

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM  
PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

**JAN PRIBOŠEK**

## **RAČUN ENERGETSKIH PARAMETROV HIDROELEKTRARNE**

## **CALCULATION OF ENERGY PARAMETERS FOR THE HYDROELECTRIC POWER PLANT**

**Mentor:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

**Predsednik komisije:**

**Član komisije:**



## **POPRAVKI**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 620.9:627.8(043.2)  
**Avtor:** Jan Pribošek  
**Mentor:** doc. dr. Andrej Kryžanowski  
**Naslov:** Račun parametrov hidroelektrarne  
**Tip dokumenta:** Diplomaska naloga - univerzitetni študijski program gradbeništvo  
**Obseg in oprema:** 23 str., 16 sl., 0 pregl., 43 en.  
**Ključne besede:** Energetski parametri hidroelektrarne, pretok vode, pretok vode v poljubno oblikovani strugi

**Izvleček**

V okviru diplomske naloge sem razvil aplikacijo za računanje energetskih parametrov pretočne hidroelektrarne. V prvem delu naloge sem podal teoretične osnove za razvoj take aplikacije in na osnovi opisanih principov razvil in implementiral algoritem za izračun konsumpcijske krivulje, krivulje trajanja hidrograma in izračun proizvodnje električne energije za rečne struge poljubne geometrije. V drugem delu naloge sem delovanje algoritma preveril na konkretnem primeru, ter njegovo pravilnost potrdil z ročnim izračunom.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC** 620.9:627.8(043.2)  
**Author:** Jan Pribošek  
**Supervisor:** Assist. Prof. Andrej Kryžanowski, Ph. D.  
**Title:** Calculation of energy parameters for the hydroelectric power plant  
**Document type:** Graduation - Thesis - university program  
**Notes:** 23 p., 16 fig., 0 tab., 43 eq.  
**Keywords:** Energy parameters of hydroelectric power plant, river flow, flow in arbitrarily formed river channel

### **Abstract**

In this thesis I have developed software for calculation of energy parameters for the hydroelectric power plant. In the first part of the thesis, I have described the theoretical fundamentals and implemented algorithms for calculating consumption curve, duration curve and electricity production for river channels of any geometry. In the second part of the thesis, I provided an example that proves correctness of the software calculations.

## KAZALO VSEBINE

<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b>	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoretične osnove</b>	<b>2</b>
2.1 Pridobitev podatkov . . . . .	3
2.2 Analiza hidrološkega niza podatkov . . . . .	3
2.3 Izračun konsumpcijske krivulje . . . . .	4
2.3.1 Izračun konsumpcijske krivulje za pravokotne in trapezne struge . . . . .	4
2.3.2 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike . . . . .	6
2.4 Izračun proizvodnje električne energije . . . . .	10
<b>3 Opis uporabe programa</b>	<b>13</b>
3.1 Vnos podatkov . . . . .	13
3.2 Izračun konsumpcijske krivulje . . . . .	16
3.3 Izračun parametrov po metodi za pravokotno in trapezno oblikovano strugo vodotoka . . . . .	17
3.3.1 Ročni izračun . . . . .	17
3.3.2 Izračun s programom . . . . .	17
3.4 Izračun parametrov po metodi za strugo poljubne oblike . . . . .	18
3.4.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne . . . . .	18
3.4.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom . . . . .	19
<b>4 ZAKLJUČEK</b>	<b>21</b>
<b>VIRI</b>	<b>22</b>

## KAZALO SLIK

2.1	Shematični prikaz analiziranega odseka . . . . .	2
2.2	Prečni prerez pravokotne struge . . . . .	5
2.3	Prečni prerez trapezne struge . . . . .	5
2.4	Prečni prerez poljubno oblikovane struge vodotoka . . . . .	6
2.5	Izbrani analizirani odsek struge . . . . .	7
2.6	Detajl izbranega odseka struge . . . . .	8
2.7	Prikaz seštevka $S_n(h)$ in $P_n(h)$ po odsekih . . . . .	10
2.8	Shema prečnega prereza hidroelektrarne . . . . .	10
3.1	Uporabniški vmesnik ob zagonu programa . . . . .	14
3.2	Primer izračunanega hidrograma v črtnem in stolpičnem diagramu . . . . .	15
3.3	Primer izračunane krivulje trajanja pretokov . . . . .	16
3.4	Shema rečnega korita obravnavanega vodotoka . . . . .	16
3.5	Vnos podatkov v program . . . . .	17
3.6	Konsumpcijska krivulja določena po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge . . . . .	18
3.7	Vnos podatkov v program . . . . .	19
3.8	Graf konsumpcijske krivulje izračunani po metodi za poljubno oblikovane struge . . . . .	20

## KAZALO PREGLEDNIC



## 1 Uvod

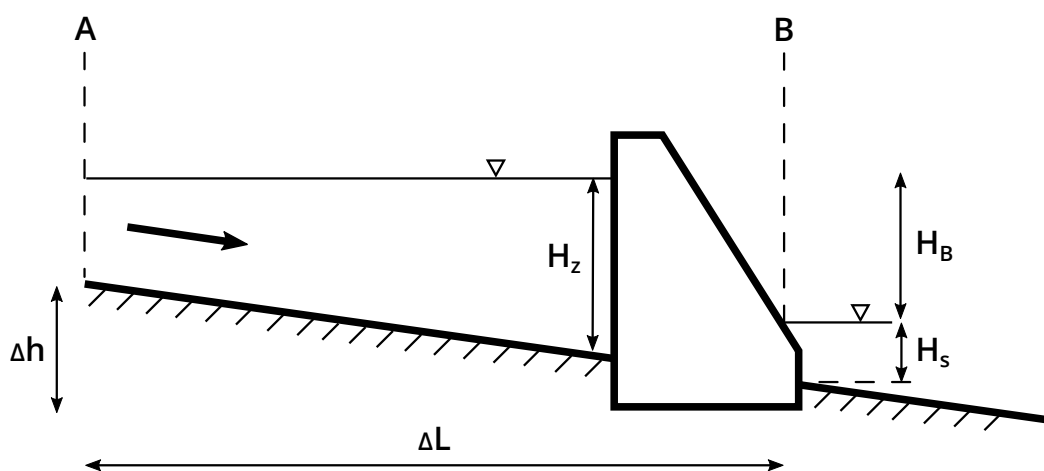
Letna količina vode ki se pretoči v Sloveniji je  $33,9 \text{ km}^3$ , kar nas primerjano na število prebivalcev uvršča v sam vrh v Evropi, takoj za Švico in Norveško. Potreba po električni energiji se iz leta v leto veča, vendar se le okoli 47% vodnega potenciala učinkovito uporablja za potrebe proizvodnje 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 izdelava aplikacije, ki omogoča oceno hidroenergetskega potenciala vodotoka na poljubnem odseku. Vhodni podatek predstavljajo povprečni dnevni pretoki iz javno dostopnih podatkovnih baz in parametri rečne struge, ki jih določimo iz razpoložljivih geodetskih podatkov (karakteristični prečni prerezi in naklon struge) in podatkov iz literature (koeficient hrapavosti). Aplikacija omogoča, da s pomočjo začetno ocenjenih parametrov struge in razpoložljivih povprečnih dnevnih pretokov na izbranem odseku vodotoka izračunamo energetske parametre pretočne hidroelektrarne.

V diplomski nalogi bomo najprej opisali postopek izračuna z osnovnimi enačbami, na koncu pa bomo primerjali rezultate ročnega izračuna z rezultati, ki jih izračuna program. Pri izračunu smo upoštevali, da je gladina vode v zadrževalniku za pregrado na maksimalni konstantni višini, izkoristek elektrarne konstanten in neodvisen od obratovalnega pretoka ter naklon struge od 0% do 2%.

