

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

Kandidat:

JAN PRIBOŠEK

RAČUN ENERGETSKIH PARAMETROV HIDROELEKTRARNE

Diplomska naloga št:

**CALCULATING ENERGETIC PARAMETERS OF THE
HYDROELECTRIC POWER PLANT**

Graduation thesis:

Mentor:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

LJUBLJANA, 2017

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent **Jan Pribošek**, vpisna številka **26110710**, sem avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Račun energetskih parametrov hidroelektrarne**

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)
 - (a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela
 - (b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 19. avgust 2017

Jan Pribošek

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK

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., 15 sl., 0 pregl., 49 en.
Ključne besede:

Izvleček

V okviru diplomske naloge sem razvil program za računanje parametrov pretočne hidroelektrarne. V prvem delu naloge sem opisal teoretične osnove za razvoj takega programa in opisal princip metod, ki jih program uporablja za izračun energetskih parametrov hidroelektrarne. V drugem delu naloge pa sem prikazal pravilnost izračuna ročno in s programom, primerjal rezultate različnih metod izračuna in utemeljil zakaj pride do odstopanj v rezultatih.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDC**

Author: Jan Pribošek
Supervisor: Assist. Prof. Andrej Kryžanowski, Ph. D.
Title: Calculating energetic parameters of the hydroelectric powerplant
Document type: Graduation - Thesis - university program
Notes: 23 p., 15 fig., 0 tab., 49 eq.
Keywords:

Abstract

In thesis I have developed software for calculating parameters of run-of-river hydroelectric power plant. In the first part of the thesis I described the theory basics on which the software is built upon, and described the algorithms for calculating the energetic parameters of hydroelectric power plants. In the second part of the thesis, I provided an example that proves correctness of the software calculations and presented the reason why the results differ based on the chosen method of calculations.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	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	5
2.4 Izračun proizvodnje električne energije	9
3 Opis uporabe programa	12
3.1 Vnos podatkov	12
3.2 Izračun konsumpcijske krivulje	15
3.3 Izračun parametrov po metodi za pravokotno in trapezno oblikovano strugo vodotoka	16
3.3.1 Ročni izračun	16
3.3.2 Izračun s programom	16
3.4 Izračun parametrov po metodi za strugo poljubne oblike	17
3.4.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne	17
3.4.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom	18
3.5 Rezultati izračuna konsumpcijske krivulje	19
4 ZAKLJUČEK	21
VIRI	22

KAZALO SLIK

2.1	Prečni prerez pravokotne struge	4
2.2	Prečni prerez trapezne struge	5
2.3	Prečni prerez poljubno oblikovane struge vodotoka	6
2.4	Izbrani analizirani odsek struge	6
2.5	Detajl izbranega odseka struge	7
2.6	Prikaz seštevka pretokov po odsekih	9
2.7	Shema prečnega prereza hidroelektrarne	9
3.1	Uporabniški vmesnik ob zagonu programa	13
3.2	Primer izračunanega hidrograma v črtnem in stolpičnem diagramu	14
3.3	Primer izračunane krivulje trajanja	15
3.4	Shema rečnega korita obravnavanega vodotoka	15
3.5	Vnos podatkov v program	16
3.6	Konsumpcijska krivulja določena po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge	17
3.7	Vnos podatkov v program	18
3.8	Graf konsumpcijske krivulje izračunani po metodi za poljubno oblikovane struge	19

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 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 izdelava aplikacije, ki omogoča oceno hidroenergetskega potenciala vodotoka na poljubnem odseku. Vhodni podatek predstavljajo povprečni dnevni pretoki, ki so na voljo 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 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

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 (npr. LIDAR, ortofoto), praviloma pa je treba natančnejše posnetke zagotoviti z geodetskimi meritvami na terenu. 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. Na karti v spletni aplikaciji Geopedija si izberemo dve točki, ki definirata odsek analiziranega vodotoka in odčitamo podatke o višinski razliki Δh in razdalji ΔL 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 [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 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 si 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 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 in izračun proizvedene električne energije. Postopek za izračun navedenega je opisan v zadnjem koraku algoritma za izračun energetskih parametrov hidroelektrarne v tem poglavju.

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, centimetrski korak po višini predstavlja zadostno natančnost. Pretok vode v odprti strugi Q se torej za vsak cm višine h izračuna po Manningovi enačbi:

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

Kjer je:

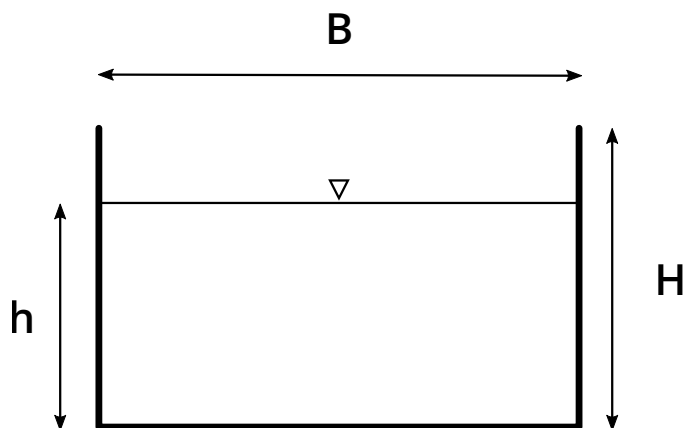
Q	pretok
ng	Manningov koeficient hrapavosti dna struge
I	naklon struge
S	ploščina dela prečnega profila pod gladino vode
R	hidravlični radij $\frac{S}{P}$
P	dolžina omočenega oboda struge

