

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

Kandidat:

JAN PRIBOŠEK

IZRAČUN ENERGETSKIH PARAMETROV HIDROELEKTRARNE

Diplomska naloga št.

Mentor:

Andrej Kryžanowski

LJUBLJANA, 2017

delovna verzija, 30. junij 2017

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK

Avtor: Jan Pribošek
Mentor: Prof. dr. Andrej Kryžanowski
Naslov: Izračun parametrov hidroelektrarne
Tip dokumenta: Diplomaska naloga - univerzitetni študijski program gradbeništvo
Obseg in oprema: 20 str., 11 sl., 0 pregl., 34 en.
Ključne besede:

Izvleček

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC

Author: Jan Pribošek

Supervisor: Prof. Andrej Kryžanowski, Ph. D.

Title: Calculating parameters of the hydroelectric powerplant

Document type: Graduation - Thesis - university program

Notes: 20 p., 11 fig., 0 tab., 34 eq.

Keywords:

Abstract

ZAHVALA

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA	IV
1 Uvod	1
2 Teoretične osnove	2
2.1 Pridobitev podatkov	2
2.2 Analiza hidrološkega niza podatkov	3
2.3 Izračun konsumpcijske krivulje	3
2.3.1 Izračun konsumpcijske krivulje za pravokotne in trapezne struge	3
2.3.2 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike	6
2.4 Izračun proizvodnje električne energije	9
3 Izračun	11
3.1 Izračun parametrov po trapezni metodi	11
3.1.1 Ročni izračun	11
3.1.2 Izračun s programom	11
3.2 Izračun parametrov po numerični metodi	13
3.2.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne	13
3.2.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom	13
3.3 Rezultati	15
4 ZAKLJUČEK	16
POVZETEK	17
SUMMARY	18

VIRI	19
-------------	-----------

DODATKI	20
----------------	-----------

KAZALO SLIK

2.1	Prečni prerez pravokotne struge	4
2.2	Prečni prerez trapezne struge	4
2.3	Prečni prerez poljubno oblikovane struge vodotoka	6
2.4	Izbrani odsek struge	7
2.5	Detajl odseka struge	7
2.6	Shema prečnega prereza hidroelektrarne	9
3.1	Shema struge izbranega vodotoka	11
3.2	Vnos podatkov v program	12
3.3	Konsumpcijska krivulja izračunana po trapezni metodi	12
3.4	Vnos podatkov v program	14
3.5	Graf konsumpcijske krivulje izračunani po numerični metodi	14

KAZALO PREGLEDNIC

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

1 Uvod

Letna količina vode ki se pretoči v Sloveniji je $33,9 \text{ km}^3$, kar nas primerjano na število prebivalcev uvršča v sam vrh v Evropi, takoj za Švico in Norveško. Potreba po električni energiji se iz leta v leto veča, vendar se le okoli 47% vodnega potenciala efektivno uporablja za potrebe proizvodnje električne energije. Voda v Sloveniji je povsod okoli nas, zato je zanimivo preračunati koliko električne energije bi lahko proizvedli iz bližnjega potoka ali večje reke. Podatki o pretokih rek v Sloveniji so namreč javno dostopni v arhivu na spletni strani agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). [1]

Cilj diplomske naloge je ocena proizvedene električne energije pretočne hidroelektrarne poljubne velikosti za vodotok poljubnega pretoka in oblike. V ta namen sem napisal program, ki s pomočjo začetno ocenjenih parametrov struge in meritev povprečnih dnevnih pretokov izbranega vodotoka izračuna parametre pretočne hidroelektrarne.

V diplomski nalogi bom najprej opisal postopek izračuna z osnovnimi enačbami, na koncu pa bom primerjal rezultate ročnega izračuna z rezultati ki jih izračuna program. Pri izračunu sem upošteval da je voda za pregrado na maksimalni konstantni višini, izkoristek turbine konstanten in neodvisen od pretoka skozi turbino ter naklon struge od 0% do 2%.

2 Teoretične osnove

Parametre za iskano hidroelektrarno lahko izračunamo po naslednjem algoritmu:

1. Pridobitev podatkov
2. Analiza hidrološkega niza podatkov za iskano obdobje
3. Izračun konsumpcijske krivulje
4. Izračun proizvodnje električne energije

2.1 Pridobitev podatkov

Za nadaljnje izračune potrebujemo podatke o:

- Dimenzijah in naklonu rečne struge
- Manningovem koeficientu hrapavosti rečnega korita
- Povprečnih dnevnih pretokih vodotoka za izbrano obdobje

