

MALA HIDROELEKTRANA S ARHIMEDOVOM TURBINOM

Pudar, Ljubo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:248668>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

LJUBO PUDAR

ZAVRŠNI RAD

**MALA HIDROELEKTRANA S ARHIMEDOVOM
TURBINOM**

Split, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Obnovljivi izvori energije

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Ljubo Pudar

Naslov rada: Mala hidroelektrana s Arhimedovom turbinom

Mentor: dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

Komentor: Prof. António Grade

Split, rujan 2022.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Preddiplomski stručni studij „Konstruktivno strojarstvo“
Predmet: Obnovljivi izvori energije
Nastavnik: dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

ZAVRŠNI RAD

ZADATAK

Kandidat: Ljubo Pudar
Naslov teme: Mala hidroelektrana s Arhimedovom turbinom

U završnom radu potrebno je:

- uvodno se osvrnuti o primjeni Arhimedove turbine u svrhu proizvodnje električne energije,
- objasniti princip rada Arhimedove turbine, s posebnim naglaskom na geometriju i tehničke karakteristike turbine, te na pripadajući proračun radnih karakteristika i procjene proizvodnje električne energije,
- za postojeći ili zamišljeni vodotok odabrati Arhimedovu turbinu s pripadajućim sustavima i opremom koji čine malu hidroelektranu,
- izraditi proračun radnih parametara Arhimedove turbine i procjenu proizvodnje električne energije,
- izraditi pripadajuću nacrtno-tehničku dokumentaciju,
- iznijeti zaključke,
- navesti literaturu i izvore podataka.

Sažetak

U završnom radu prikazan je pojednostavljen proces dimenzioniranja koji prethodi izgradnji male hidroelektrane koja koristi Arhimedovu turbinu (AT). Arhimedova turbina koristi se za ekološki prihvatljiv način proizvodnje električne energije koji nema velikog utjecaja na životinjski svijet unutar vodotoka kojeg koristi za pokretanje. Zahtjeva male vodene padove, mali volumni protok vode i relativno mala ulaganja s obzirom da ne zahtijeva izgradnju brane. U uvodu je opisano podrijetlo Arhimedove spirale kao i njezine upotrebe u razne svrhe, s naglaskom na njene prednosti i nedostatke. Objasnjeno je načino rada te način proizvodnje Arhimedove turbine i pripadajućeg sustava. U praktičnom dijelu rada izvršen je proračun i dimenzioniranje Arhimedove turbine, odabrani su pripadajući sustavi i oprema za pretvorbu energije. Konačno, izvršena je procjena ekonomske isplativosti izvedbe male hidroelektrane s Arhimedovom turbinom.

Ključne riječi: Arhimedova turbina, mali vodeni pad, mali volumni protok, izgradnja male hidroelektrane.

Summary (Small Hydropower Plant with Archimedes Turbine)

This final paper presents a simplified process that precedes the construction of a small hydroelectric power plant that uses an Archimedes screw turbine (AST). The Archimedes screw turbine is used for an environmentally friendly way of producing electricity that does not have a major impact on the animal life within the watercourse it uses to power it. It requires small water falls, small volume flow of water and relatively small investments considering that it does not require the construction of a dam. The introduction describes the origin of Archimedes' screws as well as its use for various purposes, with an emphasis on its advantages and disadvantages. The principle of operation and the method of production of the Archimedean screw turbine and the associated system are explained. In the practical part of the work, the calculation and dimensioning of the Archimedean screw turbine was performed, the associated systems and equipment for energy conversion were selected. Finally, an assessment of the economic profitability of a small hydroelectric power plant with an Archimedean screw turbine was made.

Keywords: Archimedes screw turbine, small water head, small volume flow, construction of a small hydropower plant.

SADRŽAJ

Sažetak	2
Summary (Small Hydropower Plant with Archimedes Turbine).....	2
1. Uvod.....	8
2. Princip rada Arhimedove turbine.....	11
3. Geometrija Arhimedove turbine	14
4. Optimizacija turbine.....	16
4.1. Nagib vijka	18
4.2. Duljina vijka	20
4.3. Broj zavojnica.....	21
4.4. Omjer vanjskog promjera vratila i vanjskog promjera zavojnice.....	21
4.5. Odabir vanjskog promjera	22
4.6. Unutrašnji promjer vijka.....	27
4.7. Korak vijka	27
4.8. Brzina vrtnje Arhimedovog vijka	28
4.9. Volumen vode zarobljen između dvije uzastopne plohe	28
4.10. Efikasnost turbine	29
4.11. Snaga na vratilu.....	30
5. Odabir dijelova turbine	31
5.1. Vratilo.....	31
5.2. Zavojnice Arhimedovog vijka	36
5.3. Izvedbe korita	39
5.4. Vrste i načini ugradnje ležajeva.....	43
6. Zaštita vijka od korozije.....	46
7. Generator i mjenjačka kutija Arhimedove turbine.....	47
8. Odabir načina ugradnje turbine na potrebnu lokaciju.....	50
9. Izračun isplativosti	53
10. Zaključak.....	55
Literatura	56

Prilog 58

Popis slika

Slika 1.1- Prikaz vodenog pada „H“ [1].....	8
Slika 1.2– Korištenje Arhimedovog vijka [2]	9
Slika 1.3- Usporedbe različitih vrsta turbina [3]	10
Slika2.1 - Princip rada AT [4].....	11
Slika 2.2 - Prikaz sile uzrokovane hidrostatičkim pritiskom [5].....	12
Slika 2.3 – Dijelovi turbine [6].....	12
Slika 3.1– Dimenzije Arhimedova vijka [3]	14
Slika 4.1– Prikaz vodotoka.....	16
Slika 4.2- Prikaz lokacije ugradnje turbine	16
Slika 4.3 – Selo Talasnal	17
Slika 4.4 – Udaljenost između sela i turbine	17
Slika 4.5 - Radni raspon Arhimedove turbine [3]	18
Slika 4.6- Prikaz volumena V_b iz različitih kutova gledanja [7]	23
Slika 4.7– Schema za određivanje volumena posude [7].....	24
Slika 4.8- Vanjski promjeri AT ovisno o umnošku između nagiba turbine i protoka i odgovarajuće regresijske krivulje [7].....	26
Slika 5.1– Prikaz dijelova vijka [9].....	31
Slika 5.2- Shema opterećenog nosača [13]	32
Slika 5.3- Reakcije u osloncima [13]	34
Slika 5.4– Uvjeti ravnoteže za segment vratila [13]	35
Slika 5.5 - Slijepa prirubnica izrađena od nehrđajućeg čelika [12]	36
Slika 5.6– Prolaz ribe kroz turbinu [5].....	37
Slika 5.7– Različite izvedbe zavojnica [14]	37
Slika 5.8– Segment vijka [9].....	38
Slika 5.9– Izvedba segmenata zavojnice s vijcima [9].....	39
Slika 5.10– Udaljenost između ceste i lokacije ugradnje turbine	39
Slika 5.11– Betonsko korito[20]	40
Slika 5.12– Metalno korito[15]	41
Slika 5.13– Kompaktno korito[15].....	41
Slika 5.14– Bočni profil	43
Slika 5.15– Načini montiranja gornjeg ležaja [16]	44

Slika 5.16- Načini izvedbe donjeg ležaja [16]	44
Slika 7.1– Presjek alternatora [17]	47
Slika 7.2– Prikaz mjenjačke kutije [18]	48
Slika 7.3– Izvedbe spojeva između alternatora i mjenjačke kutije [16].....	48
Slika 8.1– Izvedba s betonskim kanalom za dotok vode do turbine [9].....	50
Slika 8.2 – Izvedba s kraćim dotokom vode i s iskopima za ispust vode [9].....	51
Slika 8.3– Otvori za kontrolu protoka vode	52
Slika 9.1– Ukupni troškovi ulaganja [19]	53

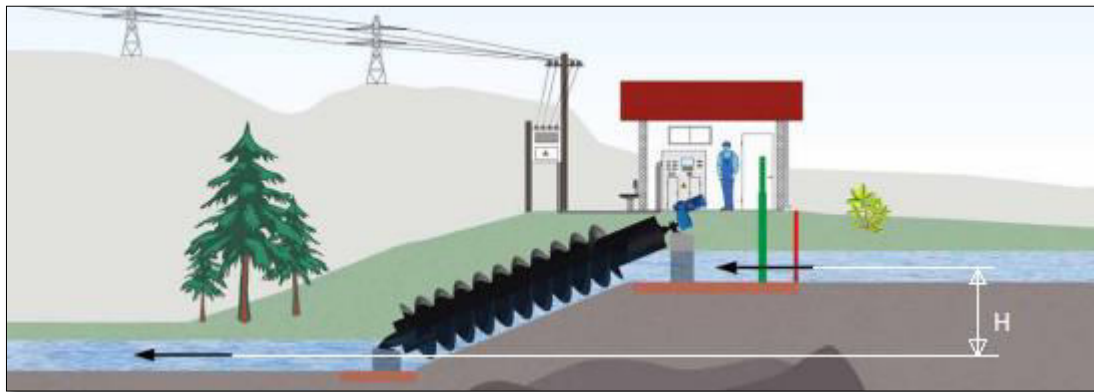
Popis tablica

Tablica 4.5.1 - Podatci turbina proizvođača Rehart Power [7]	23
Tablica 5.1.1 - Karakteristike cijevi [14]	29
Tablica 5.4.1 - Izračun povrata investicija	51

1. Uvod

Male hidroelektrane s Arhimedovom turbinom (AT) dobro su rješenje za nepristupačna mjesta koja zahtijevaju električnu energiju, a imaju pristup konstantnom protoku vode u vidu potoka ili rijeke s dovoljnom količinom vode za pokretanje turbine. Izgradnjom male hidroelektrane omogućuje se energetska neovisnost nekog naselja, pogona ili drugih vrsta potrošača električne energije na ekološki prihvatljiv način.

Arhimedova turbina koristi se pri izgradnji male hidroelektrane koje se postavljaju na vodotokove volumnog protoka do $10 \text{ m}^3/\text{s}$, s malim vodenim padom. Pod mali vodeni pad smatraju se visine pada od 1,5 m do 5 m, pri čemu vodeni pad predstavlja visinsku razliku između zahvata i ispusta vode. Na slici 1.1 prikazan je primjer vodenoga pada.



Slika 1.1- Prikaz vodenog pada „H“ [1]

Hidroelektrana s Arhimedovom turbinom ekološki je prihvatljiv način proizvodnje električne energije koji ne ugrožava životinje s obzirom na to da mogu nesmetano prolaziti kroz zavojnice spirale pri čemu je mala vjerojatnost da se ozljede. Također im je omogućeno i vraćanje uzvodno pomoću posebno izrađenih kanala. Konstruiranje AT ne zahtijeva akumulaciju vode ni izgradnju betonskih brana, što uvelike smanjuje troškove izgradnje.

Učinkovitost AT iznosi između 60 i 80 %, dok nazivna snaga može iznositi i do 500 kW, ovisno o načinu izvedbe, broju zavojnica i mjestu ugradnje.

AT radi na principu Arhimedovog vijka koji se koristi još od davnina u svrhu izgradnje jednostavne pumpe za podizanje vode s niže razine na višu, kao što je prikazano na slici 1.2.





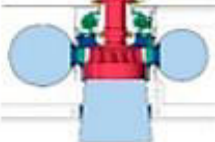
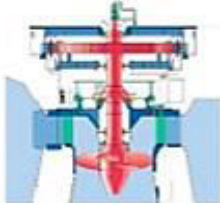
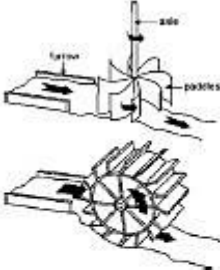

Slika 1.2– Korištenje Arhimedovog vijka [2]

Arhimedov vijak dobio je naziv po grčkom filozofu Arhimedu koji je objasnio princip rada vijka oko 234. godine prije Krista. Konačno, postoje dokazi da se princip rada vijka koristio još i prije Arhimeda, u starom Egiptu.

