

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, 28. 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., 33 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., 33 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 Izračun hidrološkega niza podatkov	3
2.3 Izračun konsumpcijske krivulje	3
2.3.1 Izračun konsumpcijske krivulje za pravokotne in trapezne struge	3
2.4 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike	6
2.4.1 Izračun višine rečnega korita	6
2.4.2 Določitev parametrov odseka	6
2.5 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	Poljubno definirana struga	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 neodvisen od pretoka skozi turbino in naklon struge od 0% do 2%.

2 Teoretične osnove

Parametre izbrane hidroelektrarne lahko izračunamo po naslednjem algoritmu:

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

2.1 Pridobitev podatkov

Za nadaljnje izračune potrebujemo podatke o:

- Dimenzijah rečne struge
- Naklonu in oceno Manningovega koeficienta hrapavosti rečnega korita
- Povprečnih dnevnih pretokih vodotoka za izbrano obdobje

Podatke o dimenzijah rečne struge lahko pridobimo z meritvami ali pa dimenzije ocenimo na podlagi ortofoto posnetkov. Naklon se lahko oceni s pomočjo spletne aplikacije Geopedija, kjer so vneseni podatki o višinski razliki izbranih točk Δh rečne struge in razdalje med točkami L . Naklon rečne struge izračunamo po enačbi:

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

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. 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 korita

Podatke o pretokih slovenskih vodotokov lahko pridobimo iz arhiva, ki se nahaja na spletni strani agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). V primeru da iščemo pretok za manjši vodotok, obstaja velika verjetnost da podatki o pretokih 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 v poglavju 2.3.1 in ocenjenih členov enačbe dobimo končno ocenjeno vrednost pretokov za posamezno obdobje meritev.

2.2 Izračun hidrološkega niza podatkov

Iz arhiva lahko izvozimo podatke o povprečnih dnevni pretokih v csv (comma separated values) obliki. Iz 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. Prav tako se lahko določi mokro in suho leto obdobja, ki ju primerjamo z povprečnimi mesečnimi pretoki.

2.3 Izračun konsumpcijske krivulje

Konsumpcijska krivulja je graf, ki predstavlja višino gladine spodnje vode v rečni strugi v odvisnosti od pretoka vode skozi turbine hidroelektrarne. Graf konsumpcijske krivulje potrebujemo za določitev višinske razlike dh med spodnjo in zgornjo vodo 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

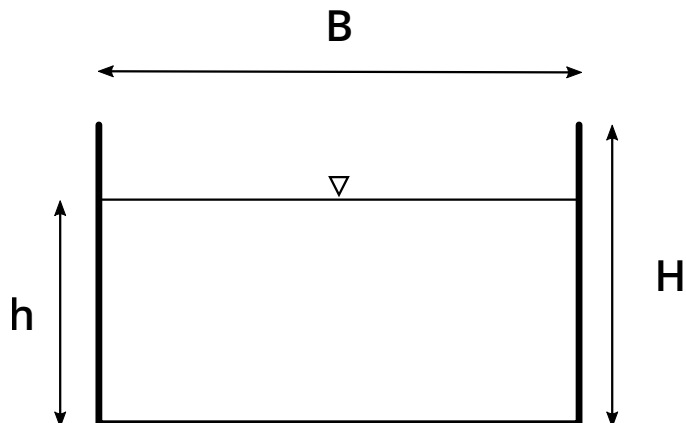
Za izračun konsumpcijske krivulje potrebujemo pretok vodotoka v odvisnosti od višine gladine vode h v strugi. Gladina vode h poteka od dna struge do maksimalne višine struge H . Pretok vode v strugi se za vsak cm višine h izračuna po Manningovi enačbi:

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

Kjer je:

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

1. Pravokotna struga:



Slika 2.1: Prečni prerez pravokotne struge

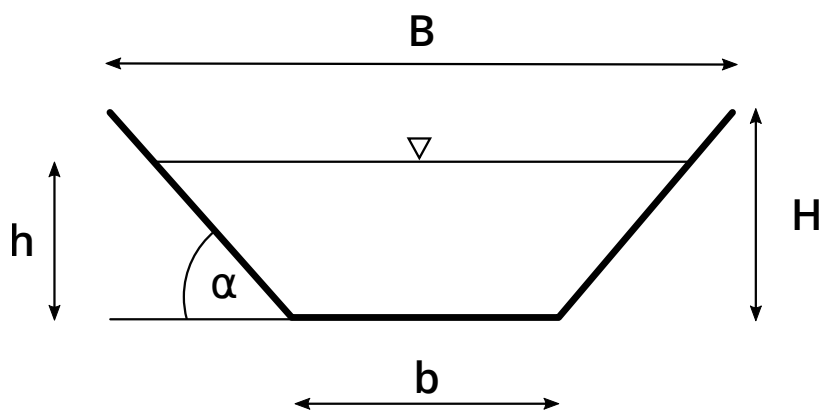
Omočeni obod pravokotne struge izračunamo kot seštevek širine dna struge in dvakratne višine struge h .

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

Ploščino pravokotne struge dobimo po enačbi:

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

2. Trapezna struga:



Slika 2.2: Prečni prerez trapezne struge

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

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

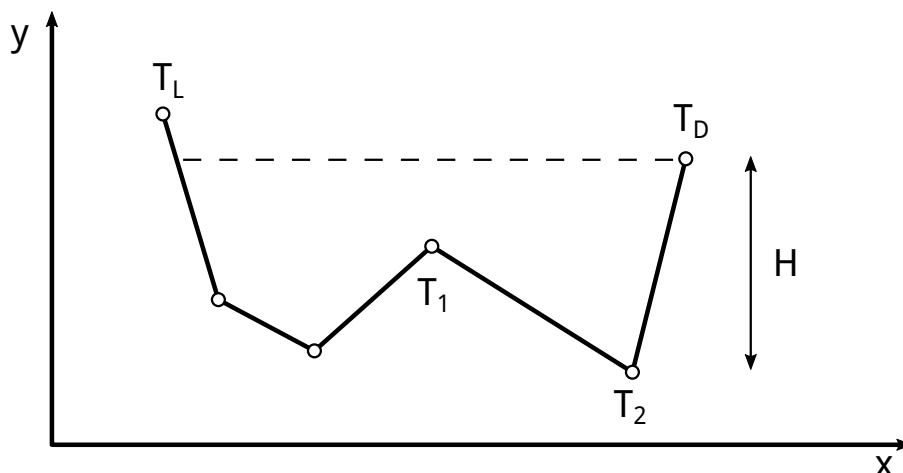
Ploščino trapezne struge izračunamo po enačbi:

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

Ko poznamo vse parametre Manningove enačbe 2.2, izračunamo pretoke vodotoka za vsak cm višine rečne struge, ki poteka od 0 do H in narišemo konsumpcijsko krivuljo $h(Q)$.

2.4 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike

Poljubno oblikovano strugo lahko popišemo s serijo točk, ki jih dodajamo v kartezijski koordinatni sistem. Za vsako točko poljubnega rečnega korita podamo x in y koordinato, za točke pa predpostavimo da so med seboj povezane z enačbo linearne funkcije.



Slika 2.3: Poljubno definirana struga

2.4.1 Izračun višine rečnega korita

Skrajni točki struge sta točki T_L in T_D na sliki 2.3. Točko na robu struge z najnižjo y koordinato označimo s T_{Smin} (na sliki 2.3 točka T_D). Najnižjo točko poljubne struge označimo s T_{min} (na sliki 2.3 točka T_2). Višina rečnega korita H je definirana kot razdalja med točkama T_{Smin} in T_{min} .

2.4.2 Določitev parametrov odseka

Program razdeli podano strugo na odseke po dve točki $T_1 (x_1, y_1)$ in $T_2 (x_2, y_2)$. Za podan odsek se najprej določi enačba linearne funkcije.

