]	MOSTE .Storage m3 [Last]	MOSTE .Tailwater Elevation m [Last]
▶ 10/2/04 Sat	11.90	105.54	66.69	9.96	522.15	4.40	1658806.80	455.30
▶ 10/9/04 Sat	10.30	104.16	67.33	9.73	522.52	4.34	1858722.60	455.15
▶ 10/16/04 Sat	29.00	215.45	65.50	25.67	522.23	8.98	1701249.36	456.46
▶ 10/23/04 Sat	15.00	153.90	66.45	14.57	522.04	6.41	1600448.28	455.55
▶ 10/30/04 Sat	31.90	220.07	65.76	22.76	523.04	9.17	2152775.36	456.55
▶ 11/6/04 Sat	21.70	220.49	65.87	21.07	522.45	9.19	1820449.60	456.53
▼ 11/13/04 Sat	20.60	199.58	66.16	18.99	522.76	8.32	1992373.44	456.48
11/7/04 Sun	20.40	211.80	65.97	20.21	522.48	8.83	1836738.04	456.50
11/8/04 Mon	19.40	211.08	65.93	20.15	522.36	8.80	1771584.28	456.49
11/9/04 Tue	18.60	208.79	65.83	19.97	522.14	8.70	1653501.48	456.42
11/10/04 Wed	20.00	212.78	65.58	20.43	522.07	8.87	1616364.24	456.53
11/11/04 Thu	19.40	182.46	65.72	17.48	522.38	7.60	1782443.24	456.50
11/12/04 Fri	19.70	197.55	65.86	18.88	522.51	8.23	1853159.80	456.58
11/13/04 Sat	20.60	199.58	66.16	18.99	522.76	8.32	1992373.44	456.48
▶ 11/20/04 Sat	16.00	178.25	66.97	16.75	523.14	7.43	2211393.76	456.23
▶ 11/27/04 Sat	13.50	128.11	66.92	12.05	522.56	5.34	1880973.80	455.53
▶ 12/4/04 Sat	14.70	134.62	66.16	12.81	521.84	5.61	1496197.88	455.52
▶ 12/11/04 Sat	12.50	97.93	66.61	9.25	521.95	4.08	1553280.40	455.07
▶ 12/18/04 Sat	11.30	119.79	67.06	11.24	522.06	4.99	1611058.92	455.00
▶ 12/25/04 Sat	10.10	88.72	66.64	8.38	521.89	3.70	1522144.48	455.10
▶ 1/1/05 Sat	11.50	75.96	66.32	7.21	521.82	3.17	1485819.24	455.13
▶ 1/8/05 Sat	10.30	90.64	65.89	8.66	521.28	3.78	1212955.20	455.24
▶ 1/15/05 Sat	4.50	16.48	66.97	1.55	521.92	0.69	1537712.44	454.70
▶ 1/22/05 Sat	8.30	91.15	67.56	8.49	522.23	3.80	1701249.36	454.69

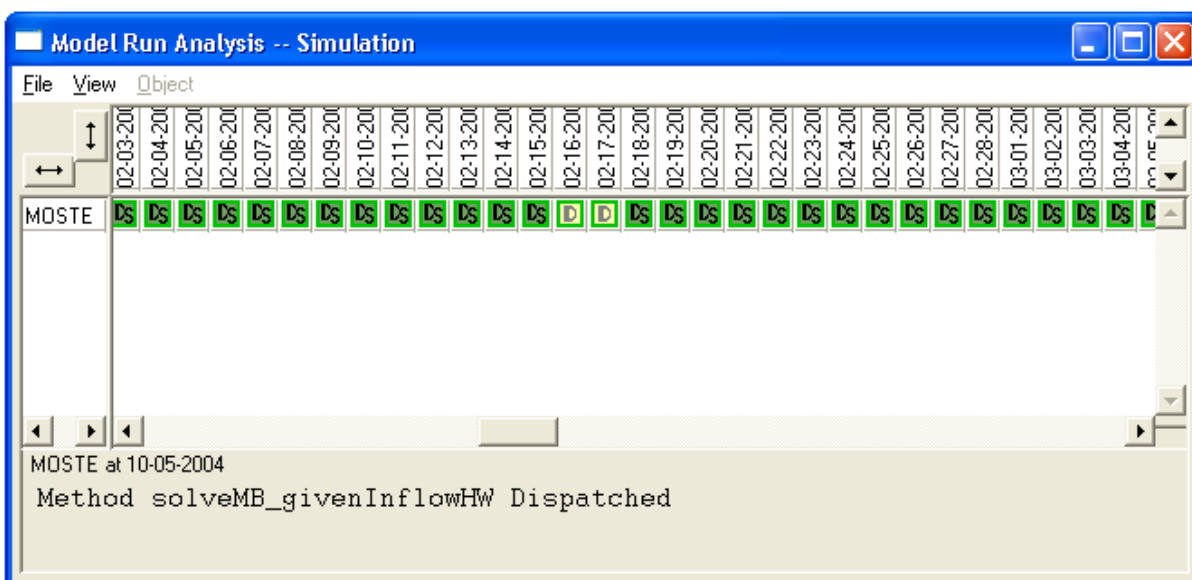
MOSTE.Energy [Column 0]
7 values [MWH] -- Sum 573.86 -- Ave 81.98 -- Med 107.33 -- Min 16.48 -- Max 120.57 -- Range 104.09

Slika 3: Simulacijska kontrolna tabela

Po uspešno izvedeni simulaciji je program v izhodni diagnostični tabeli javil, da je za naslednje časovne korake: 24.1., 16.2., 17.2 prišlo do negativnih vrednosti odtoka iz hidroelektrarne Moste. Ti dnevi so bili prav tako kritični na savskih elektrarnah, saj v omenjenih dnevih ni bilo proizvodnje električne energije.

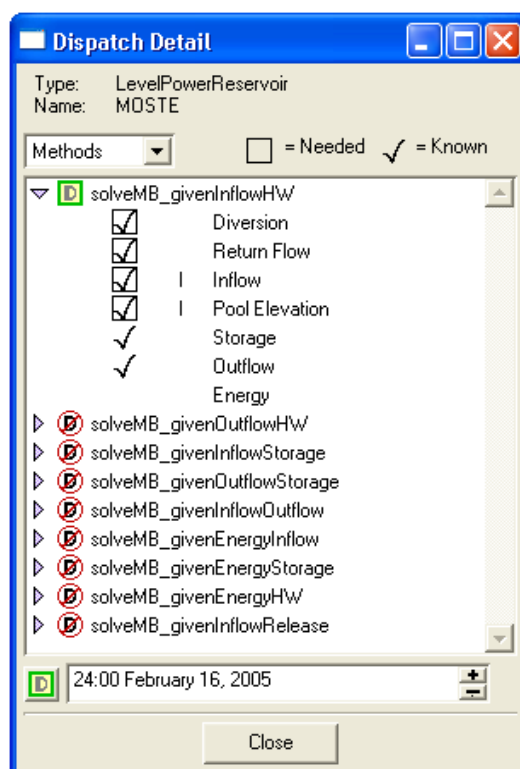
Rezultate simulacije program RiverWare prikaže v oknu z imenom, analiza zagonov modela (angl. model run analysis), kjer je za vsak časovni korak posebej z ikono predstavljeno ali je

program uspešno izvedel simulacijo. Kot se lahko vidi na sliki 4. za časovnih korak 16.2.2005 in 17.2.2005 se izračun ni dokončno izvršil (niso bile izračunane vse spremenljivke)



Slika 4: Pogovorno okno analiza zagona modela (angl. model run analysis)

Za prikaz bolj detajlnega prikaza izbranega časovnega koraka, se klikne na izbrani časovni korak in odpre se detajlno »dispatch« okno (slika 5). V odprtem oknu se lahko pogled preklaplja med metodami ali atributi. Čisto spodaj je drsnik, ki omogoča premikanje med posameznimi časovnimi koraki.



Slika 5: Detajlno “dispatch” okno

Nato sem primerjala vrednosti proizvedene električne energije izračunane v programu RiverWare in vrednosti proizvedene električne energije izračunanih na savskih elektrarnah. Razlika med rezultati je velika. Odstopanje za celotno hidrološko leto znaša malo manj kot 5000 MWh.

Vzroki za tako velika odstopanja so lahko različni. Že v samem izhodišču program RiverWare podatke o tlačnih izgubah (angl. head loss) vzame kot konstantno vrednost, namesto da bi se časovno spreminjali. Na hidroelektrarni Moste se tlačne izgube spreminjajo linearno, odvisno od dotoka v akumulacijski bazen.

Prav tako atribut, ki definira izkoristek delovanja elektrarne (angl. plant efficiency value) program prevzame kot konstantno vrednost. V realnosti se izkoristek delovanja hidroelektrarne s časom spreminja. Program RiverWare ima povsem zakrito kodo; uporabnik programa nima na voljo vpogleda v postopek po katerem je program prišel do rešitve. Na voljo so samo posamezni koraki, ki opišejo, kako se je izvedla simulacija. Posamezni koraki se lahko vidijo v posebnem izhodnem diagnostičnem oknu angl. diagnostic output window,

kjer se v orodni vrstici natančno določi, katere informacije naj program izpiše (več o izhodnem diagnostičnem oknu se lahko prebere v seminarju z naslovom Program RiverWare za podporo odločanju pri integriranem upravljanju z vodami s podnaslovom program RiverWare). Program računa odtok tako, da vse kar priteče v akumulacijo, gre potem takoj naprej skozi turbine. V primeru visokih voda, gre preostali pretok čez prelivna polja. To je dinamika, ki je privzeta pri uporabljeni metodi. V RiverWare – u ni na voljo metode, s katero bi se dalo simulirati dinamiko polnjenja in praznjenja akumulacijskega bazena.

2.2.3 Primerjava rezultatov izračunanih na sedežu savskih elektrarn in v programu Riverware

Spodnji dve tabeli prikazujeta primerjavo vrednosti doseženih moči in proizvedene električne energije dobljenih na sedežu savskih elektrarn v Medvodah in rezultatov dobljenih za prvo obdobje, ki je trajalo od 1. januarja 2005 do 31. marca 2005 za prvo in drugo varianto. Program RiverWare vedno za prvi časovni korak nikoli ne poda rezultata.

V preglednici 4 je prikazana primerjava rezultatov proizvedene električne energije. Glede na rezultate, je bila na savskih elektrarn za 449,78 MWh oz. 6,1% večja proizvodnja od variante ena in za 660,41 MWh oz. 9,0% večja proizvodnja od variante dve.

Preglednica 4 prikazuje vrednosti dosežene moči na savskih elektrarn in izračunane s pomočjo programa RiverWare. Na savskih elektrarnah so za hidroelektrarno Moste dosegli za 56,61 MW oz. 16,5% več proizvedene moči kot pri varianti ena, ter za 65,38 MW oz. 19,1% več od variante 2.

Preglednica 4: Primerjava rezultatov proizvedene električne energije za obdobje od 1. januarja 2005 do 31. marca 2005

		ENERGIJA - SEL	ENERGIJA var 1	ENERGIJA var 2
mesec	dan	[MWh]	[MWh]	[MWh]
JAN	1	48.34		
	2	46.87	40.64	40.06

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

	3	94.18	57.57	55.72
	4	198.28	138.44	128.92
	5	172.44	180.03	169.46
	6	146.95	149.56	142.74
	7	128.26	125.46	121.57
	8	47.40	94.54	93.19
	9	28.23	43.40	42.88
	10	121.22	64.04	61.78
	11	117.48	113.29	109.44
	12	136.62	111.92	107.28
	13	135.59	125.74	119.96
	14	111.49	122.79	118.39
	15	18.53	17.18	17.04
	16	28.94	18.09	17.90
	17	131.80	74.47	71.57
	18	126.82	114.50	110.00
	19	84.20	100.73	98.50
	20	110.25	86.28	83.73
	21	134.12	114.70	109.78
	22	22.98	95.00	94.02
	23	14.99	10.78	10.68
	24	113.32	55.97	54.41
	25	107.36	100.38	97.46
	26	106.08	95.12	92.69
	27	91.52	89.21	87.01
	28	124.98	96.96	93.99
	29	45.85	79.50	78.27
	30	52.86	45.06	44.34
	31	147.11	88.22	84.37
FEB	1	101.55	124.93	120.81
	2	107.71	97.52	94.36
	3	73.20	90.30	88.07
	4	69.50	76.13	74.38
	5	23.86	50.63	50.08
	6		6.57	6.52
	7	112.04	42.16	40.89
	8	86.18	103.79	100.94
	9	85.57	82.13	79.87
	10	122.16	93.63	90.58
	11	172.36	127.93	121.31
	12	163.59	159.71	153.08
	13	181.19	136.89	128.99
	14	19.87	141.71	140.37
	15		6.81	6.77
	16			
	17			

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

	18	32.76	9.57	9.40
	19	75.67	50.42	49.68
	20	61.62	64.28	63.01
	21	126.83	84.91	82.30
	22	126.32	112.27	107.68
	23	96.26	113.15	109.96
	24	78.42	83.68	81.78
	25	89.90	83.01	80.55
	26	12.57	53.45	53.00
	27	15.61	12.54	12.43
	28	94.97	47.76	46.38
MAR	1	113.91	97.33	93.93
	2	81.48	95.67	93.41
	3	62.44	69.85	68.59
	4	58.37	53.02	52.16
	5	20.70	41.77	41.35
	6		10.49	10.43
	7	97.10	41.79	40.45
	8	85.42	88.72	86.65
	9	76.64	78.91	76.77
	10	66.44	68.22	66.66
	11	61.85	69.32	67.78
	12	28.41	48.28	47.62
	13	23.54	22.05	21.78
	14	56.38	43.18	42.25
	15	61.37	58.96	57.64
	16	86.26	71.21	69.57
	17	96.60	94.18	91.75
	18	67.53	79.20	77.42
	19	50.20	57.37	56.46
	20	88.84	59.23	57.86
	21	114.37	97.51	94.17
	22	111.16	106.22	102.68
	23	109.02	108.49	105.42
	24	91.31	94.89	92.84
	25	91.89	91.02	88.71
	26	58.99	63.43	62.08
	27	28.90	40.66	40.14
	28	41.38	33.43	32.86
	29	101.27	68.75	66.23
	30	95.06	104.18	100.56
	31	124.87	115.57	111.16
		7328.13	6878.35	6667.72

Preglednica 5: Primerjava rezultatov doseženih moči za obdobje od 1. januarja 2005 do 31. marca 2005

		MOČ - SEL	MOČ – varianta 1	MOČ – varianta 2
mesec	dan	[MW]	[MW]	[MW]
JAN	1	2.75	0.00	0.00
	2	2.67	1.69	1.67
	3	4.54	2.40	2.32
	4	8.96	5.77	5.37
	5	8.00	7.50	7.06
	6	6.83	6.23	5.95
	7	6.04	5.23	5.07
	8	2.67	3.94	3.88
	9	1.29	1.81	1.79
	10	6.13	2.67	2.57
	11	5.67	4.72	4.56
	12	6.33	4.66	4.47
	13	6.29	5.24	5.00
	14	5.54	5.12	4.93
	15	1.46	0.72	0.71
	16	1.54	0.75	0.75
	17	6.13	3.10	2.98
	18	5.33	4.77	4.58
	19	4.08	4.20	4.10
	20	5.25	3.60	3.49
	21	6.21	4.78	4.57
	22	1.04	3.96	3.92
	23	1.17	0.45	0.45
	24	5.13	2.33	2.27
	25	5.21	4.18	4.06
	26	4.79	3.96	3.86
	27	4.25	3.72	3.63
	28	5.63	4.04	3.92
	29	2.50	3.31	3.26
	30	2.83	1.88	1.85
	31	6.88	3.68	3.52
FEB	1	4.71	5.21	5.03
	2	5.33	4.06	3.93
	3	3.79	3.76	3.67
	4	3.63	3.17	3.10
	5	1.13	2.11	2.09
	6	0.00	0.27	0.27
	7	5.25	1.76	1.70
	8	3.75	4.32	4.21
	9	4.21	3.42	3.33
	10	5.67	3.90	3.77
	11	7.96	5.33	5.05

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

	12	7.46	6.65	6.38
	13	8.08	5.70	5.37
	14	0.88	5.90	5.85
	15	0.00	0.28	0.28
	16	0.33	0.00	0.00
	17	0.50	0.00	0.00
	18	1.46	0.40	0.39
	19	4.17	2.10	2.07
	20	3.29	2.68	2.63
	21	5.38	3.54	3.43
	22	5.46	4.68	4.49
	23	4.17	4.71	4.58
	24	3.25	3.49	3.41
	25	3.83	3.46	3.36
	26	0.63	2.23	2.21
	27	0.75	0.52	0.52
	28	4.13	1.99	1.93
MAR	1	4.88	4.06	3.91
	2	3.54	3.99	3.89
	3	3.25	2.91	2.86
	4	2.50	2.21	2.17
	5	1.67	1.74	1.72
	6	0.96	0.44	0.43
	7	4.17	1.74	1.69
	8	3.63	3.70	3.61
	9	3.29	3.29	3.20
	10	2.92	2.84	2.78
	11	2.75	2.89	2.82
	12	1.42	2.01	1.98
	13	1.04	0.92	0.91
	14	2.50	1.80	1.76
	15	3.50	2.46	2.40
	16	4.04	2.97	2.90
	17	4.13	3.92	3.82
	18	3.13	3.30	3.23
	19	2.42	2.39	2.35
	20	4.13	2.47	2.41
	21	4.92	4.06	3.92
	22	5.29	4.43	4.28
	23	4.54	4.52	4.39
	24	4.17	3.95	3.87
	25	4.00	3.79	3.70
	26	2.83	2.64	2.59
	27	1.74	1.69	1.67
	28	2.25	1.39	1.37
	29	4.46	2.86	2.76

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

	30	3.96	4.34	4.19
	31	5.67	4.82	4.63
	Σ	343.20	286.59	277.82

V mesečnih energetskih poročilih je moč ob koncu vsakega dneva podana kot vsota vseh čez dan doseženih moči, medtem ko je v programu RiverWare podano povprečje moči dosežene v posameznem dnevu. Zaradi primerjave doseženih moči dobljenih v programu in izračunanih na savskih elektrarnah, sem iz mesečnih energetskih poročil za vsak dan določila dnevna povprečja.

Za drugo obdobje, ki obsega hidrološko leto 2005, sem v preglednici 6 prikazala primerjavo med rezultati proizvedene električne energije izračunane na savskih elektrarn in v programu RiverWare za varianti ena in dve. Zaradi prevelikega obsega sem prikazala rezultate za prvo polovico hidrološkega leta (od začetka oktobra 2004 do konca marca 2005). Proizvodnja električne za hidroelektrarno Moste od variante ena večja za 4176,70 MWh oz. 9,2 % in za 4690,98 MWh oz. za 10,3% večja od variante dve.