Jedna od značajnijih pozitivnih strana izrade AT je relativno jeftina izvedba. Uz očekivane uvjete ugradnje, AT se isplati nakon nekoliko godina. Jedan od faktora koji utječu na cijenu je njen vijek trajanja koji iznosi i preko 30 godina bez značajnijeg gubitka efikasnosti. Obzirom na to da se zavojnica okreće malim brzinama okretaja dolazi do sporijeg trošenja materijala te samim time ne zahtijeva čestu zamjenu potrošnih dijelova kao što su ležajevi i zupčanici.

Ova tehnologija je poprilično nova s obzirom na to da je prva hidroelektrana koja koristi Arhimedovu turbinu u Europi ugrađena 1998. Danas, diljem Europe, ima nešto više od 200 izvedenih malih hidroelektrana s Arhimedovom turbinom.

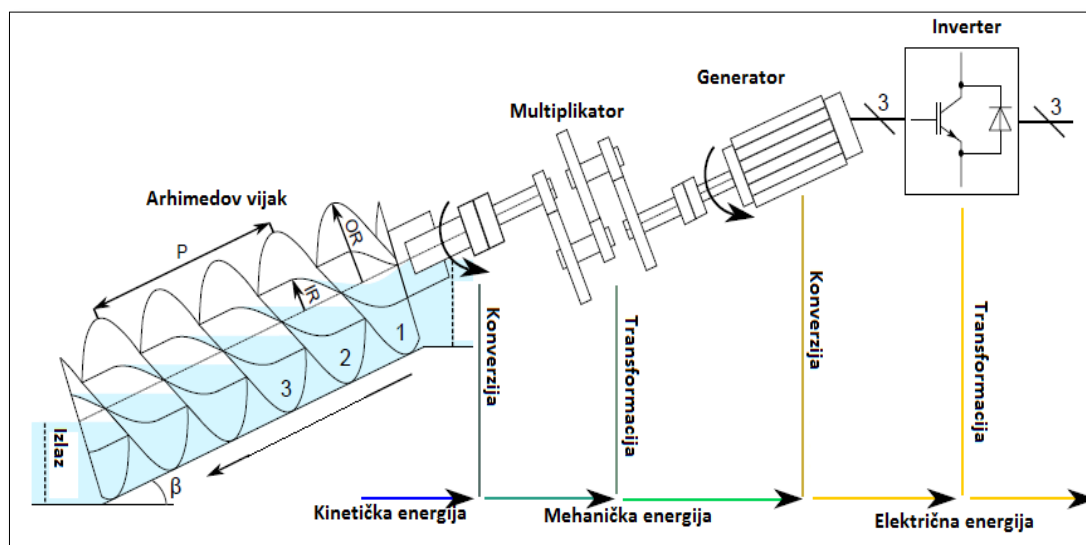
Za razliku od ostalih turbina, AT koristi jako male vodene padove i ne zahtijeva velike količine vode. Za usporedbu, na slici 1.3 prikazane su različite turbine i njihove radne karakteristike.

Vrsta	Turbina	Vodeni pad (m)	Protok (m ³ /s)
Impulsne	Pelton [36] 	50 *-1000 [12]	<50 [35]
	Turgo [38] 	50 **-250 [39]	<10 [40]
Reaktivne	Francis [41] 	40-600 [39]	0.2-1000 [35]
	Kaplan [42] 	<50 [43]	0.5-1000 [35]
Kvazi statički pritisak	Water wheel [32] 	<10	<5
	Archimedes Screw 	<10 [33,40]	<10 [33,45]

Slika 1.3- Usporedbe različitih vrsta turbina [3]

2. Princip rada Arhimedove turbine

Arhimedova turbina radi na principu transformacije kinetičke energije vode u mehaničku energiju, kojase zatim koristi zaokretanje generatora i proizvodnju električna energije. Obzirom da se Arhimedov vijak okreće malim brzinama okretaja potrebno je povećati brzinu okretanja generatora pomoću mjenjačke kutije. Mjenjačka kutija povećava brzinu okretanja za faktor od 20 do 30. Dobivena električna energija transformatorom se pretvara iz istosmjerne električne energije u izmjeničnu (ako je to potrebno). Cijeli proces shematski je prikazan na slici 2.1.

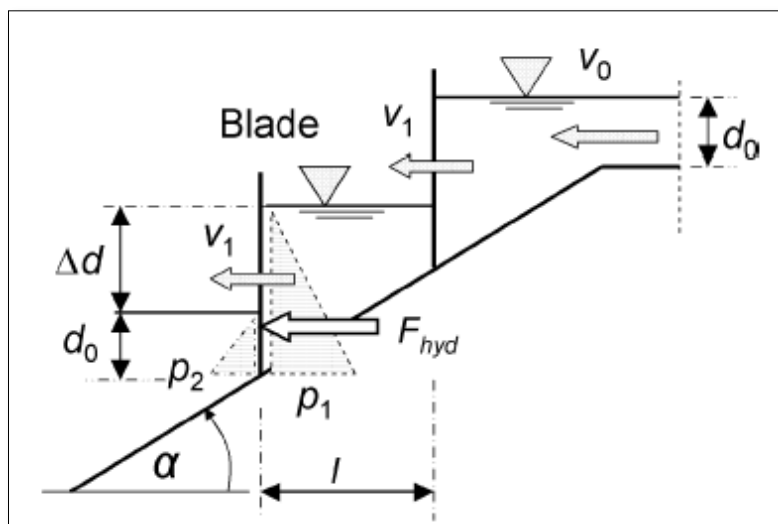


Slika2.1 - Princip rada AT [4]

Proces bi se mogao odvijati i bez mjenjačke kutije, ali to bi zahtijevalo preveliki generator. Nedostaci mjenjačke kutije uključuju gubitak učinkovitosti zbog trenja između zupčanika, redovito održavanje, buka, i tako dalje.

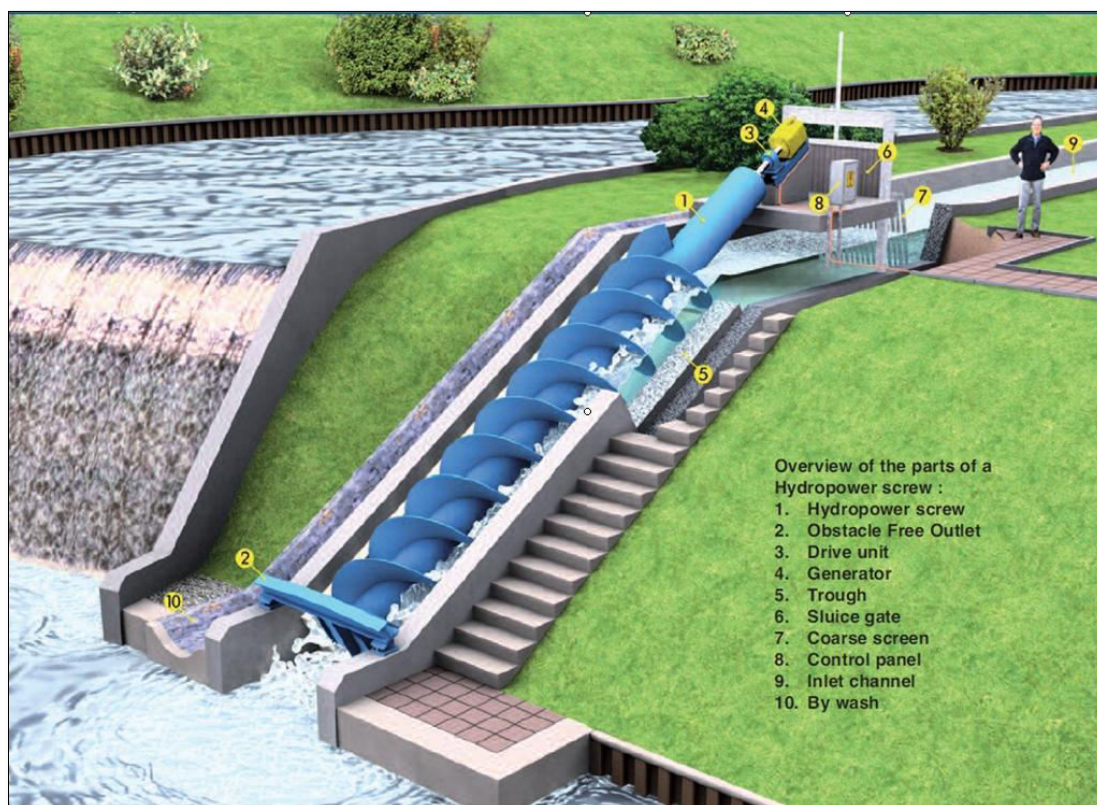
Okretanje vratila omogućujehidrostatski pritisakvode koji djeluje na površinu lopatica vijka koje su uronjene pod vodom. Rezultantna sila tog pritiska usmjerena je u smjerukretanja vijka. Slika 2.2 predstavlja pojednostavljeni prikaz kako hidrostatski pritisak djeluje na lopatice vijka. Hidrostatski pritisak nastaje uslijed razlike u razinama vode na uzvodnoj i nizvodnoj strani svake lopatice. Sila nastala zbog hidrostatskog pritiska F_{hyd} pomiče se s brzinom lopatice v_l , dok umnožak tih dvaju veličina daje snagu:

$$P_s = F_{hyd} \times v_l$$



Slika 2.2 - Prikaz sile uzrokovane hidrostatičkim pritiskom [5]

Na slici 2.3 prikazan je model AT gdje se jasno vide njeni osnovni dijelovi. Model je uzet samo kao primjer i ne predstavlja stvarne dimenzije turbine proračunate u ovom radu.



Slika 2.3 – Dijelovi turbine [6]

Gdje je:

1. Zavojnica

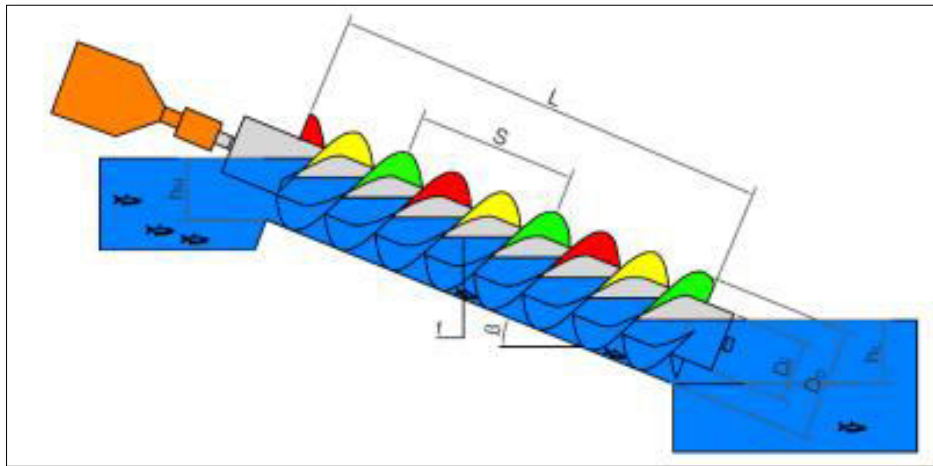
2. Izlaz
3. Spojnica
4. Generator
5. Korito
6. Ulazna zaustava
7. Ulaz s rešetkama za zaustavljanje neželjenih predmeta
8. Kontrolna ploča
9. Dovod vode
10. Kanal koji omogućuje kretanje riba

Navedeni dijelovi biti će detaljnije opisani u nastavku.