Podatke o dimenzijah rečnega korita lahko pridobimo z meritvami na terenu ali pa dimenzije ocenimo na podlagi ortofoto posnetkov. Naklon rečne struge vodotoka se lahko oceni s pomočjo spletne aplikacije Geopedija. Izberemo odsek vodotoka, ki ga definirata dve točki. S pomočjo Geopedije odčitamo podatke o višinski razliki Δh in razdalji ΔL med točkama. S pomočjo spodnje enačbe določimo naklon izbranega odseka vodotoka:

$$I = \frac{100\Delta h}{\Delta L} [\%] \quad (2.1)$$

Manningov koeficient hrapavosti rečnega korita n_g se lahko oceni izkustveno na terenu s pomočjo priročnikov ali pa z umerjanjem na podlagi podatkov o nivojih vode in pretokih. Manningov koeficient hrapavosti je odvisen od naslednjih 7 faktorjev [2]:

1. Hrapavosti površine ostenja
2. Zaraščenosti rečnega korita
3. Neregularnosti oblike rečnega korita
4. Meandriranja rečne struge
5. Zamašitve struge s plavinami
6. Oblike in velikosti rečnega korita
7. Polnosti rečnega korita z vodo

Podatke o pretokih slovenskih vodotokov lahko pridobimo iz arhiva, ki se nahaja na spletni strani agencije Republike Slovenije za okolje (v nadaljevanju ARSO). V primeru da iščemo pretok za manjši vodotok, je zelo verjetno da podatki o pretokih vodotoka ne obstajajo. V tem primeru lahko pretok vodotoka ocenimo s pomočjo meritev višine gladine vode in dimenzij struge, ocene Manningovega koeficienta hrapavosti in naklona struge. S pomočjo Manningove enačbe opisane kasneje v poglavju 2.3.1 in prej omenjenih

členov Manningove enačbe dobimo končno ocenjeno vrednost pretoka vodotoka za posamezno obdobje meritev.

2.2 Analiza hidrološkega niza podatkov

Iz ARSO-vega arhiva lahko izvozimo podatke o povprečnih dnevni pretokih iskanega vodotoka v csv obliki (comma separated values). Iz izvoženih podatkov lahko za vsak mesec obdobja izračunamo povprečni mesečni pretok. Če mesečne pretoke povprečimo za vsa leta izbranega obdobja lahko navedene povprečne mesečne pretoke obdobja prikažemo na hidrogramu obdobja. Hidrogram je graf, ki prikazuje povprečne mesečne pretoke vodotoka za izbrano obdobje analize.

2.3 Izračun konsumpcijske krivulje

Konsumpcijska krivulja je graf funkcije, ki predstavlja višino gladine vode v odvisnosti od pretoka vode v rečni strugi. Graf konsumpcijske krivulje potrebujemo za določitev višinske razlike dh med spodnjo in zgornjo vodo hidroelektrarne v odvisnosti od pretoka vode skozi turbine hidroelektrarne. Višinsko razliko dh potrebujemo za določitev moči hidroelektrarne v zadnjem koraku algoritma opisanega v tem poglavju.

2.3.1 Izračun konsumpcijske krivulje za pravokotne in trapezne struge

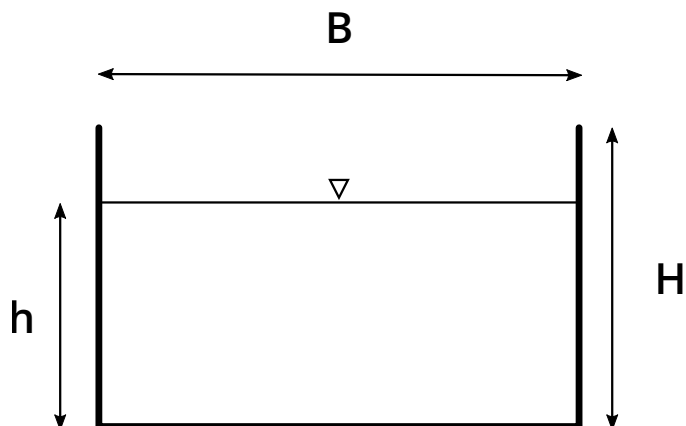
Za izračun konsumpcijske krivulje potrebujemo pretok vodotoka Q v odvisnosti od višine gladine vode h v strugi. Gladina vode h poteka od dna struge do maksimalne višine struge vodotoka H . Pretok vode v strugi Q se za vsak cm višine h izračuna po Manningovi enačbi:

$$Q(h) = \frac{1}{ng} \sqrt{I} \frac{S(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}} \quad (2.2)$$

Kjer je:

Q	pretok
ng	Manningov koeficient hrapavosti dna struge
I	naklon struge
S	ploščina omočenega dela prečnega profila
P	dolžina omočenega oboda struge