## 2 Teoretične osnove

V tem poglavju bodo predstavljene teoretične osnove in enačbe za izračun energetskih parametrov za izbrani odsek vodotoka. Na sliki 2.1 je prikazan značilni vzdolžni prerez vodotoka za katerega nas zanimajo energetski parametri. Obravnavali bomo pretočno hidroelektrarno na lokaciji med točkama  $A$  in  $B$ , katera proizvaja električno energijo na podlagi bruto razlike višin vode  $H_B$ . Gladino zgornje vode določa nivo zaježitve v zadrževalniku ali derivacijskem kanalu, gladino pod pregrado pa določimo na podlagi konsumpcijske krivulje, ki je odvisna od geometrije struge in pretočnih razmer.



Slika 2.1: Shematični prikaz analiziranega odseka

Energetske parametre za izbrani odsek vodotoka lahko izračunamo po naslednjem algoritmu:

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

## 2.1 Pridobitev podatkov

Za nadaljnje izračune potrebujemo podatke o:

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

Podatke o geometriji rečnega korita lahko pridobimo iz javne baze podatkov, praviloma pa je treba natančnejše posnetke zagotoviti z geodetskimi meritvami na terenu (npr. LIDAR, ortofoto). Za potrebe ocene hidroenergetskega potenciala niso potrebne natančne izmere, zato smo geometrijo struge določili na podlagi ortofoto posnetkov. Naklon rečne struge vodotoka se lahko oceni s pomočjo spletne aplikacije Geopedija [2]. Na karti v spletni aplikaciji Geopedija si izberemo dve točki, ki definirata odsek analiziranega vodotoka in odčitamo podatke o višinski razliki  $\Delta h$  in razdalji  $\Delta L$  med izbranimi 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  $n_g$  je odvisen od naslednjih 7 faktorjev [3]:

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) [4]. 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 dobimo končno ocenjeno vrednost pretoka vodotoka za posamezno obdobje meritev.

## 2.2 Analiza hidrološkega niza podatkov

Namen analize hidrološkega niza podatkov je priprava podatkov za nadaljnje izračune energetskih parametrov hidroelektrarne. Potrebovali bomo hidrogram obdobja in krivuljo trajanja. Hidrogram obdobja je diagram, ki prikazuje povprečne mesečne pretoke vodotoka za izbrano obdobje analize vodotoka, sortirane v kronološkem vrstnem redu. S pomočjo hidrograma lahko ocenimo rečni režim našega vodotoka in nihanja vrednosti povprečnih mesečnih pretokov vodotoka skozi leto. Po navadi na hidrogramu tudi

prikažemo vrednosti pretokov za mokro in suho leto, t.j. leto z maksimalnimi oz. minimalnimi vrednostmi pretokov vodotoka v izbranem obdobju analize. S tem ponazorimo nihanje pretokov vodotoka, ki se lahko pojavi v bodočem času obratovanja hidroelektrarne.

Krivulja trajanja je diagram, ki prikazuje podatke iz hidrograma, t.j. povprečne mesečne pretoke vodotoka v analiziranem obdobju sortirane po vrsti padajoče. S pomočjo krivulje trajanja ponazorimo čas trajanja posameznih vrednosti pretokov izbranega vodotoka. Poleg tega si s krivuljo trajanja pomagamo pri izbiri ustrezne vrste in velikosti turbin v času načrtovanja hidroelektrarne.

## 2.3 Izračun konsumpcijske krivulje

Konsumpcijska krivulja je funkcija, ki predstavlja višino gladine vode v odvisnosti od pretoka vode v rečni strugi. S pomočjo konsumpcijske krivulje bomo v naslednjih poglavjih določali višino spodnje vode hidroelektrarne. 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 in izračun proizvedene električne energije. Postopek za izračun navedenega je opisan v zadnjem koraku algoritma za izračun energetskih parametrov hidroelektrarne v tem poglavju. V nadaljevanju bomo predstavili izračun konsumpcijske krivulje za primer pravokotne, trapezne in struge poljubne geometrije.

### 2.3.1 Izračun konsumpcijske krivulje za pravokotne in trapezne struge

Za izris konsumpcijske krivulje potrebujemo vrednosti pretoka vodotoka  $Q$  v odvisnosti od višine gladine vode  $h$  v rečni strugi. Gladina vode  $h$  poteka od najnižje točke v strugi do maksimalne višine gladine vode v strugi vodotoka  $H$ . Natančnost rezultatov numeričnih metod, je odvisna od velikosti koraka izračuna. V našem primeru za potrebe ocene pretoka smo privzeli centimetrski korak po višini, kar nudi zadovoljivo natančnost. Pretok vode v odprti strugi  $Q$  se torej za vsak cm višine  $h$  izračuna po Manningovi enačbi [3]:

$$Q = \frac{\sqrt{I}}{n_g} \cdot S \cdot R^{2/3} \quad (2.2)$$

Kjer je:

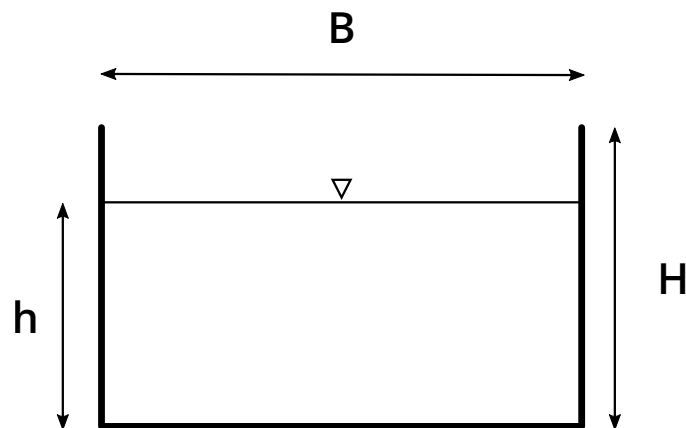
$Q$	pretok
$n_g$	Manningov koeficient hrapavosti dna struge
$I$	naklon struge
$S$	ploščina dela prečnega profila pod gladino vode
$R$	hidravlični radij $\frac{S}{P}$
$P$	dolžina omočenega oboda struge

Če člene Manningove enačbe izpišemo dobimo spodnjo enačbo [3]:

$$Q(h) = \frac{\sqrt{I}}{ng} \cdot \frac{S(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}} \quad (2.3)$$

Dobili smo končno enačbo katero bomo uporabljali v nadaljevanju pri izračunu pretokov po višini za pravokotne in trapezno oblikovane struge.

1. Pravokotno oblikovana struga vodotoka:



Slika 2.2: Prečni prerez pravokotne struge

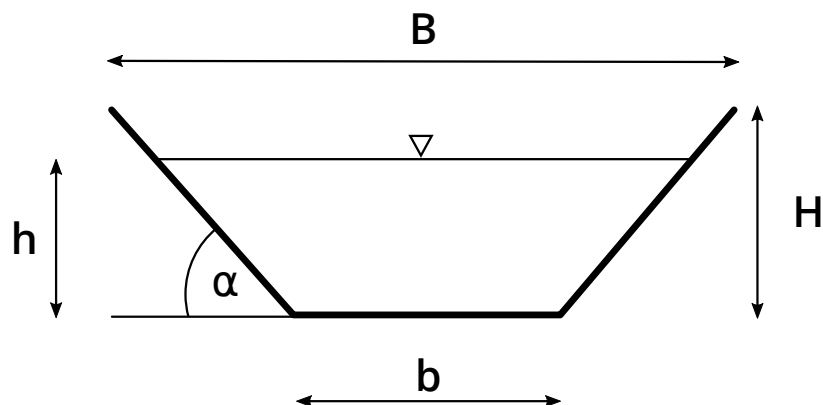
Omočeni obod pravokotno oblikovane struge  $P_p(h)$  izračunamo kot seštevek širine struge  $B$  in dvakratne višine gladine vode v rečnem koritu  $h$ :

$$P_p(h) = B + 2h \quad (2.4)$$

Ploščino prečnega prereza struge vodotoka pod gladino vode  $S_p(h)$  za pravokotno oblikovano strugo dobimo po enačbi:

$$S_p(h) = B \cdot h \quad (2.5)$$

2. Trapezno oblikovana struga vodotoka:



Slika 2.3: Prečni prerez trapezne struge

Omočeni obod trapezno oblikovanega rečnega korita  $P_t(h)$  izračunamo kot seštevek širine dna struge in dvakratne razdalje od roba dna do točke presečišča rečnega korita z gladino vode:

$$P_t(h) = b + 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{\tan \alpha}\right)^2} \quad (2.6)$$