Najbolja izvedba AT je izvedba s promjenjivim brzinama, što implicira da se brzina rotacije vijka može povećati ili smanjiti ovisno o protoku vode. Ovo je daleko bolje od korištenja vijka s fiksnom brzinom jer nastaju visoki gubici u padu vode pri podešavanju brzine protoka kroz automatizirani otvor, što utječe na ukupnu učinkovitost sustava. Vijci s promjenjivim brzinama također su tiši od vijaka s fiksnom brzinom okretanja. Velika prednost AT je njena tolerancija na otpad i ostale nepoželjne predmete u vodi. S obzirom na relativno velike razmake između lopatica i male brzine okretanja otpad može proći kroz turbinu bez da je ošteti ili utječe na njen rad. To znači da pri ulazu vode u turbinu nije potrebna velika zaštita od otpada, dovoljno je ugraditi metalne rešetke širine 100 – 150 mm na ulazu. Najčešće nema potrebe za ugradnjom automatskih čistača na ulazima kao što je slučaj kod drugih turbina. Osim otpada kroz turbinu bez poteškoća prolaze i ribe. Šanse za ozljeđivanje životinja pri prolazu kroz turbinu su jako male.

3. Geometrija Arhimedove turbine

Arhimedova turbina sastojise od lopatica koje formiraju spiralu duž cilindričnog vratila, koje su zatvorene ili poluzatvorene koritom koje može biti od betona ili metala. Slika 3.1 prikazuje klasični prikaz Arhimedovog vijka s njegovim osnovnim dimenzijama.



Slika 3.1– Dimenzije Arhimedova vijka [3]

Gdje je:

- D_i - Unutrašnji promjer
- D_o -Vanjski promjer
- L -Ukupna dužina vijka
- β -Kut nagiba vijka
- S -Korak vijka (Dužina uz duž osi simetrije vijka za jedan puni okret zavojnice)
- F -Visina ispune korita vijka
- h_u -Visina gornjeg (ulaznog) nivoa vode
- h_L -Visina donjeg (izlaznog) nivoa vode

Geometrija Arhimedovog vijka određena je vanjskim parametrima (D_o, L i β) i unutarnjim parametrima (D_i i S). Vanjski parametri se određuju s obzirom na lokaciju samog vijka te karakteristike protoka vode. Unutrašnji parametri određuju se tako da se optimiziraju i poboljšavaju radne karakteristike turbine.

Uvidom u podatke o izvedenim turbinama, najmanje turbine su promjera 1 m kroz koje maksimalno može protjeći 250 l/s vode. Veličina promjera može doseći i do 5 m pri čemu

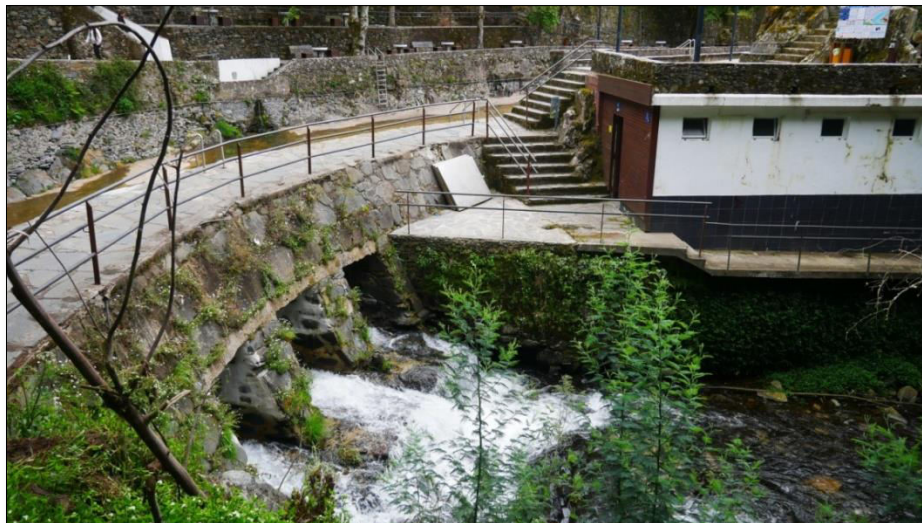
volumni protoci iznose i do $15 \text{ m}^3/\text{s}$ vode. U praksi se često koristinjski promjer od oko 3 m. Moguće je ugraditi dvavijka paralelno spojena ako je zahtjev za energijom prevelik za jedan vijak.

4. Optimizacija turbine

Kako bi se postigla maksimalna iskoristivost sustava potrebno je optimizirati turbinu. Većina proračuna izvedenih u ovom poglavlju temelji se na proračunima za pumpe koje koriste Arhimedov vijak, te na preporukama dobivenih na temelju iskustva stečenih izvedbom postojećih Arhimedovih turbina. Za potrebe završnog rada, odabran je vodotok rijeke koja se nalazi u mjestu Lousa u Portugalu. Dostupni vodeni pad iznosi $H = 2,5$ m. Protok rijeke iznosi $Q=20 - 30$ m³/s, od čega će se koristiti samo mali dio za pokretanje turbine. Lokacija ugradnje turbine i dostupnog vodotoka prikazana je na slikama 4.1 i 4.2.



Slika 4.1– Prikaz vodotoka



Slika 4.2- Prikaz lokacije ugradnje turbine

Cilj izgradnje male hidroelektrane s Arhimedovom turbinom je opskrba obližnjeg sela Talasnal, prikazano na slici 4.3, s električnom energijom. Selo datira iz 17. stoljeća, dok se

u selu nalazi 60 kamenih kuća od kojih je 40 prenamijenjeno u turističke svrhe (restorani, kafići, apartmani, vinarije i slično). Procijenjena godišnja potreba sela za električnom energijom, uključujući uličnu rasvjetu, iznosi $E_{god} = 219$ MWh, odnosno $E_{mje} = 18250$ kWh mjesečno.



Slika 4.3 – Selo Talasnal

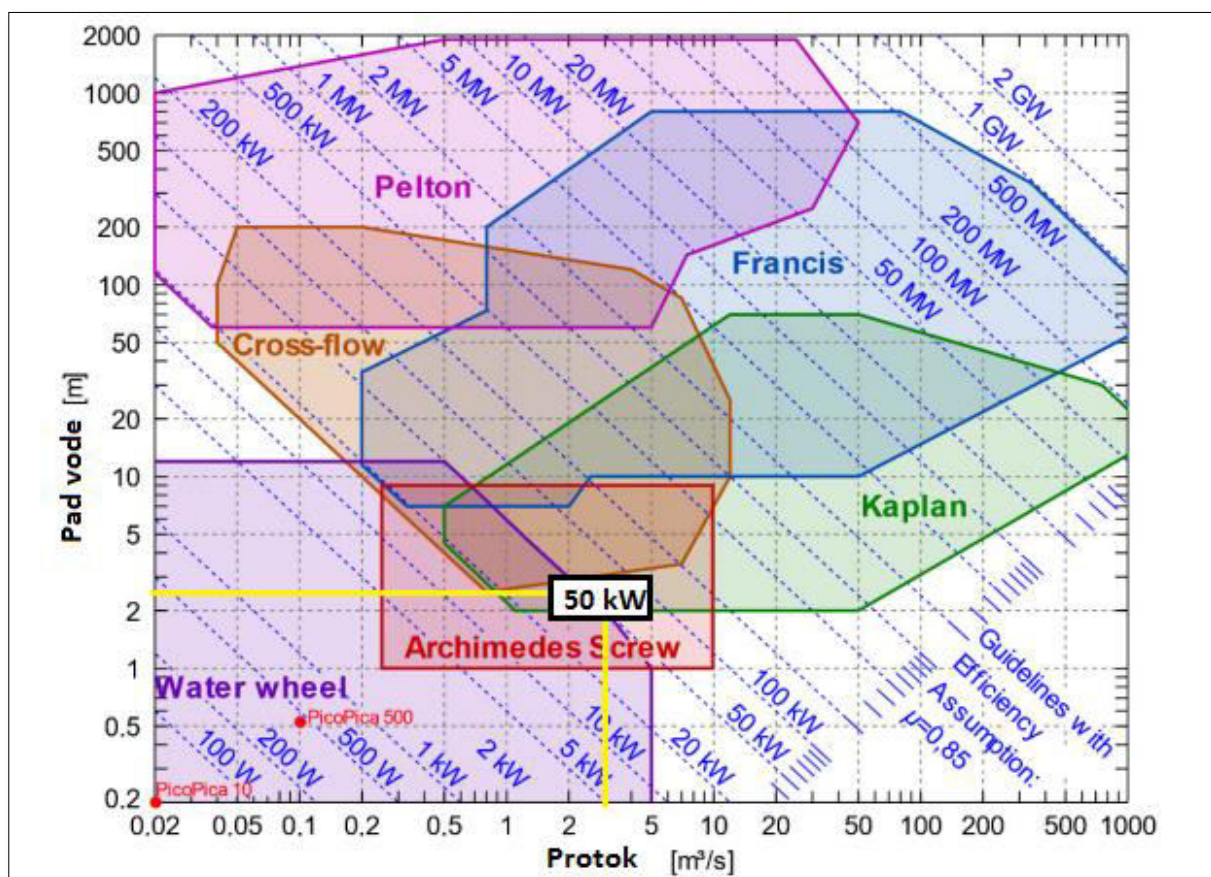


Slika 4.4 – Udaljenost između sela i turbine

Na slici 4.4 je prikazana je udaljenost između lokacije sela i lokacije ugradnje turbine, koja iznosi 3 km zračne linije. Obzirom da je selo povezano na gradsku distribucijsku

mrežuelektrične energije, neće biti potrebno graditi novu mrežu, ali je potrebno predvidjeti troškove naknade za korištenje gradske mreže.

Na osnovu dostupnih podataka o visini vodenog pada i potrebama za električnom energijom, potrebno je odrediti potrebni volumni protok vode. Na slici 4.5 prikazan je radni raspon Arhimedove turbine na kojem se može očitati potrebni volumni protok vode da bi se osigurala nazivna snaga Arhimedove turbine od 50 kW uz dostupni pad vode od 2,5 m.



Slika 4.5 - Radni raspon Arhimedove turbine [3]

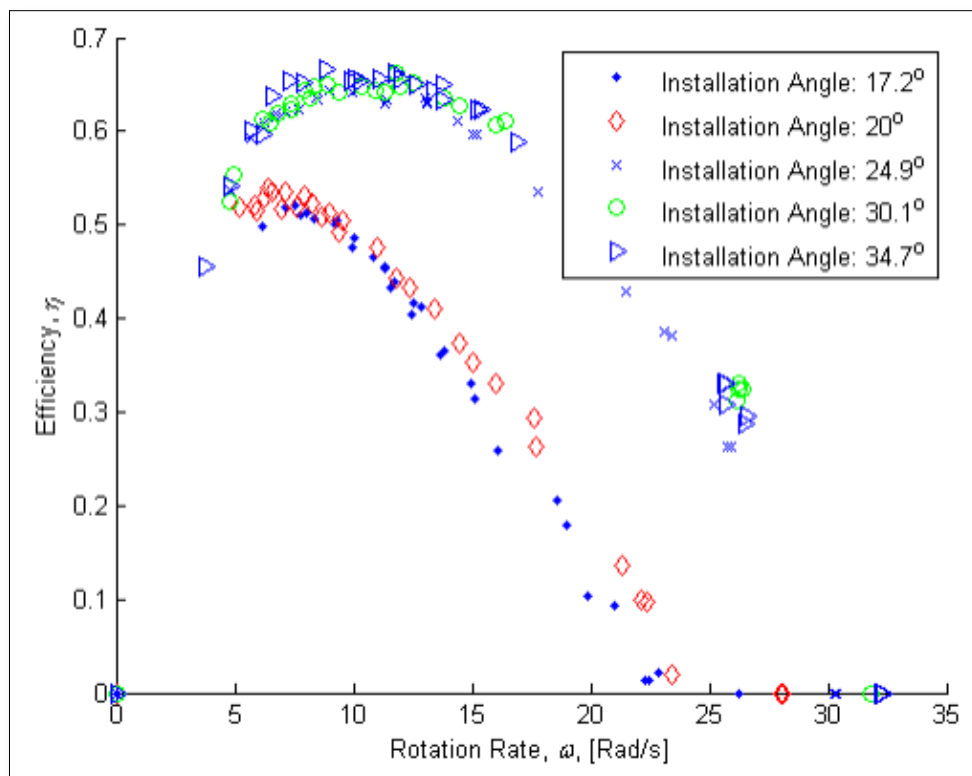
Potrebni protok prema slici 4.5 iznosi $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$. Protok će se regulirati otvorima za regulaciju protoka. U ovom slučaju, na planiranoj lokaciji već postoje otvori s mogućnostima za reguliranje protoka vode. Uz prilagodbu mogu se prenamijeniti u svrhu kontrole protoka vode za AT te samim time smanjiti troškove izvedbe sustava.