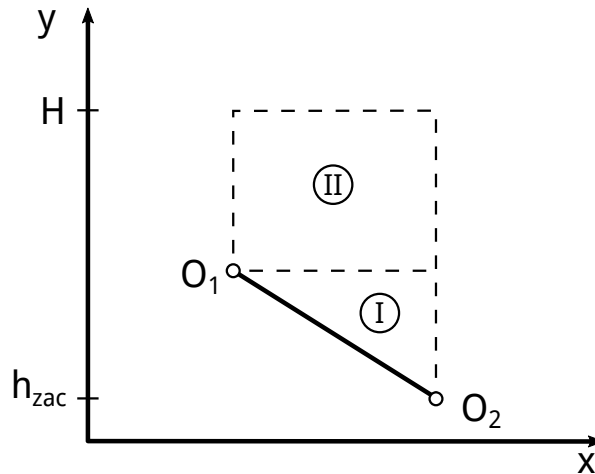
$$f(x) = kx + n \quad (2.7)$$

Naklon funkcije k se izračuna po formuli:

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

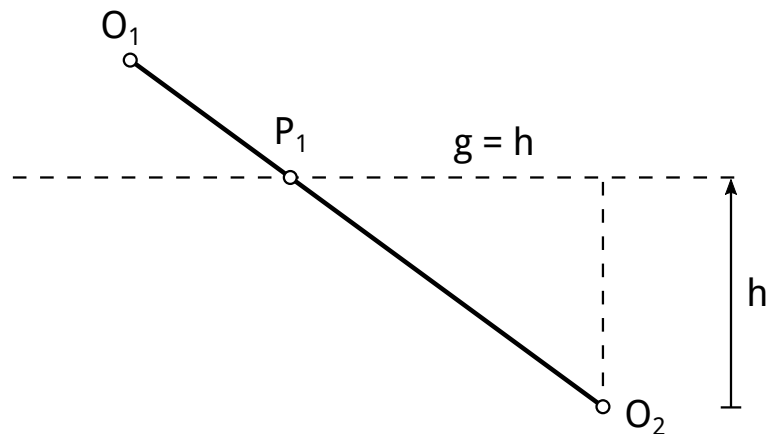
Če v enačbo linearne funkcije 2.7 vstavimo izračunan k in koordinate točke T_1 , lahko izračunamo iskani n in s tem je določena enačba linearne funkcije $f(x)$ med dvema točkama, ki jo potrebujemo za nadaljnje izračune.

Za vsak odsek dveh točk se najprej določi najnižja točka odseka T_{zac} , na sliki 2.4 označena kot točka O_2 . Y koordinata točke T_{zac} nam predstavlja začetno višino odseka h_{zac} . Razdaljo med začetno višino odseka h_{zac} in končno gladino struge H označimo z dh .



Slika 2.4: Izbrani odsek struge

Od h_{zac} do končne višine rečnega korita H za vsak cm po višini določimo presečišče P_1 prej izračunane funkcije $f(x)$ s horizontalno ravnino g , ki predstavlja gladino vode pri trenutni višini h .



Slika 2.5: Detajl odseka struge

Ko imamo določeno presečišče P_1 gladine vode s funkcijo $f(x)$ med točkama odseka, lahko izračunamo dolžino omočenega oboda struge in ploščino lika ki ga oklepajo funkcija odseka, navidezna gladina vode g in najnižja točka odseka T_{zac} na sliki 2.4 označena z O_2 .

1. V primeru da se presečišče P_1 odseka nahaja v območju med točkama O_1 in O_2 , dolžino omočenega oboda določimo po Pitagorovem izreku kot:

$$P = \sqrt{(T_{zac}x - P_1x)^2 + (T_{zac}y - P_1y)^2} \quad (2.9)$$

ploščino področja ki ga oklepajo horizontalna ravnina s presečiščem P_1 in najnižjo točko odseka T_{zac} pa določimo kot ploščino trikotnika (področje I na sliki 2.4) po formuli:

$$S = \frac{|T_{zac}x - P_1x| \cdot |T_{zac}y - P_1y|}{2} \quad (2.10)$$

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

$$P = \sqrt{(O_1x - O_2x)^2 + (O_1y - O_2y)^2} \quad (2.11)$$

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

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

Pri čemer sta S_I in S_{II} enaka:

$$S_I = \frac{(O_2y - O_1y) * (O_2x - O_1x)}{2} \quad (2.13)$$

$$S_{II} = (O_2x - O_1x) * (H - O_1y) \quad (2.14)$$

Za določitev končne dolžine omočenih obodov pri iskani višini h moramo sešteti vse omočene obode odsekov pri iskani višini h .