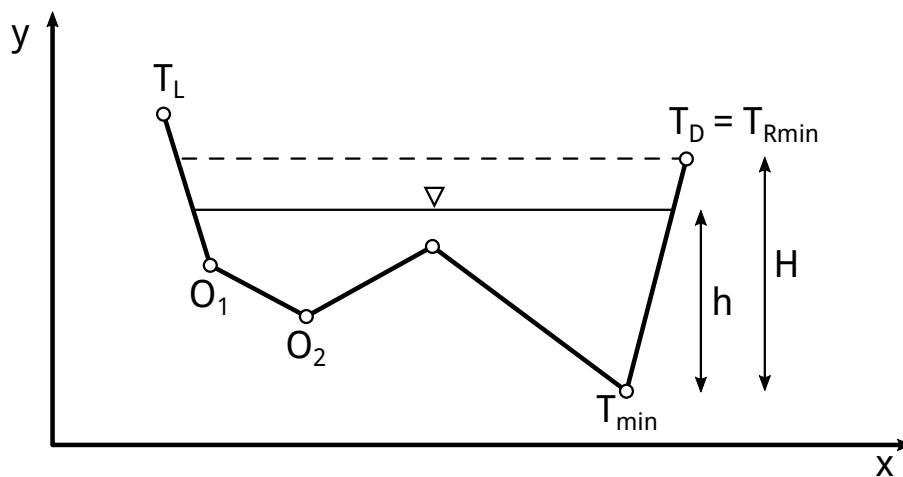
Ploščino prečnega prereza struge pod gladino vode  $S_t(h)$  za trapezno oblikovano rečno korito izračunamo po enačbi:

$$S_t(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{\tan \alpha} \quad (2.7)$$

Ko poznamo vse člene Manningove enačbe 2.3, izračunamo pretoke vodotoka za vsak cm višine gladine vode v rečni strugi, ki poteka od višine  $h = 0$  do višine  $h = H$ . S tem smo izračunali točke diagrama konsumpcijske krivulje  $h(Q)$ .

### 2.3.2 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike

V primeru, da iščemo konsumpcijsko krivuljo za strugo vodotoka poljubne oblike, si za izračun členov Manningove enačbe ( $S(h)$  in  $P(h)$ ) ne moremo pomagati z znanimi formulami preprostih geometrijskih likov. Poljubno oblikovano strugo lahko modeliramo s serijo točk, ki jih dodajamo v kartezijski koordinatni sistem  $x, y$ . 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 2.4 je predstavljena shema prečnega prereza poljubno oblikovane struge vodotoka.



Slika 2.4: Prečni prerez poljubno oblikovane struge vodotoka

Skrajni točki na robu struge vodotoka sta točki  $T_L$  in  $T_D$  prikazani na sliki 2.4. Točko na robu struge z nižjo  $y$  koordinato označimo s  $T_{Rmin}$  (na sliki 2.4 desna skrajna točka označena kot točka  $T_D$ ). Najnižjo točko struge vodotoka označimo s  $T_{min}$ . Maksimalna višina gladine vode v rečnem koritu  $H$  je definirana kot razdalja med točkama  $T_{Rmin}$  in  $T_{min}$ . Obilno deževje, ki privede do poplav, lahko povzroči, da bi bil pretok vodotoka večji od pretoka, ki ga je rečno korito sploh sposobno prevajati. V tem primeru se voda začne prelivati preko robov struge vodotoka, višina gladine vode v strugi pa je zaradi preliva vode preko robov vodotoka še vedno enaka maksimalni višini gladine  $h = H$ .

Za izračun konsumpcijske krivulje, s točkami definirano poljubno strugo vodotoka najprej razdelimo na  $n$  odsekov podanih z dvema zaporednima točkama  $O_1 (x_1, y_1)$  in  $O_2 (x_2, y_2)$ . To je shematično prikazano na sliki 2.4. Za vsak analizirani odsek struge vodotoka  $n$ , se najprej določi enačba linearne funkcije, ki povezuje točki  $O_1$  in  $O_2$ . Zaradi poenostavljenega zapisa so v nadaljevanju koordinate točke  $O_1$  označene z  $x_1$  in  $y_1$ , koordinate točke  $O_2$  pa z  $x_2$  in  $y_2$ . Razdaljo med  $y$  koordinatami točk analiziranega odseka  $O_1$  in  $O_2$  označimo z  $\Delta y$ , razdaljo med  $x$  koordinatami točk  $O_1$  in  $O_2$  pa z  $\Delta x$ . Enačbo linearne funkcije, ki povezuje točki  $O_1$  in  $O_2$  določimo na dva načina:

1. V primeru ko je  $\Delta x > 0$  je enačba linearne funkcije, ki povezuje točki  $O_1$  in  $O_2$  definirana kot:

$$f(x) = kx + n \quad (2.8)$$

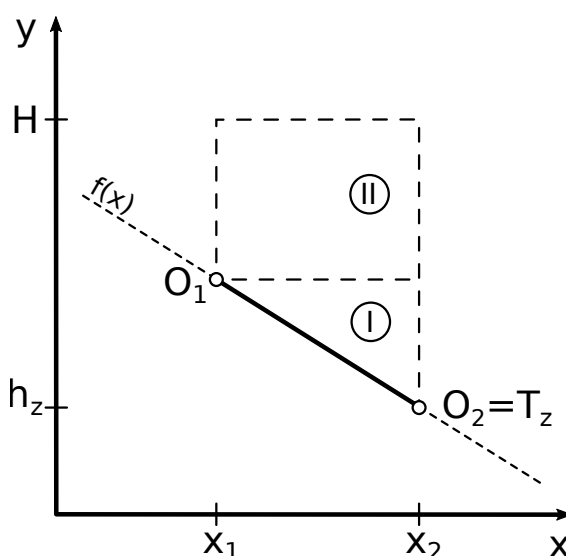
Naklon funkcije  $k$  se izračuna po spodnji enačbi:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.9)$$

Če v enačbo linearne funkcije 2.8 vstavimo izračunan naklon  $k$  in koordinate točke  $O_1$ , lahko izračunamo iskani  $n$ . S tem je določena iskana enačba linearne funkcije  $f(x)$ .