4.1. Nagib vijka

Za početak optimizacije potrebno je odabrati nagib vijka β . Veća vrijednost kuta (veći nagib) bila bi poželjnija s ekonomske strane. Veća vrijednost kuta utječe na smanjenje vrijednosti

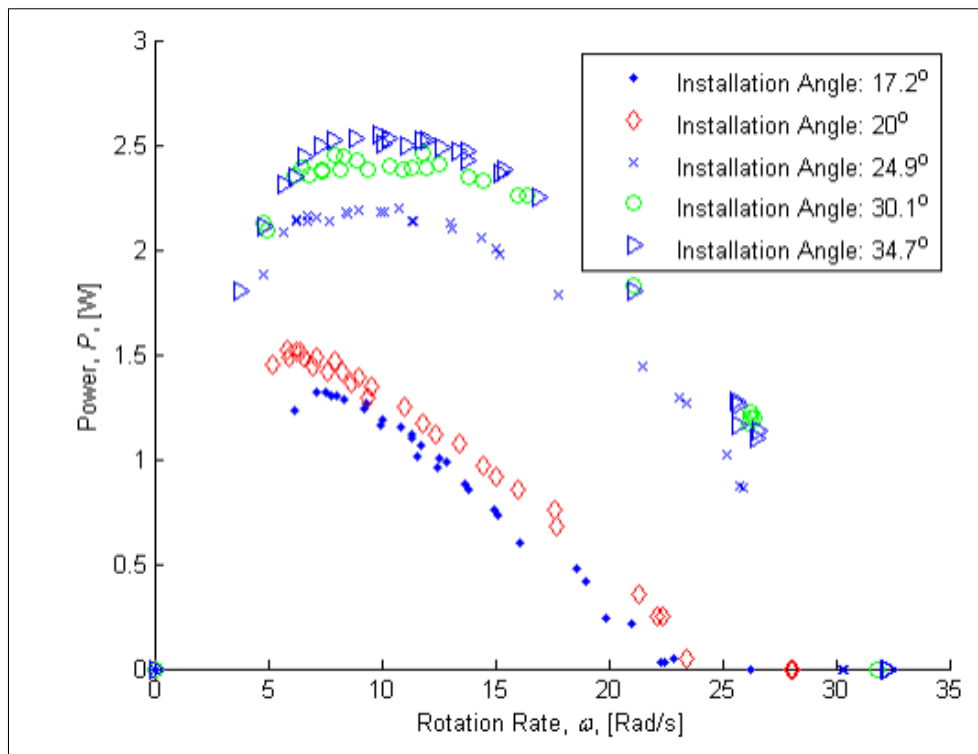
dužine vijka, što predstavlja uštedu na materijalu, konstrukciji, zahvatu u prostoru, i tako dalje. Kut ipak ne smije biti prevelik jer može doći do prelijevanja vode preko zavojnica što bi dovelo do nepotrebnih gubitaka u efikasnosti. Ako je kut toliko velik da je turbina potpuno popunjena vodom u tom slučaju bi praktički postala aksijalna turbina, te bi bilo efikasnije zamijeniti je propelernom vrstom turbine (Kaplanova turbina).

Na slici 4.1.1 prikazana je učinkovitost turbine u odnosu na brzinu okretanja vijka za pojedinačne vrijednosti kutova.



Slika 4.1.1– Odnos učinkovitosti i rotacijske brzine za različite kutove [11]

Promatranjem slike 4.1.1 može se zaključiti da se učinkovitost ne mijenja značajno s povećanjem nagiba vijka za više od 25°. Maksimalna snaga može se dobiti za kutove između 30° i 35° što je prikazano na slici 4.1.2.



Slika 4.1.2– Odnos kuta i snage za različite kutove [11]

Kut ugradnje vijka najviše ovisi o uvjetima na lokaciji izgradnje male hidroelektrane. Za ovaj proračun odabrati će se kut $\beta = 25^\circ$. U ovom slučaju radi se o turbini s fiksnim ugradbenim kutom, dok se u praksi mogu koristiti turbine s mogućnostima promijene kuta β .

4.2. Duljina vijka

U praksi se duljina vijka uglavnom odabire prema praktičnim mogućnostima koje nudi teren na lokaciji ugradnje. U slučaju savršenih pogodnosti duljina vijka se računa prema visini vodenog pada i odabranom kutu instalacije, odnosno prema formuli (4.2.1):

$$L = \frac{H}{\sin \beta} = \frac{2,5 \text{ m}}{\sin 25^\circ} = 5,92 \text{ m} \quad (4.2.1)$$

S ekonomske strane poželjno je da vijak bude što manje duljine kako bi se smanjio utrošak materijala i cijena proizvodnje turbine. Zbog pojednostavljena proračuna vrijednost duljine vijka će se zaokružiti na vrijednost:

$$L = 6 \text{ m}$$

4.3. Broj zavojnica

Pri odabiru broja zavojnica potrebno je voditi računa da turbina može prenositi maksimalnu snagu na vratilo a da pri tome bude što laganija. Povećanje broja zavojnica znači da će unutar zavojnice biti više zasebnih posuda ispunjenih vodom u kojima će volumen vode biti manji. Povećati će se gubici udara pri ulazu vode u zavojnicu kao i gubici zbog viskoziteta vode unutar zavojnice. Dodavanjem zavojnica povećava se težina turbine, te posljedično i opterećenje na nosače odnosno ležajeve što dovodi do povećanih gubitaka uslijed trenja unutar ležajeva. Također se povećava i cijena transporta, proizvodnje i instalacije turbine. Zbog navedenih razloga cilj je odabrati što je moguće manji broj zavojnica kako bi se postigla što većiskoristivost.

Lyons [11] je u svojim istraživanjima došao da zaključka da se povećanjem broja zavojnica iznad $N = 3$ ne postiže znatnije povećanje u iskoristivosti. Pri smanjivanju broja zavojnica na samo dvije, dolazi do znatnog pada u tehničkim karakteristikama turbine. Može se zaključiti da je optimalan broj lopatica/zavojnica $N = 3$.

4.4. Omjer vanjskog promjera vratila i vanjskog promjera zavojnice

Temeljeno na teoretskim istraživanjima i praktičnim mjerenjima na pumpi, a u svrhu maksimalne ispunje Arhimedovog vijka vodom, Nagel [8] je preporučio omjer vanjskog promjera vratila i vanjskog promjera zavojnice između 0,45 i 0,55.

$$\delta = \frac{D_i}{D_e} = [0,45; 0,55] \quad (4.4.1)$$

Nakon optimizacijskog istraživanja Rorres [10] je zaključio da je najbolji omjer promjera $\delta = 0,54$ za vijke koji imaju 1 do 4 zavojnice. Na temelju navedenih istraživanja, a uzevši u obzir usvojeni broj zavojnica $N = 3$, odabran je omjer:

$$\delta = 0,54$$

Odabir navedenog omjera također utječe i na utrošak materijala pri izradi vijka.

4.5. Odabir vanjskog promjera

Vanjski promjer vijka D_e usko je vezan s brzinom okretanja turbine. Trenutno se ne koriste vijci s vanjskim promjerom većim od 4 metra zbog zamora zavara između spoja zavojnice i vratila. U proračunima izvedenim od strane Gerharda Nagelapreporučeno je da brzina okretanja ne prelazi brzine veće od gornje granice definirane izrazom (4.5.1):

$$n = \frac{50}{D_e^{2/3}} \quad (4.5.1)$$

Ograničenje je postavljeno zbog razloga što pri velikim brzinama okretanja dolazi do prskanja vode van turbine te prelijevanja iz jedne posude u drugu zbog prijanjanja vode za lopatice turbine. Brzina bi trebala biti što bliža gornjoj granici kako bi se smanjio omjer prijenosa u mjenjačkoj kutiji te posljedično i veličina mjenjačke kutije.

Drugi način za odabir brzine okretanja je da se zadovolji uvjet da zadani protok koji vijak apsorbira tijekom jednog punog okreta bude jednak pražnjenju vijka na izlazu. Uz pretpostavku da će N broj posuda unutar vijka biti ispunjeno za vrijeme jedne rotacije može se izvesti sljedeći izraz:

$$n = \frac{60Q}{NV_b} \quad (4.5.2)$$

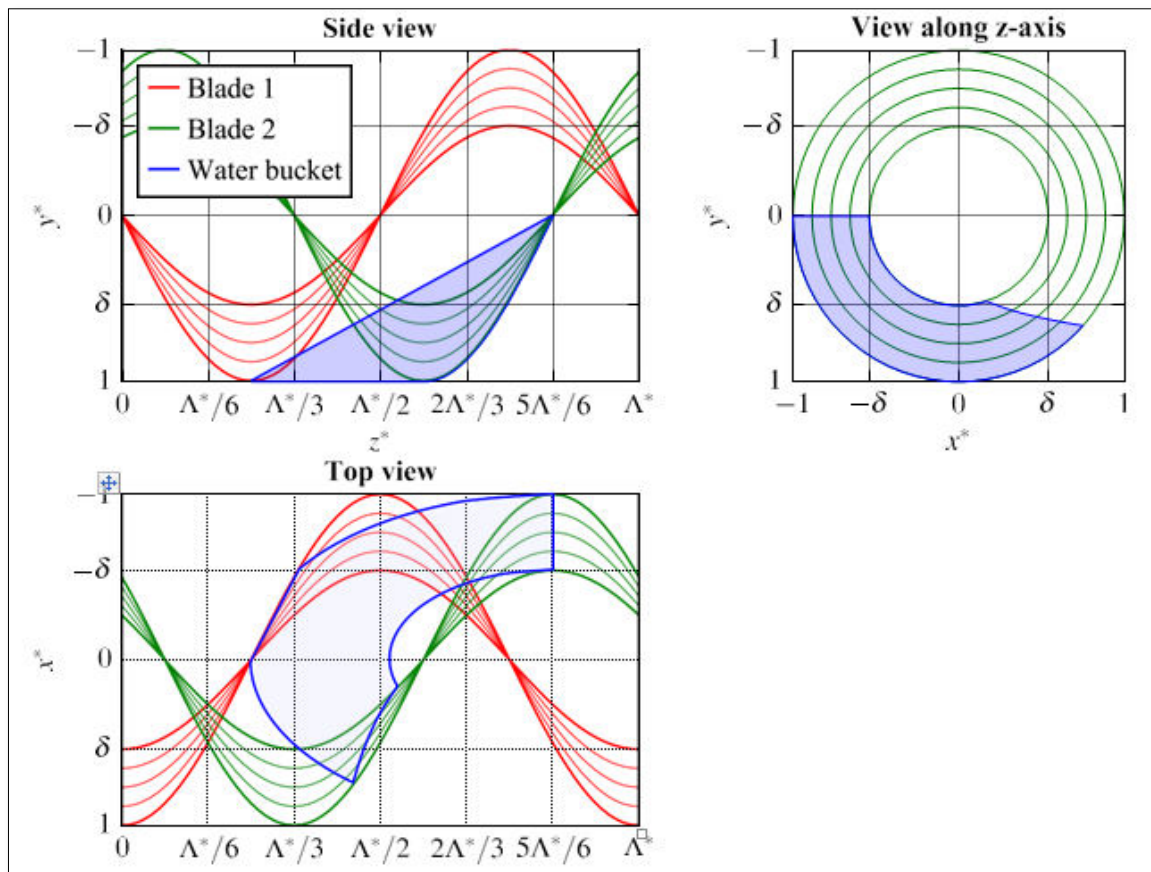
gdje je V_b volumen jedne posude.