1. Pravokotno oblikovana struga vodotoka:



Slika 2.1: Prečni prerez pravokotne struge

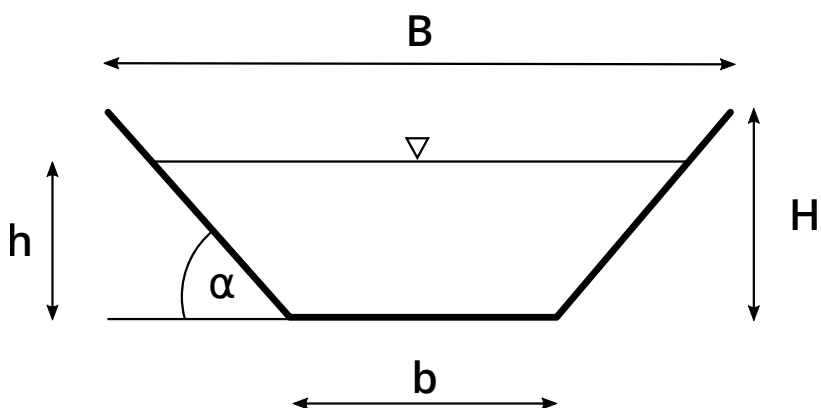
Omočeni obod pravokotne struge izračunamo kot seštevek širine dna struge in dvakratne višine gladine vode v strugi vodotoka h .

$$P_p(h) = B + 2h \quad (2.3)$$

Ploščino omočenega dela, ki ga omejujejo rečno korito in gladina vode za pravokotno oblikovano rečno strugo dobimo po enačbi:

$$S_p(h) = B \cdot h \quad (2.4)$$

2. Trapezno oblikovana struga vodotoka:



Slika 2.2: Prečni prerez trapezne struge

Omočeni obod trapezno oblikovane rečne struge izračunamo kot seštevek širine dna struge in dvakratne razdalje od roba dna do točke presečišča rečnega korita z gladino vode:

$$P_t(h) = b + 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{\tan \alpha} \right)^2} \quad (2.5)$$

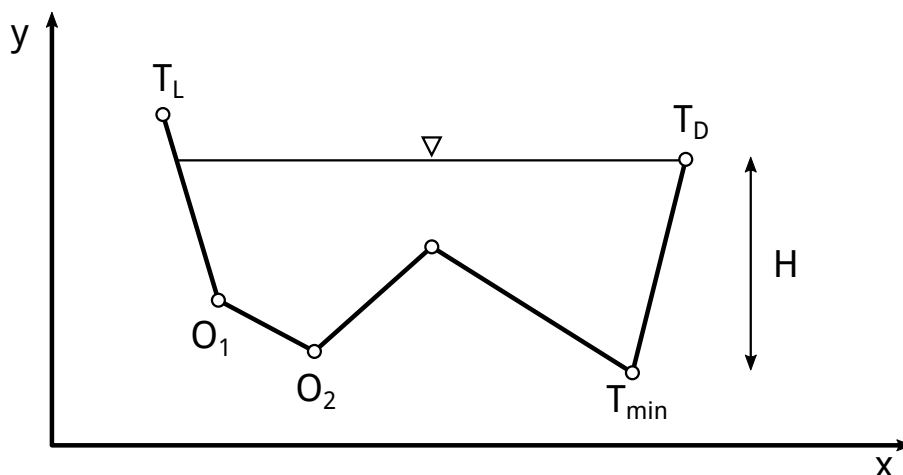
Ploščino omočenega dela v trapezno oblikovani rečni strugi izračunamo po enačbi:

$$S_t(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{2 \tan \alpha} \quad (2.6)$$

Ko poznamo vse parametre Manningove enačbe [2.2](#), izračunamo pretoke vodotoka za vsak cm višine rečne struge, ki poteka od višine 0 do H in narišemo graf konsumpcijske krivulje $h(Q)$.

2.3.2 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike

V primeru da iščemo konsumpcijsko krivuljo za vodotok poljubne oblike, si za izračun le te ne moremo pomagati s znanimi formulami preprostih geometrijskih likov. Poljubno oblikovano strugo lahko popišemo s serijo točk, ki jih dodajamo v kartezijski koordinatni sistem. Za vsako točko ki definira poljubno rečno korito podamo x in y koordinato, za točke pa predpostavimo da so med seboj povezane z enačbo linearne funkcije. Na sliki 2.3 je predstavljen prečni prerez poljubno oblikovane struge vodotoka.



Slika 2.3: Prečni prerez poljubno oblikovane struge vodotoka

Skrajni točki na robu struge sta točki T_L in T_D na sliki 2.3. Točko na robu struge z nižjo y koordinato označimo s T_{Rmin} (na sliki 2.3 označena kot točka T_D). Najnižjo točko struge vodotoka označimo s T_{min} . Maksimalna gladina vode v rečnem koritu H je definirana kot razdalja med točkama T_{Rmin} in T_{min} . V primeru da je višina gladine vode večja od višine rečnega korita H pride do preliva vode čez robove rečnega korita.

Za določitev parametrov odseka, ki jih potrebujemo za izračun konsumpcijske krivulje, s točkami definirano poljubno strugo vodotoka najprej razdelimo na odseke po dve točki $O_1 (x_1, y_1)$ in $O_2 (x_2, y_2)$. Za vsak izbran odsek rečne struge, se najprej določi enačba linearne funkcije, ki povezuje točki O_1 in O_2 .