2. V primeru ko je  $\Delta x = 0$  pa je enačba linearne funkcije, ki povezuje točki  $O_1$  in  $O_2$  vertikalna premica definirana kot:

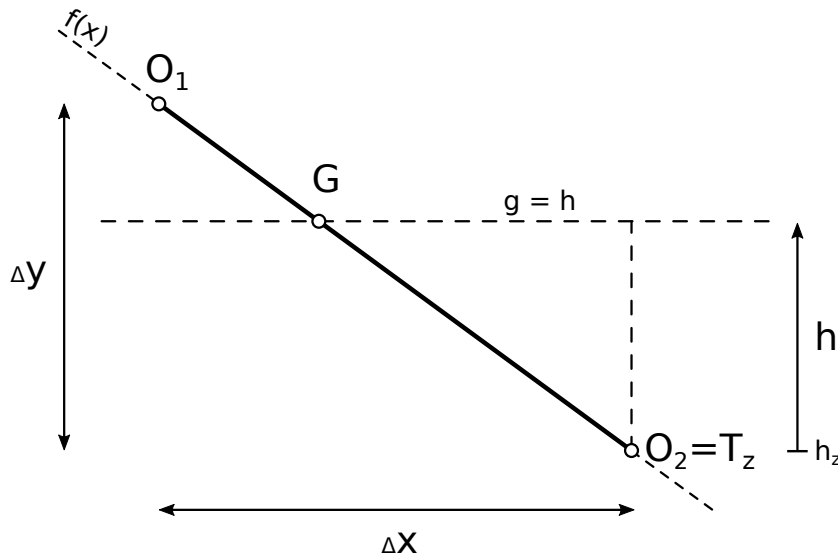
$$x = x_1 = x_2 \quad (2.10)$$



Slika 2.5: Izbrani analizirani odsek struge

Za vsak analizirani odsek dveh točk se določi najnižja točka odseka  $T_z$ , na sliki 2.5 označena kot točka  $O_2$ . Y koordinata točke  $T_z$  nam predstavlja začetno višino odseka  $h_z$ . Od  $h_z$  do končne višine gladine vode v strugi  $H$  za vsak cm po višini določimo omočeni obod struge  $P(h)$  in ploščino prečnega prereza

odseka pod vodo  $S(h)$ . Ravnina  $g$  predstavlja gladino vode pri trenutni višini  $h$ , kar je prikazano na sliki 2.6.



Slika 2.6: Detajl izbranega odseka struge

Omočeni obod struge vodotoka  $P(h)$  in ploščina prečnega prereza struge vodotoka pod gladino vode  $S(h)$  se glede na naklon funkcije  $f(x)$ , ki povezuje točki na robu analiziranega odseka izračuna na dva načina:

1. V primeru ko velja  $\Delta y = 0$  je funkcija  $f(x)$  med točkama trenutno analiziranega odseka vodoravna premica in dolžino omočenega oboda  $P(h)$  ter ploščino prečnega prereza struge pod gladino vode  $S(h)$  določimo kot:

$$P(h) = \Delta x \quad (2.11)$$

$$S(h) = \Delta x \cdot h \quad (2.12)$$

2. V primeru ko  $\Delta y \neq 0$  ima funkcija  $f(x)$  naklon  $k \neq 0$ . V tem primeru od začetka višine odseka  $h_z$  do končne višine gladine vode v strugi vodotoka  $H$  za vsak cm izračunamo presečišče  $G$ , funkcije  $f(x)$  s horizontalno ravnino  $g = h$ , ki predstavlja gladino vode v strugi vodotoka.

Ko imamo določeno presečišče  $G$  gladine vode s funkcijo  $f(x)$  med točkama analiziranega 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 2.5 označena z  $O_2$ ).

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

- (a) V primeru da se presečišče  $G$  izbranega odseka struge nahaja v območju med točkama  $O_1$  in  $O_2 = T_z$ , dolžino omočenega oboda določimo po Pitagorovem izreku kot:

$$P(h) = \sqrt{(T_{zx} - G_x(h))^2 + (T_{zy} - G_y(h))^2} \quad (2.13)$$



Ploščino območja, ki ga oklepajo horizontalna ravnina  $g$  s presečiščem  $G$  in najnižjo točko odseka  $T_z$  pa določimo kot ploščino trikotnika (območje I na sliki 2.5) po formuli:

$$S(h) = \frac{|T_{zx} - G_x(h)| \cdot |T_{zy} - G_y(h)|}{2} \quad (2.14)$$

- (b) 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:

$$P = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (2.15)$$

Ploščina prečnega prereza struge vodotoka pod gladino vode analiziranega odseka  $S(h)$  pa se določi kot seštevek ploščin območij I in II označenih na sliki 2.5.

$$S(h) = S_I + S_{II}(h) \quad (2.16)$$

Pri čemer sta  $S_I$  in  $S_{II}$  enaka:

$$S_I = \left| \frac{\Delta y \cdot \Delta x}{2} \right| \quad (2.17)$$

$$S_{II}(h) = \left| \Delta x \cdot (h - y_1) \right| \quad (2.18)$$

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 struge vodotoka  $Q(h)$ . Posamezne ploščine odsekov  $S_n$  po višinah medsebojno seštejemo in dobimo končno površino vodnega telesa v odvisnosti od višine gladine vode v strugi vodotoka, ter po enakem postopku določimo omočeni obod v prečni smeri  $P_n$ , kar je shematično prikazano na sliki 2.7:

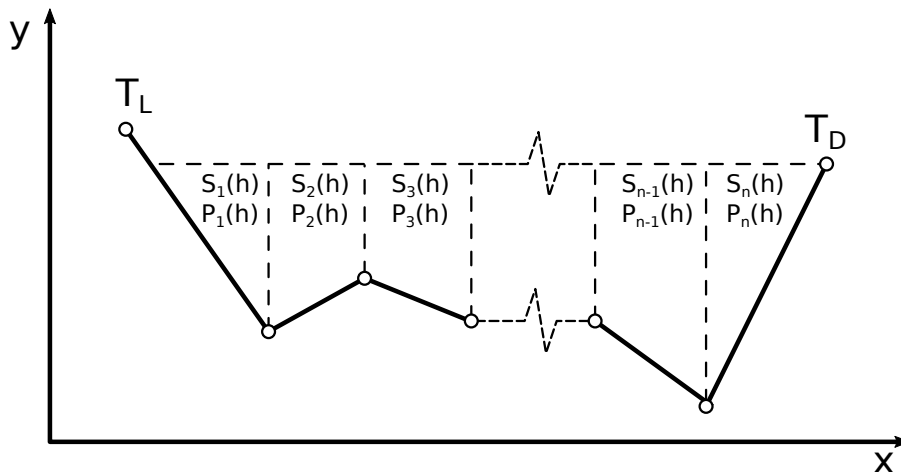
$$S(h) = \sum_{n=1}^n S_n(h) \quad (2.19)$$

$$P(h) = \sum_{n=1}^n P_n(h) \quad (2.20)$$

Pretok vode skozi presek izbranega vodotoka izračunamo po Manningovi enačbi opisani v poglavju 2.3.1.

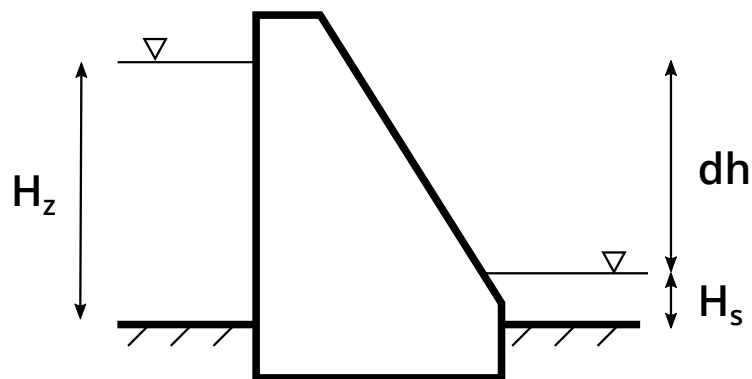
$$Q(h) = \frac{\sqrt{I}}{ng} \cdot \frac{S(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}} \quad (2.21)$$

S tem postopkom smo izračunali vse točke, ki določajo konsumpcijsko krivuljo  $h(Q)$  za izbrano strugo poljubne geometrije.