Če člene Manningove enačbe izpišemo dobimo spodnjo enačbo:

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

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 2.1: 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 :

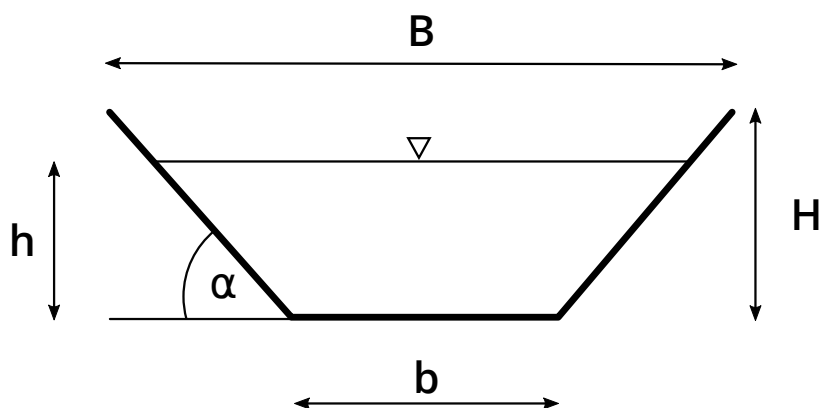
$$P_p(h) = B + 2h \quad (2.4)$$

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:

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:



Slika 2.2: Prečni prerez trapezne struge

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

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

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

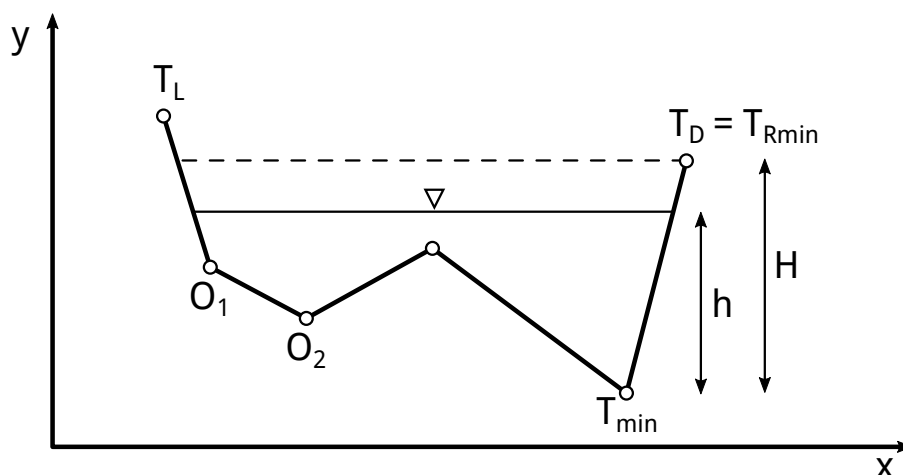
Ko poznamo vse člene Manningove enačbe 2.3, izračunamo pretoke vodotoka za vsak cm višine gladine vode v rečni strugi, ki poteka od višine $h = 0$ do višine $h = H$. S tem smo izračunali točke diagrama konsumpcijske krivulje $h(Q)$. S pomočjo konsumpcijske krivulje bomo v naslednjih poglavjih določali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

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 2.3 je predstavljena shema prečnega prereza poljubno oblikovane struge vodotoka.

Skrajni točki na robu struge vodotoka sta točki T_L in T_D prikazani na sliki 2.3. Točko na robu struge z nižjo y koordinato označimo s T_{Rmin} (na sliki 2.3 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 po dve točki $O_1(x_1, y_1)$ in $O_2(x_2, y_2)$ kar je shematično prikazano na sliki 2.3. Za



Slika 2.3: Prečni prerez poljubno oblikovane struge vodotoka

vsak analizirani odsek struge vodotoka m , 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 Δy , razdaljo med x koordinatami točk O_1 in O_2 pa z Δx .

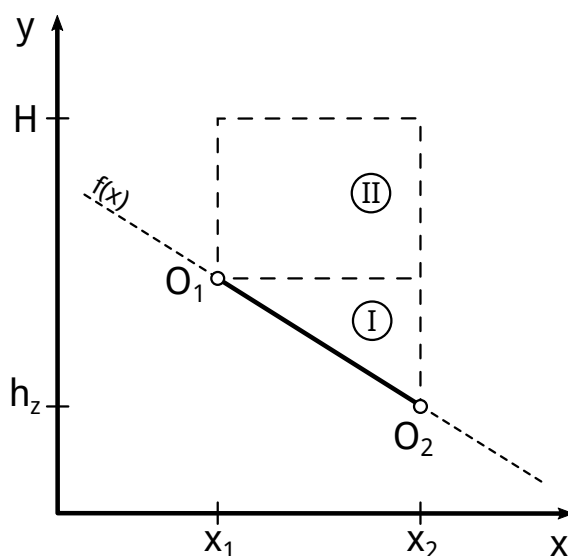
Enačba linearne funkcije je definirana kot:

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

Naklon funkcije k se izračuna po spodnji enačbi:

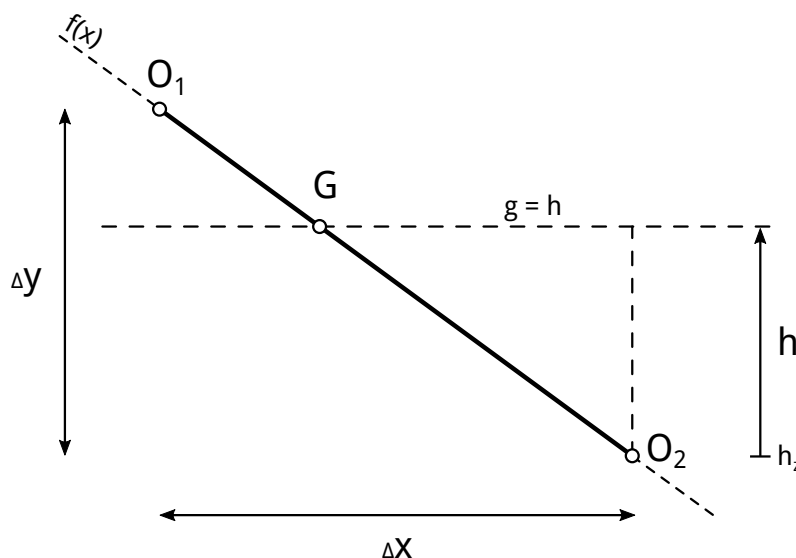
$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.9)$$

Če v enačbo linearne funkcije 2.8 vstavimo izračunan naklon k in koordinate točke O_1 , lahko izračunamo iskani n . S tem je določena enačba linearne funkcije $f(x)$ ki povezuje točki O_1 in O_2 .



Slika 2.4: Izbrani analizirani odsek struge

Za vsak analizirani 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 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 2.5.



Slika 2.5: 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:

$$P(h) = \Delta x \quad (2.10)$$

$$S(h) = \Delta x \cdot h \quad (2.11)$$

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 2.4 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 , dolžino omočenega oboda določimo po Pitagorovem izreku kot:

$$P(h) = \sqrt{(T_{zx} - G_x(h))^2 + (T_{zy} - G_y(h))^2} \quad (2.12)$$

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 2.4) po formuli:

$$S(h) = \frac{|T_{zx} - G_x(h)| \cdot |T_{zy} - G_y(h)|}{2} \quad (2.13)$$

- (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:

$$P = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (2.14)$$

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 2.4.

$$S(h) = S_I + S_{II}(h) \quad (2.15)$$

Pri čemer sta S_I in S_{II} enaka:

$$S_I = \left| \frac{\Delta y \cdot \Delta x}{2} \right| \quad (2.16)$$

$$S_{II}(h) = \left| \Delta x \cdot (h - y_1) \right| \quad (2.17)$$

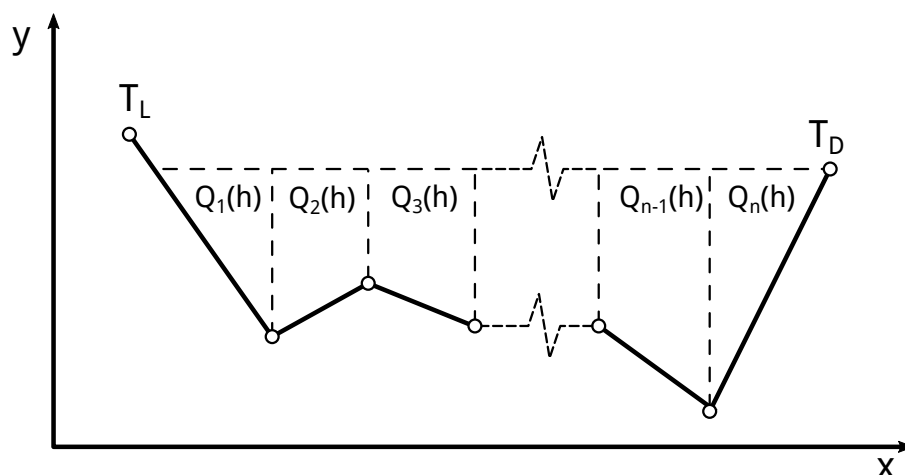
Ko imamo za vsak cm višine gladine vode izračunan omočeni obod $P_m(h)$ odseka m in ploščino prečnega prereza pod gladino vode $S_m(h)$ lahko določimo pretok vode skozi odsek struge vodotoka $Q_m(h)$. Pretok vode skozi odsek izračunamo po Manningovi enačbi opisani v poglavju 2.3.1. Za vsak računani odsek m moramo poznati tudi naklon struge vodotoka I_m in Manningov koeficient hrapavosti površine ng_m , ki se ju določi po postopkih opisanih v poglavju 2.1.

$$Q_m(h) = \frac{\sqrt{I_m}}{ng_m} \cdot \frac{S_m(h)^{5/3}}{P_m(h)^{2/3}} \quad (2.18)$$

Posamezne pretoke odsekov po višinah medsebojno seštejemo in dobimo končne vrednosti pretokov Q v odvisnosti od višine gladine vode v strugi vodotoka, kar je shematično prikazano na sliki 2.6:

$$Q(h) = \sum_1^n Q_n(h) \quad (2.19)$$

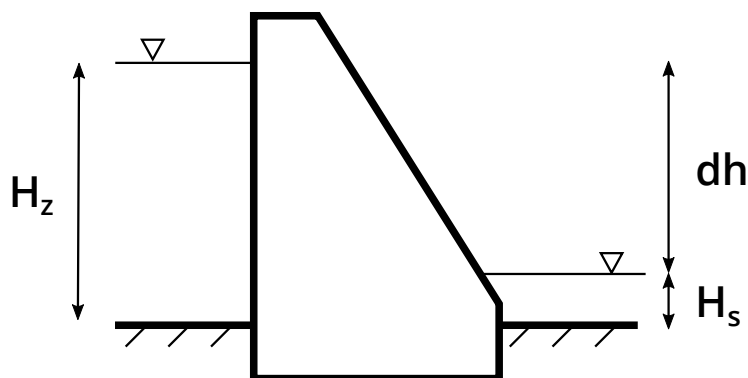
S tem postopkom smo določili vse točke, ki določajo konsumpcijsko krivuljo $h(Q)$ za izbrano strugo poljubne oblike.