$$P(h) = P_1(h) + P_2(h) + P_3(h) + \dots + P_{n-1}(h) + P_n(h) \quad (2.15)$$

Za določitev končnih vrednosti ploščin likov S pri iskani višini h , moramo sešteti ploščine S pri iskani višini h za vse odseke točk rečne struge, to so vse točke med T_L in T_D na sliki 2.3

$$S(h) = S_1(h) + S_2(h) + S_3(h) + \dots + S_{n-1}(h) + S_n(h) \quad (2.16)$$

Za izris konsumpcijske krivulje potrebujemo podatke o pretokih v odvisnosti od višine vode v strugi. Za vsak odsek struge imamo na voljo podatke o ploščini prečnega profila struge in omočenega oboda dna struge v odvisnosti od višine vode v strugi. Pretoke za vsak cm višine vode v strugi izračunamo po Manningovi enačbi 2.2

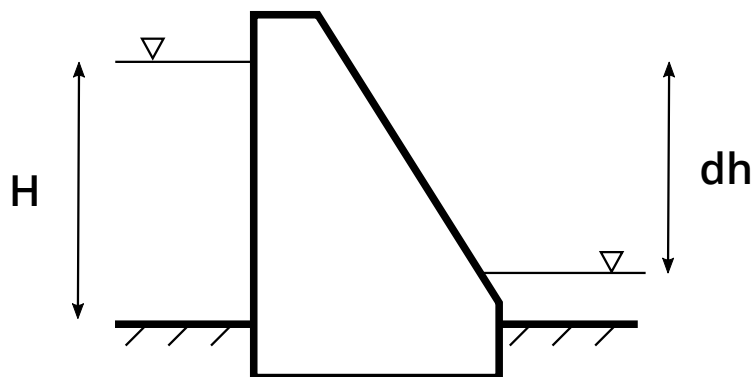
Ko imamo posamezne pretoke po višinah za vse odseke izračunane, jih medsebojno seštejemo in dobimo končne vrednosti pretokov:

$$Q(h) = Q_1(h) + Q_2(h) + Q_3(h) + \dots + Q_{n-1}(h) + Q_n(h) \quad (2.17)$$

Sledi izris konsumpcijske krivulje $h(Q)$.

2.5 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:

$$dh = H - H_{spodaj} \quad (2.18)$$

Moč hidroelektrarne izračunamo po enačbi:

$$P = \mu \cdot g \cdot Q \cdot dh \quad (2.19)$$

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

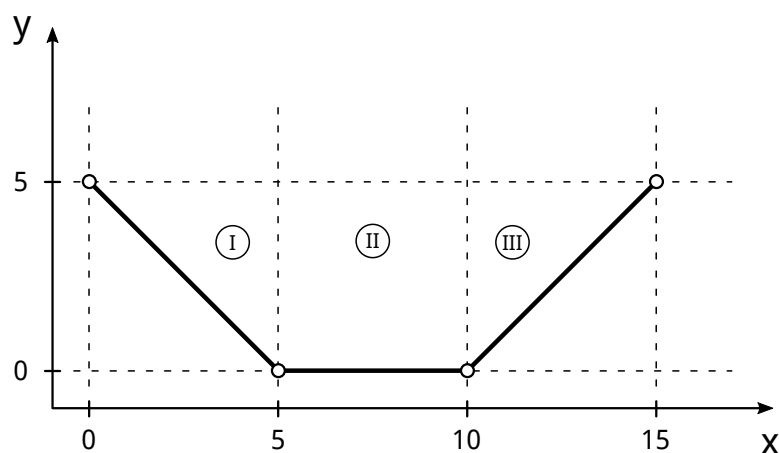
$$E = \frac{24 \cdot \bar{P} \cdot d}{1000} \quad (2.20)$$

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. 2.4. 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.

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

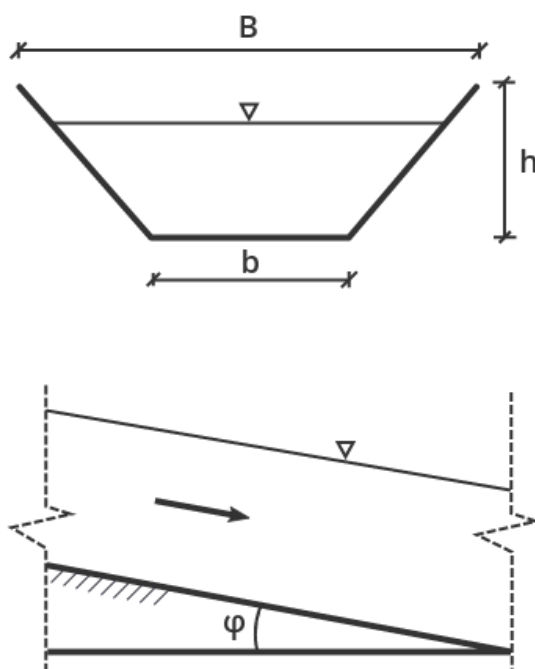
$$S(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{\tan \alpha} = 55 + \frac{5^2}{\tan 45} = 50 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