Preglednica 6: Primerjava rezultatov za hidrološko leto 2005

mesec	dan	ENERGIJA – SEL [MWh]	ENERGIJA_var 1 [MWh]	ENERGIJA_var 2 [MWh]
OKT	1	152.04	0	0
	2	65.75	105.54	108.16
	3	69.71	54.74	56.03
	4	170.27	92.31	91.65
	5	126.21	147.29	148.42
	6	125.68	113.88	114.61
	7	128.93	113.36	113.75
	8	131.91	111.39	111.7
	9	75.96	104.16	106.27
	10	177.84	111.06	108.59
	11	216.07	228.89	218.47
	12	133.47	125.19	125.58
	13	137.48	120.77	120.79
	14	154.87	125.01	124.5
	15	166.67	156.57	153.56
	16	210.84	215.45	198.94
	17	303	220.38	187.59

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

	18	175.89	192.88	190.01
	19	191.63	154.64	150.68
	20	194.73	189.91	183.62
	21	110.91	145.12	147.21
	22	200.51	141.26	135.95
	23	117.9	153.9	156.06
	24	65.77	74.92	76.99
	25	181.16	104.37	102.81
	26	149.69	141.84	141.77
	27	219.96	155.29	150.46
	28	226.99	214.59	200.19
	29	175.41	222.86	220.16
	30	234.25	220.07	198.76
	31	327.65	238.67	202.09
NOV	1	320.66	236.91	200.48
	2	315.93	233.95	198.03
	3	316.85	232.78	197.03
	4	312.65	230.69	195.5
	5	298.92	227.1	194.58
	6	229.41	220.49	199.69
	7	223.65	211.8	201.92
	8	224.28	211.08	199.04
	9	212.93	208.79	200.57
	10	202.71	212.78	201.38
	11	196.8	182.46	176.16
	12	209.91	197.55	189.66
	13	188.29	199.58	194.89
	14	170.6	151.88	150.43
	15	196.56	168.63	162.68
	16	211.95	197.55	189.83
	17	226.13	203.6	194.95
	18	172.73	191.56	189.79
	19	206.58	166.98	160.99
	20	178.84	178.25	175.88
	21	86.17	118.73	120.47
	22	212.35	126.63	122.72
	23	179.77	197.59	192.68
	24	193.86	178.6	172.7
	25	193.2	182.52	176.55
	26	181.61	173.64	169.98
	27	103.75	128.11	130.53
	28	117.66	94.68	95.22
	29	192.51	148.98	143.73
	30	127.31	175.29	175.83
DEC	1	222.83	136.18	130.15
	2	215.63	211.07	199.96

»se nadaljuje ...«

- 22 Nartnik, M. 2006. Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče.
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.
-

»... nadaljevanje«

	3	187.29	197.36	193.09
	4	80.59	134.62	137.89
	5	68.32	58.68	59.88
	6	219.48	117.1	112.05
	7	178.59	204.76	198.66
	8	167.9	220.07	217.07
	9	162.71	148.02	146.37
	10	155.85	151.89	150.14
	11	40.94	97.93	100.92
	12	45.66	30.51	31.32
	13	159.24	86.95	85.74
	14	122.77	130.91	131.01
	15	124.57	118.79	119.41
	16	190.08	144.18	139.5
	17	178.87	172.31	167.89
	18	35.73	119.79	123.12
	19	54.77	38.82	39.76
	20	159.66	93.74	92.19
	21	167.96	143.84	142.24
	22	129.5	145.65	145.7
	23	126.84	114.55	114.75
	24	125.85	114.65	114.77
	25	43.99	88.72	91.28
	26	106.55	99.01	100.06
	27	285.47	189.22	177.29
	28	273.95	226.76	201.95
	29	148.4	191.79	191.15
	30	127.8	122.04	123.06
	31	111.27	111.65	113.06
JAN	1	48.34	75.96	78.1
	2	46.87	38.99	40.06
	3	94.18	55.24	55.72
	4	198.28	132.79	128.92
	5	172.44	172.64	169.46
	6	146.95	143.37	142.74
	7	128.26	120.25	121.57
	8	47.4	90.64	93.19
	9	28.23	41.63	42.88
	10	121.22	61.42	61.78
	11	117.48	108.67	109.44
	12	136.62	107.33	107.28
	13	135.59	120.57	119.96
	14	111.49	117.76	118.39
	15	18.53	16.48	17.04
	16	28.94	17.35	17.9
	17	131.8	71.44	71.57

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

	18	126.82	109.84	110
	19	84.2	96.64	98.5
	20	110.25	82.76	83.73
	21	134.12	97.42	97.2
	22	22.98	91.15	94.02
	23	14.99	10.35	10.68
	24	113.32	53.7	54.41
	25	107.36	96.32	97.46
	26	106.08	91.27	92.69
	27	91.52	85.6	87.01
	28	124.98	93.02	93.99
	29	45.85	76.29	78.27
	30	52.86	43.24	44.34
	31	147.11	84.63	84.37
FEB	1	101.55	119.85	120.81
	2	107.71	93.54	94.36
	3	73.2	86.62	88.07
	4	69.5	73.03	74.38
	5	23.86	48.58	50.08
	6		6.3	6.52
	7	112.04	40.45	40.89
	8	86.18	99.61	100.94
	9	85.57	78.81	79.87
	10	122.16	89.83	90.58
	11	172.36	122.69	121.31
	12	163.59	153.1	153.08
	13	181.19	131.13	128.99
	14	19.87	135.77	140.37
	15		6.53	6.77
	16			
	17			
	18	32.76	9.18	9.4
	19	75.67	48.38	49.68
	20	61.62	61.7	63.01
	21	126.83	81.48	82.3
	22	126.32	107.7	107.68
	23	96.26	108.54	109.96
	24	78.42	80.26	81.78
	25	89.9	79.61	80.55
	26	12.57	51.28	53
	27	15.61	12.03	12.43
	28	94.97	45.82	46.38
MAR	1	113.91	93.37	93.93
	2	81.48	91.77	93.41
	3	62.44	67	68.59
	4	58.37	50.87	52.16

»se nadaljuje ...«

- 24 Nartnik, M. 2006. Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče.
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.
-

»... nadaljevanje«

	5	20.7	40.08	41.35
	6		10.07	10.43
	7	97.1	40.11	40.45
	8	85.42	85.14	86.65
	9	76.64	75.72	76.77
	10	66.44	65.46	66.66
	11	61.85	66.53	67.78
	12	28.41	46.33	47.62
	13	23.54	21.17	21.78
	14	56.38	41.45	42.25
	15	61.37	56.6	57.64
	16	86.26	68.35	69.57
	17	96.6	90.4	91.75
	18	67.53	76.01	77.42
	19	50.2	55.08	56.46
	20	88.84	56.85	57.86
	21	114.37	93.59	94.17
	22	111.16	101.94	102.68
	23	109.02	104.1	105.42
	24	91.31	91.04	92.84
	25	91.89	87.32	88.71
	26	58.99	60.86	62.19
	27	28.9	39.02	40.14
	28	41.38	32.09	32.86
	29	101.27	65.98	66.23
	30	95.06	99.99	100.56
	31	124.87	110.89	111.16

3 ANALIZA MOŽNOSTI ČRPANJA VODE IZ AKUMULACIJE HE MEDVODE V AKUMULACIJO HE MAVČIČE

3.1 Hidroelektrarna Mavčiče

Hidroelektrarna Mavčiče je druga v verigi hidroelektrarn na reki Savi in obratuje od leta 1986. Elektrarna se nahaja v dolini reki Savi, pod naseljem Mavčiče (slika 6) in je prijezovnega tipa z dnevno akumulacijo. Hidroelektrarno sestavljajo težnostna betonska pregrada, strojnica in dve prelivni polji.

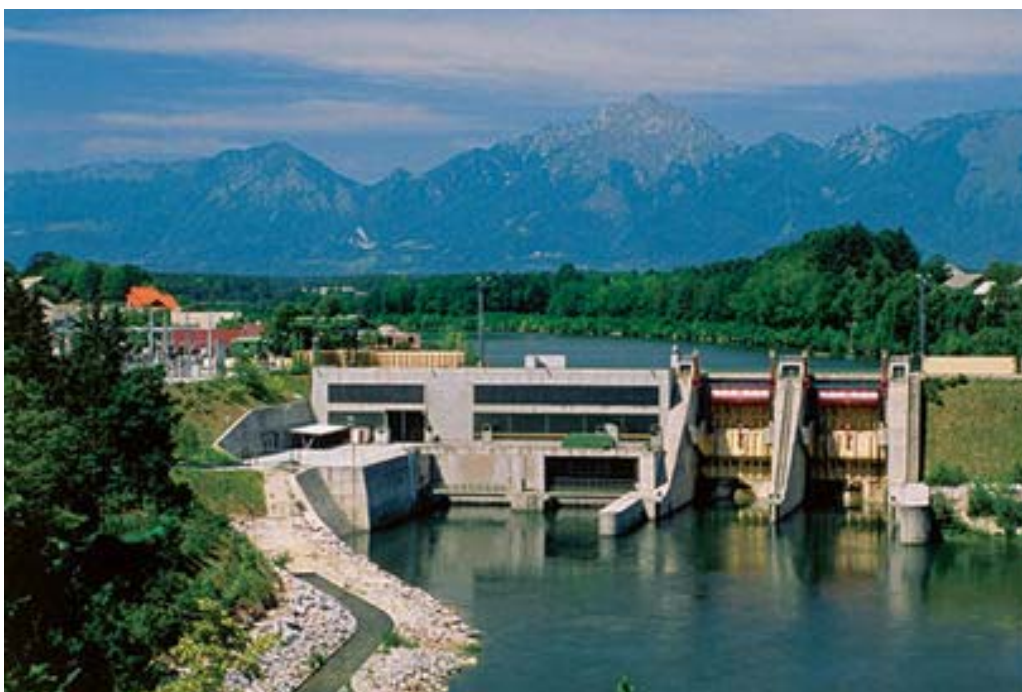
Pregrada je v celoti temeljna na prepustni podlagi, zaradi tega je bilo potrebno vgraditi tesnilno zaveso do neprepustne podlage. Tesnilna zavesa ob bokih pregrade sega v dolžino 200 m (SEL, 2002). V letu 1999 je bila zaradi slabega tesnjenja tesnilna zavesa sanirana. V strojnici sta nameščena dva agregata s skupnim instaliranim pretokom $260 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEL, 2002). Vgrajeni sta dve Kaplanovi turbini z instalirano močjo 25 MW (SEL, 2002). Navedena vrsta turbin se vgrajuje v elektrarne, ki imajo instalirane padce od 5 m do 25 m (Goljevšček, 1962). Pri Mavčičah znaša instalirani padeč 17,50 m. Vrednost instaliranega ali bruto padca dobim, če od nominalne kote zgornje vode, ki znaša 346,00 m (SEL, 2002) odštejem nominalno koto spodnje vode, katera vrednost je 328,50 m (SEL, 2002).

Prelivni objekt je sestavljen iz dveh pretočnih polj. Maksimalna pretočnost enega prelivnega polja je $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEL, 2002), kolikor je tudi ocenjena 100 – letna voda.

Na tem območju je reka Sava še zelo hudourniška zaradi vpliva Save Bohinjke, Tržiške Bistrice, Kokre in pritokov iz Karavank. Ob večjih deževjih v alpskem svetu pretok v nekaj urah naraste za velikostni red $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ali več (SEL, 2002).

Pretočni polji sta opremljeni s segmentnima zapornica z nasajeno zaklopko in sta daljinsko vodeni iz centra vodenja v Medvodah. Zaradi varnosti, mora biti pri pretokih večjih od $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEL, 2002) v Mavčičah prisotna posadka, ki čisti obsežne nanose naplavin in upravlja z zapornicami.

Poleg naštetih in opisanih elementov hidroelektrarne je še en pomemben člen hidroelektrarne – akumulacijski bazen. Celotna vsebina akumulacijskega bazena hidroelektrarne Mavčiče znaša 10836906 m^3 (SEL, 2002), medtem ko je razpoložljivega volumna 1700000 m^3 (SEL, 2002). Normalno dovoljeno znižanje višine gladine vode v bazenu je $1,70 \text{ m}$ (SEL, 2002), dovoljeno urno nihanje bazena je 60 cm (SEL, 2002). V res izjemno ekstremnih primerih lahko višina gladine akumulacijskega bazena v enem dnevu zaniha za maksimalno $3,30 \text{ m}$ (SEL, 2002). Volumen akumulacijskega bazena služi za pokrivanje konic potrošnje električne energije.



Slika 6: Hidroelektrarna Mavčiče (vir: <http://www2.pfmb.uni-mb.si/tehnika> (8.3.2006))

3.2 Hidroelektrarna Medvode

Naslednja v verigi za hidroelektrarno Mavčiče, je hidroelektrarna Medvode (slika 7). Nahaja se pri naselju Medvode, nad sotočjem reke Save s Soro. Prvi zagon elektrarne je bil leta 1953. Hidroelektrarna Medvode je enako steberskega tipa z dnevno akumulacijo. Zanja veljajo enake značilnosti porečja kot za Mavčiče. Elektrarna obratuje z dnevno izravnavo in s

kompenzacijskim bazenom uravnava nihanje pretokov, ki nastanejo zaradi gorvodnega obratovanja HE Mavčiče.

Hidroelektrarno sestavljajo: jezovna zgradba, ki je kombinirano steberskega – obrežnega tipa, strojnica in dve prelivni polji v smeri matice toka. Ker se hidroelektrarna nahaja na območju, kjer je reka Sava vrezala brzice v dolomitu, je posledično večji del razpokan in prepreden z votlinami. Za zagotovitev ustreznega tesnjenja se je izdelala stabilizacija temeljnih tal z injekcijsko zaveso, katera razvita širina znaša 190 m (SEL, 2002) ter sega do neprepustne podlage skrilavcev in peščenjakov.

V strojnici elektrarne sta nameščena dva agregata, ki sta obnovljena. Račun modela črpanja sem izvajala za star sistem, ker so mi bili na voljo podatki o obratovanju HE Medvode, ko obnovljena agregata še nista na polno obratovala. Požiralnost dveh agregatov starega sistema znaša $142 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEL, 2002), kar je precej manj kot v gorvodni hidroelektrarni Mavčiče. Nahajata se v turbinskih stebrih na obrežju. Enako kot pri Mavčičah, je tudi v Medvodah vgrajen Kaplanov tip turbine. Instalirani padec, dobljen kot razlika med nominalno koto zgornje vode - 328,50 m (SEL, 2002) in nominalno koto spodnje vode 307,30 m (SEL, 2002) znaša 21,20 m.

Prelivni objekt je sestavljen iz dveh prelivnih polj s prevodnostjo $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEL, 2002).

Prelivni polji sta opremljeni s tablastima zapornicama kljukaste izvedbe.

K hidroelektrarni sodi akumulacijski bazen z naslednjimi karakteristikami: celotni volumen akumulacije je 7000000 m^3 (SEL, 2002), razpoložljivi volumen znaša 1120000 m^3 (SEL, 2002). Glede omejitev nihanja gladine vode, za elektrarno Medvode veljajo enake omejitve kot so opisane pri hidroelektrarni Mavčiče. Poleg tega morajo Medvode v času nizkih pretokov zagotoviti ekološki sprejemljivi pretok - Q_{es} , ki znaša $12 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEL, 2002). V zakonu v vodah je ekološko sprejemljivi pretok definiran v 71. členu, citiram: »Ekološko sprejemljivi pretok je količina vode, ki ob dovoljeni rabi ali dovoljenem onesnaževanju ne poslabšuje ekološkega stanja površinskih voda ali ne preprečuje njegovega izboljšanja.«

- 28 Nartnik, M. 2006. Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče.
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.
-



Slika 7: Hidroelektrarna Medvode (vir: <http://www.geoservis.si/instrumenti/hds/cyra-hidroelektrarna.htm> (7.4.2006))

3.3 Klasifikacija hidroelektrarn

Hidroelektrarne se delijo v tri večje skupine (Goljevšček, 1962), katere so sestavljene iz posameznih podskupin. Če se predvsem osredotočim na razvrščanje elektrarn glede na velikost akumulacijskega prostora, imamo v slovenskem hidroenergetskem prostoru le eno hidroelektrarno s tedensko akumulacijo, vse preostale so bodisi z dnevno akumulacijo, pretočne, medtem ko so hidroelektrarne s črpalno akumulacijo večinoma v gradnji ali fazi pridobivanja soglasij za njihovo izgradnjo.

V prvo skupino se uvrščajo hidroelektrarne (Goljevšček, 1962) glede na instalirani vodni padec:

- nizekotlačne hidroelektrarne (instalirani padec se nahaja v mejah od 5 m do 25 m),
- srednjetačne hidroelektrarne (instalirani padec se nahaja v mejah od 25 m do 250 m),
- visokotlačne hidroelektrarne (instalirani padec se nahaja v mejah od 250 m do 2000 m).

V drugo skupino se uvrščajo hidroelektrarne (Goljevšček, 1962) glede na velikost akumulacijskega prostora:

- hidroelektrarne brez akumulacije ali pretočne hidroelektrarne,
- hidroelektrarne z dnevno akumulacijo,
- hidroelektrarne s tedensko akumulacijo,
- hidroelektrarne z letno akumulacijo,
- hidroelektrarne s sezonsko akumulacijo,
- hidroelektrarne s pretočno akumulacijo ter
- hidroelektrarne s črpalno akumulacijo.

Zgoraj naštetih hidroelektrarne se v energetskega smislu med seboj zelo razlikujejo. Ker hidroelektrarni Mavčiče in Medvode sodita v podskupino hidroelektrarn z dnevno akumulacijo, sem v poglavju 3.3.1 to vrsto hidroelektrarn podrobneje opisala.

V tretjo skupino se uvrščajo kombinirane vodne naprave (Goljevšček, 1962). Mednje se štejejo:

- spajanje pregradne in derivacijske hidroelektrarne v enoten energetskega sistem,

- kaskadna ureditev hidroelektrarn,
- verižna ureditev hidroelektrarn.

3.3.1 Hidroelektrarne z dnevno izravnavo

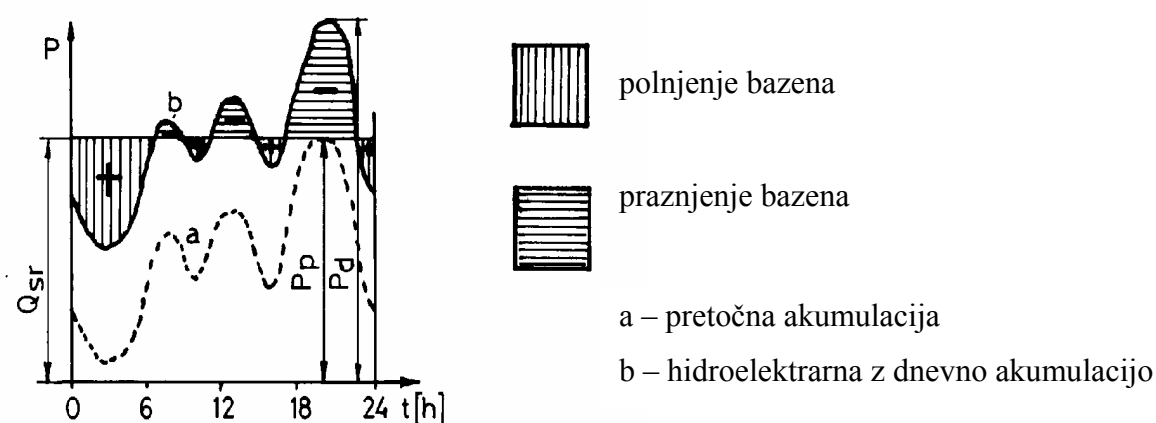
Hidroelektrarne z dnevno akumulacijo, predstavljajo naprave, katerih volumen akumulacijskega bazena omogoča dnevno izravnavo. To pomeni, da se celoten bazen izprazni do določene kote in preko dneva ponovno napolni. V primerjavi s pretočno hidroelektrarno imajo proizvodnjo veliko večjo (slika 8) Pri elektrarnah z dnevno izravnavo, se v času majhne nočne porabe bazen polni (slika 8, +) in s tem akumulira energijo, ki jo porabi podnevi (slika 8, -), ko je cena energije višja. Ko se izračuna vodna bilanca ob koncu dneva (ob 24.00 uri), se ugotovi, da je vsota dotoka v akumulacijski bazen in vsota potrošnje (potrošnja ima negativno vrednost), ki jo predstavlja odtok iz akumulacijskega bazena enaka nič.

Vodno bilanco se izračuna po enačbi 3:

$$\sum_{i=1}^{24} Q_{dot} + \sum_{i=1}^{24} -Q_{potr} = 0 \quad (3)$$

Q_{dot} [m³/s] ... vsota dotokov v akumulacijo v enem dnevu

Q_{potr} [m³/s] ... vsota potrošnje hidroelektrarne v enem dnevu



Slika 8: Dnevni dotok in njegova izraba v hidroelektrarni (vir: Goljevšček, 1962)

Režim obratovanja elektrarne je odvisen od trenutnega pretoka, dnevnega reda obratovanja, ki se vsakodnevno naredi za izbrano elektrarno. Potrebno je upoštevati še okoljske zahteve - zagotavljanje ekološko sprejemljivega pretoka v času nizkih pretokov (poglavje z naslovom Hidroelektrarna Medvode). V primeru, ki ga obravnavam v diplomski nalogi, mora le hidroelektrarna Medvode v sušnih razmerah zagotoviti ekološki sprejemljivi pretok, medtem ko hidroelektrarni Mavčiče to ni potrebno. Pri obratovanju je potrebno biti pozoren, da se ne prekoračijo dovoljena dnevna in urna nihanja bazena, ki veljajo za hidroelektrarno.

Pri izračunu dnevne izravnave, hidroelektrarni Mavčiče in Medvode delujeta v sistemu obratovanja v verigi. Bazen hidroelektrarne Mavčiče predstavlja akumulacijski bazen, bazen hidroelektrarne Medvode pa kompenzacijskega. To pomeni, da voda, ki odteče iz Mavčič predstavlja dotok v kompenzacijski bazen hidroelektrarne Medvode, ki opravlja funkcijo uravnavanja nihanja pretokov zaradi vršnega obratovanja gorvodno ležeče hidroelektrarne Mavčiče. Omenjeni režim obratovanja je razviden v grafikonih obratovanja modela črpanja (poglavje 3.4.1.6).

3.4 Model črpanja

Med izdelovanjem diplomske naloge, se je izkazalo, da program RiverWare ni ustrezen programski paket za izdelovanje modelov, kateri bi simulirali obratovanje hidroelektrarn na slovenskih vodotokih. Zato se je pojavila ideja o novem modelu, s pomočjo katerega bi se izdelala analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče. V modelu črpanja bi hidroelektrarni Mavčiče in Medvode ohranili svoj obstoječi režim obratovanja. Kar pomeni, da Mavčiče obratujejo kot vršna elektrarna z jutranjimi, opoldanskimi in večernimi konicami, hidroelektrarna Medvode se s svojim obratovanjem prilagaja režimu gorvodne elektrarne. Bistvena razlika od obstoječega sistema je ta, da izkoriščamo kapacitativno sposobnost akumulacije HE Mavčiče s črpanjem vode iz bazena HE Medvode ponoči, ko je energije najcenejša.