Slika 2.6: Prikaz seštevka pretokov 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 rezervoarju in koto spodnje vode t.j. vode, ki teče skozi turbine hidroelektrarne. Ker računamo proizvodnjo električne energije za pretočne hidroelektrarne predpostavimo, da je kota zgornje vode konstantna na višini H_z .



Slika 2.7: Shema prečnega prereza hidroelektrarne

Koto spodnje vode H_s določimo iz prej izračunane konsumpcijske krivulje 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:

$$dh = H_z - H_s \quad (2.20)$$

Moč hidroelektrarne izračunamo po enačbi:

$$P = \eta \cdot \frac{g \cdot \rho_v}{1000} \cdot Q_t \cdot dh \quad (2.21)$$

Pri čemer so:

P	moč [kW]
η	izkoristek turbine [%]
g	gravitacijska konstanta $\left[9,81 \frac{m}{s^2}\right]$
ρ_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 načeloma odvisen od pretoka vode skozi turbine, vendar lahko to lastnost turbin za potrebe ocene proizvodnje električne energije zanemarimo. Pretok vode skozi turbine hidroelektrarne Q_t je odvisen od parametrov hidroelektrarne in pretoka vodotoka. Q_t se določi glede na spodnje pogoje:

$$Q_t = \begin{cases} 0, & Q < Q_{min} \\ Q, & Q_{min} < Q < Q_{max} \\ Q_{max}, & Q_{max} < Q < Q_{teh} \\ 0, & Q > Q_{teh} \end{cases} \quad (2.22)$$

Pri čemer so:

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

V primeru, ko je pretok vodotoka manjši kot biološki minimum, ki se zahteva zato, da reka ne presahne, se vsa voda prelija skozi prelivna polja hidroelektrarne in do proizvodnje električne energije ne pride. V primeru poplav, ko je pretok vodotoka večji od tehničnega maksimuma pretoka hidroelektrarne se vsa voda prelija preko jezua in hidroelektrarna prav tako ne proizvaja električne energije. V vseh ostalih primerih pretokov vodotoka, pa je pretok skozi turbine kar enak pretoku vodotoka z maksimalnim pretokom pri $Q_t = Q_{max}$. Maksimalni pretok Q_{max} se določi na podlagi izbranih turbin hidroelektrarne, določenih s pomočjo krivulje trajanja.

Za določitev povprečne mesečne proizvodnje električne energije potrebujemo znano povprečno mesečno moč hidroelektrarne \bar{P} . Povprečno mesečno moč hidroelektrarne izračunamo s povprečjem dnevnih moči hidroelektrarne za iskani mesec po enačbi 2.21. Podatke o povprečnih mesečnih pretokih pridobimo iz rezultatov analize hidrološkega niza podatkov opisane v poglavju 2.2. Za vsak mesec izračunamo povprečno moč hidroelektrarne po spodnji enačbi, pri čemer je n število dni v mesecu.

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{n-1} + P_n}{n} \quad (2.23)$$

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

$$E_n = \frac{24 \cdot \bar{P} \cdot d}{1000} \quad (2.24)$$

Pri čemer so:

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

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

$$E_{leto} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{10} + E_{11} + E_{12}}{1000} [GWh] \quad (2.25)$$

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: <https://github.com/GreatDanton/Thesis/tree/master/code>.

Za izračun energetskih parametrov hidroelektrarne s programom moramo najprej vnesti podatke o dimenzijah struge vodotoka in povprečnih dnevni 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. 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 [/]

φ 2 [%]