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

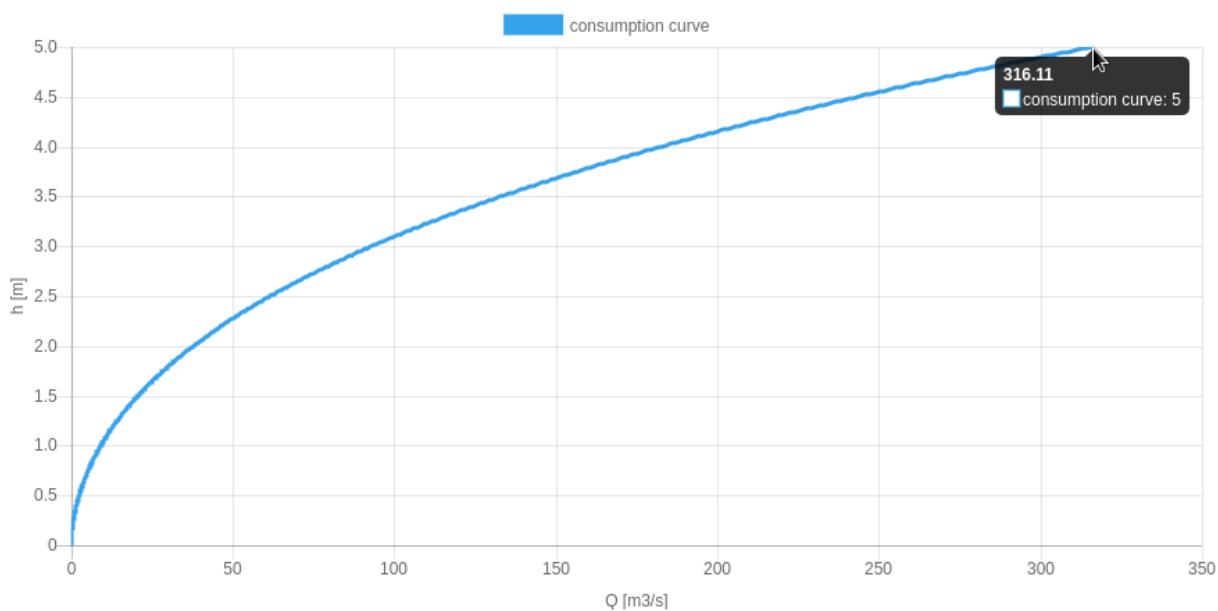
3.1.2 Izračun s programom

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

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

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

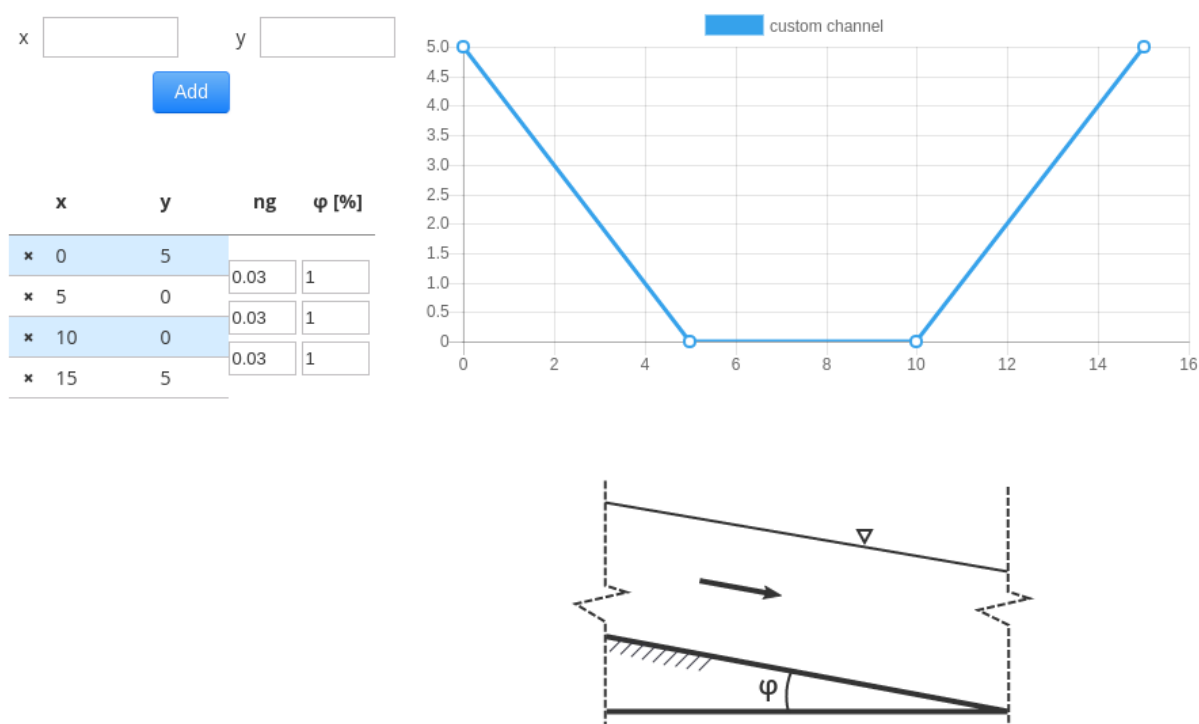