Ozbiljan problem koji se javlja pri projektiranju Arhimedove turbine je izračun volumena V_b .

Volumen posude omeđen je s pet površina:

1. slobodna površina vode u posudi,
2. navlažena površina nizvodne lopatice,
3. navlažena površina uzvodne lopatice,
4. navlažena unutarnja površina korita i
5. navlažena vanjska površina vratila.

Kompleksnost volumena V_b prikazana je na slici 4.6.



Slika 4.6- Prikaz volumena V_b iz različitih kutova gledanja [7]

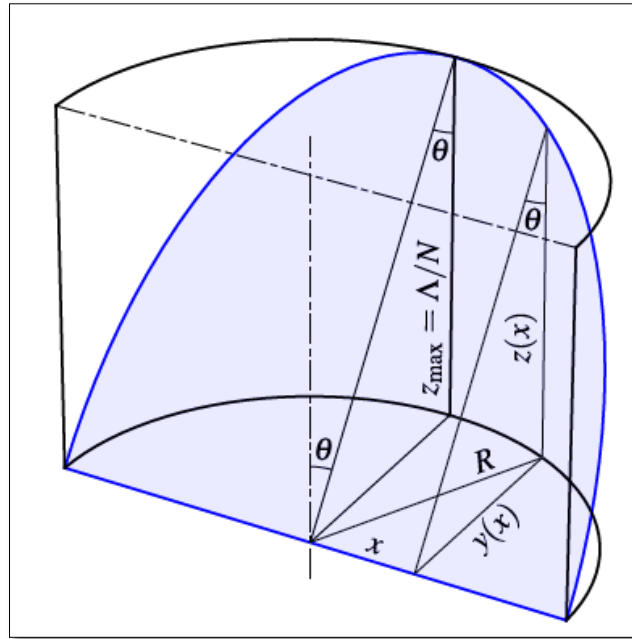
Zbog kompleksnosti oblika koristi se pojednostavljena procjena volumena. Zbog relativno grube procjene koristiti će se korekcijski faktor dobiven eksperimentalno.

Za grubu procjenu volumena posude shema na slici 4.7 može se koristiti dvaput. Prvo, veći volumen koji se sastoji između slobodne površine u odsutnosti vratila, unutarnje površine korita i kružne površine koja zamjenjuje nizvodnu lopaticu. Drugo, manji volumen pomaknut glavčinom (koji ima radijus R_i) treba izdvojiti iz volumena određenog u prvom koraku.

Prema slici 4.7, mogu se napisati sljedeće relacije:

$$y(x) = \sqrt{R^2 - x^2} \quad (4.5.3)$$

$$z(x) = \frac{y(x)}{\operatorname{tg}\theta} = \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{K} \quad (4.5.4)$$



Slika 4.7– Schema za određivanje volumena posude [7]

Gdje R zamjenjuje vrijednosti R_e i R_i . Osnovni volumen na koordinati x je:

$$dV = \frac{1}{2} y(x)z(x)dx = \frac{1}{2} \frac{R^2 - x^2}{K} dx \quad (4.5.5)$$

Cijeli volumen dobije se integracijom:

$$V = \frac{1}{2K} \int_{-R}^R (R^2 - x^2) dx = \frac{2}{3} \frac{R^3}{K} \quad (4.5.6)$$

Sada volumen posude može biti prikazan kao:

$$V_b = \frac{2}{3} k_v \frac{R_e^3 - R_i^3}{K} = \frac{2}{3} k_v \frac{R_e^3}{K} (1 - \delta^3) = \frac{1}{12} k_v \frac{D_e^3}{K} (1 - \delta^3) \quad (4.5.7)$$

gdje je k_v = korekcijski faktor

Supstitucijom n iz jednadžbe (4.5.2) i V_b iz jednadžbe (4.5.7) u jednadžbu (4.5.8) slijedi:

$$\frac{50}{D_e^{2/3}} = \frac{720KQ}{k_v N D_e^3 (1 - \delta^3)} \quad (4.5.8)$$

Što rezultira sljedećom jednadžbom za vanjski promjer:

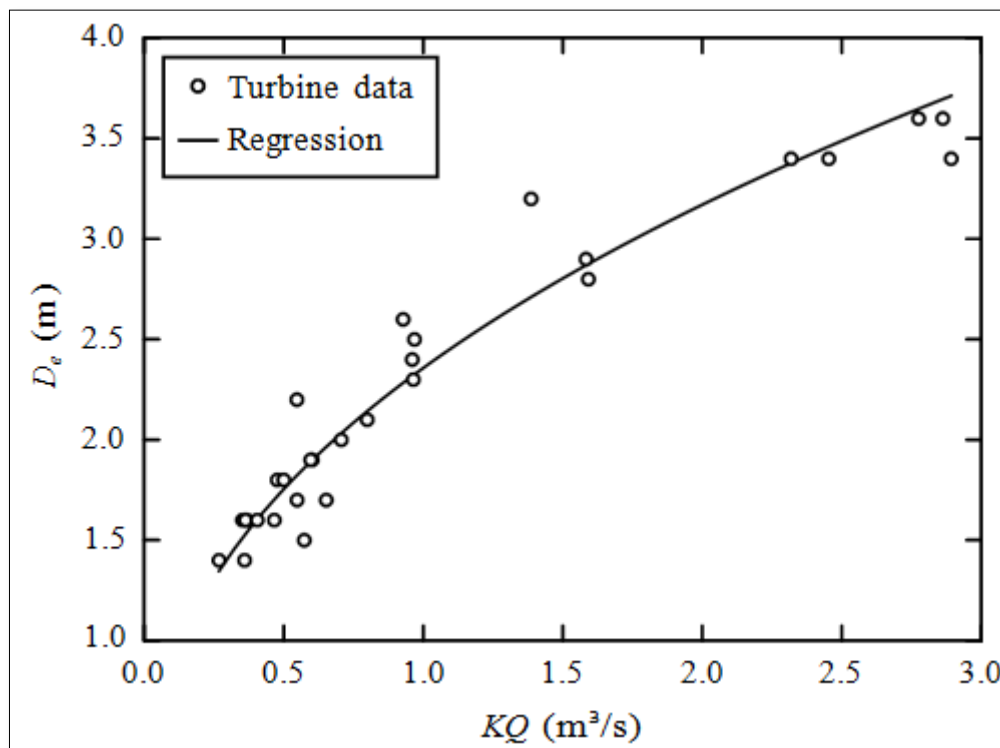
$$D_e = \left[\frac{14.4KQ}{k_v N (1 - \delta^3)} \right]^{3/7} \quad (4.5.9)$$

Korekcijski faktor k_v odabran je pomoću regresijske analize podataka dobivenih od tvrtke Rehart Power. Podatci su dobiveni na osnovu analiza 29 ugrađenih turbina s različitim karakteristikama. Koristili su se samo podatci turbina čija je efikasnost prelazila 60%. Podatci su prikazani u tablici 4.5.1.

Tablica 4.5.1 - Podatci turbina proizvođača Rehart Power [7]

Lokacija	Q (m^3/s)	H (m)	P_e (kW)	L (m)	D_e (m)	β (°)	η_u (%)	D_e (m)	ε_D (%)
Haddo	0,5	5	15,9	10,47	1,4	28	64,8	1,35	3,7
Indore	0,6	5,3	19	10,23	1,4	31,2	60,9	1,53	8,5
Schnaittach	0,8	1,35	7,5	3,2	1,6	25	70,8	1,54	3,9
Herrenhof	0,9	2,1	13,9	5,71	1,6	21,6	75	1,51	6
Genkikungou	0,9	1,05	7,3	3,02	1,6	20,3	71,6	1,53	4,6
Bischofsmais	1	3,16	21	7,43	1,6	25,2	67,7	1,7	5,9
Mühlen	1	3	21	6	1,5	30	71,4	1,86	19,4
Vadodara	1	5	33	10,35	1,7	28,9	67,3	1,82	6,6
Eitting	1,2	3,57	29	9,6	1,8	21,8	69	1,72	4,7
Erding	1,2	1,75	13,9	4,5	1,8	22,8	67,5	1,75	2,9
St.Michael	1,2	3,2	26,9	6,6	1,7	28,7	71,5	1,96	13,3
Vierhöfen	1,2	1	8	3,1	1,6	18,8	68	1,6	
Colditz	1,5	3	33	8,7	2,2	20,2	74,8	1,82	20,9
Niedermühle	1,5	3,17	33	8,46	1,9	22	70,7	1,9	
FlatfordMill	1,6	1,1	12,6	3,13	1,9	20,6	73	1,89	0,5
Gescher	1,8	3,45	46	9,4	2	21,5	75,5	2,03	1,5
Yvoir	2	1,8	26	4,83	2,1	21,9	73,6	2,14	1,9
Stimpfach	2,3	2,55	44	6,57	2,3	22,8	76,5	2,32	0,9
Dautphetal	2,5	2,55	45,8	7,3	2,6	20,4	73,2	2,28	14
Untrmünkheim	2,5	1,8	31	5	2,4	21,1	70,2	2,32	3,4
TurburyMill	2,8	2,1	43	6,4	2,5	19,2	74,5	2,33	7,3
Pilsing	3,2	3,6	8	8,1	2,9	26,4	70,8	2,87	1
Wiener	3,5	4,05	98	9,76	2,8	24,5	70,5	2,88	2,8
Baiersdorff	4,5	1,5	48,1	5,08	3,2	17,2	72,6	2,71	18,1
ShanesCastle	5,5	5	192	12,85	3,4	22,9	71,2	3,38	0,6
Hausen	6	5,8	250	15,3	3,4	22,3	73,2	3,46	1,7
Kirchberg	6	2,97	130	6,83	3,4	25,8	74,4	3,71	8,4
Wien	7,1	1,7	84	4,54	3,6	22	70,9	3,7	2,7
MapleDurham	8	1,73	99	5,27	3,6	19,2	72,9	3,65	1,4
Average							71,2		
Standarddeviati on							3,4		

Regresija je provedena koristeći metodu najmanjih kvadrata i rezultirala je faktorom $k_V = 0,7730$. Koeficijent određivanja je $R^2 = 0,9696$. Regresijska krivulja zajedno s podacima na kojima je temeljena prikazana je na slici 4.8.