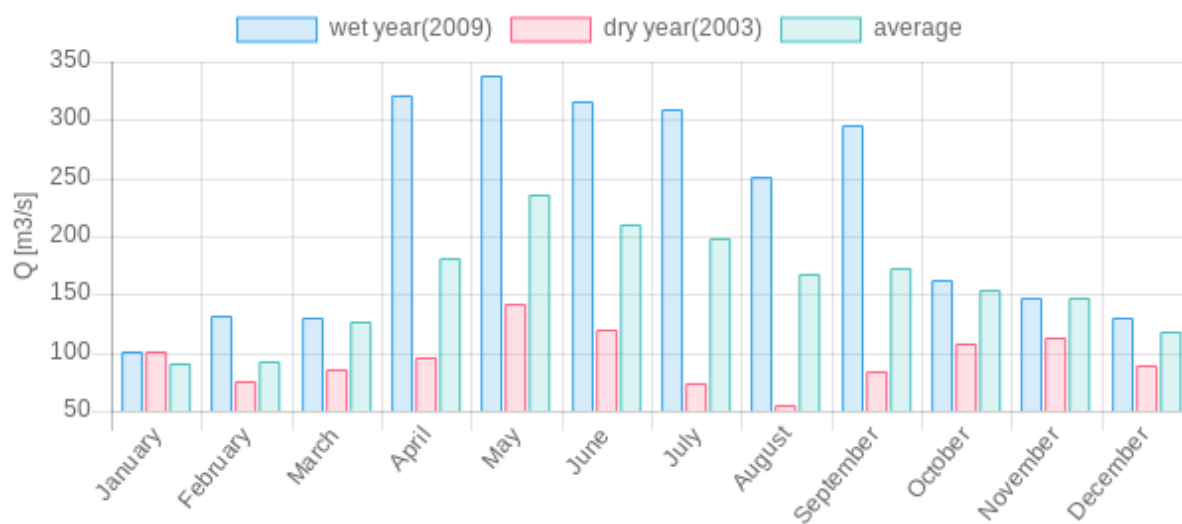
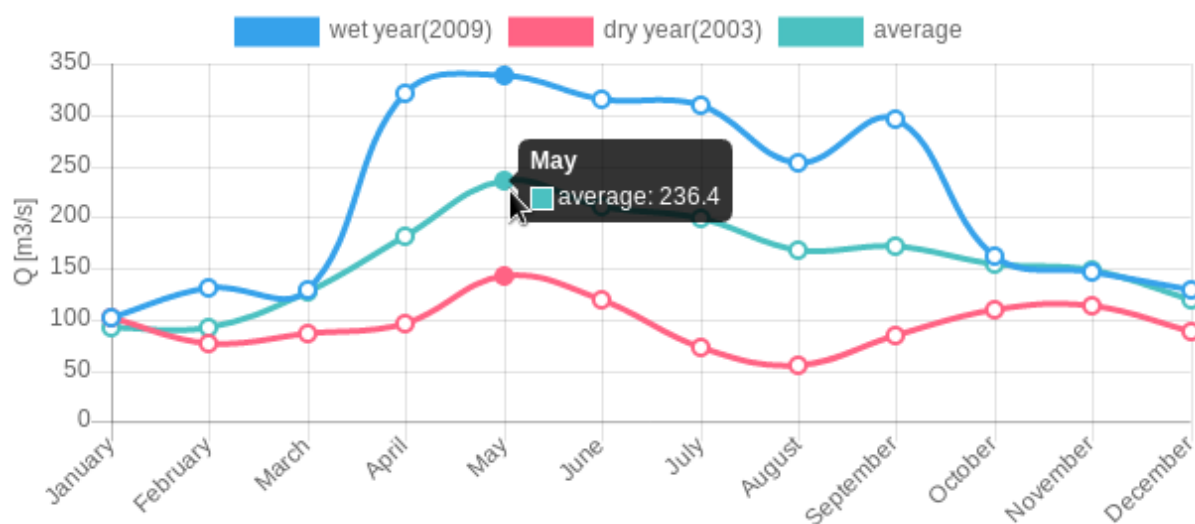
B