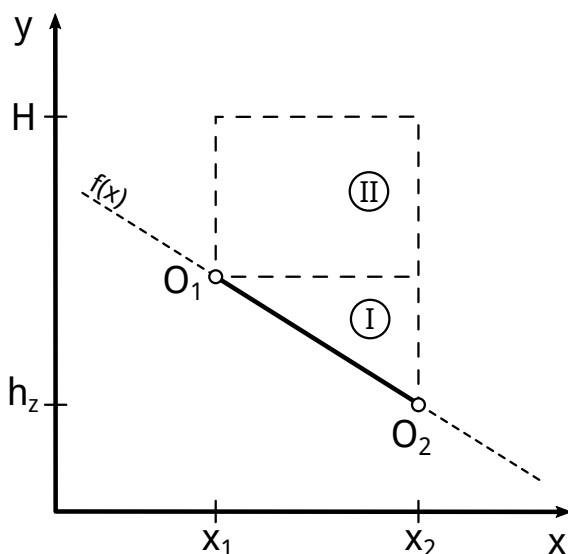
Enačba linearne funkcije se definira kot:

$$f(x) = kx + n \quad (2.7)$$

Naklon funkcije k se izračuna po spodnji enačbi:

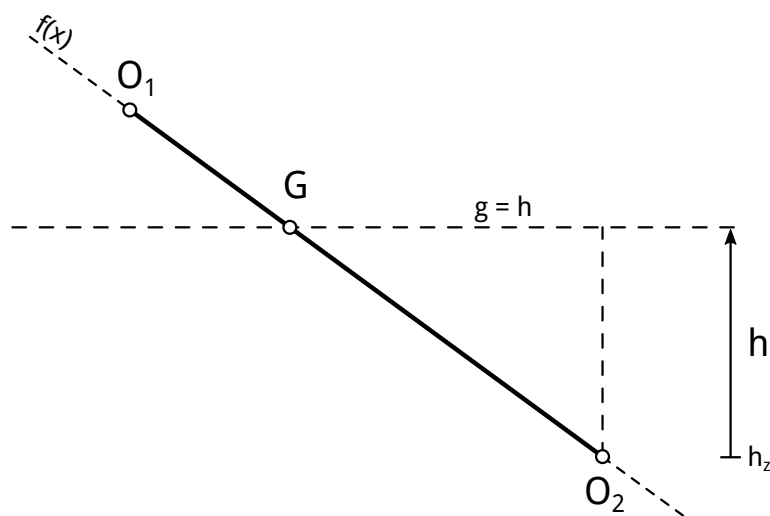
$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.8)$$

Če v enačbo linearne funkcije 2.7 vstavimo izračunan naklon k in koordinate točke O_1 , lahko izračunamo iskani n . S tem je določena enačba linearne funkcije $f(x)$ ki povezuje točki O_1 in O_2 .



Slika 2.4: Izbrani odsek struge

Za vsak odsek dveh točk se določi najnižja točka odseka T_z , na sliki 2.4 označena kot točka O_2 . Y koordinata točke T_z nam predstavlja začetno višino odseka h_z . Od h_z do končne višine gladine rečnega korita H za vsak cm po višini določimo presečišče G prej izračunane funkcije $f(x)$ s horizontalno ravnino $g = h$, ki predstavlja gladino vode pri trenutni višini h , kar je prikazano na sliki 2.5.



Slika 2.5: Detajl odseka struge

Ko imamo določeno presečišče G gladine vode s funkcijo $f(x)$ med točkama odseka, lahko izračunamo dolžino omočenega oboda struge odseka in ploščino lika ki ga oklepajo funkcija odseka $f(x)$, navidezna gladina vode $g = h$ in najnižja točka odseka T_z , na sliki 2.4 označena z O_2 . Zaradi poenostavljenega zapisa so v nadaljevanju koordinate točke O_1 označene kot x_1 in y_1 , koordinate točke O_2 pa x_2 in y_2 .

Način izračuna omočenega oboda struge vodotoka $P(h)$ in ploščine prečnega prereza $S(h)$ je odvisen od pozicije presečišča G :

1. V primeru da se presečišče G izbranega odseka struge nahaja v območju med točkama O_1 in O_2 ,

dolžino omočenega oboda določimo po Pitagorovem izreku kot:

$$P(h) = \sqrt{(T_{zx} - G_x(h))^2 + (T_{zy} - G_y(h))^2} \quad (2.9)$$

Ploščino območja ki ga oklepajo horizontalna ravnina s presečiščem G in najnižjo točko odseka T_z pa določimo kot ploščino trikotnika (območje I na sliki 2.4) po formuli:

$$S(h) = \frac{|T_{zx} - G_x(h)| \cdot |T_{zy} - G_y(h)|}{2} \quad (2.10)$$

2. V primeru, da se presečišče G nahaja izven območja točk O_1 in O_2 se dolžina omočenega oboda odseka izračuna kot razdalja med točkama O_1 in O_2 po Pitagorovem izreku:

$$P = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2.11)$$

Ploščina S odseka pa se določi kot seštevek ploščin območij I in II na sliki 2.4.