Slika 4.8- Vanjski promjeri AT ovisno o umnošku između nagiba turbine i protoka i odgovarajuće regresijske krivulje [7]

Vanjski promjer može biti prikazan kao:

$$D_e = \left[\frac{18.63KQ}{N(1 - \delta^3)} \right]^{3/7} \quad (4.5.10)$$

Promjeri preračunati jednadžbom (4.5.10) za Rehartove turbine i njihove relativne razlike u odnosu na stvarne promjere, također su prikazani u tablici 4.5.1 radi usporedbe. U većini slučajeva razlike su manje od 5%, uz dva slučaja u kojima su promjeri identični. Samo u pet slučajeva, razlike su veće od 10%.

$$\varepsilon_D = \frac{|D_{eRehart} - D_{ecalc}|}{D_{ecalc}} \times 100 (\%) \quad (4.5.11)$$

Na temelju prethodnih izvoda i podataka računa se D_e :

$$D_e = \left[\frac{14.4KQ}{k_V N(1 - \delta^3)} \right]^{3/7} \quad (4.5.12)$$

Odabire se $k_v = 0,7730$

Vrijednost K predstavlja uspon vijka koji iznosi:

$$K = \tan \beta^\circ = \tan 25^\circ = 0,47$$

Vanjski promjer vijka određen je prema formuli (4.5.12):

$$D_e = \left[\frac{14,4 * 0,47 * 3}{0,7730 * 3 (1 - 0,54^3)} \right]^{3/7}$$

$$D_e = 2,73 \text{ m}$$

4.6. Unutrašnji promjer vijka

Unutrašnji promjer vijka predstavlja vanjski promjer vratila na kojeg su zavarene lopatice vijka. Uvrštavanjem dobivenog vanjskog promjera D_e u jednadžbu (4.4.1) proizlazi unutrašnji promjer D_i :

$$\delta = \frac{D_i}{D_e}$$

$$D_i = \delta \cdot D_e$$

$$D_i = 0,54 \cdot 2,73 = 1,47 \text{ m}$$

Navedeni promjer može varirati ovisno o standardima koji se koriste za odabir cijevi koja će imati ulogu vratila.

4.7. Korak vijka

Promjena koraka vijka utječe na volumen vode unutar posude kao i na broj posuda. Povećavanjem koraka vijka smanjuje se volumen vode unutar pojedine posude. Time će manja sila utjecati napojedinu posudu koja djeluje na lopatice, ali će se broj posuda povećati. Za postizanje optimalnih radnih karakteristika, Nagel [8] je pokazao da, ovisno o nagibu vijka β , korak vijka treba biti od 1,6 do 2,4 puta veći od vanjskog radijusa R_e i preporučio je standardnu vrijednost $S = 1,6R_e$ za nagibe vijka niže od 30° . Navedeno je potrebno usvojiti kako bi se izbjeglo previše varijanti dizajna i povećanje troškova proizvodnje.

Korak vijka određen je prema izrazu (4.7.1):

$$S = 1,6 \cdot Re \quad (4.7.1)$$

$$S = 1,6 \cdot 1,365 = 2,184 \text{ m}$$

4.8. Brzina vrtnje Arhimedovog vijka

Cilj je postići što manji broj okretaja po minuti pri radu turbine kako bi se smanjila buka pri radu, produljio vijek trajanja ležaja, te smanjili gubici sustava zbog gibanja vode unutar vijka, odnosno prskanja i prijanjanja vode za površinu lopatica pri radu.

Nagel [8] je preporučio da brzina vrtnje ne prelazi gornju granicu koja iznosi:

$$n_{max} = \frac{50}{D_e^{2/3}} = \frac{50}{2,73^{2/3}} = 25,6 \text{ okr/min} \quad (4.8.1)$$

Supstitucijom jednadžbe 4.5.12 u jednadžbu 4.8.1 dobije se sljedeći iznos brzine vrtnje:

$$n = \frac{50}{\left(\frac{14,4 \cdot K \cdot Q}{k_v \cdot N \cdot (1 - \delta^3)}\right)^{2/7}} = \frac{50}{\left(\frac{14,4 \cdot 0,47 \cdot 3}{0,773 \cdot 3 \cdot (1 - 0,56^3)}\right)^{2/7}} = 25,45 \text{ okr/min}$$

U slučaju da uvjet nije zadovoljen potrebno je povećati vanjski promjer D_e . Za većinu postojećih Arhimedovih turbina na području Europe potvrđeno je da rade ovom brzinom vrtnje ili manjom. Iskustvo je pokazalo da pri većim brzinama vrtnje od n_{max} trenje i centrifugalne sile postaju neprihvatljivo velike.

4.9. Volumen vode zarobljen između dvije uzastopne plohe

Uz poznatu vrijednost vanjskog promjera može se izračunati volumen vode u pojedinoj posudi, prema formuli 4.9.1:

$$V_b = \frac{1}{12} k_v \frac{D_e^3}{K} (1 - \delta^3) = \frac{1}{12} * 0,773 * \frac{2,73^3}{0,47} (1 - 0,54^3) \quad (4.9.1)$$

$$V_b = 2,35 \text{ m}^3$$

4.10. Efikasnost turbine

Očekivana efikasnost turbine dizajnirane na osnovu prethodnog proračuna iznosi:

$$\eta = 70\% - 75\%$$

Navedena efikasnost uključuje i gubitke u generatoru kao i gubitke mjenjačke kutije.

Postoje različite vrste gubitka energije koji utječu na mehaničku učinkovitost u sustavu rada Arhimedove turbine, dok su glavni razlozi:

- Hidraulični gubitci - voda koja teče kroz prostor između vijka i korita, udar vode na ulazu u turbinu i vrtloženje pri izlazu, prskanje vode.
- Mehanički gubitci - trenje u ležajevima koji podupiru vijak, trenje u mjenjačkoj kutiji.
- Viskozni gubitci - energija se gubi zbog posmičnih sila između vode i unutrašnjosti vijčane površine.

Gubici zbog otpora ležajeva mogu se smanjiti odabirom prikladnih ležajeva. Najvažnije je spriječiti prodiranje nečistoća u donji ležaj koji je djelomično zaronjen pod vodom. Dobar sustav podmazivanja je također veoma važan.

Protok vode kroz vijak Q može se podijeliti na dva dijela: $Q = Q_b + Q_l$ gdje je Q_b volumni protok vode zarobljen unutar vijka, a Q_l volumen vode koji curi kroz otvor između lopatica i korita. Raspodjela kvazistatičnog tlaka vode koja djeluje na zaronjene površine uzrokuje okretanje vijka. Međutim, dio protoka Q_l curi kroz vijak te energija povezana s curenjem se gubi umjesto da doprinosi rotaciji vijka. Curenje vode može varirati od 3% do 12% kod Arhimedovih pumi, dok na osnovu stečenog iskustva već ugrađenim Arhimedovim turbinama proizlaze slični postotci curenja kao i kod pumpi. Arhimedova turbina ima najveću učinkovitost pri manjim brzinama okretanja, iako se gubitci zbog curenja vode ne smanjuju pri manjim brzinama okretanja.

Gubici zbog prelijevanja vode preko vratila moguće je spriječiti kontrolom dotoka vode na ulazu, odnosno, sprječavanjem prepunjivanja vijka vodom.

4.11. Snaga na vratilu

Snagaturbine predstavlja umnožak gravitacijske konstante, iskoristivosti sustava, količini volumnog protoka vode te padu vode:

$$P_s = g * \eta * Q * H \quad (4.11.1)$$

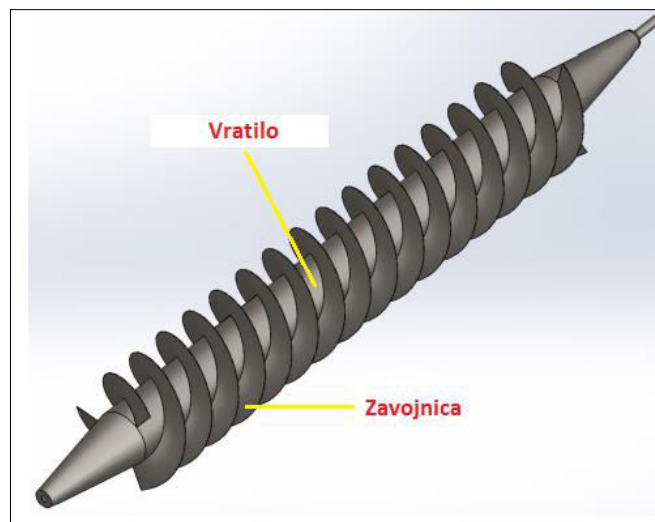
$$P_s = 9,81 * 0,75 * 3 * 2,5$$

$$P_s = 55,18\text{kW}$$

5. Odabir dijelova turbine

5.1. Vratilo

Vratilo je bitna komponenta vijka koja mora zadovoljiti statičke, mehaničke i hidraulične funkcije. Pod statičke funkcije se podrazumijeva da mora podnijeti vlastiti teret bez da dođe do neželjenog progiba koji bi rezultirao dodirivanjem zavojnica i korita. Da bi se to spriječilo treba odabrati pravilan promjer i debljinu stijenke u odnosu na dužinu vratila između dvaju oslonaca. Mehanička funkcija vratila je da nosi zavarene zavojnice te da omogućuje okretanje sustava pomoću ležajeva postavljenim na krajevima vratila odnosno prirubnicama. Hidraulična svojstva vratila odnose se na utjecaj promjera vratila na mogući sadržaj vode u posudi (slika 5.1).



Slika 5.1– Prikaz dijelova vijka [9]

Poprečni presjek vratila je prstenastog oblika. Cijev preporučena od strane Nagela G. [9] je izrađena od čelika prema DIN 2458. Navedeni materijal je nisko ugljični čelik koji sadrži karbon, silicij, fosfor i sumpor. Udio ugljika maksimalno iznosi 0,17%. To znači da je materijal vrlo izdržljiv i da se može oblikovati i strojno obrađivati. Iako odabrani materijal nema zadovoljavajuću otpornost na koroziju, ista se može poboljšati pocinčavanjem, bojanjem, epoxy premazima ili izradom vijka od nehrđajućeg čelika. Ovaj standard se slaže s ISO 4200:1991 preporukama.

U svrhu odabira dimenzije poprečnog presjeka vratila postaviti će se uvjet da deformacija ne smije prijeći iznos širine razmaka između vratila i korita:

$$\delta_{max} < G_w \quad (5.1.1)$$

Širinu razmaka je teško izmjeriti u praksi jer varira na različitim točkama duž vijka. Nagel[8] je objavio formulu maksimalne širine razmaka koja se često koristi u praksi:

$$G_w = 0,0045 * D_e \quad (5.1.2)$$

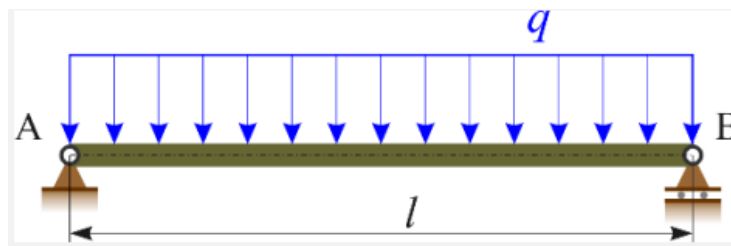
Za ovaj slučaj, maksimalna širina razmaka iznosi:

$$G_w = 0,0045 \times 2,73 = 0,0123 \text{ m} = 12,3 \text{ mm}$$

Prema tome uvjet glasi:

$$\delta_{max} < 12,3 \text{ mm}$$

Da bi se ispunio zadani uvjet, vijak će se prikazati kao nosač opterećen vlastitom težinom kao što je prikazano na slici 5.2. Preporuke Nagela [8] su da se zavojnice ne smatraju ojačanjem vratila.



Slika 5.2- Shema opterećenog nosača [13]

Sila q predstavlja opterećenje kojem je iznos umnožak gravitacijske konstante i težine vratila. Težina vratila je uzeta iz tablice 5.1.1.