∇

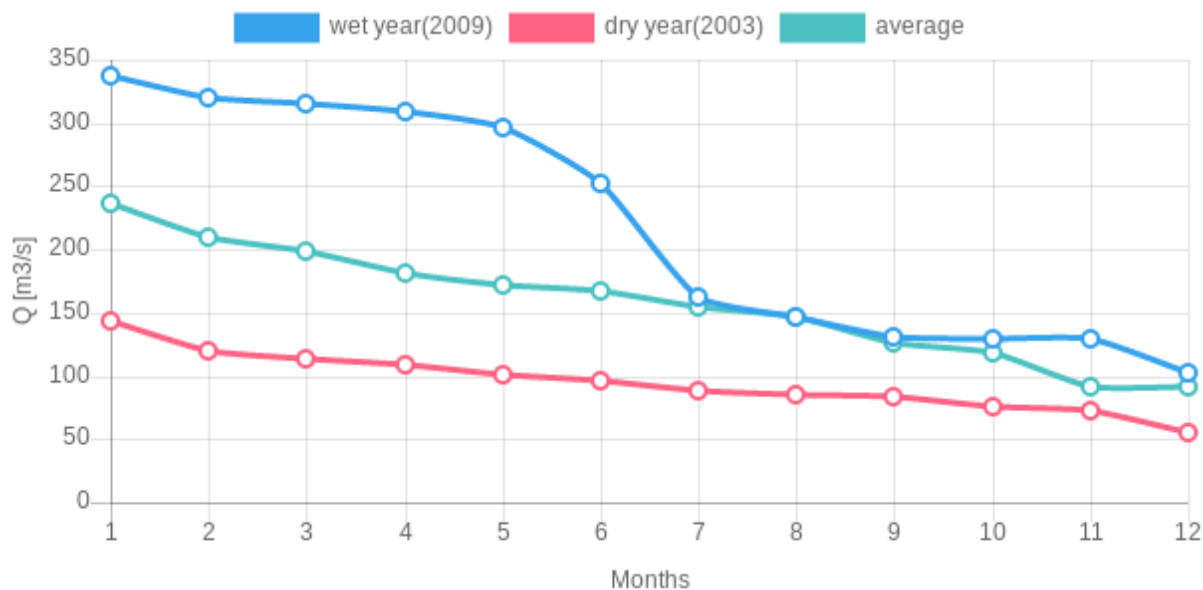
h

φ

Slika 3.1: Uporabniški vmesnik ob zagonu programa



Slika 3.2: Primer izračunanega hidrograma v črtnem in stolpičnem diagramu

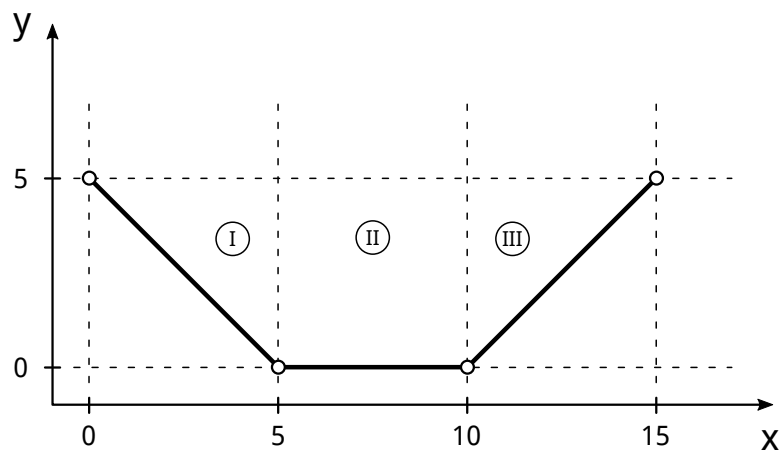


Slika 3.3: Primer izračunane krivulje trajanja

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 bom na primeru pokazal pravilnost postopka izračuna konsumpcijske krivulje. V ta namen bom uporabil 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 0,3.

Rezultate ročnega izračuna bom primerjal 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 bom preverjal 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 $h = 5\text{ m}$ uporabimo enačbe navedene v poglavju 2.3.1.

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

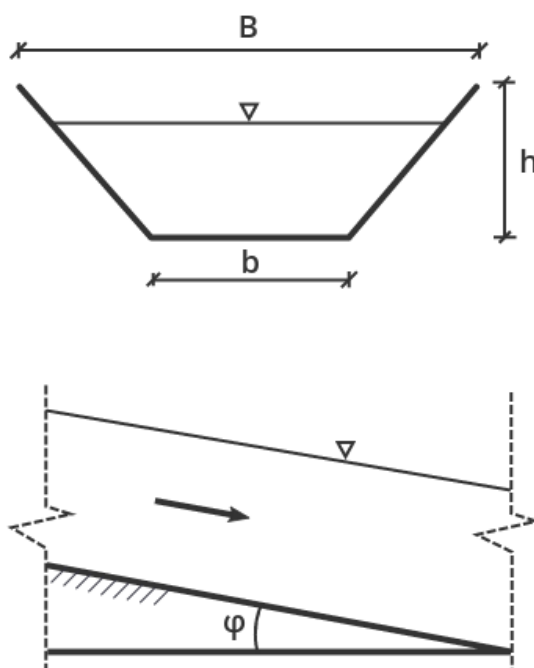
$$S(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{\tan \alpha} = 55 + \frac{5^2}{\tan 45} = 50\text{ m}^2 \quad (3.2)$$

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

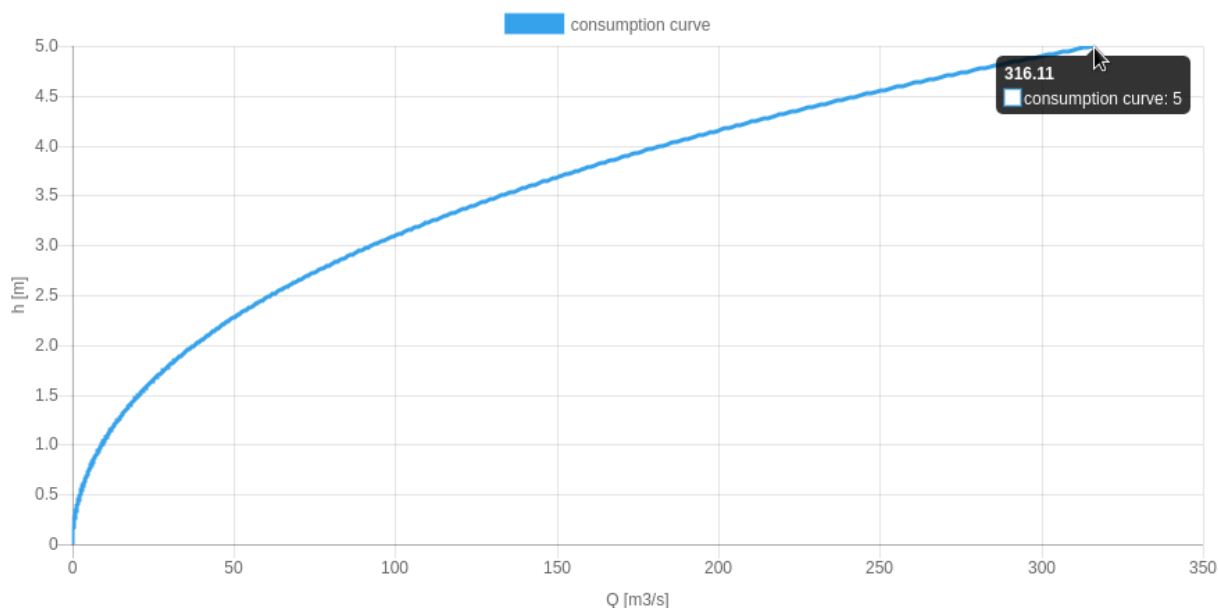
3.3.2 Izračun s programom

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"/>	[/]
φ	<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 odčitamo pretok struge izračunane po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge $Q(h = 5m) = 316,1 \text{ m}^3/s$.