$$S(h) = S_I + S_{II}(h) \quad (2.12)$$

Pri čemer je S_I enak:

- (a) V primeru če je naklon funkcije $f(x)$, $k = 0$ se ploščina S_I izračuna kot:

$$S_I(h) = \left| (x_2 - x_1) \cdot (h - y_1) \right| \quad (2.13)$$

- (b) Če za naklon funkcije $f(x)$ velja $k \neq 0$:

$$S_I(h) = \left| \frac{(y_2 - y_1) \cdot (x_2 - x_1)}{2} \right| \quad (2.14)$$

S_{II} pa se izračuna kot:

$$(2.15)$$

$$S_{II}(h) = \left| (x_2 - x_1) \cdot (h - y_1) \right| \quad (2.16)$$

Ko imamo za vsak cm višine gladine vode izračunan omočeni obod $P_n(h)$ odseka n in ploščino prečnega prereza pod gladino vode $S_n(h)$ lahko določimo pretok vode skozi odsek $Q_n(h)$. Pretok vode skozi odsek izračunamo po Manningovi enačbi 2.2. Za vsak računani odsek moramo poznati tudi naklon struge vodotoka I_n in Manningov koeficient hrapavosti površine ng_n .

$$Q_n(h) = \frac{1}{ng_n} \sqrt{I_n} \frac{S_n(h)^{5/3}}{P_n(h)^{2/3}} \quad (2.17)$$

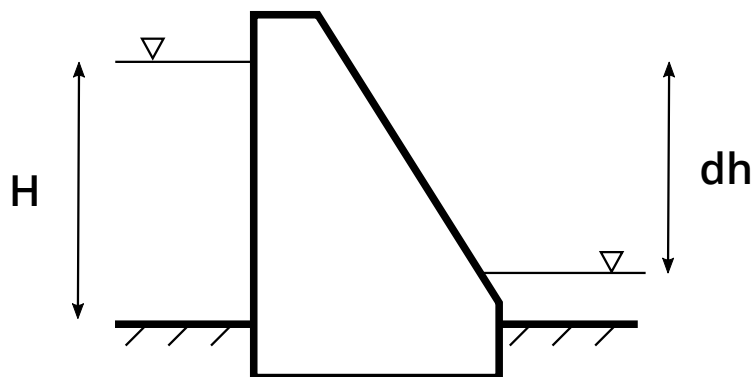
Ko imamo posamezne pretoke po višinah za vse odseke izračunane, jih medsebojno seštejemo in dobimo končne vrednosti pretokov $Q(h)$:

$$Q(h) = Q_1(h) + Q_2(h) + Q_3(h) + \dots + Q_{n-1}(h) + Q_n(h) \quad (2.18)$$

S imamo točke za izris konsumpcijske krivulje določene in funkcijo konsumpcijske narišemo na graf $h(Q)$.

2.4 Izračun proizvodnje električne energije

Za določitev končne proizvodnje električne energije potrebujemo razliko med koto zgornje vode t.j. vode v rezervoarju in koto spodnje vode, ki jo določimo iz grafa konsumpcijske krivulje izračunanega za izbrano strugo.



Slika 2.6: Shema prečnega prereza hidroelektrarne

Ker računamo proizvodnjo električne energije za pretočne hidroelektrarne, predpostavimo da je koto zgornje vode konstantna na višini H . Koto spodnje vode določimo iz prej izračunane konsumpcijske krivulje iz katere odčitamo višino spodnje vode v strugi za dani povprečni mesečni pretok skozi turbino hidroelektrarne. V primeru da se pretok skozi turbino hidroelektrarne nahaja med dvema točkama pretokov v konsumpcijski krivulji, iskano višino spodnje vode določimo z linearno interpolacijo med znanima točkama na grafu konsumpcijske krivulje.

Višinsko razliko med koto zgornje in spodnje vode določimo po spodnji enačbi:

$$dh = H - H_{spodaj} \quad (2.19)$$

Moč hidroelektrarne izračunamo po enačbi:

$$P = \mu \cdot g \cdot Q \cdot dh \quad (2.20)$$

Pri čemer so:

P	moč [kW]
μ	izkoristek turbine [%]
g	gravitacijska konstanta [$9,81 \frac{m}{s^2}$]
Q	pretok [m^3/s]
dh	razlika višin spodnje in zgornje vode [m]

Za določitev končne mesečne proizvodnje električne energije, za vsak mesec določimo povprečno moč \bar{P} in uporabimo naslednjo enačbo