Slika 2.7: Prikaz seštevka  $S_n(h)$  in  $P_n(h)$  po odsekih

## 2.4 Izračun proizvodnje električne energije

Za določitev proizvodnje električne energije potrebujemo podatek o razliki med koto zgornje vode t.j. vode v zadrževalniku in koto spodnje vode, ki je določena s konsumpcijsko krivuljo za pretok, ki teče čez profil pregrade. Ker računamo proizvodnjo električne energije za pretočne hidroelektrarne predpostavimo, da je kota zgornje vode konstantna na višini  $H_z$ .



Slika 2.8: Shema prečnega prereza hidroelektrarne

Kota spodnje vode  $H_s$  določimo iz prej izračunane konsumpcijske krivulje  $h(Q)$ , iz katere odčitamo višino gladine vode v strugi za dani povprečni mesečni pretok, ki teče skozi turbine hidroelektrarne. V primeru, da se pretok skozi turbine hidroelektrarne nahaja med dvema točkama pretokov v konsumpcijski krivulji, iskano višino spodnje vode določimo z linearno interpolacijo med znanima izračunanimi točkama na grafu konsumpcijske krivulje.

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

$$dh = H_z - H_s \quad (2.22)$$

Moč hidroelektrarne izračunamo po enačbi:

$$P = \eta \cdot \frac{g \cdot \rho_v}{1000} \cdot Q_t \cdot dh \quad (2.23)$$

Pri čemer so:

P	moč [kW]
$\eta$	izkoristek pri pretvorbi mehanske energije v električno [%]
g	gravitacijska konstanta $\left[9,81 \frac{m}{s^2}\right]$
$\rho_v$	gostota vode $\left[\frac{1000kg}{m^3}\right]$
$Q_t$	pretok skozi turbine hidroelektrarne $[m^3/s]$
dh	razlika višin med koto spodnje in koto zgornje vode [m]

Izkoristek turbin hidroelektrarne je odvisen od razmerja med dejanskim in instaliranim pretokom in se ves čas spreminja. V primeru naše naloge pa so te razlike tako majhne, da lahko za potrebe ocene proizvodnje električne energije privzamemo, da je izkoristek elektrarne konstanten. Pretok vode skozi turbine hidroelektrarne  $Q_t$  je odvisen od parametrov hidroelektrarne in pretoka vodotoka. Pretok  $Q_t$  se določi glede na spodnje pogoje:

$$Q_t = \begin{cases} 0, & Q < Q_{min} \\ Q, & Q_{min} < Q < Q_{max} \\ Q_{max}, & Q_{max} < Q < Q_{teh} \\ 0, & Q > Q_{teh} \end{cases} \quad (2.24)$$

Pri čemer so:

Q	Pretok vodotoka $[m^3/s]$
$Q_{min}$	biološki minimum v vodotoku $[m^3/s]$
$Q_{max}$	instalirani pretok $[m^3/s]$
$Q_{teh}$	tehnični maksimum pretoka hidroelektrarne $[m^3/s]$

V primeru, ko je pretok vodotoka manjši od biološkega minimuma, ki omogoča ohranjanje bioloških razmer v vodotoku, se vsa voda prelija preko prelivnih polj na pregradi in elektrarna ne obratuje. V primeru pojava visokih voda, ko je pretok vodotoka večji od tehničnega maksimuma pretoka hidroelektrarne, ki predstavlja mejni pretok za obratovanje hidroelektrarne, se vsa voda prelija preko pregrade in elektrarna prav tako ne obratuje.

V vseh ostalih obratovalnih primerih, pa je pretok skozi turbine kar enak pretoku vodotoka, vendar v primeru, ko pretok vodotoka  $Q$  presega instalirani pretok elektrarne  $Q_{max}$ , elektrarna obratuje z instaliranim pretokom pri  $Q_t = Q_{max}$ . Instalirani pretok  $Q_{max}$  določimo na podlagi krivulje trajanja in izbranega tipa turbin. Za pretočne elektrarne velja pravilo, da je instalirani pretok enak ali malo manjši od srednjega letnega pretoka vodotoka.

Za določitev povprečne mesečne proizvodnje električne energije  $n$ -tega meseca, potrebujemo znano povprečno mesečno moč hidroelektrarne  $\overline{P}_n$  za vsak mesec v letu. Povprečno mesečno moč hidroelektrarne izračunamo s pomočjo prej navedene enačbe za moč hidroelektrarne 2.23, pri čemer v enačbo vstavimo povprečni mesečni pretok  $\overline{Q}_t$  za  $n$ -ti mesec, pridobljen iz rezultatov analize hidrološkega niza podatkov opisane v poglavju 2.2. S pomočjo povprečnega pretoka meseca  $\overline{Q}_t$  in konsumpcijske krivulje določimo še razliko višin med koto zgornje in spodnje vode  $\overline{dh}$  in izračunamo povprečno moč  $\overline{P}_n$  za  $n$ -ti mesec leta:

$$\overline{P}_n = \eta \cdot \frac{g \cdot \rho_v}{1000} \cdot \overline{Q}_t \cdot \overline{dh} \quad (2.25)$$

$$(2.26)$$

Povprečno mesečno proizvodnjo električne energije  $n$ -tega meseca izračunamo po naslednji enačbi:

$$E_n = \frac{24 \cdot \overline{P}_n \cdot d}{1000} \quad (2.27)$$

Pri čemer so:

$E_n$	povprečna mesečna proizvedena električna energija [ $MWh$ ]
$\overline{P}_n$	povprečna moč v mesecu [ $kW$ ]
$d$	število dni v mesecu

Povprečno letno proizvodnjo električne energije se izračuna s seštevkom vseh povprečnih mesečnih proizvodenj:

$$E_{leto} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{10} + E_{11} + E_{12}}{1000} [GWh] \quad (2.28)$$

### 3 Opis uporabe programa

V tem poglavju bo opisana uporaba programa, ki je nastal v okviru te diplomske naloge. Program lahko služi kot učni pripomoček ali pa kot pripomoček za hitro oceno proizvedene električne energije iz bližnjega potoka ali večje reke. Napisan je v programskem jeziku *Javascript*, poleg katerega sem uporabil tudi knjižnici *React* za prikazovanje uporabniškega vmesnika in *ChartJs* za risanje diagramov. Sam program je odprto koden in pod MIT licenco, izvorna koda programa pa se nahaja na spletni strani [5].

Za izračun energetskih parametrov hidroelektrarne s programom moramo najprej vnesti podatke o dimenzijah struge vodotoka in povprečnih dnevnih vrednostih pretoka vodotoka za izbrano obdobje. Podatke lahko pridobimo na način, ki je opisan v poglavju 2.1.

#### 3.1 Vnos podatkov

Na sliki 3.1 je viden uporabniški vmesnik, ki se pokaže ob zagonu programa. S pritiskom na ikono v levem zgornjem kotu izberemo in vnesemo datoteko, ki vsebuje podatke o povprečnih dnevni pretokih vodotoka, ki smo jih dobili iz ARSO-vega arhiva v .csv formatu za izbrano obdobje analize [4]. Primer podatkov v datoteki je prikazan spodaj. Vejica loči datum meritve in povprečni dnevni pretok izbranega vodotoka.

01.01.1989,85.1
02.01.1989,83.6
03.01.1989,85.1
04.01.1989,82.1
05.01.1989,73.6
06.01.1989,69.6
07.01.1989,74.9
08.01.1989,79.2
09.01.1989,80.6
10.01.1989,79.2
11.01.1989,79.2
12.01.1989,79.2
itd...