V programu Excel sem izdelala model črpanja s katerim sem prikazala delovanje novega sistema. V nočnem času zaradi majhne potrošnje ni potrebno obratovanje hidroelektrarne

Mavčiče, zato se akumulacijski bazen polni, zaradi dotoka reke Save v bazen in črpanja vode iz dolvodno ležečega kompenzacijskega bazena hidroelektrarne Medvode. Čez dan HE Mavčiče obratuje vršno, HE Medvode svoje obratovanje uskladi z obratovanjem gorvodne hidroelektrarne. Pri obratovanju elektrarn sem upoštevala naslednje robne pogoje:

- 1,70 m (SEL, 2002) je maksimalna dnevna denivelacija bazenov hidroelektrarn Mavčiče in Medvode
- 60 cm (SEL, 2002), je maksimalno dovoljeno urno nihanje gladine obeh bazenov,
- pri hidroelektrarni Medvode, sem upoštevala, da je obvezni – minimalni odtok iz hidroelektrarne $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (obvezni tehnološki minimum; (SEL, 2002)). To vrednost sem izbrala zato, da sem na varni strani zaradi zagotavljanja ustreznega pretoka dolvodno na preostalem delu verige hidroelektrarn in za zagotovitev ustrezne količine vode, katera se uporablja za hlajenje reaktorjev v jedrski elektrarni Krško.

Namen izdelave modela črpanja je poiskati naslednje: pretoki pri katerih se izvaja črpanje, količina črpanja, čas črpanja in vrednost za koliko se poveča proizvodnje električne energije hidroelektrarni Mavčiče z upoštevanjem, da se črpa voda iz dolvodno ležečega bazena hidroelektrarne Medvode.

3.4.1 Zgradba modela črpanja

Model črpanja je sestavljen iz dveh delov. Prvi del predstavlja hidroelektrarno Mavčiče, drugi del hidroelektrarno Medvode, katera sestavljata sistem hidroelektrarn v verigi. Potrošnja hidroelektrarne Mavčiče, predstavlja dotok v hidroelektrarno Medvode. Višina gladine zgornje vode hidroelektrarne Medvode je višina gladine spodnje vode hidroelektrarne Mavčiče. Iz česar sledi, da je dinamika delovanja obeh delov med seboj izjemno povezana. Kot sem že zgoraj omenila (poglavje hidroelektrarne z dnevno izravnavo), bi morala ob koncu dneva (ob 24.00) vsa količina voda, ki priteče v bazen hidroelektrarne Medvode biti enaka količini vode, ki čez cel dan odteče iz hidroelektrarne Mavčiče. Vendar, ko sem pregledala obstoječa energetska poročila za obe hidroelektrarni, katera se vodijo na savskih elektrarnah, sem ugotovila, da temu ni tako. Pojavlja se dodaten dotok v kompenzacijski bazen hidroelektrarne Medvode, saj potrošnja hidroelektrarne Mavčiče ni enaka dotoku v hidroelektrarno Medvode.

3.4.1.1 Analiza dodatnega dotoka v Zbiljsko jezero

Na podlagi ugotovitve iz poglavja 3.4.1. sem naredila analizo dodatnega dotoka v Zbiljsko jezero. Na voljo se imela podatke o obratovanju hidroelektrarn Mavčiče in Medvode od leta 1988 do leta 2005. Od leta 2002 so mi bila na voljo bolj natančna energetska poročila, v katerih se vsakodnevno beležijo urne vrednosti. Za analizo sem poiskala tiste mesečne vrednosti potrošnje obeh hidroelektrarn, pri katerih ni bilo prelivanja preko prelivnih polj. Za vrednosti potrošnje od leta 2002 do leta 2005 sem enostavno izločila mesece, ko je bilo prelivanje, saj se v energetskih poročilih vodi dnevna in mesečna evidenca vrednosti pretoka preko prelivnih polj. Za preostala leta sem na podlagi podatkov pretokov iz vodomerne postaje Medno, poiskala mesece, ko je elektrarna prelivala. Iz hidrogramov, katere sem predhodno narisala, sem izbrala tiste mesece (preglednica 7), v katerih pretok ni presegal $140 \text{ m}^3/\text{s}$ (SEL, 2002); toliko znaša instalirani pretok hidroelektrarne Medvode (karakteristika agregatov pred obnovitvijo za katere sem imela na voljo podatke o obratovanju). Nato sem iz mesečnih energetskih poročil za izbrane mesece poiskala vrednosti potrošnje hidroelektrarn

Mavčiče in Medvode. Iz izbranih podatkov o potrošnji hidroelektrarn Mavčiče in Medvode sem dodatni dotok izračunala po enačbi 4:

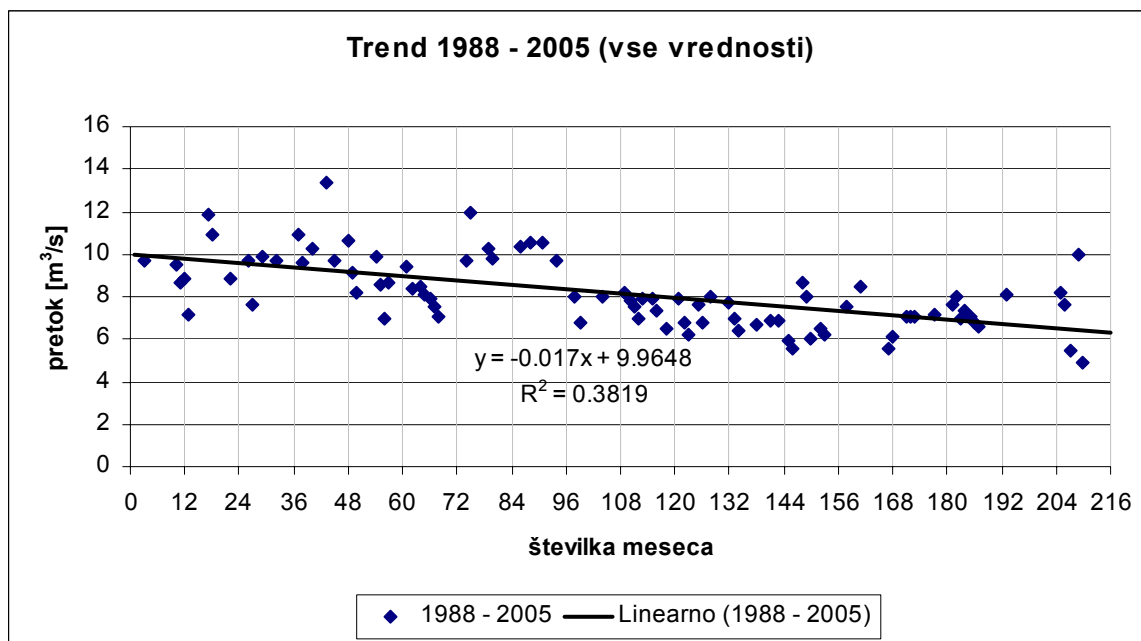
$$\Delta Q = Q_p^{Med} - Q_p^{Mav} \quad (4)$$

ΔQ [m³/s] ... dodatni dotok v Zbiljsko jezero

Q_p^{Med} [m³/s] ... potrošnja hidroelektrarne Medvode

Q_p^{Mav} [m³/s] ... potrošnja hidroelektrarne Mavčiče

Iz dobljenih rezultatov sem izrisala grafikon 1, ki prikazuje mesečno spreminjanje vrednosti dodatnega dotoka. Privzela sem linearni trend. Ker gre za merjene povprečne vrednosti, je koeficient ujemanja razmeroma majhen. Na grafikonu 1 se vidi, da se dodatni dotok spreminja. Količine dodatnega dotoka so prikazane v preglednici 7. Maksimalna količina dodatnega dotoka znaša 17,4 m³/s, minimalna 4,6 m³/s. Pod 5 m³/s pade količina dodatnega dotoka le dvakrat (preglednica 7) od 95 izračunanih vrednosti dodatnega dotoka.



Grafikon 1: Vrednosti dodatnega dotoka od leta 1988 – 2005

Preglednica 7: Vrednosti dodatnega dotoka

leto	mesec	Q_{dod} [m ³ /s]
1988	marec	9.7
1988	oktober	9.5
1988	november	8.7
1988	december	8.8
1989	januar	7.2
1989	maj	11.9
1989	junij	10.9
1989	oktober	8.8
1990	februar	9.7
1990	marec	7.6
1990	maj	9.9
1990	avgust	9.7
1991	januar	10.9
1991	februar	9.6
1991	april	10.3
1991	julij	13.4
1991	avgust	17.4
1991	september	9.7
1991	december	10.6
1992	januar	9.1
1992	februar	8.2
1992	junij	9.9
1992	julij	8.6
1992	avgust	7
1992	september	8.7
1993	januar	9.4
1993	februar	8.4
1993	april	8.5
1993	maj	8.1
1993	junij	7.9
1993	julij	7.5
1993	avgust	7.1
1994	februar	9.7
1994	marec	12
1994	julij	10.3
1994	avgust	9.8
1995	februar	10.4

»se nadaljuje ... «

»... nadaljevanje«

1995	april	10.5
1995	julij	10.5
1995	oktober	9.7
1996	februar	8
1996	marec	6.8
1996	avgust	8
1997	januar	8.2
1997	februar	7.8
1997	marec	7.5
1997	april	7
1997	maj	7.9
1997	julij	7.9
1997	avgust	7.3
1997	oktober	6.5
1998	januar	7.9
1998	februar	6.8
1998	marec	6.2
1998	maj	7.6
1998	junij	6.8
1998	avgust	8
1998	december	7.7
1999	januar	7
1999	februar	6.4
1999	junij	6.7
1999	september	6.9
1999	november	6.9
2000	januar	5.9
2000	februar	5.6
2000	april	8.7
2000	maj	8
2000	junij	6
2000	avgust	6.5
2000	september	6.2
2001	februar	7.5
2001	maj	8.5
2001	november	5.6
2001	december	6.1
2002	januar	4.6
2002	februar	5.3

»se nadaljuje ... «

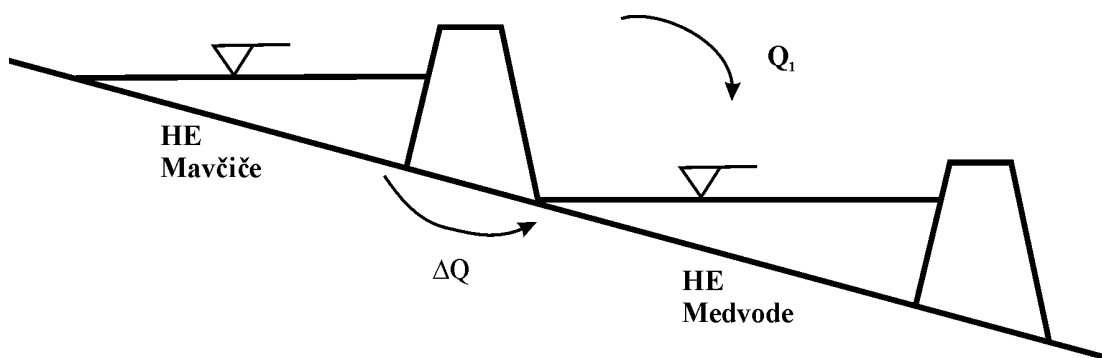
»... nadaljevanje«

2002	marec	7.1
2002	april	7.1
2002	maj	7.1
2002	junij	6.2
2002	september	7.2
2002	december	8.8
2003	januar	7.6
2003	februar	8.0
2003	marec	7.0
2003	april	7.3
2003	maj	7.1
2003	junij	6.8
2003	julij	6.6
2004	januar	8.1
2005	januar	8.2
2005	februar	7.6
2005	marec	5.5
2005	maj	10.0
2005	junij	4.9

Na vplivnem območju hidroelektrarne Medvode se pojavlja še vpliv podtalnice s kranjsko – soriškega polja (SEL, 2005) ter vpliv zalednih voda, katera se stekajo v Zbiljsko jezero. Na sliki 9 je shematski prikazan vpliv dodatne količine vode, ki se steka v kompenzacijski bazen hidroelektrarne Medvode. ΔQ predstavlja dodatni dotok iz akumulacijskega bazena hidroelektrarne Mavčiče, ki nastane zaradi slabega tesnjenja tesnilne zavese v Mavčičah. Q_1 zajema vpliv podtalnice in zalednih voda, katerih količina je odvisna od padavin. Sprva sem poskusila poiskati morebitno odvisnost med pretokom na reki Savi in vrednostjo dodatnega dotoka (ΔQ in Q_1) v Zbiljsko jezero. Izkazalo se je da je povsem drugačna dinamika spreminjanja vrednosti pretoka na reki Savi in dodatnega dotoka v Zbiljsko jezero. V primeru, da bi povezava obstajala, bi se s povečanjem pretoka na reki Savi, povečala tudi vrednost dodatnega dotoka v kompenzacijski bazen HE Medvode. V tem primeru, temu ni tako. Vpliv zalednih voda se lahko opazi na brežini jezera, kjer se nahajajo betonske cevi preko katerih je v jezero speljana lokalna voda (slika 10). V neposredni bližini Zbiljskega jezera se nahaja izvir (slika 11).

Ker sem imela na voljo le mesečna energetska poročila za hidroelektrarni Mavčiče in Medvode, sem v modelu črpanja upoštevala, da vsako uro v kompenzacijski bazen HE Medvode priteče $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Vrednost $5 \text{ m}^3/\text{s}$ sem izbrala, ker glede na rezultate (preglednica 7, grafikon 1), dodatni dotok le dvakrat pade pod $5 \text{ m}^3/\text{s}$ v vseh preostalih mesecih, ko ni bilo prelivanje so vrednosti večje od $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Če bi želela upoštevati točno količino dodatne vode, ki vsako uro priteče v kompenzacijski bazen, bi morala izdelati model v katerem bi določila dinamiko spreminjanja dodatnega dotoka v Zbiljsko jezero. Poleg tega bi predhodno bilo potrebno narediti analizo vodne bilance vplivnega območja hidroelektrarne Medvode, s katerimi bi se dejansko določil izvor vseh voda, ki se stekajo v kompenzacijski bazen hidroelektrarne Medvode.



Slika 9: Sistem hidroelektrarn Mavčiče in Medvode z dodatnim dotokom vode (ΔQ in Q_1) v Zbiljsko jezero



Slika 10: Betonska cev na brežini Zbiljskega jezera



Slika 11: Izvir v neposredni bližini Zbiljskega jezera

3.4.1.2 Elementi modela črpanja

Oba dela modela črpanja vsebujeta številne elemente s katerimi se izračunajo in grafično prikažejo procesi dogajanja na obeh hidroelektrarnah. Pri tem so potrebne številne enačbe s katerimi se ti elementi določijo. Elementi, ki so vključeni v obeh delih imajo enak fizikalni pomen. V nadaljevanju so sprva predstavljeni elementi prvega dela – hidroelektrarne Mavčiče, nato sledi predstavitev elementov elektrarne Medvode. Dela se med seboj razlikujeta le v tem, da pri drugem delu; pri hidroelektrarni Medvode, ni izračuna proizvodnje električne energije. V poglavju 3.4.1.3 so predstavljene enačbe s katerimi se izračunajo posamezni elementi. Pri nekaterih enačbah je poleg napisan postopek izračuna.

Prvi del modela črpanja hidroelektrarne Mavčiče vsebuje naslednje elemente:

- Q_{dotMav} [m^3/s]; dotok v akumulacijski bazen HE Mavčiče,
- $Q_{črp}$ [m^3/s], pretok črpanja iz kompenzacijskega bazena HE Medvode v akumulacijski bazen HE Mavčiče,
- Q_{obrMav} [m^3/s]; obratovanje ali potrošnja hidroelektrarne Mavčiče,
- $V_{dotMav} + V_{črp}$ [m^3]; volumen dotoka v akumulacijski bazen HE Mavčiče in volumen črpanja iz dolvodnega bazena,
- V_{obrMav} [m^3]; volumen odtoka ali potrošnje HE Mavčiče (v modelu se jo označi kot negativna vrednost),
- *bilanca* [$1000m^3$]; urna bilanca se določi po enačbi 9,
- V_{kum} [m^3]; trenutni relativni volumen vode se določi urno s sprotno vsoto (enačba 11),
- H_{baz} [m]; absolutna višina gladine zgornje vode ob izbranem času t ; se izračuna po enačbi 5, s tem da morajo biti predhodno znan dejanski volumen (V_{bruto}) ob izbranem času t ,
- V_{bruto} [m^3]; bruto ali dejanski volumen vode akumulacijskega bazena HE Mavčiče. Izračun dejanskega volumna akumulacijskega bazena je nekoliko bolj zapleten kot preostali izračuni. Natančen postopek je opisan v poglavju 3.4.1.3. V izračunu so uporabljene enačbe 6, 13, 14 in 15;
- $h_{nihanja}$ [m]; predstavlja razliko med maksimalno višino gladine zgornje vode in višino gladine zgornje vode ob izbranem čas – t (enačba 19)

- $h_{sp.v.}$ [m]; višina spodnje vode je v tem primeru, absolutna višina zgornje vode hidroelektrarne Medvode,
- H_{bruto} [m]; bruto višina (enačba 20)
- $E_{\dot{c}rp}$ [MWh]; energija potrebna za črpanje (enačba 21, 22, 23)
- E_{proizv} [MWh]; proizvedena električna energija (enačba 21, 24, 25)
- $cena$ [SIT]; predstavlja vrednost tarifnega območja. Električna energija proizvedena na hidroelektrarni ima preko dneva različno vrednost. V času, ko elektrarna obratuje v nočnem pasu je 1 kWh ura vredna 5 SIT (SIT – slovenski tolarji), v trapeznem režimu obratovanja je 1 kWh proizvedene električne energije 10 SIT, v času vršnega obratovanja znaša 1 kWh proizvedene električne energije 15 SIT.
- $vred.E_{\dot{c}rp}$ [1000SIT]; vrednost energije, ki je potrebna za črpanje. Izračuna se jo tako, da se energija potrebna za črpanje pomnoži s ceno tarifnega območja, v katerem se je črpalo. Enota $vred.E_{\dot{c}rp}$ je 1000SIT, ker je energija potrebna za črpanje izražena v MWh.
- $vred.E_{proizv}$ [1000SIT]; vrednost proizvedene električne energije. Izračuna se jo kot produkt količine proizvedene električne energije in cene tarifnega območja v kateri se je proizvedla električna energija. Enota $vred.E_{proizv}$ je 1000SIT, ker je enota proizvedene energije MWh.
- $tarifa$ [območje]; tarifa je območje v katerem se bodisi črpa ali proizvaja električna energija. Pri hidroelektrarnah obstajajo tri tarifna območja. Prvo tarifno območje; je obdobje nočne energije, ko je energija najcenejša. Že samo ime pove, da je to energija, ki se proizvaja čez noč, vendar v primeru hidroelektrarn je to le izjemoma, v primeru visokih voda ali morebitnih kakšnih drugih tehničnih razlogih. Drugo tarifno območje predstavlja trapezna energija, ki se proizvaja čez dan, ko ni velika potrošnja električne energije. Tretje tarifno območje predstavlja vršna energija. V tem območju ima proizvedena električna energija trikrat večjo vrednost kot če bi bila proizvedena čez noč. Hidroelektrarna praviloma vršno obratuje v času, ko se poveča potrošnja električne energije in sicer zjutraj od 7.00 do 9.00, popoldne od 12.00 do 14.00 in zvečer od 19.00 do 21.00 ure.

Drugi del modela črpanja hidroelektrarne Medvode, vsebuje naslednje elemente:

- Q_{dotMed} [m³/s]; dotok v akumulacijski bazen HE Medvode,
- Q_{dod} [m³/s]; dodatni dotok v bazen HE Medvode, ki znaša 5 m³/s,

- $Q_{\dot{c}rp}$ [m^3/s], pretok črpanja iz kompenzacijskega bazena HE Medvode v akumulacijski bazen Mavčiče (v tem delu ima pretok črpanja negativno vrednost),
- Q_{obrMed} [m^3/s]; obratovanje ali potrošnja hidroelektrarne Mavčiče,
- $V_{dotMed} + V_{dod.dot}$ [m^3]; vsota volumnov dotoka in dodatnega dotoka v kompenzacijski bazen hidroelektrarne Medvode,
- $V_{obrMav} + V_{(-\dot{c}rp)}$ [m^3]; vsota volumnov odtoka ali potrošnje HE Medvode in količine vode, ki se jo črpa in Zbiljskega jezera (v modelu se ju označi kot negativna vrednost),
- *bilanca* [$1000m^3$]; urna bilanca se izračuna po enačbi 10,
- V_{kum} [m^3]; trenutni relativni volumen vode se določa urno s sprotno vsoto (enačba 12);
- H_{baz} [m]; absolutna višina gladine zgornje vode ob izbranem času t . Višina zgornje vode na hidroelektrarni Medvode se izračuna po enačbi 7, s tem da morajo biti predhodno že izračunane vrednosti bruto volumna.
- V_{bruto} [m^3]; bruto ali dejanski volumen vode akumulacijskega bazena HE Medvode. Natančen postopek izračuna je predstavljen v poglavju 3.4.1.3,
- $h_{nihanja}$ [m]; višina nihanja gladine zgornje vode se izračuna po enačbi 19.