Tablica 5.1.1- Karakteristike cijevi [14]

Debljine stijenke (mm)									Vanjski promjer (mm)
7,18	8,8	10	11	12,5	14,2	16	17,5	20	
Težina (kg/m)									
230	258	284	323	357	406	458	512	562	1320
	227	305	348	384	437	493	552	605	1420
	297	327	372	411	468	528	591	647	1520

U ovom slučaju najbliži iznos proračunatom iznosu potrebnog promjera vratila, prema odabranom standardu cijevi, je 1420 mm. Za vanjski promjer $D_i = 1420$ mm i debljinu stijenke $T = 12,5$ mm, masa po metru iznosi:

$$m = 384 \text{ kg/m}$$

Obzirom da je duljina vratila $L = 6$ m ukupna masa iznosi:

$$G = L \cdot m = 6 \cdot 384 = 2304 \text{ kg} \quad (5.1.3)$$

Ako se masa G pomnoži s gravitacijskom konstantom g , rezultat je težina odnosno opterećenje:

$$Fq = G \cdot g = 2304 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 22602,24 \text{ N}$$

Obzirom da se radi o savijanju potrebno je promatrati silu okomitu na os vratila. Vratilo se nalazi pod kutom od 25° obzirom da je za ovaj proračun važna samo sila koja djeluje okomito na vratilo, sila iznosi:

$$Fq = 22602,24 \cdot \cos 25^\circ = 20484,59 \text{ N}$$

Formula za progib u slučaju jednostavnog nosača opterećenog jednoliko raspodijeljenim kontinuiranim opterećenjem glasi:

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot Fq \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I_y} \quad (5.1.4)$$

Gdje je :

E = Modul elastičnosti koji za odabrani čelik iznosi 210 GPa.

I_y = Aksijalni moment tromosti za poprečni presjek prstenastog oblika koji se računa prema formuli 5.1.4.

$$I_y = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (5.1.5)$$

Odnosno:

$$I_y = \frac{\pi}{64} (1420^4 - 1395^4) = 1,3681 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \quad (5.1.6)$$

Uvrštavanjem dobivenih rezultata u formulu 5.1.4 dobiva se iznos progiba:

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot 20480 \cdot 6000^3}{384 \cdot 210000 \cdot (1.3681 \cdot 10^{10})} = 0,02 \text{ mm}$$

Uvrštavanjem dobivenog iznosa u uvjet 5.1.1 proizlazi:

$$\delta_{max} = 0,02 \text{ mm} < 12,3 \text{ mm}$$

Maksimalni progib vratila je znatno manji od dopuštenog što znači da je uvjet zadovoljen. Moguće je odabrati još tanje debljine stijenke ali obzirom da se na vratilo zavaruju zavojnice može doći do nepoželjnog deformiranja vratila.

Sljedeći korak je provjeriti hoće li naprezanje prekoračiti dopušteno naprezanje zadanog čelika. Za debljine stijenke debljine do 16 mm dopušteno naprezanje iznosi:

$$\sigma_d = 235 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Jednadžba za provjeru čvrstoće glasi:

$$\sigma_{max} = \frac{|M_{y,max}|}{W_y} \leq \sigma_d \quad (5.1.7)$$

Gdje je:

$M_{y,max}$ = Maksimalni moment savijanja

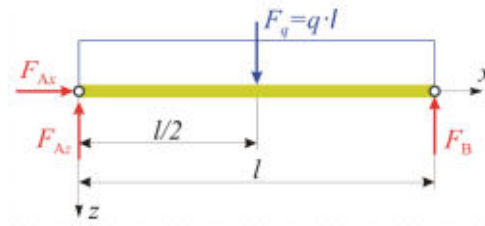
W_y = Aksijalni moment otpora

Kako bi se izračunao maksimalni moment savijanja potrebno je izračunati reakcije u osloncima, kao što je prikazano na slici 5.3.

$$\sum F_x = 0: \quad F_{Ax} = 0$$

$$\sum F_z = 0: \quad -F_{Az} + F_q - F_B = 0$$

$$\sum M_B = 0: \quad -F_{Az} \cdot l + F_q \cdot \frac{l}{2} = 0$$



Rješavanjem gornjeg sustava dobijemo:

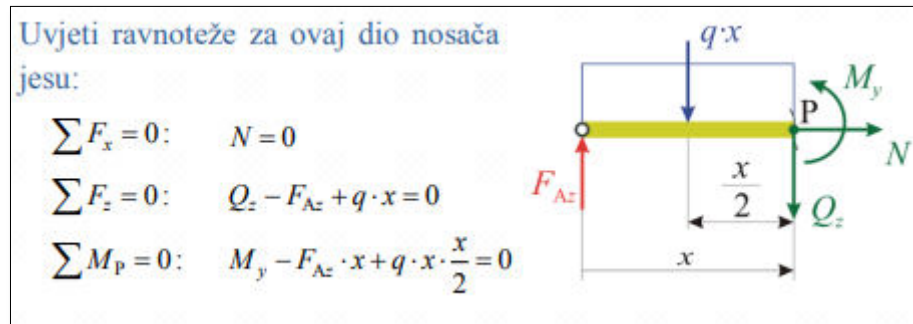
$$F_{Ax} = 0 \quad F_{Az} = F_B = \frac{F_q}{2} = \frac{q \cdot l}{2}$$

Slika 5.3- Reakcije u osloncima [13]

Kontinuirano opterećenje zamijenjeno je silom $F_q = q \cdot L$. Prema postavljenom izrazu reakcijske sile iznose:

$$F_{Az} = F_B = \frac{Fq}{2} = \frac{20,48 \text{ kN}}{2} = 10,24 \text{ kN} \quad (5.1.8)$$

Sljedeći korak je izračun unutarnjih sila. Na slici 5.4 postavljeni su uvjeti ravnoteže sa segment vratila, prema kojima će se izračunati potrebne sile.



Slika 5.4– Uvjeti ravnoteže za segment vratila [13]

Iz jednadžbi sa slika dobije se:

$$M_y = \frac{q}{2} (l \cdot x - x^2) \quad (5.1.9)$$

Moment na krajevima vratila iznosi $M_y = 0$, ekstrem se nalazi na polovici vratila i iznosi, za $x = \left(\frac{l}{2}\right)$:

$$M_y\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{q}{2} \left(l \cdot \frac{l}{2} - \frac{l^2}{2} \right) = \left(\frac{q \cdot l^2}{8} \right) = \left(\frac{3,414 \cdot 6^2}{8} \right) \quad (5.1.10)$$

$$M_{y,max} = 15,36 \text{ kN/m}$$

Aksijalni moment otpora računa se prema izrazu:

$$W_y = \frac{I_y}{z_{max}} \quad (5.1.11)$$

$$z_{max} = \frac{D_o}{2} = \frac{1420}{2} = 710 \text{ mm}$$

$$W_y = \frac{1,3681 \cdot 10^{10}}{710} = 1,92690 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Što znači da je prema formuli 5.1.7:

$$\sigma_{max} = \frac{0,1536 \cdot 10^8}{1,92690 \cdot 10^7} = 0,797 \text{ Mpa}$$

Obzirom da dopušteno naprezanje za čelik St. 37.2 iznosi:

$$\sigma_d = 230 \text{ Mpa}$$

nema potrebe za odabirom većih debljina stijenke.

U svrhu spajanja vratila turbine s ležajevima koristiti će se prirubnice. Prirubnice mogu biti kovane ili zavarene. Kovane prirubnice koriste se pri većim teretima, dok se zavarene prirubnice koriste pri manjim teretima. Prirubnice se zavare na krajeve vratila koji mogu biti ravni ili konusnog oblika. Najčešće se koriste slijepo kovane prirubnice izrađene od nehrđajućeg čelika s urezanim navojima kao što je prikazano na slici 5.5. Proračun potrebnih dimenzija prirubnica, kao ni odabir dimenzija vijaka za spajanje prirubnica, nije obrađen u ovom završnom radu.

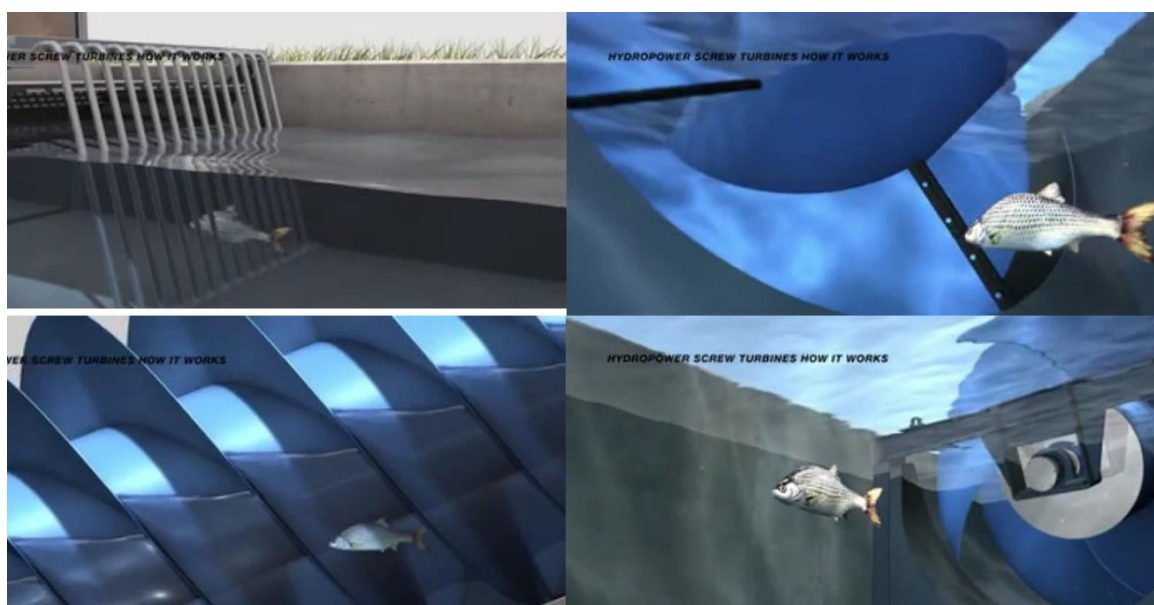


Slika 5.5 - Slijepa prirubnica izrađena od nehrđajućeg čelika [12]

5.2. Zavojnice Arhimedovog vijka

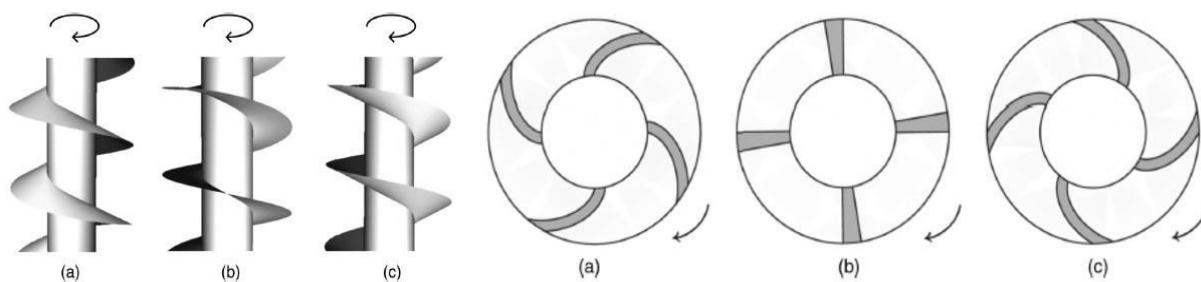
Zavojnice su komponenta vijka koje omogućuju sustavu okretanje uz pomoć statičkog pritiska vode. S vratilom se mogu spojiti na više načina a najčešće zavarivanjem. Opterećene

su na savijanje te je bitno ne prekoračiti promjer zavojnice jer može doći do pucanja zavora. Zavojnice se mogu izraditi kovanjem, hladnim prešanjem ili korištenjem strojeva za valjanje. Izrađuju se u većim dimenzijama od zadanih vrijednosti jer se nakon zavarivanja na vratilo režu na točnu mjeru pomoću plinskog ili plazma rezanja. Vijak se pri rezanju nalazi oslonjen na ležajevima na oba kraja kako bi se uklonile potencijalne nepravilnosti zbog ulijeganja vratila te se time zavojnice dovode na točnu mjeru. Pri završnoj obradi zavojnica bitno je ukloniti sve oštre rubove kako bi se zaštitile životinje koje se nađu zarobljene unutar turbine od mogućih ozljeda. Na slici 5.6 prikazan je način na koji riba prolazi kroz turbinu bez povreda. Na počecima zavojnica postavlja se gumena zaštita kako bi se dodatno osigurao prolaz životinjama.