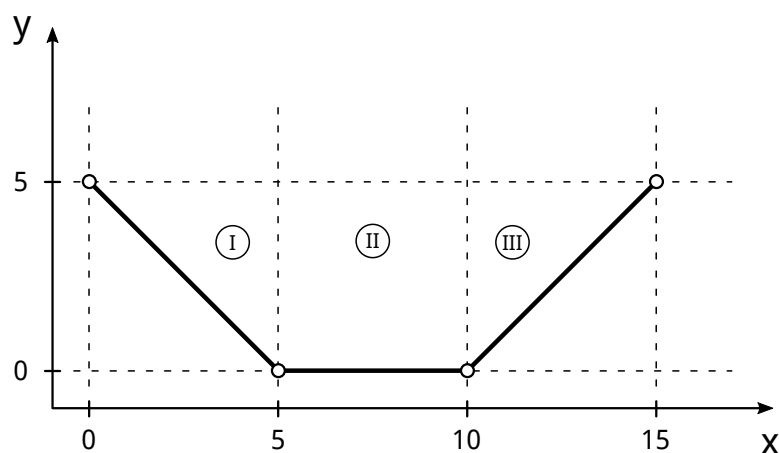
$$E = \frac{24 \cdot \bar{P} \cdot d}{1000} \quad (2.21)$$

Pri čemer so:

E	proizvedena električna energija [MWh]
\bar{P}	povprečna moč v mesecu [kW]
d	število dni v mesecu

3 Izračun

Za izračun ocene parametrov pretočne hidroelektrarne je ključnega pomena pravilen izračun konsumpcijske krivulje za izbran vodotok, saj se vsi nadaljnji izračuni nanašajo nanj. V tem poglavju bom s primerom dokazal, da program računa parametre pravilno. Za dokaz bom uporabil namišljen primer trapezno oblikovane struge vodotoka prikazane na sliki 3.1 z Manningovim koeficientom hrapavosti 0,3 in z 1% naklonom struge. Rezultate ročnega izračuna bom primerjal z rezultati ki jih izračuna program po trapezni in numerični metodi opisani v poglavju 2.3.1 oz. 2.3.2. Vse mere na spodnji sliki so v metrih.



Slika 3.1: Shema struge izbranega vodotoka

3.1 Izračun parametrov po trapezni metodi

3.1.1 Ročni izračun

Za izračun pretoka vodotoka pri višini $h = 5\text{ m}$ uporabimo enačbe navedene v poglavju 2.3.1.

$$P(h) = b + 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{\tan \alpha}\right)^2} = 5 + 2 \cdot \sqrt{5^2 + \left(\frac{5}{\tan 45}\right)^2} = 19,1 \text{ m} \quad (3.1)$$

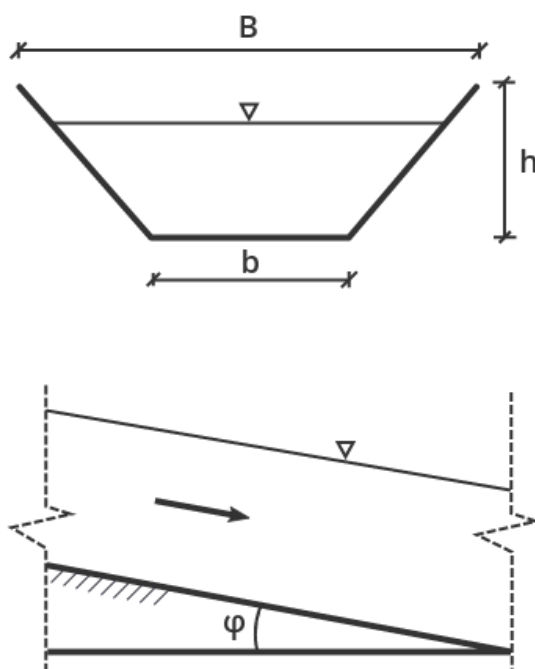
$$S(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{\tan \alpha} = 55 + \frac{5^2}{\tan 45} = 50 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

$$Q(h) = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{50^{5/3}}{19,1^{2/3}} = 316,6 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.3)$$