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 struge 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 $h = 5m$.

I. Odsek:

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

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

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

II. Odsek:

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

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

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

III. Odsek:

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

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

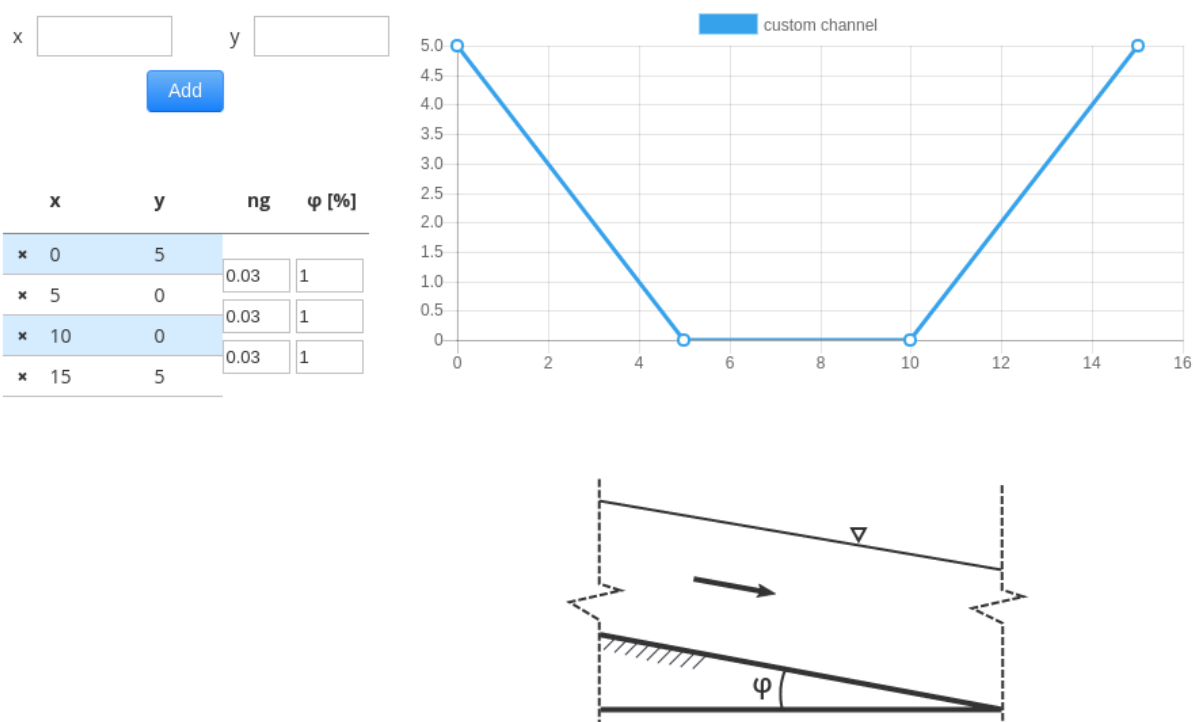
$$Q_{III} = Q_{III} = 60,9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.12)$$

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

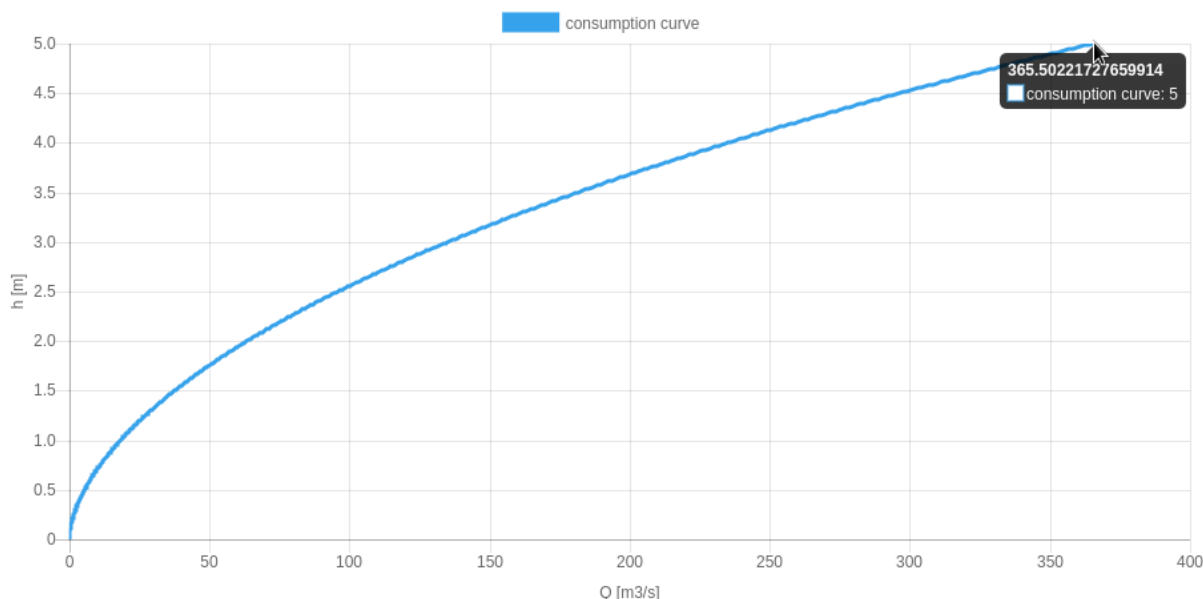
$$Q_s = Q_I + Q_{II} + Q_{III} = 60,9 + 243,7 + 60,9 = 365,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.13)$$

3.4.2 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 ng in naklone struge na sliki označene s φ . 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 $Q = 365,5\text{ m}^3/\text{s}$, ki je enak rezultatu ročnega izračuna v poglavju 3.4.1. S tem smo pokazali pravilnost numeričnega algoritma za izračun točk konsumpcijske krivulje za poljubno oblikovano strugo vodotoka..