Po vnosu podatkov o povprečnih dnevni pretokih vodotoka, program samodejno analizira podatke o pretokih in v zavihku *Results* izriše hidrogram in krivuljo trajanja. Primer izpisa hidrološke analize je viden na slikah 3.2 in 3.3. S pritiskom na leto analize, ki se nahaja nad samim diagramom, lahko izbrano leto analize odstranimo oz. filtriramo iz diagrama analize.

Channel Design

HE

Results

Rectangular

Trapezoid

Custom

B 10 [m]

h 5 [m]

ng 0.03 [/]

$\varphi$  1 [%]

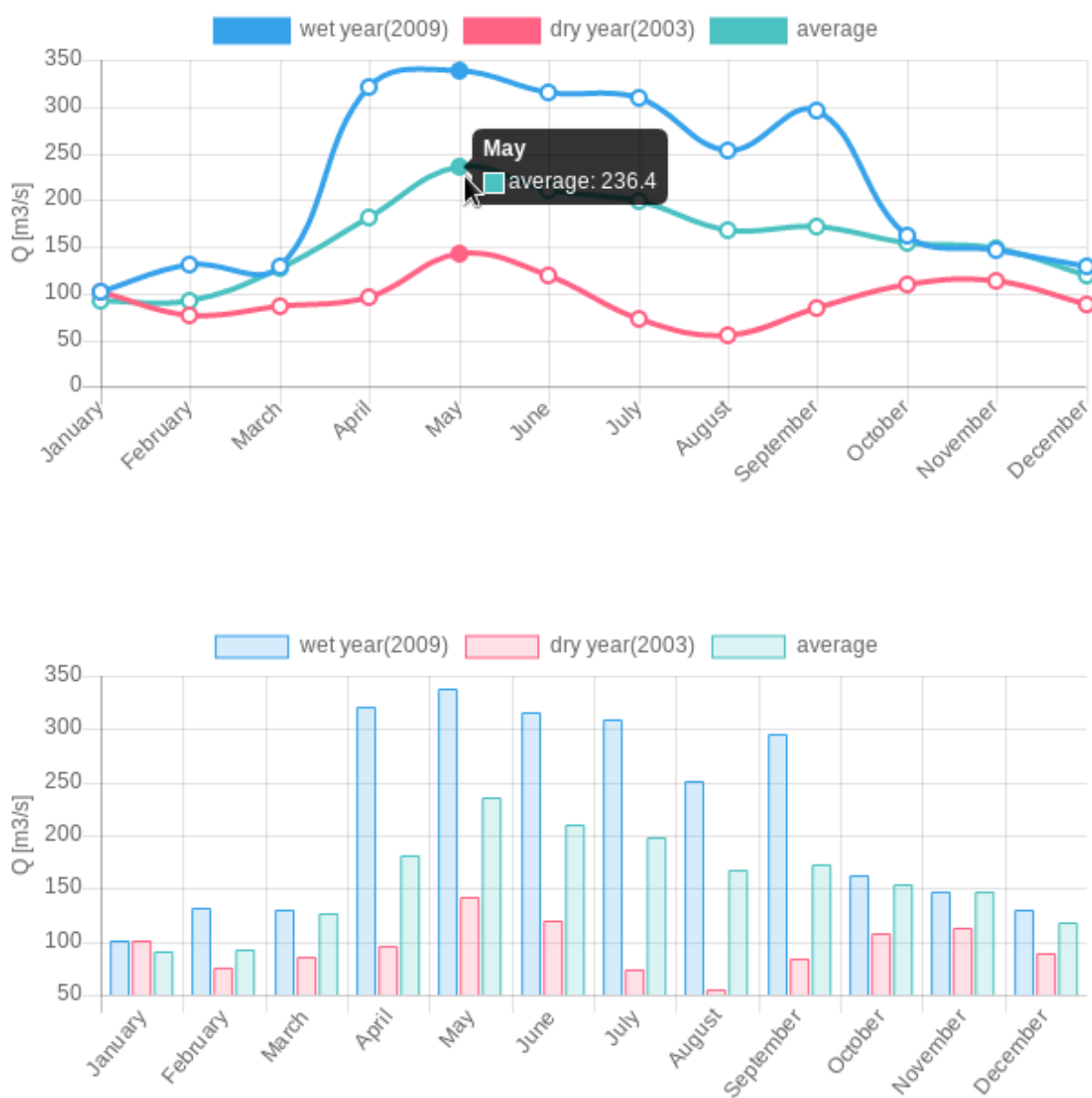
B

$\nabla$

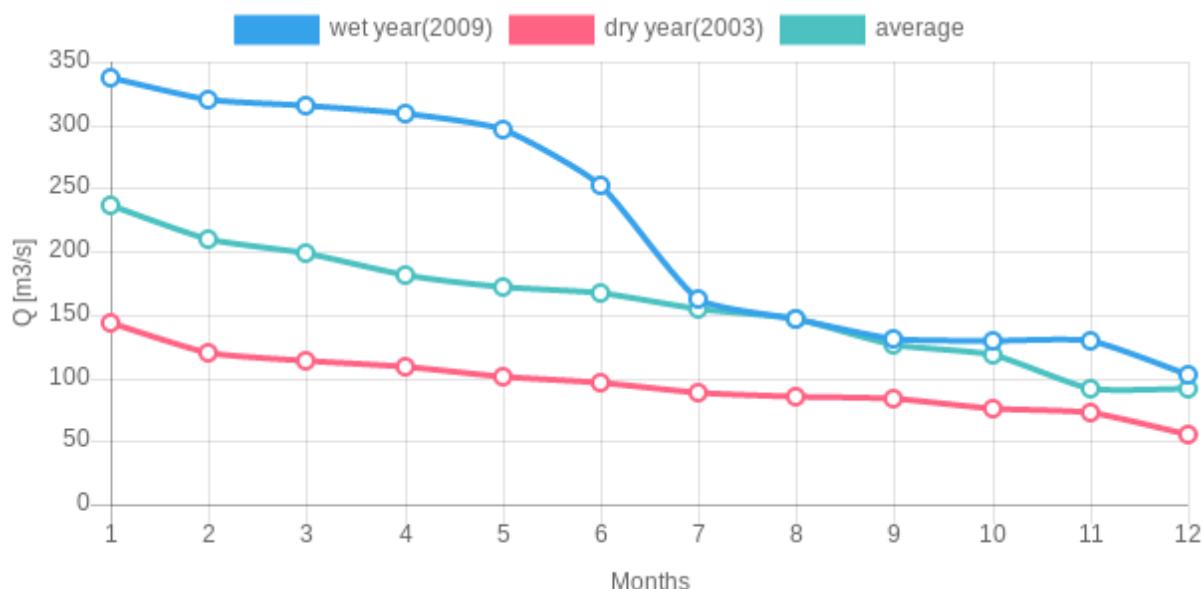
h

$\varphi$

Slika 3.1: Uporabniški vmesnik ob zagonu programa



Slika 3.2: Primer izračunanega hidrograma v črtnem in stolpičnem diagramu

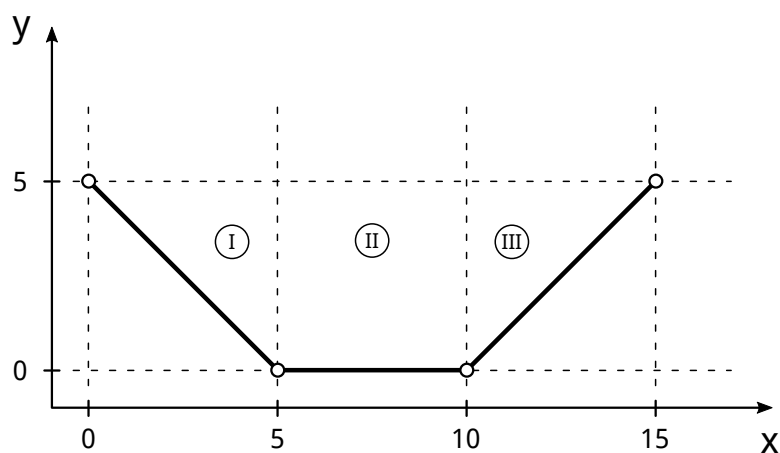


Slika 3.3: Primer izračunane krivulje trajanja pretokov

### 3.2 Izračun konsumpcijske krivulje

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 bomo na primeru pokazali pravilnost postopka izračuna konsumpcijske krivulje. V ta namen bomo uporabili namišljen primer trapezno oblikovane struge vodotoka prikazane na sliki 3.4, z 1% naklonom struge, višino vode v strugi  $h = 5m$  in Manningovim koeficientom hrapavosti  $n_g = 0,3$ .