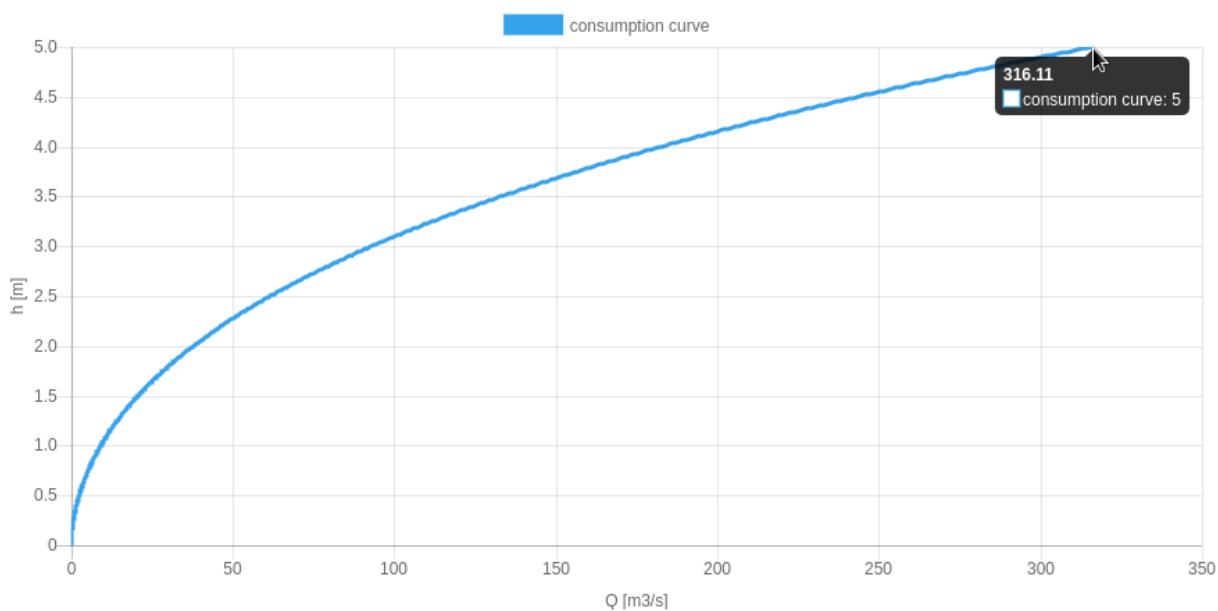
3.1.2 Izračun s programom

V program vnesemo podatke o rečnem koritu kot je prikazano na sliki 3.2.

B [m]
 b [m]
 h [m]
 ng [°]
 φ [%]



Slika 3.2: Vnos podatkov v program



Slika 3.3: Konsumpcijska krivulja izračunana po trapezni metodi

S slike 3.3 lahko odčitamo pretok struge izračunane po trapezni metodi pri višini $h = 5$ m.

3.2 Izračun parametrov po numerični metodi

V tem podpoglavju bomo primerjali rezultate ročno izračunanih parametrov in parametrov izračunanih s programom po trapezni metodi omenjeni v poglavju 3.1.

3.2.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne

I. Odsek

$$S_I = \frac{55}{2} = 12,5 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

$$P_I = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07 \text{ m} \quad (3.5)$$

$$Q_I = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{12,5^{5/3}}{7,07^{2/3}} = 60,9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.6)$$

II. Odsek

$$S_{II} = 55 = 25 \text{ m}^2 \quad (3.7)$$

$$P_{II} = 5 \text{ m} \quad (3.8)$$

$$Q_{II} = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{25^{5/3}}{5^{2/3}} = 243,7 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.9)$$

III. Odsek

$$S_{III} = S_I = 12,5 \text{ m}^2 \quad (3.10)$$

$$P_{III} = P_I = 7,07 \text{ m} \quad (3.11)$$

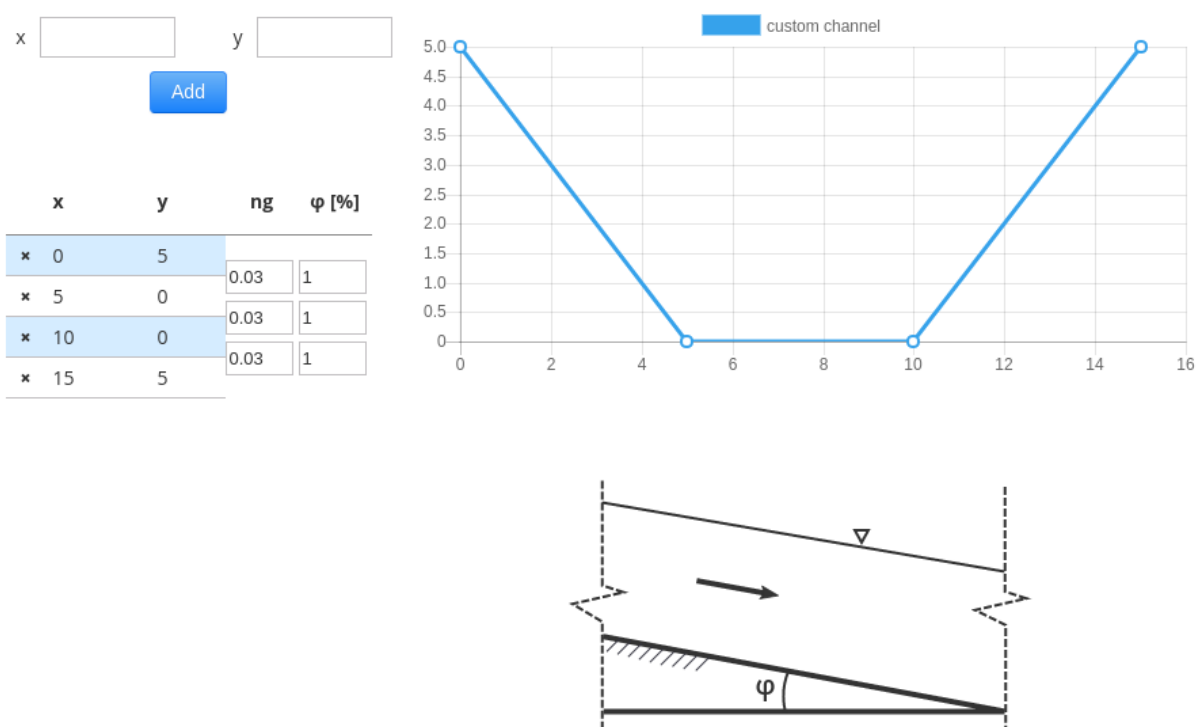
$$Q_{III} = Q_I = 60,9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.12)$$