3.5 Rezultati izračuna konsumpcijske krivulje

V poglavjih 3.3 in 3.4 smo preverili, da sta rezultata ročnega izračuna in izračuna s programom po enaki metodi enaka. Če primerjamo rezultate izračunane po različnih metodah pa se rezultati razlikujejo. Razlog za to je v izbiri matematičnega modela, kar prikazujejo enačbe spodaj.

Primerjali bomo rezultata pretokov vodotoka po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge in metodi poljubno oblikovane struge. Pri tem uporabimo podatke iz naloge opisane v poglavju 3.2. Celotna površina prečnega prereza pod gladino vode $S(h)$ in omočeni obod struge $P(h)$ sta sestavljena iz treh odsekov kot je prikazano na sliki 3.4. Q_i predstavlja izračun pretoka po trapezni metodi, Q_{ii} pa izračun pretoka po metodi poljubno oblikovane struge:

$$S(h) = S_I(h) + S_{II}(h) + S_{III}(h) \quad (3.14)$$

$$P(h) = P_I(h) + P_{II}(h) + P_{III}(h) \quad (3.15)$$

$$Q_i = \frac{\sqrt{I}}{ng} \cdot \frac{S^{5/3}}{P^{2/3}} \quad (3.16)$$

$$Q_{ii} = \frac{\sqrt{I}}{ng} \cdot \frac{S_I^{5/3}}{P_I^{2/3}} + \frac{\sqrt{I}}{ng} \cdot \frac{S_{II}^{5/3}}{P_{II}^{2/3}} + \frac{\sqrt{I}}{ng} \cdot \frac{S_{III}^{5/3}}{P_{III}^{2/3}} \quad (3.17)$$

Če v obeh enačbah odstranimo skupne člene enačbe, enačbe poenostavimo v:

$$Q_i = \frac{S^{5/3}}{P^{2/3}} \quad (3.18)$$

$$Q_{ii} = \frac{S_I^{5/3}}{P_I^{2/3}} + \frac{S_{II}^{5/3}}{P_{II}^{2/3}} + \frac{S_{III}^{5/3}}{P_{III}^{2/3}} \quad (3.19)$$

Enačimo obe enačbi in vstavimo podatke:

$$Q_i = Q_{ii} \quad (3.20)$$

$$\frac{S^{5/3}}{P^{2/3}} = \frac{S_I^{5/3}}{P_I^{2/3}} + \frac{S_{II}^{5/3}}{P_{II}^{2/3}} + \frac{S_{III}^{5/3}}{P_{III}^{2/3}} \quad (3.21)$$

$$\frac{50^{5/3}}{19,14^{2/3}} = \frac{12,5^{5/3}}{7,07^{2/3}} + \frac{25^{5/3}}{5^{2/3}} + \frac{12,5^{5/3}}{7,07^{2/3}} \quad (3.22)$$

$$94,84 \neq 109,7 \quad (3.23)$$

Do razlike v rezultatih izračuna po različnih metodah pride zaradi matematičnih pravil seštevanja potenc, kar smo pokazali z zgornjim izračunom:

$$\frac{(a+b+c)^y}{(p_1+p_2+p_3)^z} \neq \frac{a^y}{p_1^z} + \frac{b^y}{p_2^z} + \frac{c^y}{p_3^z} \quad (3.24)$$

4 ZAKLJUČEK

V prvem delu diplomske naloge sem najprej opisal teoretične osnove in predpostavke izračuna z osnovnimi formulami katere uporabljamo pri izračunu energetskih parametrov hidroelektrarne. Podrobno sem opisal postopek izračuna konsumpcijske krivulje za pravokotno, trapezno in strugo poljubne oblike. Po navedenih algoritmih program, ki je nastal v okviru diplomske naloge, tudi izračunava parametre hidroelektrarne. Čeprav so metode izračuna enake tudi za akumulacijske hidroelektrarne, sem se zaradi enostavnosti izračuna omejil le na izračun energetskih parametrov za pretočne hidroelektrarne. V namenem času za izdelavo diplomske naloge mi algoritma za optimalno nihanje gladine vode v odvisnosti od potreb električne energije namreč ni uspelo razviti.

V drugem delu sem preveril pravilnost izračunavanja energetskih parametrov hidroelektrarne s programom na namišljenem primeru po metodi za pravokotne in trapezno oblikovane struge in metodi za izračun poljubno oblikovane struge. Rezultate, ki jih je izračunal program sem primerjal z rezultati, ki sem jih izračunal ročno in dokazal, da program računa pravilno. Če primerjamo rezultate izračunane po različnih metodah pa pride do določenega odstopanja zaradi samega matematičnega modela, kar sem tudi prikazal v zadnjem delu poglavja [3.5](#).

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.