Rezultate ročnega izračuna bomo primerjali z rezultati ki jih izračuna program po metodi za pravokotno in trapezno oblikovane struge in metodi za izračun pretokov za strugo poljubne oblike opisani v poglavju 2.3.1 oz. 2.3.2. Vse mere na spodnji sliki 3.4 so v metrih.



Slika 3.4: Shema rečnega korita obravnavanega vodotoka



### 3.3 Izračun parametrov po metodi za pravokotno in trapezno oblikovano strugo vodotoka

V tem poglavju bomo preverili pravilnost delovanja implementiranega algoritma. V ta namen bomo primerjali rezultate ročnega izračuna z rezultati, ki jih izračuna program po metodi za pravokotno in trapezno oblikovane struge opisani v poglavju 2.3.1.

#### 3.3.1 Ročni izračun

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

$$P(h) = b + 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{\tan \alpha}\right)^2} = 5 + 2 \cdot \sqrt{5^2 + \left(\frac{5}{\tan 45}\right)^2} = 19,14 \text{ m} \quad (3.1)$$

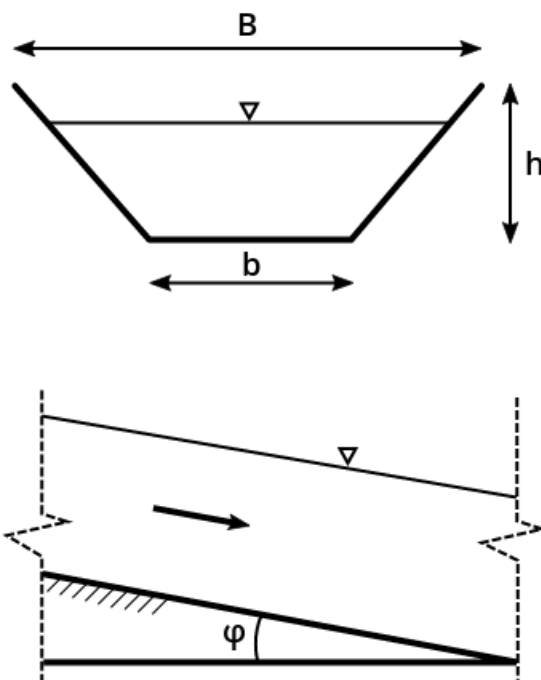
$$S(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{\tan \alpha} = 5 \cdot 5 + \frac{5^2}{\tan 45} = 50 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

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

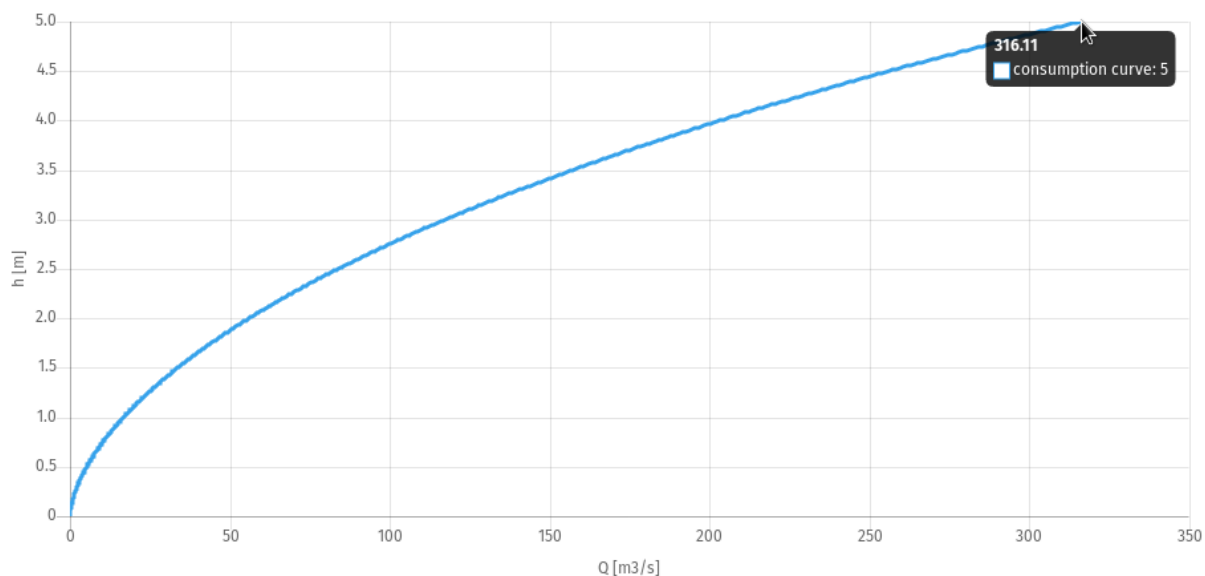
#### 3.3.2 Izračun s programom

V program vnesemo podatke o rečnem koritu kot je prikazano na sliki 3.5.

B	<input type="text" value="15"/>	[m]
b	<input type="text" value="5"/>	[m]
h	<input type="text" value="5"/>	[m]
ng	<input type="text" value="0.03"/>	[/]
$\varphi$	<input type="text" value="1"/>	[%]



Slika 3.5: Vnos podatkov v program



Slika 3.6: Konsumpcijska krivulja določena po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge

S slike 3.6 lahko pri višini  $h = 5\text{ m}$  odčitamo pretok vode v strugi izračunane po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge  $Q = 316,1\text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.4 Izračun parametrov po metodi za strugo poljubne oblike

V tem poglavju bomo primerjali rezultate ročno izračunanih parametrov in parametrov izračunanih s programom po metodi za izračun pretoka vode v strugi poljubne oblike opisani v poglavju 2.3.2.

#### 3.4.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne

Pretoke v strugi vodotoka računamo po odsekih med točkami s katerimi modeliramo strugo vodotoka, pri maksimalni višini  $h = 5\text{ m}$ .