3.4.1.3 Enačbe za izračun modela črpanja

V tem poglavju so predstavljene vse enačbe, ki so potrebne za izračun modela črpanja. Enačbe za izračun so vzete iz seminarja pri predmetu Hidrotehnični objekti.

Enačbe, ki določajo odvisnost dejanskega volumna od višine zgornje vode ter odvisnost višine zgornje vode od dejanskega volumna bazena za hidroelektrarni Mavčiče in Medvode; sem določila v programu Excel z iskanjem ustrezne regresijske krivulje.

Za prvi dve odvisnosti sem imela na voljo podatke o izmeri bazena hidroelektrarn Mavčiče (Inštitut za hidravlične raziskave, 1998) in Medvode (Inštitut za hidravlične raziskave, 2000), s pomočjo katerih sem določila enačbe 5, 6, 7 in 8. Pri določevanju enačb sem izbrala samo tisto območje izmerjenih vrednosti, ki je zanimivo za proučevanje obravnavanega problema. Pri HE Mavčiče sem vzela podatke v območju višine zgornje vode od 333,0 m do 346,0 m, pri HE Medvode sem vzela podatke v območju višine zgornje vode od 322,0 m do 328,5 m. Če sem vzela vse izmerjene podatke je bil faktor ujemanja zelo majhen. Izbrala sem polinomsko funkcijo. Stopnja polinoma sem vzela odvisno od ujemanja z merjenimi podatki. Pri enačbah 5, 6, 7, je polinom četrte stopnje, pri enačbi 8, je polinom tretje stopnje. Če sem se hotela čim bolj približati merjenim vrednostim, sem morala pri enačbah upoštevati veliko decimalnih mest. V primeru neupoštevanja zadostnega števila decimalnih mest nastanejo med rezultati razmeroma velika odstopanja.

HE Mavčiče – odvisnost višine zgornje vode od volumna akumulacijskega bazena

$$\begin{aligned} h_i = & -5,20629016691351 \cdot 10^{-16} \cdot V_i^4 + 1,64848440892397 \cdot 10^{-11} \cdot V_i^3 - \\ & - 2,17324678666842 \cdot 10^{-7} \cdot V_i^2 + 2,50920166717973 \cdot 10^{-3} \cdot V_i + \\ & + 330,51585769042 \end{aligned} \quad (5)$$

HE Mavčiče – odvisnost volumna od dejanske višine gladine zgornje vode

$$\begin{aligned} V_i = & 2,70541872350805 \cdot 10^{-2} \cdot h_i^4 - 37,0185027947991 \cdot h_i^3 + \\ & + 19012,9474843385 \cdot h_i^2 - 4343357,59614995 \cdot h_i + \\ & + 372290739,200552 \end{aligned} \quad (6)$$

HE Medvode – odvisnost višine od volumna kompenzacijskega bazena

$$h_i = -1,64620742946362 \cdot 10^{-13} \cdot V_i^4 + 1,50141158311850 \cdot 10^{-9} \cdot V_i^3 - 5,07579830949270 \cdot 10^{-6} \cdot V_i^2 + 9,10131622696861 \cdot 10^{-3} \cdot V_i + 319,492939863474 \quad (7)$$

HE Medvode – odvisnost volumna od dejanske višine gladine zgornje vode

$$V_i = -0,43622155 \cdot h_i^3 + 478,47757877 \cdot h_i^2 - 172373,34326050 \cdot h_i + 20457894,13813620 \quad (8)$$

Izračun vodne bilance hidroelektrarne Mavčiče:

$$bilanca = (V_{dotMav} + V_{\dot{c}rp}) + (-V_{obrMav}) \quad (9)$$

Izračun vodne bilance hidroelektrarne Medvode:

$$bilanca = (V_{dotMed} + V_{dod.dot}) + (-V_{obrMed} - V_{\dot{c}rp}) \quad (10)$$

Izračun kumulativnega volumna za hidroelektrarno Mavčiče

$$V_{kum} = V_{kumi-1} + ((V_{dotMav} + V_{\dot{c}rp}) + (-V_{obrMav})) \quad (11)$$

Kumulativni volumen za hidroelektrarno Medvode se izračuna z uporabo naslednje enačbe:

$$V_{kum} = V_{kumi-1} + ((V_{dotMed} + V_{dod.dot}) + (-V_{\dot{c}rp} - V_{obrMed})) \quad (12)$$

Za določitev absolutne višine zgornje vode – H_{baz} in bruto volumna bazena – V_{bruto} morajo predhodno biti znati podatki o kumulativnih količinah s pomočjo katerih se lahko izračunata omenjena elementa. Račun višine zgornje vode in bruto volumna se nekoliko razlikuje med prvim in drugim delom modela črpanja.

Pri prvem delu se absolutna višina zgornje vode – H_{baz} in bruto volumen bazena – V_{bruto} izračunata po naslednjem vrstnem redu:

- Sprva se v stolpcu označenim z V_{kum} , poišče največja količina kumulativnega volumna, (preglednica 8, $t = 6h$).

- V stolpcu označenim z H_{baz} , se poleg iskane količine največjega kumulativnega volumna vpiše maksimalna višina zgornje vode, ki znaša 346,00 m.
- V stolpcu, kjer je podan bruto volumen, se z enačbo 6 izračuna volumen bazena pri višini bazena 346,00 m. Ko se določi volumen bazena pri maksimalni višini zgornje vode, je potrebno določiti volumne bazena in njim pripadajoče višine zgornje vode za preostale ure. Volumen bazena se polni ali prazni v odvisnosti od spreminjanja količine kumulativnega volumna. Če se pogleda v preglednico 8, se vidi, da je bila ob 6.00 uri zjutraj največja vrednost kumulativnega volumna. Preostale vrednosti bruto volumna se določijo korakoma. Izračun se začne izvajati od maksimalnega volumna proti začetku dneva ali od maksimalnega volumna proti koncu dneva, odvisno kako se posameznik odloči. Računanje se mora tu začeti, ker je to edini način, s katerim je mogoče izračunati višino zgornjo vode in bruto volumna. V primeru, da se začne računanje izvajati za prvi časovni korak, se kaj kmalu ugotovi, da je na voljo premalo podatkov, s katerimi bi se dalo izračunati iskane elemente. Pod postavko a) je prikazan izračun bruto volumna od maksimalnega volumna proti začetku dneva. Pod točko b) in c) so napisane zakonitosti računanja od maksimalnega volumna proti koncu dneva. V preglednici 8 se vidi, kako se je vrednost bruto volumna spreminjala v skladu s spreminjanjem kumulativne količine volumna, s tem da stolpec V_{bruto} predstavlja absolutne količine vode v bazenu, stolpec V_{kum} predstavlja relativne količine vode.

a) $V_{kum(t)} < V_{kum(t+1)}$; v tem primeru se V_{bruto} izračuna kot:

$$V_{bruto(t)} = V_{bruto(t+1)} - abs(bilanca_{(t)}) \quad (13)$$

b) $V_{kum(t)} > V_{kum(t-1)}$; v tem primeru se V_{bruto} izračuna:

$$V_{bruto(t)} = V_{bruto(t-1)} + abs(bilanca_{(t)}) \quad (14)$$

c) $V_{kum(t)} < V_{kum(t-1)}$; V_{bruto} se izračuna po enačbi:

$$V_{bruto(t)} = V_{bruto(t-1)} - abs(bilanca_{(t)}) \quad (15)$$

- Višine zgornje vode za preostale čase se izračunajo po enačbi 6.

Preglednica 8: Tabela prikazuje izračuna višine gladine zgornje vode in bruto volumna za hidroelektrarno Mavčiče

t	$bilanca$	V_{kum}	H_{baz}	V_{bruto}	$h_{(mihanja)}$
[h]	[1000m ³]	[m ³]	[m]	[1000m ³]	[m]
1	202.07	202068	345.19	10035.04	-0.81
2	205.24	407304	345.40	10237.11	-0.60
3	202.07	609372	345.60	10442.35	-0.40
4	202.07	811440	345.80	10644.42	-0.20
5	0.47	811908	345.99	10846.48	-0.01
6	0.47	812376	346.00	10846.95	0.00
7	-190.33	622044	345.81	10656.62	-0.19
8	-298.33	323712	345.52	10358.29	-0.48
9	-150.73	172980	345.37	10207.56	-0.63
10	79.67	252648	345.45	10287.22	-0.55
11	79.67	332316	345.53	10366.89	-0.47
12	-129.13	203184	345.40	10237.76	-0.60
13	-312.73	-109548	345.08	9925.03	-0.92
14	-172.33	-281880	344.90	9752.70	-1.10
15	79.67	-202212	344.98	9832.36	-1.02
16	79.67	-122544	345.06	9912.03	-0.94
17	79.67	-42876	345.15	9991.70	-0.85
18	79.67	36792	345.23	10071.37	-0.77
19	-316.33	-279540	344.90	9755.04	-1.10
20	-193.93	-473472	344.70	9561.10	-1.30
21	-89.53	-563004	344.60	9471.57	-1.40
22	187.67	-375336	344.80	9659.24	-1.20
23	187.67	-187668	345.00	9846.91	-1.00
24	187.67	0	345.19	10034.58	-0.81

V drugem delu modela črpanja se višina gladine zgornje vode – H_{baz} in bruto volumen – V_{bruto} določita po sledečih korakih:

- Sprva se v stolpcu označenim z V_{kum} , poišče najmanjša količina kumulativnega volumna, (preglednica 9, $t = 6h$).
- V stolpcu označenim z H_{baz} , se poleg iskane količine največjega kumulativnega volumna vpiše minimalna dovoljena višina zgornje vode, ki znaša 326,80 m.
- Nato v stolpcu, kjer je podan bruto volumen, se z enačbo 8 izračuna volumen bazena pri višini bazena 326,80 m. Ko se določi volumen bazena pri minimalni dovoljeni višini

zgornje vode, je potrebno določiti še volumne bazena in njim pripadajoče višine zgornje vode za preostale ure. Volumen bazena se polni ali prazni v odvisnosti od spreminjanja količine kumulativnega volumna. V preglednici 9, se vidi, da je bila ob 6.00 uri zjutraj najnižja količina kumulativnega volumna. Preostale vrednosti bruto volumna se določijo korakoma. Izračun se začne izvajati od minimalnega volumna proti začetku dneva ali od minimalnega volumna proti koncu dneva. Računanje se mora tu začeti, ker je to edini način, s katerim je mogoče izračunati višino zgornjo vode in bruto volumna. V primeru, da se začne računanje izvajati za prvi časovni korak, se kaj kmalu ugotovi, da je na voljo premalo podatkov, s katerimi bi se dalo izračunati iskane elemente. Pod postavko d) je prikazan izračun bruto volumna od minimalnega volumna proti začetku dneva. Pod točko e) in f) so napisani pogoji računanja od minimalnega volumna proti koncu dneva.

d) $V_{kum(t)} > V_{kum(t+1)}$; v tem primeru se V_{bruto} izračuna kot:

$$V_{bruto(t)} = V_{bruto(t+1)} + abs(bilanca_{(t)}) \quad (16)$$

e) $V_{kum(t)} > V_{kum(t-1)}$; v tem primeru se V_{bruto} izračuna:

$$V_{bruto(t)} = V_{bruto(t-1)} + abs(bilanca_{(t)}) \quad (17)$$

f) $V_{kum(t)} < V_{kum(t-1)}$; V_{bruto} se izračuna po enačbi:

$$V_{bruto(t)} = V_{bruto(t-1)} - abs(bilanca_{(t)}) \quad (18)$$

- Višine zgornje vode za preostale čase se izračunajo po enačbi 8.

Preglednica 9: Tabelarični prikaz izračuna višine gladine zgornje vode in bruto volumna za hidroelektrarno Medvode

t	$bilanca$	V_{kum}	H_{baz}	V_{bruto}	$h(nihanja)$
[h]	[1000m ³]	[m ³]	[m]	[1000m ³]	[m]
1	-144.00	-144000	327.77	2638.52	0.97
2	-144.00	-288000	327.54	2494.52	0.74
3	-144.00	-432000	327.32	2350.52	0.52
4	-144.00	-576000	327.09	2206.52	0.29
5	-72.00	-648000	326.87	2062.52	0.07
6	-7.20	-655200	326.80	1990.52	0.00
7	183.60	-471600	327.04	2174.12	0.24
8	158.40	-313200	327.29	2332.52	0.49

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

9	133.20	-180000	327.50	2465.72	0.70
10	-72.00	-252000	327.38	2393.72	0.58
11	-72.00	-324000	327.27	2321.72	0.47
12	208.80	-115200	327.60	2530.52	0.80
13	201.60	86400	327.92	2732.12	1.12
14	201.17	287568	328.22	2933.29	1.42
15	-72.00	215568	328.12	2861.29	1.32
16	-72.00	143568	328.01	2789.29	1.21
17	-72.00	71568	327.89	2717.29	1.09
18	-90.00	-18432	327.75	2627.29	0.95
19	187.20	168768	328.05	2814.49	1.25
20	165.60	334368	328.29	2980.09	1.49
21	158.83	493200	328.50	3138.92	1.70
22	-169.20	324000	328.28	2969.72	1.48
23	-162.00	162000	328.03	2807.72	1.23
24	-162.00	0	327.78	2645.72	0.98

Nihanje gladine zgornje vode bazenov hidroelektrarne Mavčiče in hidroelektrarne Medvode se izračuna po enačbi:

$$h_{nihanja(t)} = H_{max\ baz} - H_{baz(t)} \quad (19)$$

$h_{nihanja(t)}$ [m] ... višina nihanja ob času t

$H_{max\ baz}$ [m] ... maksimalna višina gladine zgornje vode

$H_{baz(t)}$ [m] ... višina gladine zgornje vode ob času t

Bruto višina se izračuna po enačbi:

$$H_{bruto} = H_{baz} - H_{sp.v.} \quad (20)$$

H_{bruto} [m] ... bruto višina

H_{baz} [m] ... višina gladine zgornje vode oz. višina gladine vode v bazenu

$H_{sp.v.}$ [m] ... višina gladine spodnje vode

Enačba za določitev vrednosti potrebne električne energije za črpanje in vrednost proizvedene električne energije na elektrarni je v osnovi enaka; moč pomnožena s časom (enačba 21; - (Mosonyi, 1966)). Med seboj se izračun razlikuje v tem, da se pri računanju proizvedene

električne energije uporabi enačba za moč vodne turbine (enačba 24), pri računanju električne energije potrebne za črpanje pa enačba za moč črpalke (enačba 22).

$$E = \int_0^t P \cdot dt \quad [\text{kWh}] \quad (21)$$

Enačba za moč črpalke (Goljevšček, 1962):

$$P_{\check{c}} = \frac{Q_{\check{c}} \cdot g \cdot \Delta H}{\eta_{\check{c}}} \quad [\text{kW}] \quad (22)$$

$P_{\check{c}}$	[kW]	... moč črpalke
$Q_{\check{c}}$	[m ³ /s]	... pretok skozi črpalke
ΔH	[m]	... razlika med višino zgornje in spodnje vode
g	[m/s ²]	... težnostni pospešek
$\eta_{\check{c}}$	[/]	... učinek črpalnega obratovanja

Stopnja učinka črpalnega obratovanja je določena z enačbo (Goljevšček, 1962),:

$$\eta_{\check{c}} = \eta_{tr} \cdot \eta_m \cdot \eta_{\check{c}} \cdot \eta_c \cdot (1 - \varepsilon) = (0,80 - 0,86) \quad (23)$$

V izračunu sem uporabila vrednost 0,83 (Goljevšček, 1962), za stopnjo učinka črpalnega obratovanja hidroelektrarne Mavčiče.

Enačba je sestavljena iz naslednjih izkoristkov (Goljevšček, 1962),:

- η_{tr} ; izkoristek transformatorja (0,98 – 0,99),
- η_m ; izkoristek motorja (0,96 – 0,97),
- $\eta_{\check{c}}$; izkoristek črpalke (0,87 – 0,90),
- η_c ; izkoristek tlačnega cevovoda (0,990 – 0,955),
- ε ; za lastno rabo oziroma faktor lastne porabe naprave (0,010 – 0,050).

Enačba za moč vodne turbine je sledeča (Goljevšček, 1962),:

$$P_T = Q \cdot g \cdot \Delta H \cdot \eta_T \quad (24)$$

P_T	[kW]	... moč vodne turbine
Q	[m ³ /s]	... pretok skozi vodno turbino

ΔH	[m]	... razlika med višino zgornje in spodnje vode
g	[m/s ²]	... težnostni pospešek
η_T	[/]	... učinek turbinskega obratovanja

Stopnja učinka turbinskega obratovanja je določena s podobno enačbo kot stopnja učinka črpalnega obratovanja (Goljevšček, 1962):

$$\eta_T = \eta_c \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (25)$$

Stopnjo učinka turbinskega obratovanja hidroelektrarne Mavčiče sem vzela iz mesečnih energetskega poročila obratovanja hidroelektrarne za obdobje od leta 2002 do leta 2005. V modelu sem uporabila povprečno štiriletno vrednost stopnjo učinka turbinskega obratovanja, ki znaša 0,86 (SEL, 2002 – 2005).

Enačbo sestavljajo naslednji izkoristki (Goljevšček, 1962),:

- η_c ; izkoristek tlačnega cevovoda,
- η_t ; izkoristek turbine,
- η_g ; izkoristek generatorja
- η_{tr} ; izkoristek transformatorja,
- ε ; za lastno rabo.

3.4.1.4 Karakteristike črpalnega agregata

Črpalni agregat ima naslednje karakteristike:

- maksimalna višina črpanja znaša 19,20 (izračunana po enačbi 26),
- maksimalni pretok črpalnega agregata je 30 m³/s,
- moč agregata znaša 7 MW

$$H_{\max \text{ črp.}} = H_{\max \text{ zg.v.}} - H_{\min \text{ sp.v.}} = 346,00\text{m} - 326,80\text{m} = 19,20\text{m} \quad (26)$$

$H_{\max \text{ črp.}}$	[m]	... maksimalna višina črpanja
$H_{\max \text{ zg.v.}}$	[m]	... maksimalna višina zgornje vode (v Mavčičah znaša 346,00 m)
$H_{\min \text{ sp.v.}}$	[m]	... minimalna višina spodnje vode (v Mavčičah znaša 326,80 m)

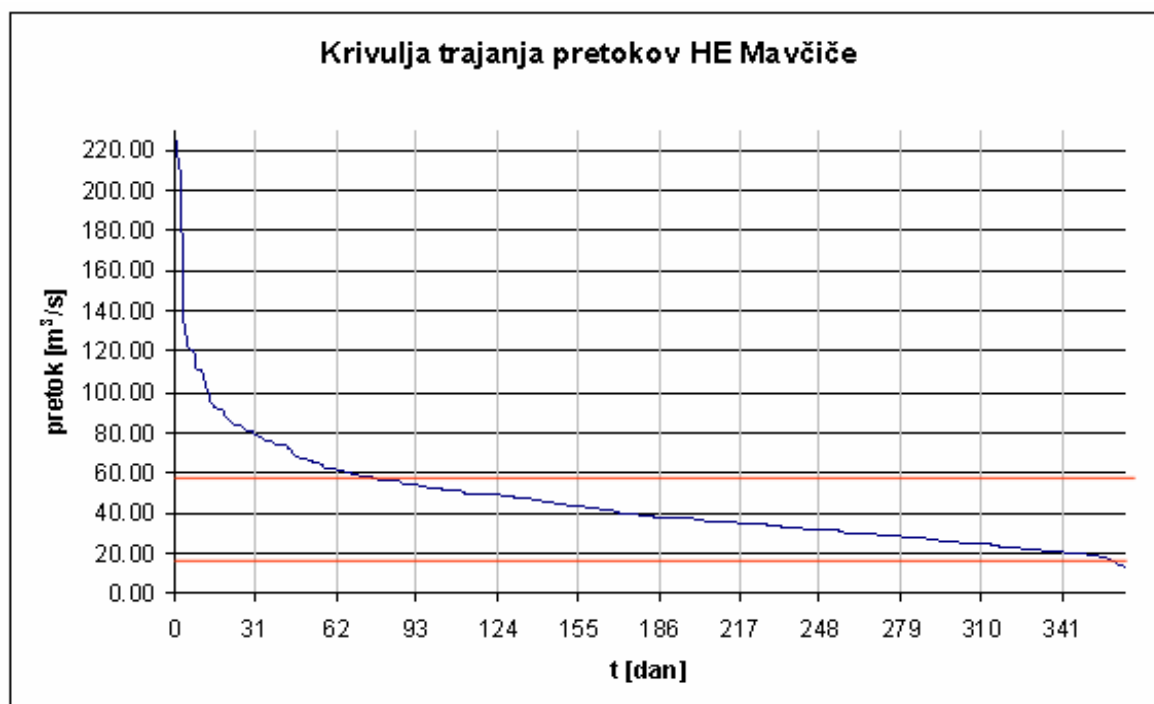
V tem primeru, bi prišla v poštev propellerska črpalka, ki bi se vrtela počasi, približno 200 – 250 min⁻¹ (Turboinstitut, 2006).