Skupni pretok za višino $h = 5\text{m}$:

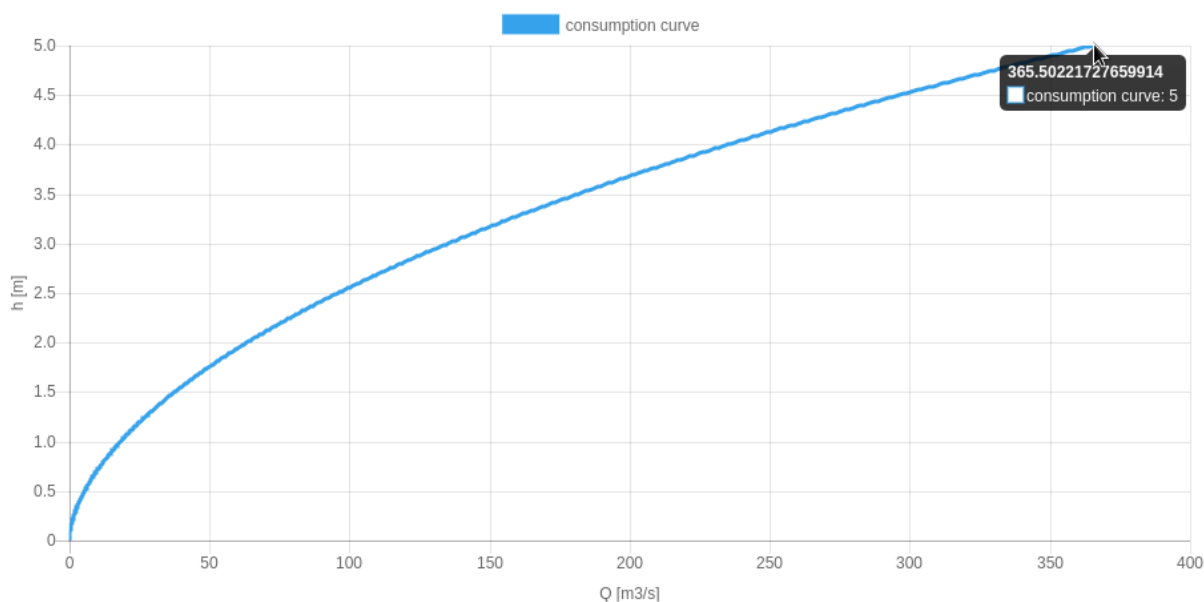
$$Q_s = Q_I + Q_{II} + Q_{III} = 60,9 + 243,7 + 60,9 = 365,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.13)$$

3.2.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom

S pomočjo uporabniškega vmesnika v koordinatni sistem vnašamo serijo točk, s katerimi modeliramo robove izbrane struge. V tabeli na levi strani diagrama, za vsak odsek med dvema točkama dodajamo Manningove koeficiente hrapavosti n_g in naklone struge na sliki označene s φ . V našem primeru so vrednosti koeficientov za vse odseke rečne struge enake.



Slika 3.4: Vnos podatkov v program



Slika 3.5: Graf konsumpcijske krivulje izračunani po numerični metodi

Z grafa konsumpcijske krivulje 3.5 pri višini $h = 5 \text{ m}$ lahko preberemo da je pretok $Q = 365,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Rezultat numerične metode s programom je enak rezultatu ki smo ga izračunali ročno.

3.3 Rezultati

V podpoglavjih [3.1](#) in [3.2](#) smo preverili da sta rezultata po isti metodi ročnega izračuna in izračuna s programom enaka.

4 ZAKLJUČEK

Predstavljena formulacija končnih elementov ...

POVZETEK

V disertaciji obravnavamo problem...

SUMMARY

In the present dissertation we study ...

VIRI

- [1] Kryžanowski, A., Mikoš, M., Brilly, M. 2011. Dragocen obnovljivi vir energije nam teče skozi prste?: Hidroelektrarne na srednji Savi. Delo 155: 3.
- [2] Chow, V. T. 1956. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company.

SEZNAM DODATKOV