I. Odsek:

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

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

$$(3.6)$$

II. Odsek:

$$S_{II} = 5 \cdot 5 = 25\text{ m}^2 \quad (3.7)$$

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

$$(3.9)$$

### III. Odsek:

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

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

$$(3.12)$$

Skupni pretok pri  $h = 5\text{ m}$  izračunamo kot:

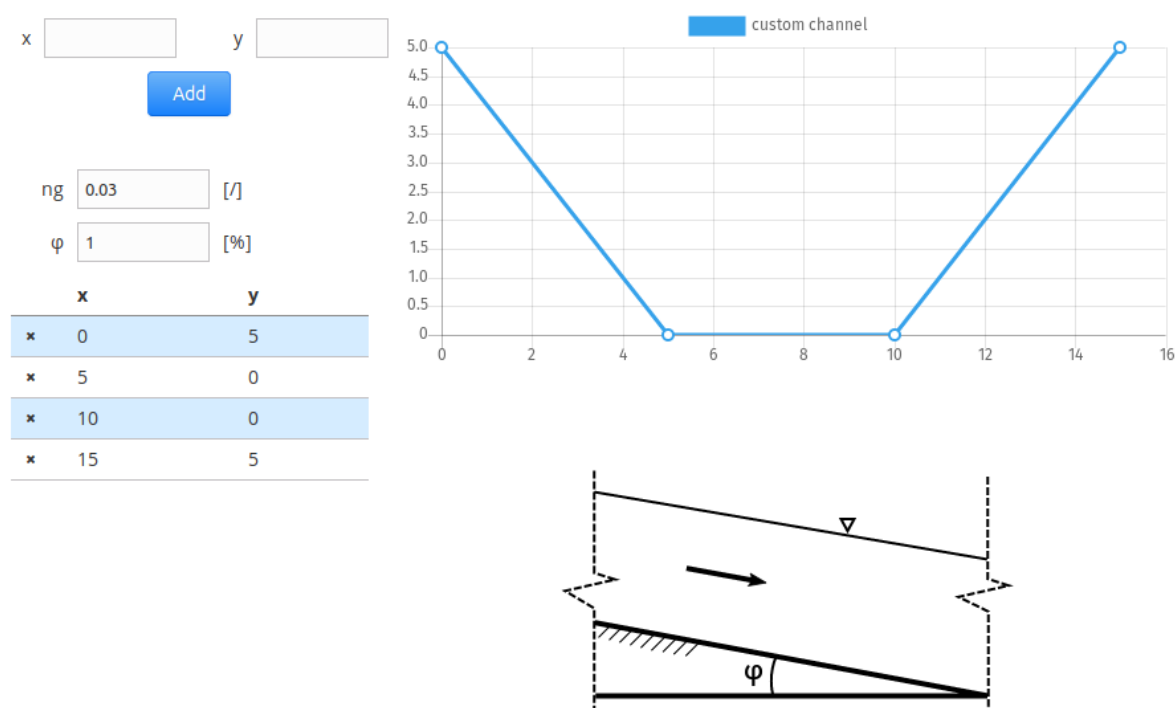
$$S_s(h) = S_I + S_{II} + S_{III} = 12,5 + 25 + 12,5 = 50 \text{ m}^2 \quad (3.13)$$

$$P_s(h) = P_I + P_{II} + P_{III} = 7,07 + 5 + 7,07 = 19,14 \text{ m} \quad (3.14)$$

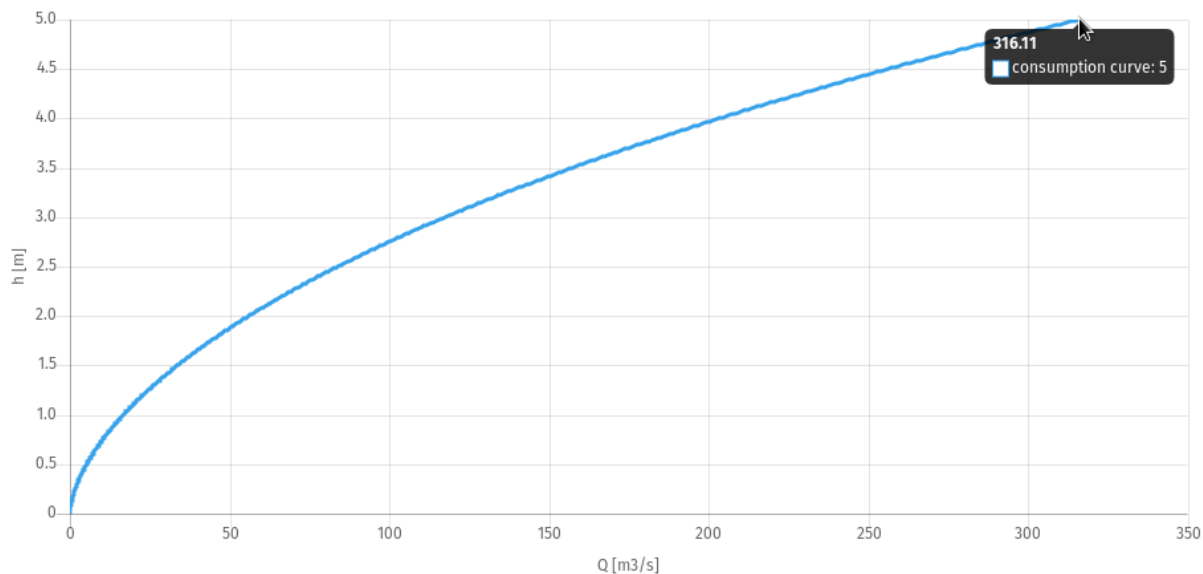
$$Q_s(h) = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{50^{5/3}}{19,14^{2/3}} = 316,1 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.15)$$

### 3.4.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom

S pomočjo uporabniškega vmesnika v koordinatni sistem vnašamo serijo točk, s katerimi modeliramo robove izbrane struge. V našem primeru so vrednosti koeficientov za vse odseke rečne struge enake.



Slika 3.7: Vnos podatkov v program



Slika 3.8: Graf konsumpcijske krivulje izračunani po metodi za poljubno oblikovane struge

Z grafa konsumpcijske krivulje 3.8 pri višini  $h = 5\text{ m}$  lahko odčitamo pretok  $Q = 316,1\text{ m}^3/\text{s}$ , ki je enak rezultatu ročnega izračuna v poglavju 3.4.1 in rezultatu dobljenem po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge v poglavju 3.3. S tem smo dokazali pravilnost numeričnega algoritma za izračun točk konsumpcijske krivulje za poljubno oblikovano strugo vodotoka.

## 4 ZAKLJUČEK

V prvem delu diplomske naloge smo najprej podali teoretične osnove in predpostavke izračuna z osnovnimi formulami, katere uporabljamo pri izračunu energetskih parametrov hidroelektrarne. Podrobno smo opisali postopek izračuna konsumpcijske krivulje za struge pravokotne, trapezne oblike, ter strugo povsem poljubne oblike. Na tej osnovi sem razvil algoritem, ki izračunava energetske parametre pretočne hidroelektrarne.

V drugem delu diplomske naloge smo preverili pravilnost izračunavanja energetskih parametrov hidroelektrarne s programom na namišljenem primeru po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge ter metodi za izračun poljubno oblikovane struge. Rezultate, ki jih je izračunal program smo primerjali z rezultati, ki smo jih izračunali ročno in dokazali, da program računa pravilno.

Čeprav so metode izračuna enake tudi za akumulacijske hidroelektrarne, smo se zaradi enostavnosti izračuna omejili le na izračun energetskih parametrov za pretočne hidroelektrarne. Možne smernice za nadaljnje delo so razširitev algoritmov za preračun energetskih parametrov akumulacijskih hidroelektrarn, ki bi v upošteval optimalno nihanje gladine vode v akumulaciji za pregrado v odvisnosti od potreb električne energije.

## VIRI

- [1] Kryžanowski, A., Mikoš, M., Brilly, M. 2011. Dragocen obnovljivi vir energije nam teče skozi prste?: Hidroelektrarne na srednji Savi. <http://www.delo.si/druzba/znanost/dragocen-obnovljivi-vir-energije-nam-tece-skozi-prste.html>. (Pridobljeno 23. 08. 2017.).
- [2] Geopedija. <http://www.geopedia.si/>. (Dostopano 17.3.2017).
- [3] Chow, V. T. 1959. Open-Channel Hydraulics. New York, McGraw-Hill: 680 str.
- [4] Arso. <http://www.arso.gov.si/>. (Dostopano 17.3.2017).
- [5] Aplikacija. <https://github.com/GreatDanton/Thesis/tree/master/code>. (Dostopano 27.08.2017).