3.4.1.5 Določitev količine črpanja v enem letu in proizvodnje električne energije hidroelektrarne Mavčiče v obdobju črpanja

Potem, ko sem nastavila model z vsemi potrebnimi elementi in njim pripadajočimi enačbami sem določila krivuljo trajanja pretokov za hidroelektrarno Mavčiče. Krivuljo sem določila iz dnevniških štiriletnih povprečnih dotokov v akumulacijski bazen hidroelektrarne Mavčiče.

Dostopni so mi bili podatki o dotokih v akumulacijo za leto 2002, 2003, 2004 in 2005, katere sem dobila v mesečnih energetskih poročilih. Mesečna energetska poročila sestavljajo dnevna poročila v katerih se beležijo urne količine na hidroelektrarni, kot na primer: urni dotok v akumulacijski bazen, urna višina zgornje vode, urna višina spodnje vode, urno relativno nihanje zgornje vode, urni pretok skozi turbine, urna dosežena moč turbine in številni drugi elementi, ki nimajo hidravličnih lastnosti. Na koncu vsakega poročila so v tabeli prikazane dnevne vrednosti vseh elementov, ki jih vodijo na hidroelektrarno.

Iz izrisane krivulje trajanja pretokov za hidroelektrarno Mavčiče (grafikon 2) sem poiskala dotoka v akumulacijski bazen Mavčiče, ki predstavlja območje v katerem HE Mavčiče črpa vodo iz kompenzacijskega bazena HE Medvode.



Grafikon 2: Krivulja trajanja pretokov za HE Mavčiče (povpr. obdobje 2002 – 2005)

Zgornja rdeča črta predstavlja dotok v akumulacijski bazen hidroelektrarne Mavčiče 57,40 m³/s (preglednica 10), pri katerem še ni mogoče črpati. Dotok sem določila s pomočjo modela črpanja. V tem primeru je dotok v bazen HE Mavčiče toliko velik, da volumen razpoložljivega bazena HE Mavčiče (1667760 m³; preglednica 10) ne dopušča, da bi se izvajalo črpanje (podatki v stolpcu $Q_{\text{črp}}$ imajo vrednost nič).

Preglednica 10: Dotok v akumulacijski bazen Mavčiče, pri katerem ni mogoče črpati

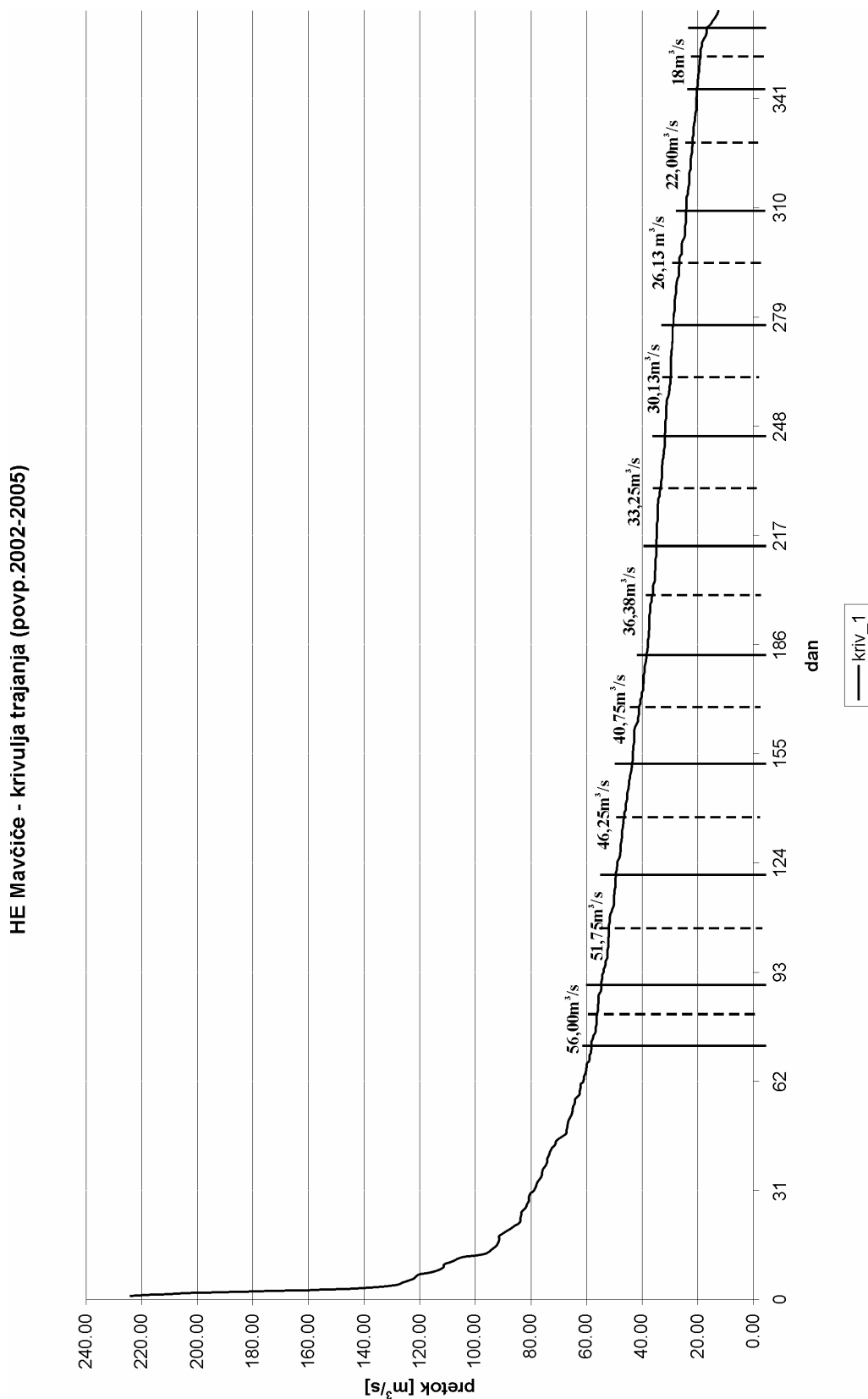
t	QdotMav	Qčrp	QobrMav	Vdot+Včrp	VobrMav	bilanca	Vkum	Hbaz	Vbruto	h(nihanja)
[h]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]	[m ³]	[1000m ³]	[m ³]	[m]	[1000m ³]	[m]
1	57.40	0.00	0.00	206640	0	206.64	206640	344.96	9813.75	-1.04
2	57.40	0.00	0.00	206640	0	206.64	413280	345.17	10020.39	-0.83
3	57.40	0.00	0.00	206640	0	206.64	619920	345.38	10227.03	-0.62
4	57.40	0.00	0.00	206640	0	206.64	826560	345.59	10433.67	-0.41
5	57.40		0.00	206640	0	206.64	1033200	345.80	10640.31	-0.20
6	57.40		-55.00	206640	-198000	8.64	1041840	346.00	10846.95	0.00
7	57.40		-158.00	206640	-568800	-362.16	679680	345.64	10484.79	-0.36
8	57.40		-158.00	206640	-568800	-362.16	317520	345.28	10122.63	-0.72
9	57.40		-157.00	206640	-565200	-358.56	-41040	344.91	9764.07	-1.09
10	57.40		0.00	206640	0	206.64	165600	345.12	9970.71	-0.88
11	57.40		0.00	206640	0	206.64	372240	345.33	10177.35	-0.67
12	57.40		-140.00	206640	-504000	-297.36	74880	345.03	9879.99	-0.97
13	57.40		-139.00	206640	-500400	-293.76	-218880	344.72	9586.23	-1.28
14	57.40		-138.40	206640	-498240	-291.60	-510480	344.41	9294.63	-1.59
15	57.40		0.00	206640	0	206.64	-303840	344.63	9501.27	-1.37
16	57.40		0.00	206640	0	206.64	-97200	344.85	9707.91	-1.15
17	57.40		0.00	206640	0	206.64	109440	345.07	9914.55	-0.93
18	57.40		0.00	206640	0	206.64	316080	345.28	10121.19	-0.72
19	57.40		-149.00	206640	-536400	-329.76	-13680	344.94	9791.43	-1.06
20	57.40		-148.00	206640	-532800	-326.16	-339840	344.60	9465.27	-1.40
21	57.40		-135.20	206640	-486720	-280.08	-619920	344.30	9185.19	-1.70
22	57.40	0.00	0.00	206640	0	206.64	-413280	344.52	9391.83	-1.48
23	57.40	0.00	0.00	206640	0	206.64	-206640	344.74	9598.47	-1.26
24	57.40	0.00	0.00	206640	0	206.64	0	344.95	9805.11	-1.05
	1378	0	-1378	4959360	-4959360		1661760.00			-1.70

Spodnja rdeča črta predstavlja dotok v akumulacijski bazen – 15 m³/s (preglednica 11), pri katerem se črpanje konča (do vključno 15 m³/s se izvaja črpanje). V tem primeru razpoložljivi volumen kompenzacijskega bazena HE Medvode (1144800 m³, preglednica 11), obvezni odtok iz HE Medvode (20 m³/s (preglednica 11, stolpec $Q_{obr,Med}$), določajo omejitev glede količine črpanja. Pri dotoku v akumulacijo elektrarne Mavčiče, manjšem od 15 m³/s, črpanje ni mogoče, ker 20 m³/s znaša obvezni odtok iz elektrarne Medvode, minus dodatni dotok 5 m³/s (preglednica 11, stolpec Q_{dod}). Če se dodatni dotok v modelu hidroelektrarne Medvode ne bi upošteval, bi znašala spodnja meja črpanja 20 m³/s.

Preglednica 11: Spodnja meja črpanja (HE Medvode)

t	QdotMed	Qdod	-Qčrp	QobrMed	VdotMed+Vdod	VobrMed+Včrp	bilanca	Vkum	Hbaz	Vbruto	h(nihanja)	
[h]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]	[m ³]	[1000m ³]	[m ³]	[m]	[1000m ³]	[m]	
1	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-154800	327.81	2663.72	1.01	
2	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-309600	327.57	2508.92	0.77	0.24
3	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-464400	327.32	2354.12	0.52	0.24
4	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-619200	327.08	2199.32	0.28	0.24
5	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-673200	326.84	2044.52	0.04	0.24
6	13	5	0	-20	64800	-72000	-7.20	-680400	326.80	1990.52	0.00	0.04
7	63	5	0	-20	244800	-72000	172.80	-507600	327.02	2163.32	0.22	0.22
8	63	5	0	-20	244800	-72000	172.80	-334800	327.29	2336.12	0.49	0.27
9	63	5	0	-20	244800	-72000	172.80	-162000	327.57	2508.92	0.77	0.27
10	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-216000	327.48	2454.92	0.68	0.09
11	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-270000	327.39	2400.92	0.59	0.09
12	59	5	0	-20	230400	-72000	158.40	-111600	327.65	2559.32	0.85	0.25
13	56	5	0	-20	219600	-72000	147.60	36000	327.88	2706.92	1.08	0.23
14	56	5	0	-20	219600	-72000	147.60	183600	328.11	2854.52	1.31	0.23
15	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	129600	328.02	2800.52	1.22	0.08
16	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	75600	327.94	2746.52	1.14	0.08
17	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	21600	327.86	2692.52	1.06	0.08
18	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-32400	327.77	2638.52	0.97	0.08
19	61	5	0	-20	237600	-72000	165.60	133200	328.03	2804.12	1.23	0.26
20	61	5	0	-20	237600	-72000	165.60	298800	328.28	2969.72	1.48	0.25
21	61	5	0	-20	237600	-72000	165.60	464400	328.50	3135.32	1.70	0.22
22	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	309600	328.29	2980.52	1.49	0.21
23	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	154800	328.06	2825.72	1.26	0.23
24	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	0	327.82	2670.92	1.02	0.24
	556	120	-196	-480	2433600	-2433600		1144800		max h =	1.70	0.27

Ko sem določila zgornjo in spodnjo mejo črpanja sem iz krivulje trajanja pretokov za pretoke od 57,30 m³/s do 15 m³/s izračunala proizvodnjo električne energije hidroelektrarne Mavčiče v času črpanja. Edini način s pomočjo katerega sem izračunala proizvodnjo električne energije je bil ta, da sem krivuljo trajanja pretokov razdelila na deset obdobj (preglednica 12). Kot je razvidno na grafikonu 2 ali grafikonu 3 ima krivulja linearno obliko, kar pomeni da pri vsakem obdobju privzamem srednji dotok obravnavanega obdobja za katerega izračunam proizvodnjo električne energije v času črpanja, (izjema je prvo obdobje trajajoče 16 dni, pri katerem se za vsak pretok posebej določila proizvodnjo električne energije). Dobljeno količino nato pomnožim s številom dni (preglednica 12), kolikor je bilo dolgo obdobje ter dobim količino proizvodnje električne energije obravnavanega obdobja.



Grafikon 3: Srednji pretok obravnavanega časovnega obdobja

Preglednica 12: Obravnavana obdobja s časom trajanja

OBDOBJE	SREDNJI PRETOK	ŠTEVILO DNI
[št. obdobja]	[m ³ /s]	[št.]
I.	18,40	16
II.	22,00	34
III.	26,13	32
IV.	30,13	32
V.	33,25	32
VI.	36,38	31
VII.	40,75	31
VIII.	46,25	31
IX.	51,75	32
X.	56,00	17

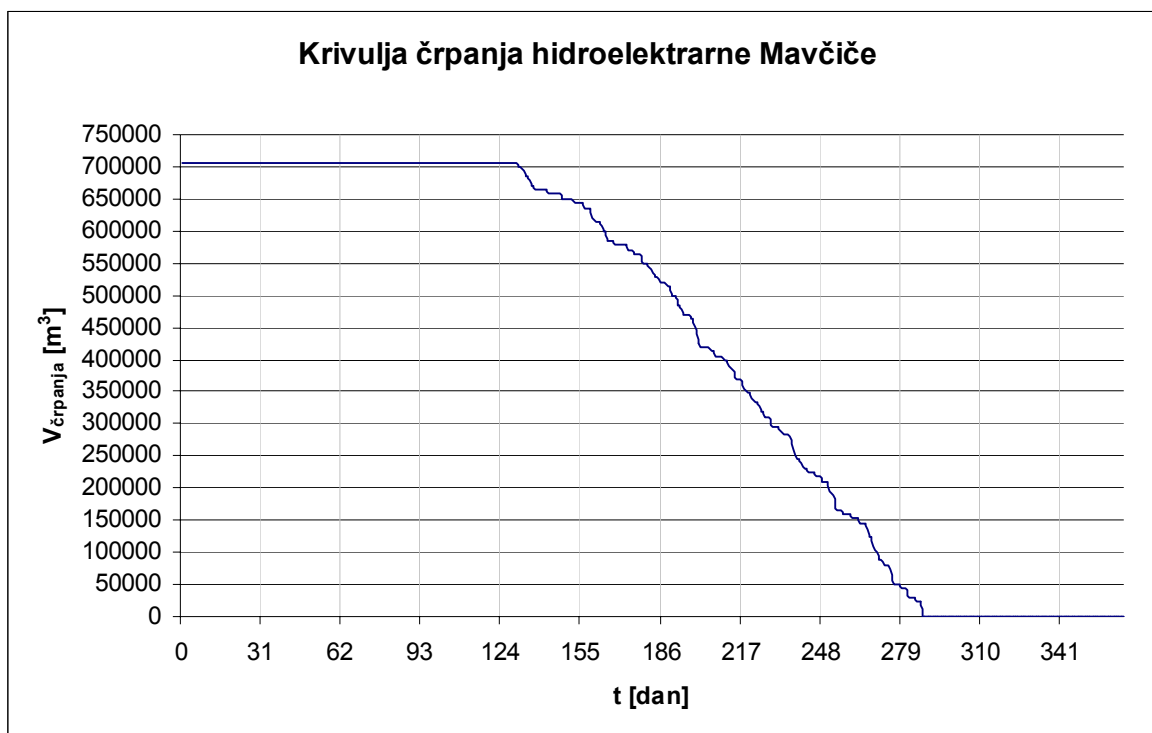
Če seštejem število vseh dni dobim vrednost 288, ki predstavlja število dni v letu, ko se je izvajalo črpanje iz kompenzacijskega bazena HE Medvode v akumulacijski bazen HE Mavčiče.

3.4.1.6 Rezultati modela črpanja

S pomočjo modela črpanja sem na podlagi podatkov o dnevni dotokih v bazen HE Mavčiče določila krivuljo črpanja (grafikon 4), ki prikazuje koliko m³ vode, se lahko posamezen dan v letu črpa iz Zbiljskega jezera v akumulacijski bazen hidroelektrarne Mavčiče. Največja količina črpanja znaša 705600 m³.

Na grafikonu 4 se vidi, da je maksimalna količina črpanja daljši čas konstantna. Po približno 130 – ih dnevni konstantnega črpanja (45 % obdobja črpanja) prične volumen vode linearno upadati do minimalne možne količine, ki je še na razpolago za črpanje. Prvih 45 % obdobja črpanja, hidroelektrarna Medvode s svojim razpoložljivim volumenom, določa maksimalno količino črpanja. Ta zakonitost velja vse do dotoka 33 m³/s v akumulacijski bazen

hidroelektrarne Mavčiče. Pri dotoku v bazen, večjem od $33 \text{ m}^3/\text{s}$, prične razpoložljivi volumen akumulacije HE Mavčiče diktirati, kolikšna bo količina črpanja. Preostalih 55 % obdobja črpanja je bazen HE Mavčiče toliko poln, da mora HE Mavčiče količino črpanja postopno zmanjševati. Pri vsakokratni spremembi dotoka $1 \text{ m}^3/\text{s}$, se volumen črpanja zmanjša za 28800 m^3 .



Grafikon 4: Krivulja črpanja hidroelektrarne Mavčiče

Proizvodnjo električne energije HE Mavčiče sem določila, tako da sem krivuljo pretokov razdelila na posamezna obdobja (poglavje 3.4.1.5, preglednica 12, grafikon 3). Pri vsakem obdobju sem za srednji pretok (na grafikonu 4 so označeni srednji pretoki posameznega obdobja) tega obdobja določila proizvodnjo električne energije. Izračunano proizvodnjo električne energije za obdobje 288 dni sem primerjala z rezultati proizvodnje električne enakega obdobja izračunane na savskih elektrarnah (preglednica 13). Podatke o proizvodnji električne energije hidroelektrarne Mavčiče sem vzela iz mesečnih energetske poročil.

V preglednici 13 sem sprva podala srednje pretoke obravnavanih obdobij in število dni, kolikor traja posamezno obdobje. V tabelo sem vključila še naslednje spremenljivke:

- *Včrp* volumen dnevnega črpanja,
- *Ečrp/dan* je dnevna potrošnja električne energije potrebna za črpanje,
- *Eproizv/dan* je dnevna proizvodnja električne energije, ko se je črpalo,
- *Ečrp* je količina potrošnje električne energije za črpanje v obravnavanem obdobju,
- *Eproizv* je količina proizvedene električne energije v obravnavanem obdobju,
- *ESEL* je količina proizvedene električne energije na savskih elektrarnah za obravnavano obdobje,
- *Edod* predstavlja proizvodnjo električne energije dodatno proizvedeno v času konic na račun načrpane vode iz kompenzacijskega bazena

V 288 dnevih, kolikor je trajalo črpanje, je bilo za črpanje potrebnih 8810,95 MWh (preglednica 13, stolpec *Ečrp*) električne energije, proizvedenih je bilo 42142,69 MWh (preglednica 13, stolpec *Eproizv*) električne energije, med tem ko je bilo v enakem obdobju na savskih elektrarnah proizvedenih 36736,61 MWh (preglednica 13, stolpec *ESEL*). Primerjava proizvodnje električne energije, ko se je črpalo in ko se ni črpalo, pokaže da dodatna količina načrpane vode poveča proizvodnjo za 14%. Če se pri proizvedeni električni energiji (42142,69 MWh) upošteva električno energijo za črpanje (-8810,95 MWh) je dejansko proizvedene električne energije za 9 % manj, to pa je 33331,74 MWh.