$$Q_{III} = Q_I = 60,9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.12)$$

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

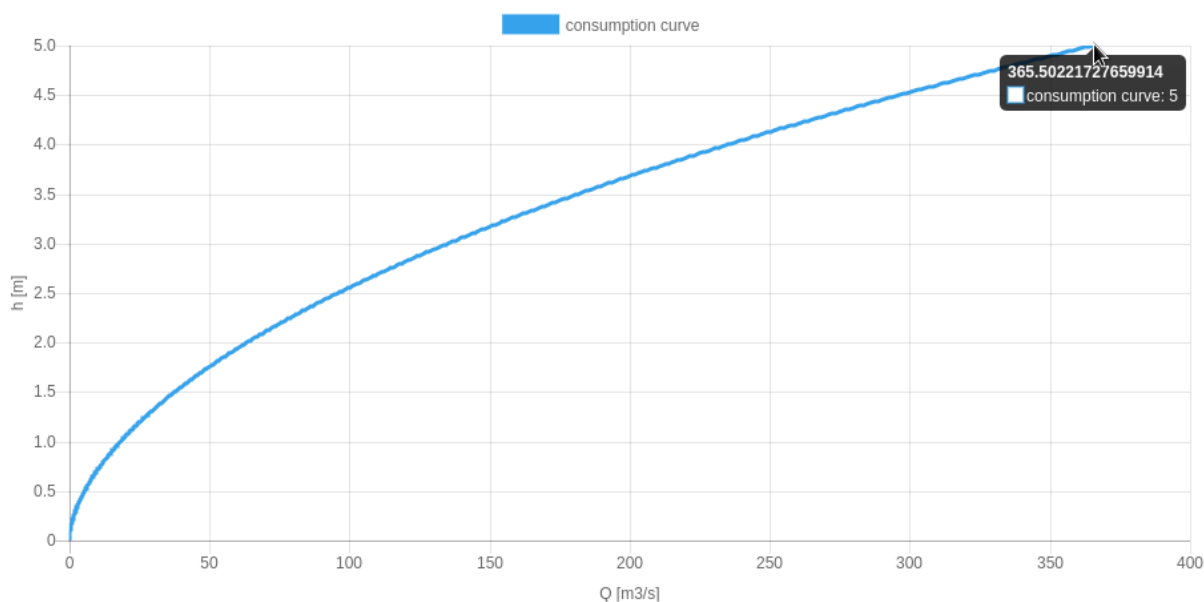
$$Q_s = Q_I + Q_{II} + Q_{III} = 60,9 + 243,7 + 60,9 = 365,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.13)$$

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