Preglednica 13: Primerjava proizvodnje električne energije hidroelektrarne Mavčiče

obdobje	pretok [m ³ /s]	št. dni [dan]	Včrp [m ³]	Ečrp/dan [MWh/dan]	Eproizv/dan [MWh/dan]	Ečrp [MWh]	Eproizv [MWh]	ESEL [MWh]	Edod proiz [MWh]
I.	18,4	16	705600	-40,80	94,17	-652,79	1506,67	1019,04	487,64
II.	22,00	34	705600	-40,70	106,65	-1383,84	3626,16	2618,23	1007,94
III.	26,13	32	705600	-41,10	121,65	-1315,31	3892,71	2929,82	962,90
IV.	30,13	32	705600	-40,36	132,68	-1291,46	4245,79	3409,18	836,61
V.	33,25	32	705600	-40,75	144,47	-1304,11	4623,02	3826,43	796,59
VI.	36,38	31	612000	-35,00	150,15	-1084,91	4654,53	4016,16	638,38
VII.	40,75	31	486000	-27,75	159,94	-860,37	4958,28	4517,69	440,59
VIII.	46,25	31	320400	-18,31	172,30	-567,75	5341,35	5142,12	199,23
IX.	51,75	32	169200	-9,63	185,14	-308,23	5924,43	5845,85	78,58
X.	56,00	17	43200	-2,48	198,22	-42,17	3369,74	3412,11	-42,37
	$\Sigma =$	288			$\Sigma =$	-8810,95	42142,69	36736,61	5406,09

Na naslednjih straneh so prikazani rezultati modela črpanja za drugo obravnavano obdobje, pri katerem znaša srednji pretok $22 \text{ m}^3/\text{s}$ (preglednici 14, 15) in za deveto obravnavano obdobje, pri katerem je srednji pretok $56 \text{ m}^3/\text{s}$ (preglednici 16,17). Omenjena pretoka sem izbrala zato, ker želim prikazati razliko med količino črpanja, nihanjem gladin bazena pri dveh različnih pretokih.

V drugem obravnavanem obdobju, pri dotoku v akumulacijo $22 \text{ m}^3/\text{s}$ je znašala dnevna količina črpanja 705600 m^3 . Črpanje se je pričelo izvajati ob polnoči in je trajalo od 4.00 ure ter proti koncu dneva od 22.00 do 24.00 ure. V tem obdobju hidroelektrarna ne obratuje, zato črpa vodo iz dolvodnega bazena. Režim obratovanja hidroelektrarne Mavčiče in Medvode je prikazan tabelarično (preglednici 14, 15) in grafično (grafikona 5, 7). Preglednici 14 in 15 predstavljata posamezna dela modela črpanja, kateri je bil opisan v predhodnih poglavjih.

Pri režimu obratovanja elektrarne Mavčiče so razvidni trije viški proizvodnje: jutranji višek, sledi opoldanski višek in nato še večerni višek proizvodnje električne energije. Tekom dneva elektrarna ne obratuje. Na grafikonu 6 je prikazano nihanje gladine akumulacijskega bazena čez dan. Zjutraj, ko se prične obratovanje HE Mavčiče je bazen povsem poln (kota bazena je $346,00 \text{ m}$), nato zaradi potrošnje gladina bazena nekoliko upade, potem malenkost naraste, ponovno sledi upad gladine zaradi opoldanskega viška proizvodnje energije; zvečer gladina bazena ponovno upade ter doseže najnižjo dnevno koto bazena ($344,64 \text{ m}$). Na levi strani grafikona 5 je izrisana sekundarna os, ki prikazuje dnevno denivelacijo bazena. Grafikon 9 prav tako prikazuje nihanje gladine bazena s tem, da je spremenjena časovna os. Na grafikonu 9 je zvezno prikazano, kako se je ob 7.00 uri zjutraj pričelo obratovanje (praznjenje bazena in znižanje gladine bazena), sledita še dva upada gladine bazena; zvečer ob 22.00 uri se prične črpanje oziroma polnjenje bazena, ki traja 7 ur.

Za hidroelektrarno Medvode so izrisani enaki grafikoni kot za elektrarno Mavčiče. Na grafikonu 7 je prikazan režim obratovanja. Hidroelektrarna skoraj cel dan obratuje s pretokom $20 \text{ m}^3/\text{s}$, samo zjutraj in opoldne nekoliko poveča svojo proizvodnjo, da ne pride do prevelikega nihanja bazena, zaradi vršnega obratovanja gorvodne elektrarne. Grafikona 8 in 10 predstavljata zrcalno sliko grafikonov 6 in 9. Zjutraj ob 6.00 uri, ko je bazen v Mavčičah povsem poln je v Medvodah višina gladine na najnižji dovoljeni koti ($326,80 \text{ m}$). Ob 21.00

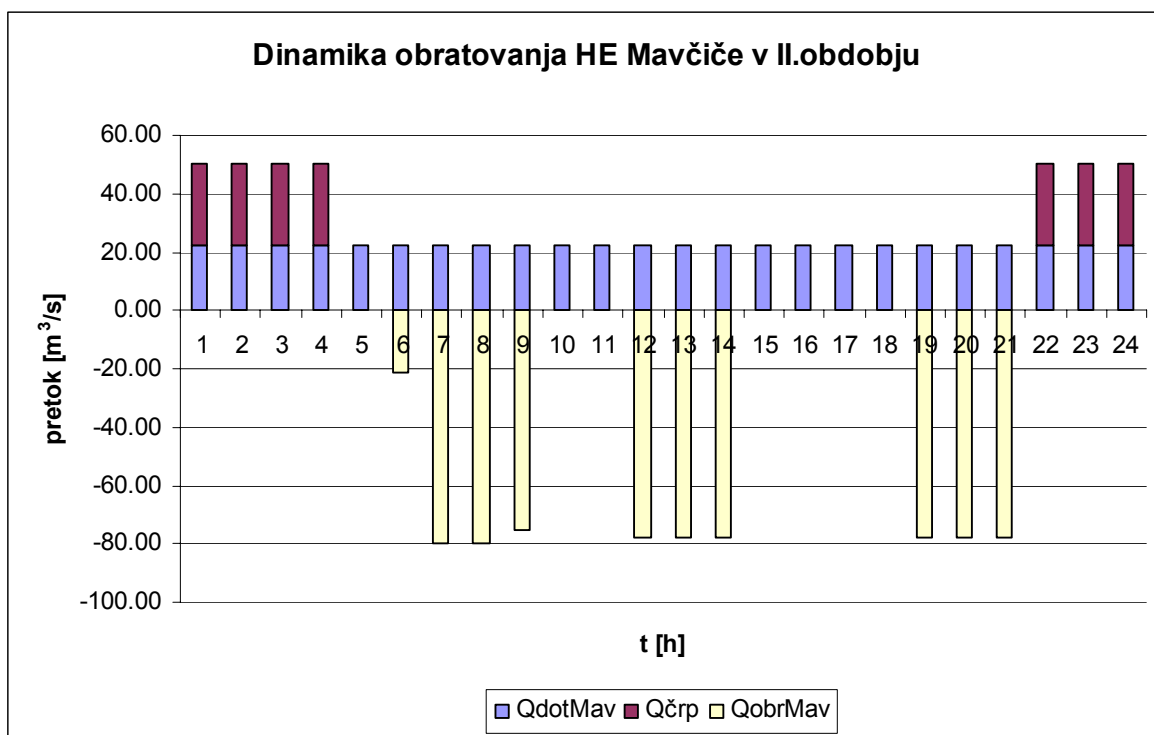
uri, ko pade gladina bazena HE Mavčiče na najnižji nivo (344,64 m; preglednica 14) je gladina bazena HE Medvode na najvišji koti 328,50 m (preglednica 15). Nihanje gladine v bazenu elektrarne Medvode se giblje v nasprotju z nihanjem gladine v Mavčičah. Primerjava polnjenja in praznjenja je najbolj razvidna na grafikonih 9 in 10. Ko se bazen v Mavčičah polni, se bazen v Medvodah prazni in obratno.

Preglednica 14: Prvi del modela črpanja - HE Mavčiče ($Q_{dotMav} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)

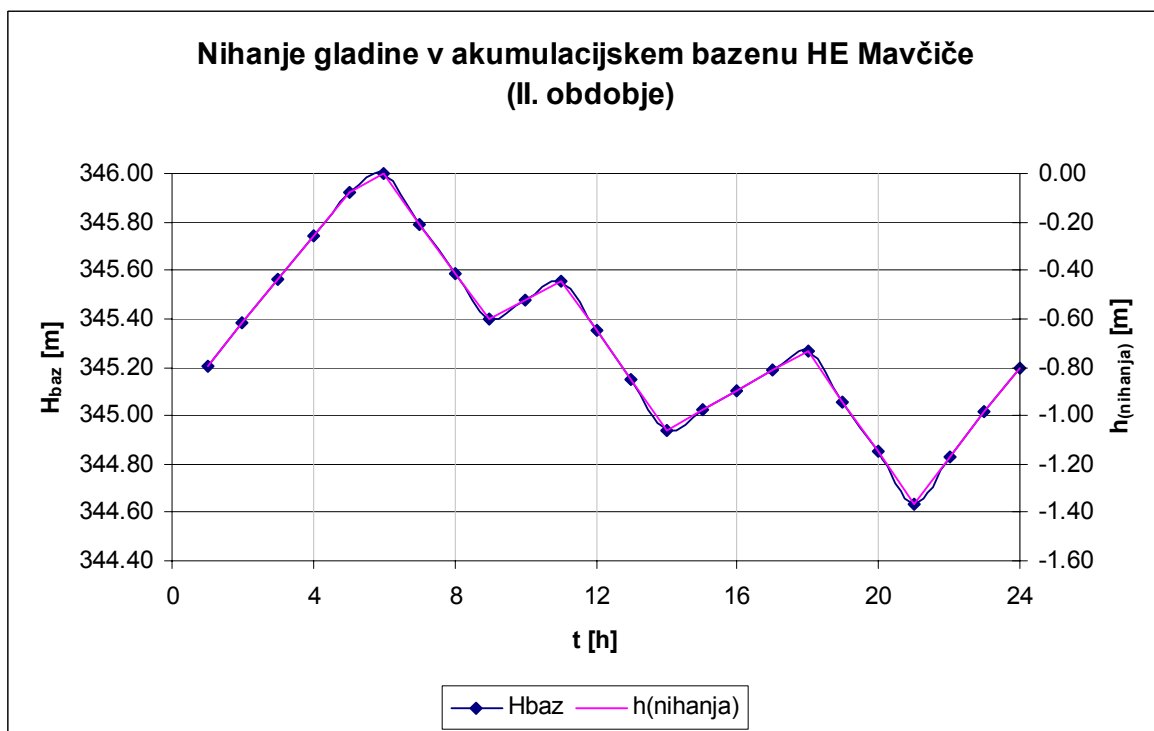
t	QdotMav [m ³ /s]	Qčrp [m ³ /s]	QobrMav [m ³ /s]	Vdot+Včrp [m ³]	VobrMav [m ³]	bilanca [1000m ³]	Vkum [m ³]	Hbaz [m]	Vbruto [1000m ³]	h(nihanja) [m]	hsp.v. [m]	Hbruto [m]	Ečrp [MWh]	Eproizv. [MWh]	cena [1000SIT]	vred.Ečrp [1000SIT]	vred.Eproizv [1000SIT]	tarifa [območje]
1	22,00	28,00	0,00	180000	0	180,00	180000	345,20	10047,75	-0,80	327,81	17,39	-5,76	0,00	5,00	-28,78	0,00	1. tar
2	22,00	28,00	0,00	180000	0	180,00	360000	345,39	10227,75	-0,61	327,57	17,82	-5,90	0,00	5,00	-29,49	0,00	1. tar
3	22,00	28,00	0,00	180000	0	180,00	540000	345,57	10407,75	-0,43	327,32	18,25	-6,04	0,00	5,00	-30,19	0,00	1. tar
4	22,00	28,00	0,00	180000	0	180,00	720000	345,74	10587,75	-0,26	327,08	18,67	-6,18	0,00	5,00	-30,89	0,00	1. tar
5	22,00		0,00	79200	0	79,20	799200	345,92	10767,75	-0,08	326,84	19,08	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
6	22,00		-21,00	79200	-75600	3,60	802800	346,00	10846,95	0,00	326,80	19,20	0,00	3,41	10,00	0,00	34,06	2. tar.
7	22,00		-80,00	79200	-288000	-208,80	594000	345,79	10638,15	-0,21	327,02	18,78	0,00	12,69	15,00	0,00	190,31	3. tar.
8	22,00		-80,00	79200	-288000	-208,80	385200	345,59	10429,35	-0,41	327,28	18,31	0,00	12,37	15,00	0,00	185,55	3. tar.
9	22,00		-75,00	79200	-270000	-190,80	194400	345,40	10238,55	-0,60	327,53	17,87	0,00	11,32	15,00	0,00	169,81	3. tar.
10	22,00		0,00	79200	0	79,20	273600	345,48	10317,75	-0,52	327,44	18,04	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
11	22,00		0,00	79200	0	79,20	352800	345,56	10396,95	-0,44	327,35	18,20	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
12	22,00		-78,00	79200	-280800	-201,60	151200	345,35	10195,35	-0,65	327,62	17,73	0,00	11,68	15,00	0,00	175,22	3. tar.
13	22,00		-78,00	79200	-280800	-201,60	-50400	345,15	9993,75	-0,85	327,89	17,26	0,00	11,37	15,00	0,00	170,55	3. tar.
14	22,00		-78,00	79200	-280800	-201,60	-252000	344,94	9792,15	-1,06	328,14	16,80	0,00	11,07	15,00	0,00	165,98	3. tar.
15	22,00		0,00	79200	0	79,20	-172800	345,02	9871,35	-0,98	328,06	16,96	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
16	22,00		0,00	79200	0	79,20	-93600	345,10	9930,55	-0,90	327,98	17,12	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
17	22,00		0,00	79200	0	79,20	-14400	345,18	10029,75	-0,82	327,90	17,29	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
18	22,00		0,00	79200	0	79,20	64800	345,27	10108,95	-0,73	327,81	17,45	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
19	22,00		-78,00	79200	-280800	-201,60	-136800	345,06	9907,35	-0,94	328,05	17,01	0,00	11,20	15,00	0,00	168,07	3. tar.
20	22,00		-78,00	79200	-280800	-201,60	-338400	344,85	9705,75	-1,15	328,28	16,57	0,00	10,92	15,00	0,00	163,73	3. tar.
21	22,00		-78,00	79200	-280800	-201,60	-540000	344,64	9504,15	-1,36	328,50	16,14	0,00	10,63	15,00	0,00	159,48	3. tar.
22	22,00	28,00	0,00	180000	0	180,00	-360000	344,83	9684,15	-1,17	328,29	16,54	-5,47	0,00	5,00	-27,36	0,00	1. tar
23	22,00	28,00	0,00	180000	0	180,00	-180000	345,01	9864,15	-0,99	328,06	16,95	-5,61	0,00	5,00	-28,05	0,00	1. tar
24	22,00	28,00	0,00	180000	0	180,00	0	345,20	10044,15	-0,80	327,82	17,38	-5,75	0,00	5,00	-28,75	0,00	1. tar
Σ	528	196	-724	2606400	-2606400		1342800			-1,36		Σ =	-40,70	106,65		-203,51	1582,75	[1000SIT]

Preglednica 15: Drugi del modela črpanja - HE Medvode ($Q_{dotMav} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)

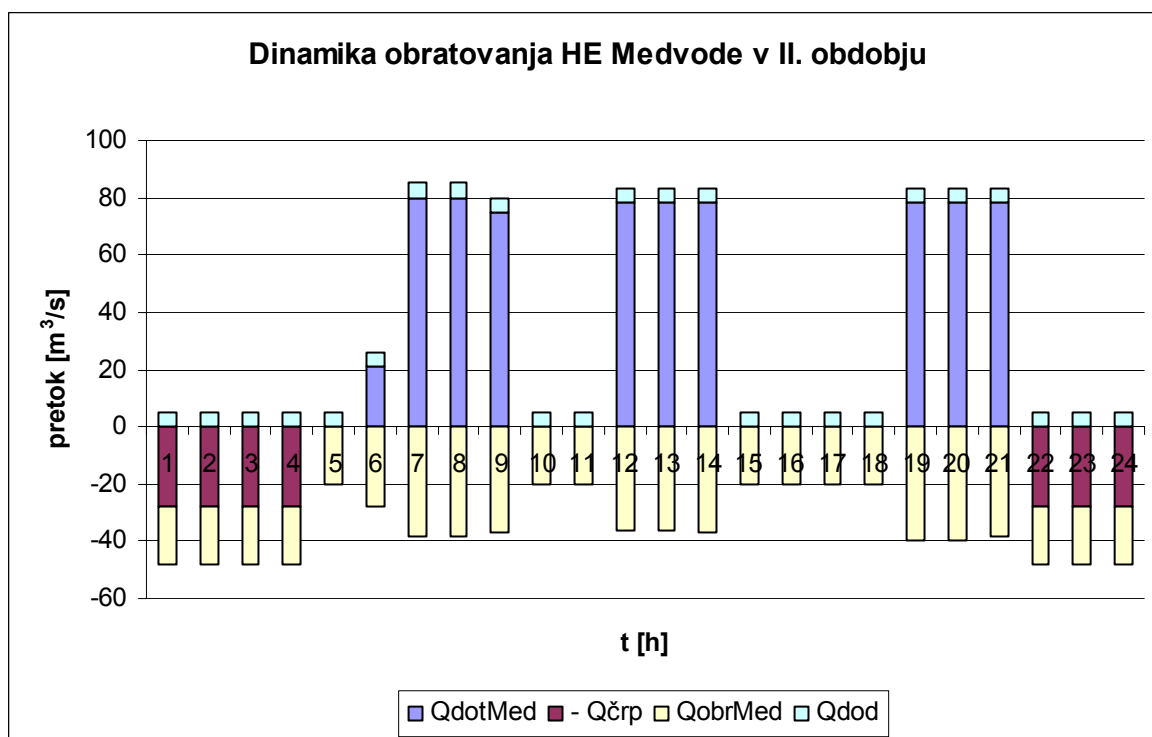
t	QdotMed [m ³ /s]	Qdod [m ³ /s]	-Qčrp [m ³ /s]	QobrMed [m ³ /s]	VdotMed+Vdod [m ³]	VobrMed+Včrp [m ³]	bilanca [1000m ³]	Vkum [m ³]	Hbaz [m]	Vbruto [1000m ³]	h(nihanja) [m]
1	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-154800	327.81	2663.72	1.01
2	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-309600	327.57	2508.92	0.77
3	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-464400	327.32	2354.12	0.52
4	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	-619200	327.08	2199.32	0.28
5	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-673200	326.84	2044.52	0.04
6	21	5	0	-28	93600	-100800	-7.20	-680400	326.80	1990.52	0.00
7	80	5	0	-38	306000	-136800	169.20	-511200	327.02	2159.72	0.22
8	80	5	0	-38	306000	-136800	169.20	-342000	327.28	2328.92	0.48
9	75	5	0	-37	288000	-133200	154.80	-187200	327.53	2483.72	0.73
10	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-241200	327.44	2429.72	0.64
11	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-295200	327.35	2375.72	0.55
12	78	5	0	-36	298800	-129600	169.20	-126000	327.62	2544.92	0.82
13	78	5	0	-36	298800	-129600	169.20	43200	327.89	2714.12	1.09
14	78	5	0	-37	298800	-133200	165.60	208800	328.14	2879.72	1.34
15	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	154800	328.06	2825.72	1.26
16	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	100800	327.98	2771.72	1.18
17	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	46800	327.90	2717.72	1.10
18	0	5	0	-20	18000	-72000	-54.00	-7200	327.81	2663.72	1.01
19	78	5	0	-40	298800	-144000	154.80	147600	328.05	2818.52	1.25
20	78	5	0	-40	298800	-144000	154.80	302400	328.28	2973.32	1.48
21	78	5	0	-38	298800	-136800	162.00	464400	328.50	3135.32	1.70
22	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	309600	328.29	2980.52	1.49
23	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	154800	328.06	2825.72	1.26
24	0	5	-28	-20	18000	-172800	-154.80	0	327.82	2670.92	1.02
Σ =	724	120	-196	-648	3038400	-3038400		1144800		max h =	1.70



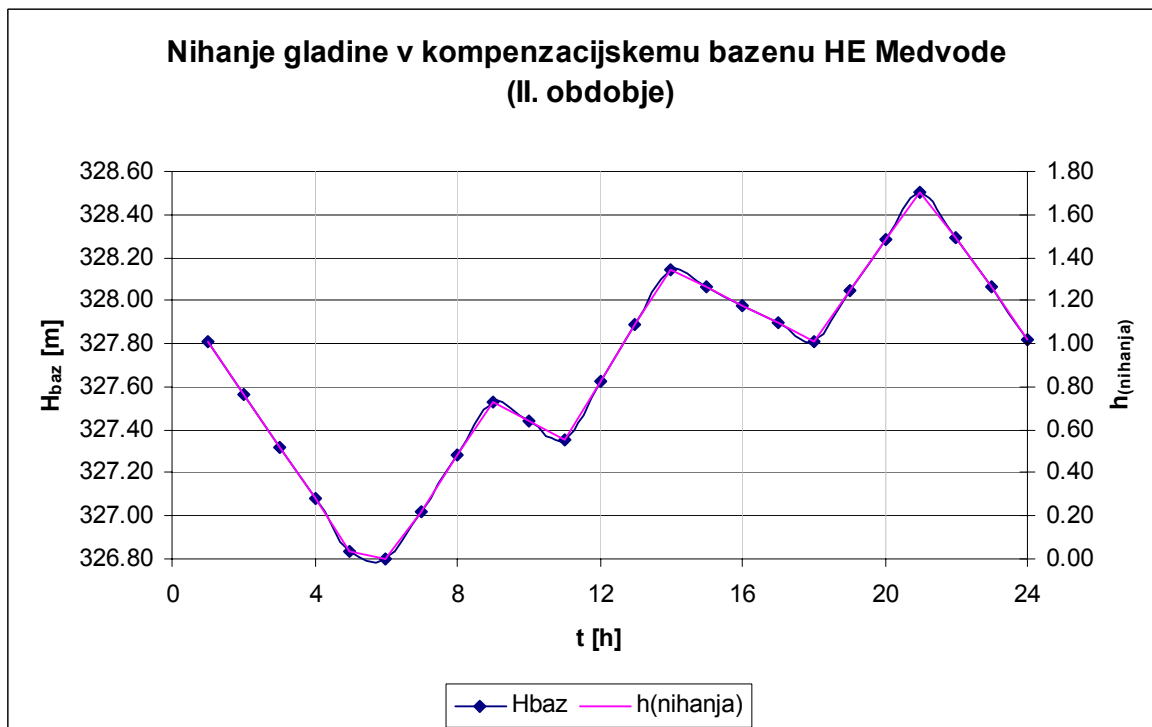
Grafikon 5: Dinamika obratovanja HE Mavčiče (II. obdobje)



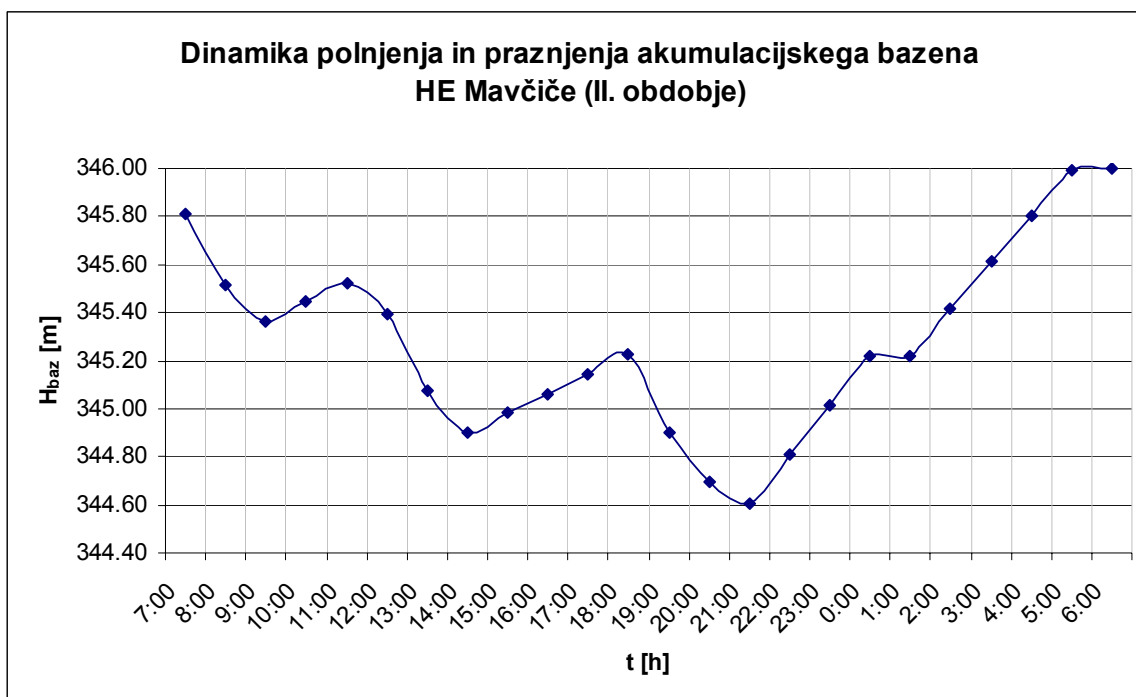
Grafikon 6: Nihanje gladine v akumulacijskem bazenu HE Mavčiče (II. obdobje)



Grafikon 7: Dinamika obratovanja HE Medvode (II. obdobje)



Grafikon 8: Nihanje gladine vode v kompenzacijskem bazenu HE Medvode (II. obdobje)



Grafikon 9: Dinamika polnjenja in praznjenja bazena HE Mavčiče (II. obdobje)



Grafikon 10: Dinamika polnjenja in praznjenja bazena HE Medvode (II. obdobje)

Pri dotoku $56 \text{ m}^3/\text{s}$ v akumulacijo elektrarne Mavčiče se stvari nekoliko spremenijo. V osnovi je dinamika obratovanja povsem enaka kot pri dotoku v akumulacijo $22 \text{ m}^3/\text{s}$, razlika je samo v robnih pogojih. V preglednici 16, ki prikazuje prvi del modela črpanja, se vidi da so Mavčiče dosegle maksimalno dovoljeno denivelacijo 1,70 m, medtem ko so Medvode dosegle dnevno denivelacijo 1,32 m (preglednica 17). Sedaj ni več razpoložljivi volumen bazena HE Medvode tisti, ki bi postavljal omejitev glede količine črpanja, temveč jo postavlja razpoložljivi volumen bazena HE Mavčiče. V tem primeru dotok v akumulacijo že toliko napolni bazen elektrarne Mavčiče, da morajo zmanjšati količino črpanja iz dolvodnega bazena.

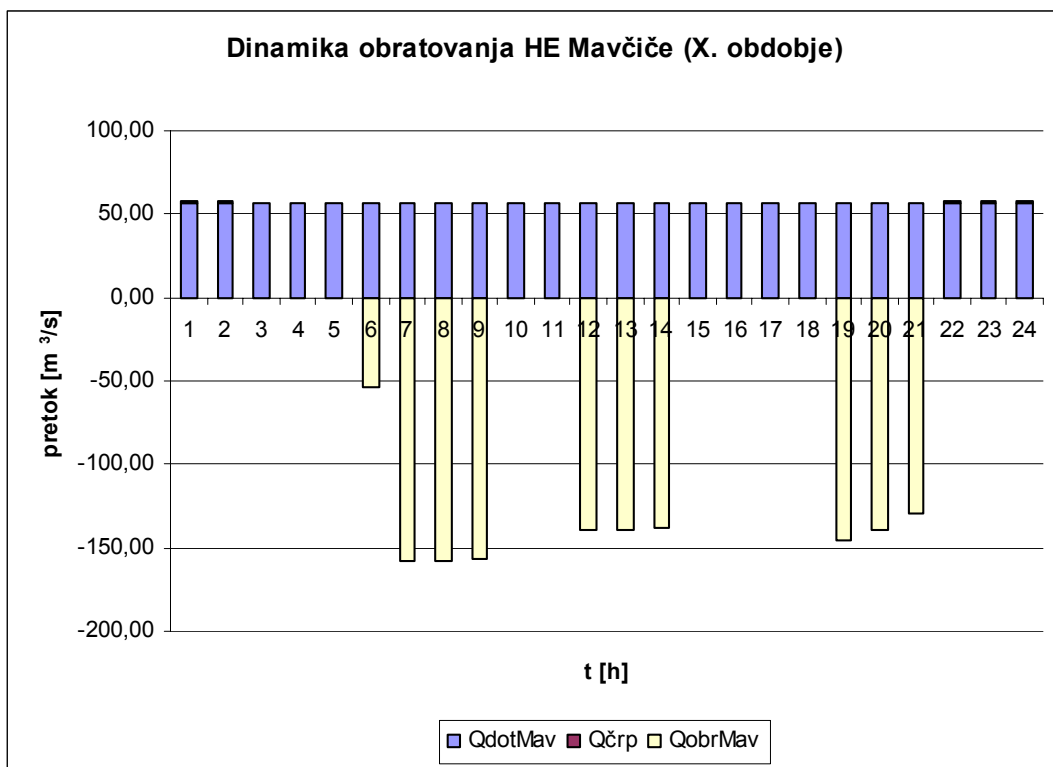
Pri dotoku $56 \text{ m}^3/\text{s}$ znaša dnevna količina črpanja 43200 m^3 (preglednica 16). Obe elektrarni še vedno obratujeta po enakem režimu kot sta pri dotoku $22 \text{ m}^3/\text{s}$. Razlika je v tem, da se poveča pretok skozi turbine (režim obratovanja Mavčiče prikazuje grafikon 11, obratovanje Medvod grafikon 13). Gladine obeh bazenov nihata enako kot pri prejšnjem primeru, elektrarni imata tri viške proizvodnje električne energije (na grafikonih 12 in 14 se jih opazi kot tri večje vrhove), med seboj se razlikujejo le v vrednostih, katere sem že predhodno omenila. Enako je s polnjenjem in praznjenjem bazena (grafikona 15, 16).

Preglednica 16: Prvi del modela črpanja HE Mavčiče ($Q_{dotMav} = 56 \text{ m}^3/\text{s}$)

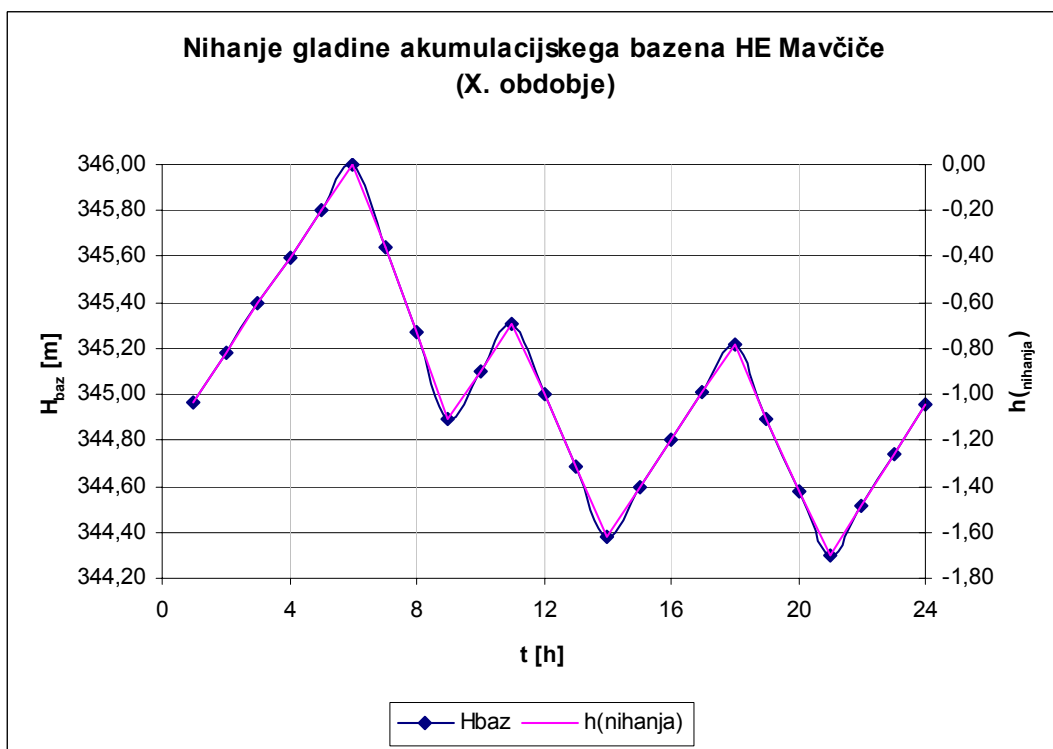
t	QdotMav [m ³ /s]	Qčrp [m ³ /s]	QobrMav [m ³ /s]	Vdot+Včrp [m ³]	VobrMav [m ³]	bilanca [1000m ³]	Vkam [m ³]	Hbaz [m]	Vbruto [1000m ³]	h(nihanja) [m]	hsp v. [m]	Hbruto [m]	Ečrp [MWh]	Eproizv. [MWh]	cena [SIT]	vred.Ečrp [1000SIT]	vred.Eproizv [1000SIT]	tarifa [območje]
1	56,00	2,00	0,00	208800	0	208,80	208800	344,97	9817,35	-1,03	327,49	17,47	-0,41	0,00	5,00	-2,07	0,00	1. tar
2	56,00	2,00	0,00	208800	0	208,80	417600	345,18	10026,15	-0,82	327,34	17,84	-0,42	0,00	5,00	-2,11	0,00	1. tar
3	56,00	1,00	0,00	205200	0	205,20	622800	345,39	10234,95	-0,61	327,19	18,21	-0,22	0,00	5,00	-1,08	0,00	1. tar
4	56,00	1,00	0,00	205200	0	205,20	828000	345,60	10440,15	-0,40	327,04	18,56	-0,22	0,00	5,00	-1,10	0,00	1. tar
5	56,00		0,00	201600	0	201,60	1029600	345,80	10645,35	0,20	326,89	18,91	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
6	56,00		-54,00	201600	-194400	7,20	1036800	346,00	10846,95	0,00	326,80	19,20	0,00	8,76	10,00	0,00	87,57	2. tar.
7	56,00		-158,00	201600	-568800	-367,20	669600	345,64	10479,75	-0,36	327,04	18,60	0,00	24,82	15,00	0,00	372,29	3. tar.
8	56,00		-158,00	201600	-568800	-367,20	302400	345,27	10112,55	-0,73	327,34	17,93	0,00	23,93	15,00	0,00	358,94	3. tar.
9	56,00		-157,00	201600	-565200	-363,60	-61200	344,89	9748,95	-1,11	327,63	17,26	0,00	22,89	15,00	0,00	343,33	3. tar.
10	56,00		0,00	201600	0	201,60	140400	345,10	9950,55	-0,90	327,46	17,64	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
11	56,00		0,00	201600	0	201,60	342000	345,31	10152,15	-0,69	327,29	18,02	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
12	56,00		-139,00	201600	-500400	-298,80	43200	345,00	9853,35	-1,00	327,57	17,43	0,00	20,47	15,00	0,00	306,98	3. tar.
13	56,00		-139,00	201600	-500400	-298,80	-255600	344,69	9554,55	-1,31	327,85	16,84	0,00	19,77	15,00	0,00	296,57	3. tar.
14	56,00		-138,00	201600	-496800	-295,20	-550800	344,38	9259,35	-1,62	328,12	16,26	0,00	18,95	15,00	0,00	284,29	3. tar.
15	56,00		0,00	201600	0	201,60	-349200	344,59	9460,95	-1,41	327,93	16,66	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
16	56,00		0,00	201600	0	201,60	-147600	344,80	9662,55	-1,20	327,75	17,06	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
17	56,00		0,00	201600	0	201,60	54000	345,01	9864,15	-0,99	327,56	17,45	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
18	56,00		0,00	201600	0	201,60	255600	345,22	10065,75	-0,78	327,37	17,85	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	2. tar.
19	56,00		-145,00	201600	-522000	-320,40	-64800	344,89	9745,35	-1,11	327,61	17,28	0,00	21,16	15,00	0,00	317,44	3. tar.
20	56,00		-139,00	201600	-500400	-298,80	-363600	344,58	9446,55	-1,42	327,82	16,76	0,00	19,68	15,00	0,00	295,16	3. tar.
21	56,00		-129,00	201600	-464400	-262,80	-626400	344,30	9183,75	-1,70	327,96	16,33	0,00	17,80	15,00	0,00	266,94	3. tar.
22	56,00	2,00	0,00	208800	0	208,80	-417600	344,52	9392,55	-1,48	327,81	16,71	-0,39	0,00	5,00	-1,97	0,00	1. tar
23	56,00	2,00	0,00	208800	0	208,80	-208800	344,74	9601,35	-1,26	327,66	17,08	-0,40	0,00	5,00	-2,02	0,00	1. tar
24	56,00	2,00	0,00	208800	0	208,80	0	344,96	9810,15	-1,04	327,50	17,46	-0,41	0,00	5,00	-2,06	0,00	1. tar
Σ =	1344	12	-1356	4881600	-4881600	1663200			max h =	-1,70		Σ =	-2,48	198,22	MWh	-12,40	2929,51	[1000SIT]

Preglednica 17: Drugi del modela črpanja HE Medvode ($Q_{dotMav} = 56 \text{ m}^3/\text{s}$)

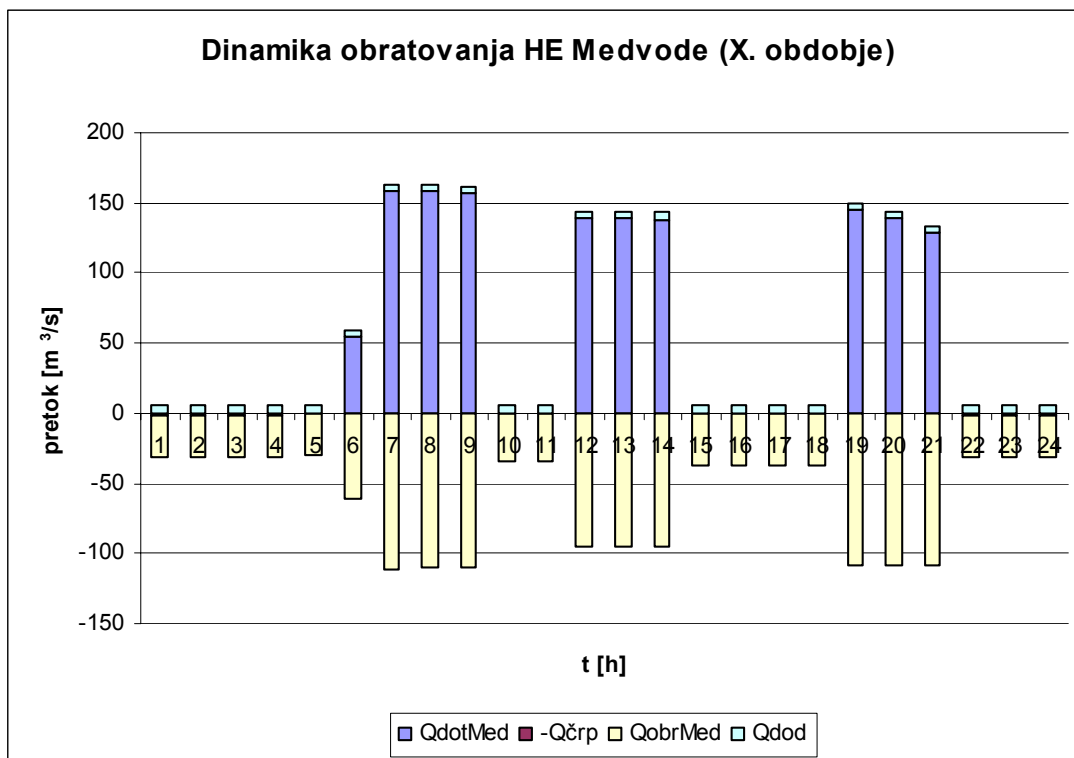
t	QdotMed [m ³ /s]	Qdod [m ³ /s]	- Qčrp [m ³ /s]	QobrMed [m ³ /s]	VdotMed+Vdod [m ³]	VobrMed+V(-črp) [m ³]	bilanca [1000m ³]	Vkum [m ³]	Hbaz [m]	Vbruto [1000m ³]	h(mihanja) [m]
1	0	5	-2	-30	18000	-115200	-97.20	-97200	327.49	2462.12	0.69
2	0	5	-2	-30	18000	-115200	-97.20	-194400	327.34	2364.92	0.54
3	0	5	-1	-30	18000	-111600	-93.60	-288000	327.19	2267.72	0.39
4	0	5	-1	-30	18000	-111600	-93.60	-381600	327.04	2174.12	0.24
5	0	5	0	-30	18000	-108000	-90.00	-471600	326.89	2080.52	0.09
6	54	5	0	-61	212400	-219600	-7.20	-478800	326.80	1990.52	0.00
7	158	5	0	-112	586800	-403200	183.60	-295200	327.04	2174.12	0.24
8	158	5	0	-110	586800	-396000	190.80	-104400	327.34	2364.92	0.54
9	157	5	0	-110	583200	-396000	187.20	82800	327.63	2552.12	0.83
10	0	5	0	-35	18000	-126000	-108.00	-25200	327.46	2444.12	0.66
11	0	5	0	-35	18000	-126000	-108.00	-133200	327.29	2336.12	0.49
12	139	5	0	-95	518400	-342000	176.40	43200	327.57	2512.52	0.77
13	139	5	0	-95	518400	-342000	176.40	219600	327.85	2688.92	1.05
14	138	5	0	-95	514800	-342000	172.80	392400	328.12	2861.72	1.32
15	0	5	0	-38	18000	-136800	-118.80	273600	327.93	2742.92	1.13
16	0	5	0	-38	18000	-136800	-118.80	154800	327.75	2624.12	0.95
17	0	5	0	-38	18000	-136800	-118.80	36000	327.56	2505.32	0.76
18	0	5	0	-38	18000	-136800	-118.80	-82800	327.37	2386.52	0.57
19	145	5	0	-108	540000	-388800	151.20	68400	327.61	2537.72	0.81
20	139	5	0	-108	518400	-388800	129.60	198000	327.82	2667.32	1.02
21	129	5	0	-108	482400	-388800	93.60	291600	327.96	2760.92	1.16
22	0	5	-2	-30	18000	-115200	-97.20	194400	327.81	2663.72	1.01
23	0	5	-2	-30	18000	-115200	-97.20	97200	327.66	2566.52	0.86
24	0	5	-2	-30	18000	-115200	-97.20	0	327.50	2469.32	0.70
	1356	120	-12	-1464	5313600	-5313600		871200			1.32



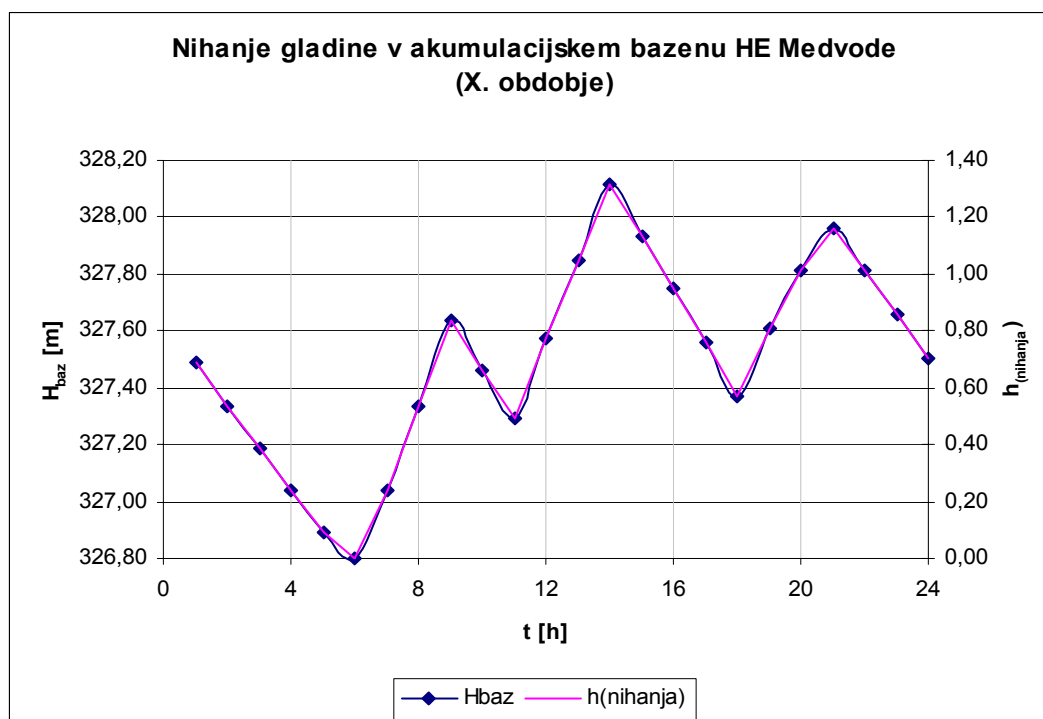
Grafikon 11: Dinamika obratovanja HE Mavčiče (X. obdobje)



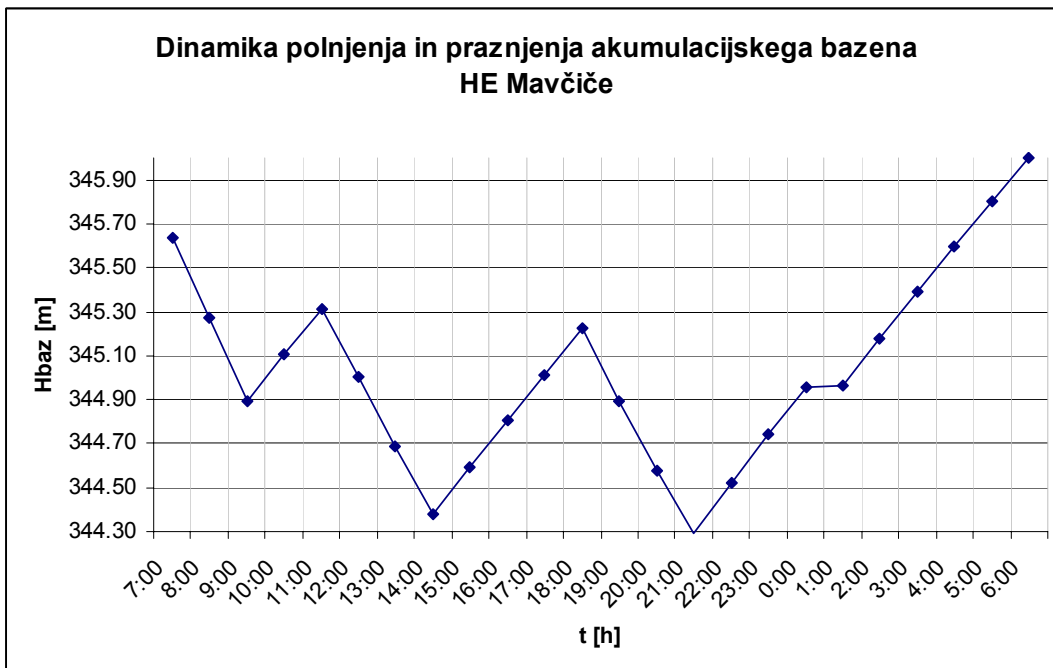
Grafikon 12: Nihanje gladine akumulacijskega bazena HE Mavčiče (X. obdobje)



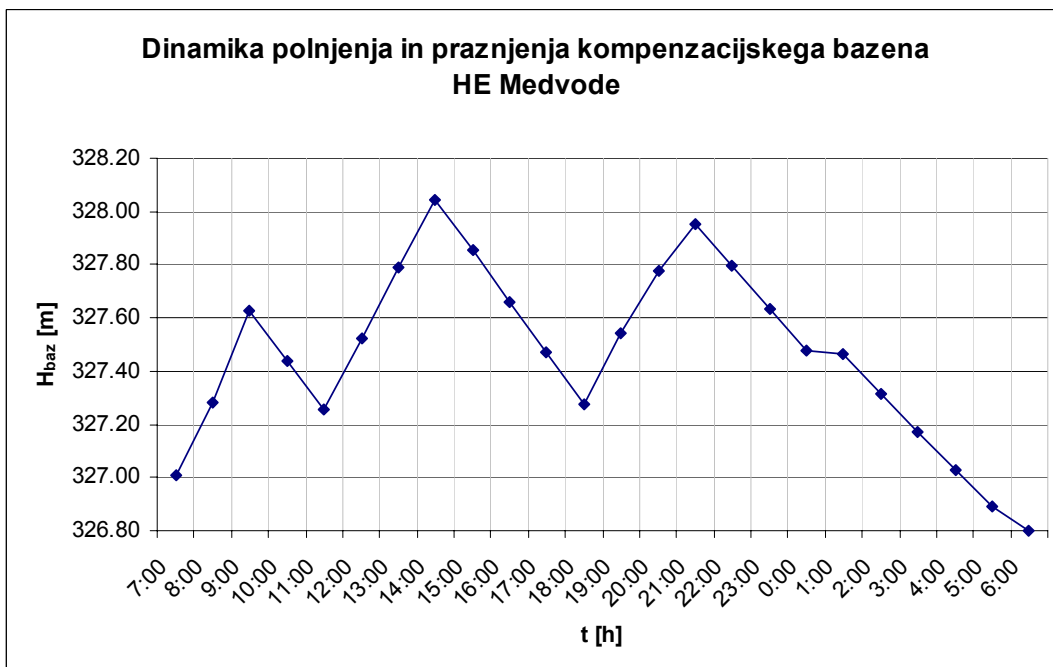
Grafikon 13: Dinamika obratovanja HE Medvode (X. obdobje)



Grafikon 14: Nihanje gladine kompenzacijskega bazena HE Medvode (X. obdobje)



Grafikon 15: Dinamika polnjenja in praznjenja akumulacijskega bazena HE Mavčiče (X. obdobje)



Grafikon 16: Dinamika polnjenja in praznjenja kompenzacijskega bazena HE Medvode (X. obdobje)

3.4.1.7 Analiza vrednosti proizvodnje električne energije

Pogled na proizvodnjo električne energije s finančne plati (preglednica 18) je sledeči. Pri določevanju vrednosti proizvodnje sem upoštevala, da je v nočnem času 1 kWh električne energije vredna 5 SIT (SEL., 2006), v obdobju trapeznega obratovanja 10 SIT za 1 kWh (SEL, 2006), v času konic je 1 kWh električne energije vredna 15 SIT (SEL, 2006). Znesek proizvodnje električne energije sem dobila kot produkt med ceno (tarifno območje v katerem se energija proizvede) in količino proizvedene električne energije.

Vrednost električne energije potrebne za črpanje znaša 44.053.259 SIT. Vrednost proizvodnje električne energije v času črpanja znaša 624.285.596 SIT (preglednica 18, stolpec *vred.Eproizv*). Vrednost dejanske proizvodnje je 580.232.336 SIT (preglednica 18, stolpec *dej.vrednost*), dobljena kot razlika med vrednostjo proizvodnje električne energije v času črpanja in vrednostjo električne energije potrebne za črpanje (strošek).

Vrednost proizvodnje električne energije v času, ko se ni črpalo znaša 546.807.921 SIT (preglednica 18, stolpec *vred.Eproizv(ni_črp)*). Vrednost proizvodnje električne energije v času črpanja (624.285.596 SIT) je za 14% oz 77.477.674 SIT (preglednica 18, stolpec *vred.Edod*) večja od vrednosti proizvodnje, ko se ni črpalo (546.807.921 SIT).

Razlika med vrednostjo proizvodnje v kateri so upoštevani stroški črpanja (580.232.336 SIT) in vrednostjo proizvodnje energije, ko se ni črpalo (546.807.921 SIT) znaša 33.424.415 SIT (preglednica 18, stolpec *vred.Edod – vred.Ečrp*), kar predstavlja dodatno vrednost proizvedene električne energije. Ta pozitivna razlika je nastala zaradi črpanja vode v nočnem času in večje proizvodnje električne energije v času konic.

Preglednica 18: Primerjava proizvodnje električne energije HE Mavčiče s finančnega vidika

obdobje	pretok	št. dni	vred.Ečrp	vred.Eproizv	dej. vrednost	vred.Eproizv(ni_črp)	vred.Edod	vred.Edod - vred.Ečrp
[št.]	[m ³ /s]	[dan]	[1000SIT]	[1000SIT]	[1000SIT]	[1000SIT]	[1000SIT]	[1000SIT]
I.	18,4	16	-3.262,45	22.412,75	19.150,30	16.440,42	5.972,33	2.709,88
II.	22,00	34	-6.919,22	53.813,51	46.894,29	41.556,53	12.256,98	5.337,76
III.	26,13	32	-6.576,54	57.819,87	51.243,32	45.284,80	12.535,06	5.958,52
IV.	30,13	32	-6.457,29	63.115,97	56.658,68	53.255,76	9.860,21	3.402,92
V.	33,25	32	-6.520,57	68.493,24	61.972,67	56.505,78	11.987,46	5.466,89
VI.	36,38	31	-5.424,54	68.908,43	63.483,90	59.138,64	9.769,80	4.345,26
VII.	40,75	31	-4.301,85	73.367,03	69.065,19	65.841,48	7.525,55	3.223,70
VIII.	46,25	31	-2.838,76	79.012,37	76.173,60	74.216,25	4.796,11	1.957,35
IX.	51,75	32	-1.541,17	87.540,75	85.999,58	85.097,41	2.443,34	902,17
X.	56,00	17	-210,87	49.801,67	49.590,80	49.470,84	330,83	119,96
Σ =		288	-44.053,26	624.285,60	580.232,34	546.807,92	77.477,67	33.424,42

3.4.1.8 Ocena investicije črpalnega agregata

S strani Turboinstituta mi je bila dana ustna informacija o okvirni ceni črpalnega agregata, ki znaša od 500 – 700 EUR (evro) / 1kW. Ker gre v mojem primeru za moč črpalke 7 MW, sledi da je okvirna cena črpalnega agregata 4.200.000 EUR ob predpostavki, da upoštevam 600 EUR za 1 kW moči.

Investicijo črpalnega agregata sestavljajo:

- gradbena dela – 40 % (Mosonyi, 1966) investicijske vrednosti (5.600.000 EUR)
- elektroinstalacijska dela – 30 % (Mosonyi, 1966) investicijske vrednosti (4.200.000 EUR)
- strojna oprema – 30 % (Mosonyi, 1966) investicijske vrednosti (4.200.000 EUR)

Skupna vrednost investicije znaša 14.000.000 EUR oziroma 3.360.000.000 SIT (1 EUR = 240 SIT). V primeru, da cene ostanejo nespremenjene se stroški investicije povrnejo v 10 – ih letih, realno gledano bi se investicija povrnila v približno 20 – ih letih. Podane ocene so ranga 20 – 40 % natančnosti.

Po splošnih priporočilih, ki veljajo v inženirski praksi, dobljeno preko konzultacij z različnimi strokovnjaki (Litostroj, SEL), velja za rentabilno investicijo tista, katere instalirani kW ne presega 2500 EUR. Glede na ta priporočila je ocena obravnavane investicije v teh okvirih – 2000 EUR / 1 kW.

3.5 Zaključek

Prvoten namen diplomske naloge je bil izdelati model RiverWare na zgornji verigi savskih elektrarn. Naredila sem model za hidroelektrarno Moste. V tem modelu program izračuna doseženo moč in proizvodnjo električne energije elektrarne. Dobljeni rezultati modela so zaradi neustreznih metod, ki popisujejo dinamiko obratovanja hidroelektrarne, preveč odstopali od rezultatov na savskih elektrarnah. Zato sem večji del naloge namenila izdelavi rekonstrukcije sistema hidroelektrarne Mavčiče in hidroelektrarne Medvode.

Moj namen je bil ugotoviti ali je smiselno, da hidroelektrarna Mavčiče, v nočnem času ko ne obratuje, črpa vodo iz kompenzacijskega bazena hidroelektrarne Medvode. Poleg tega je bilo potrebno določiti volumen črpanja, območje dotokov v akumulacijo pri katerih se črpa iz tega pa število dni, ko se črpanje izvaja.

Izkazalo se je, da se črpanje lahko izvaja v območju od $15 \text{ m}^3/\text{s}$ do $57 \text{ m}^3/\text{s}$, kar pri dotokih v akumulacijski bazen HE Mavčiče predstavlja 288 dni v letu. Maksimalna količina načrpane vode tako znaša 705600 m^3 . V tem obdobju se je proizvodnja električne energije proizvedena v času konic povečala za 5 GWh oz. 15 %, kar predstavlja dodatno količino proizvedene vršne energije (razlika med proizvodnjo v času ko se črpa (42142,69 MWh) in proizvodnjo električne energije, ko se ne črpa (36736,61 MWh)). Celotna slika ob upoštevanju porabljene električne energije za črpanje (8810,95 MWh, preglednica 13, stolpec *Ečrp*), pokaže, da je dejansko proizvedene električne energije (33331,74 MWh) za 9 % manj kot v primeru, da se ne črpa.

Pogled s finančne plati spremeni sliko. Vrednost dejanske proizvodnje znaša 580.232.336 SIT (v katero so že vključeni stroški energije potrebni za črpanje – 44.053.259 SIT), je za 33.424.415 SIT oziroma 6,1 % večja od vrednosti proizvodnje električne energije, ko se ni črpalo. Odtod je razvidno, da je dodatna količina vode načrpane iz Zbiljskega jezera, vplivala na povečanje proizvodnje električne energije v času konic, v katerem je električna energija najdražja.

Izpostaviti moram problem, ki se je pojavljal ves čas izdelave modela črpanja; to je vpliv dodatne vode v kompenzacijski bazen hidroelektrarne Medvode. Na podlagi analiz, ki sem jih naredila, sem ugotovila, da znaša minimalni urni dotok dodatne vode v Zbiljsko jezero $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Nihanje tega dotoka nima nobene povezave z nihanjem pretoka na reki Savi.

Na njegovo spreminjanje vplivajo padavine. Na voljo sem imela samo obratovalne podatke elektrarn Mavčiče in Medvode, zato sem v modelu upoštevala le del dodatnega dotoka v bazen HE Medvode.

Namestitev črpalne turbine na hidroelektrarni Mavčiče je dolgoročno gledano lahko zelo perspektivna investicija, ki bi se po grobih ocenah povrnila v približno 20-ih letih. Vendar bi bilo za tako velik poseg predhodno potrebno narediti podrobnejšo hidrološko analizo vplivnega območja hidroelektrarn Mavčiče in Medvode.

V tam namen bi bilo potrebno narediti: izotopske analize voda, izdelati vodne bilance prispevnega območja in postaviti ustrezno število dežemerov. Za bolj natančno obratovanje hidroelektrarne Mavčiče in hidroelektrarne Medvode; predlagam namestitev merilne opreme za merjenje dotokov v bazen.

VIRI

Dušak, M. 2002. Predstavitev obratovanja HE na Savi. Medvode, Savske elektrarne v Ljubljani d.o.o., center vodenja: 6 f.

Goljevšček, M. 1962. Tehnične, energetske in gospodarske osnove za izbrabo vodnih sil vodotokov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Gradbeni oddelek fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 144 str.

Košenina, A. 2002. Program, vozni red (navodila za uporabo). Medvode, Savske elektrarne v Ljubljani d.o.o., center vodenja: 8 f.

Mesečno energetska poročila za hidroelektrarni Mavčiče in Medvode. Podatki o obratovanju HE. 2002 – 2005. Medvode, Savske elektrarne Ljubljana d.o.o., center vodenja,: podatki

Mosonyi, E. 1966. Wasserkraftwerke, Band I, Niederdruckanlagen. Düsseldorf, Verlag des vereins Deutscher Ingenieure: str. 152

Mosonyi, E. 1966. Wasserkraftwerke, Band II, Hochdruckanlagen, Kleinskraftwerke und Pumpspeichieranlagen. Düsseldorf, Verlag des vereins Deutscher Ingenieure: str. 1153

Možna proizvodnja hidroelektrarn v Sloveniji, Teoretične osnove. 1994. Ljubljana, Elektroinštitut Milan Vidmar, oddelek za energetiko, Elektro Slovenija, P.O. Javno podjetje za prenos, nakup, prodajo, uvoz in izvoz električne energije: referat št 1194 (84 f.)

Možna proizvodnja hidroelektrarn v Sloveniji, Hidroelektrarne na reki Savi. 1994. Ljubljana, Elektroinštitut Milan Vidmar, oddelek za energetiko, Elektro Slovenija, P.O. Javno podjetje za prenos, nakup, prodajo, uvoz in izvoz električne energije: referat št 1194 (109 f.)

80 Nartnik, M. 2006. Izdelava modela RiverWare za reko Savo in analiza možnosti črpanja vode iz akumulacije HE Medvode v akumulacijo HE Mavčiče.
Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

Nartnik, M. 2005. Program RiverWare za podporo odločanju pri integriranem upravljanju z vodami (program RiverWare). Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 67 f.

Orel, B. Hidroelektrarne. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko: str. 73 -83

<http://www.powerlab.uni-mb.si/predavanja/download/voda/Orel.doc> (6.2. 2006)

Petan. S. 2001. Seminar pri predmetu hidrotehnični objekti. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer: 4. poglavje, f. 1-31

Savske elektrarne Ljubljana. d.o.o. 2003. Navodila za izdelavo dnevnih in mesečnih poročil v hidroelektrarnah. Medvode. Savske elektrarne d.o.o., center vodenja: f 1 – 12

Savske elektrarne Ljubljana d.o.o. 2002. Hidroelektrarna Moste, hidroelektrarna Mavčiče, hidroelektrarna Medvode, Vloga HE (možnosti pokrivanja storitev v Sloveniji in vloga HE), Vplivi hidroelektrarn, Večnamenska raba HE

<http://www.savske-el.si> (7.4.2006)

Savske elektrarne Ljubljana d.o.o. 2002. Obnova HE Moste

<http://www.he-moste.sel.si/> (7.4.2006)

Sekavčnik, M., Tuma, M. 2004. Energetski sistemi, Preskrba z električno energijo in toploto. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: str. 203 - 216

<http://www.fs.uni-lj.si/kes/LTE/ESistemi/Skripta-ESistemi.pdf> (8.3. 2006)

Zakon o vodah (ZV - !). 2002, 71. člen

<http://www.dz-rs.si/index.php?id=101&mandate=-1&vt=47&cl=V&o=60&unid=SZ|C12563A400338836C1256BF400489676&showdoc=1>

(12.3. 2006)