Slika 5.6– Prolaz ribe kroz turbinu [5]

Oblici zavojnica mogu biti različiti, dok su na slici 5.7 za primjer prikazane tri vrste zavojnica.



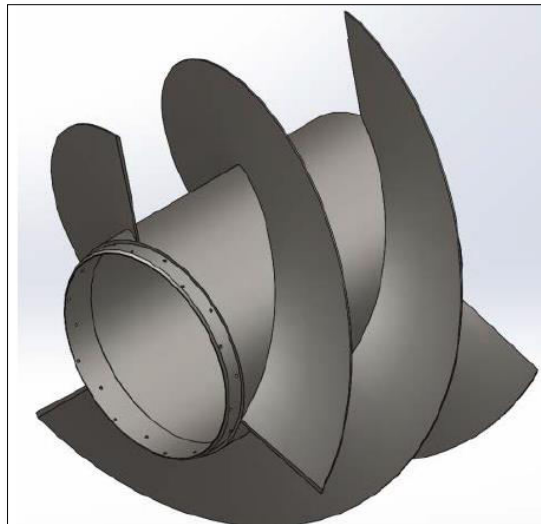
Slika 5.7– Različite izvedbe zavojnica [14]

Gdje je:

- a) Strake
- b) Helikoid
- c) Obrnuti strake

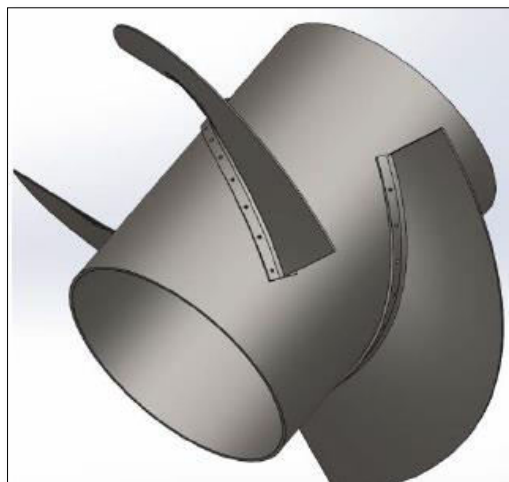
U ovom radu koristitiće se Helikoidni oblik lopatica zbog najjednostavnije izrade.

Način spajanja vratila i zavojnica ovisi o pristupačnosti lokacije ugradnje. Ako je lokacija nepristupačna vijak se može izraditi iz više segmenata koji će biti povezani na mjestu postavljanja turbine. Za primjer je na slici 5.8 prikazana izvedba segmenta koji koristi vijke za povezivanje, pri čemu je moguće koristiti i zakovice uz određene prilagodbe u dizajnu segmenta.



Slika 5.8– Segment vijka [9]

Zavojnice se osim zavarivanja mogu povezati s vratilom uz pomoć vijaka kao što je prikazano na slici 5.9. Prednosti te izvedbe su veća izdržljivost spoja zavojnice i vratila što daje mogućnost većeg vanjskog promjera zavojnica ako je to potrebno, olakšava transport i omogućuje jednostavno demontiranje i optimizaciju. Razlog zbog kojeg se ova izvedba rijetko koristi je kompleksna izvedba i povećani trošak materijala, proizvodnje i održavanja. U slučaju da se vijak radi iz više dijelova treba paziti da spojevi nisu na polovici dužine vijka jer se tu javlja najveći moment te može doći do pucanja spoja.



Slika 5.9– Izvedba segmenata zavojnice s vijcima [9]

S obzirom na to da je lokacija u ovom slučaju relativno pristupačna, vijak je najjednostavnije napraviti iz jednog komada i pomoću dizalice ga montirati na potrebnu lokaciju prikazanu na slici 5.10.



Slika 5.10– Udaljenost između ceste i lokacije ugradnje turbine

5.3. Izvedbe korita

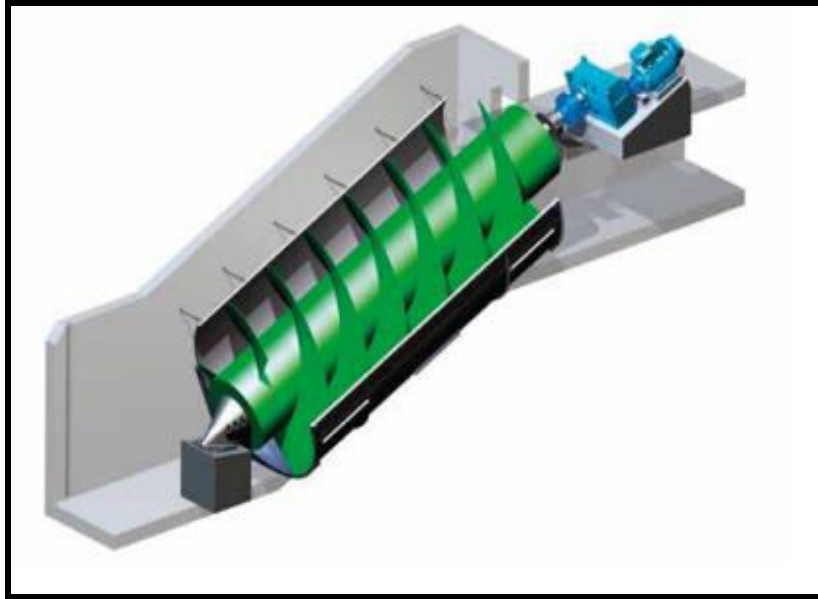
Korito je polucilindrična ili cilindrična posuda koja zadržava vodu koja pokreće vijak. Može biti metalno ili od betona, u ovom pod poglavlju biti će predstavljene neke od izvedbi. Odabir izvedbe ovisi o praktičnim mogućnostima lokacije ugradnje ili željama investitora.

Klasična konfiguracija je kada je vijak smješten u otvoreno betonsko korito pri čemu je turbina „obješena“ između gornjeg i donjeg ležaja, te se slobodno rotira s vrlo malim razmakom od korita od samo nekoliko milimetara. Uz pomoć samog vijka koji se sporo vrti a na koji je privremeno postavljena traka za estrih, stvara se savršeno korito koje je samo nekoliko milimetara većeg promjera od samoga vijka. Kako se meki beton ulijeva u korito, rotacijom vijka stvara se savršeni "otisak" vijka. Na slici 5.11 prikazan je presjek betonskog korita.



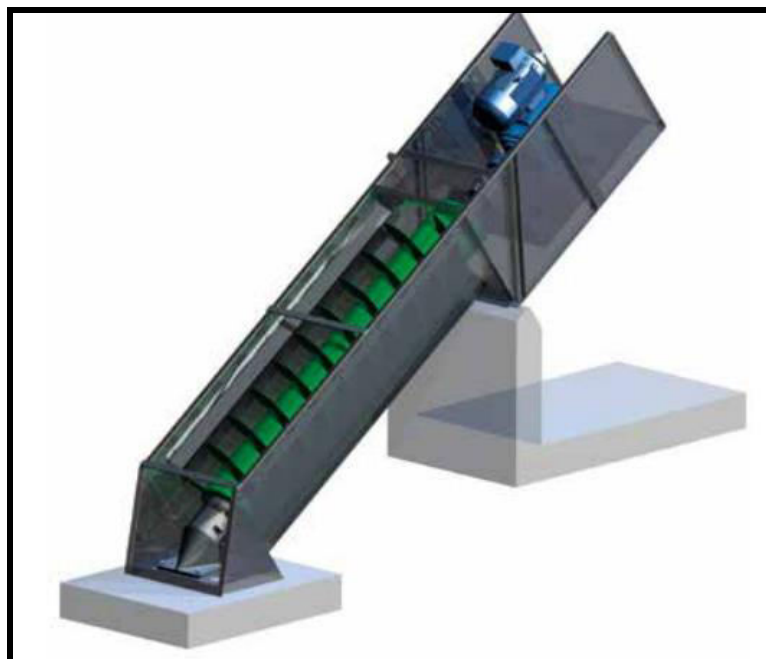
Slika 5.11– Betonsko korito[20]

Sljedeća izvedba je s metalnim koritom. Građevinski radovi za ovu vrstu su slični onoj za "betonsko korito" opisano ranije, ali nije potrebno postavljanje estriha; umjesto toga, beton se zasipa u montažnu čeličnu oblogu korita. U slučajevima kada puno kamenja i šljunka ulazi u ulaz, čelična obloga korita jača otpornost korita na habanje što ovoj izvedbi daje dulji vijek trajanja od one s betonskim koritom. Na slici 5.12 prikazan je presjek metalnog korita.



Slika 5.12– Metalno korito[15]

Pri upotrebi kompaktnog korita građevinski radovisu minimalni. Integrirani ulazni dio, izlazni dio, korito i vijak ugrađeni su u montažnu samo noseću čeličnu konstrukciju koja je sastavljena u pogonu proizvodnje i isporučena u jednom komadu. Oslonac u ulaznom kanalu i oslonac na izlaznom kanalu jedini su građevinski zahtjevi. Ova izvedba može se koristiti za kapacitete do $5 \text{ m}^3/\text{s}$ na ulazu, ali je ipak najbolja za manje kapacitete. Na slici 5.13 prikazan je presjek kompaktnog korita.



Slika 5.13– Kompaktno korito[15]

Pri ugradnji Arhimedovog vijka u korito potrebno je omogućiti dovoljan razmak između vijaka i korita. Razmak mora biti što je moguće uži kako bi se smanjili gubici zbog curenja vode, ali mora biti dovoljno velik da omogućiti toplinsko širenje vijka, potencijalno savijanje za vijke velikih dužina i da zadovolji proizvodne tolerancije koje ovise o odabiru i kvaliteti izrade korita i vijka. Zbog učinaka skaliranja očekuje se da će manji vijci imati veće gubitke učinkovitosti zbog curenja od većih vijaka, budući da se širina razmaka kao dio promjera vijka smanjuje kako se veličina vijka povećava.

Ako se uzme u obzir da su korito i vijak kvalitetno izrađeni unutar zadanih tolerancija, pri odabiru širine razmaka G_w gubici bi trebali iznositi između 3 i 12%. Navedeni veći iznos gubitaka odnosi se na vijak manjeg promjera i velikog ugradbenog kuta.

Količina vode koja curi također ovisi o koeficijentu protoka μ . Iskustvo je pokazalo da je sigurno pretpostaviti da je $\mu = 1$, i ako je koeficijent brzine jednake vrijednosti, tako da je prosječna brzina $v = \sqrt{2gh}$, prema formuli koju je postavio Nagel [8], može se izračunati gubitak zbog curenja prema izrazu 5.3.1:

$$Q_l = 2,5 \cdot G_w \cdot D \cdot \sqrt{D} \quad (5.3.1)$$

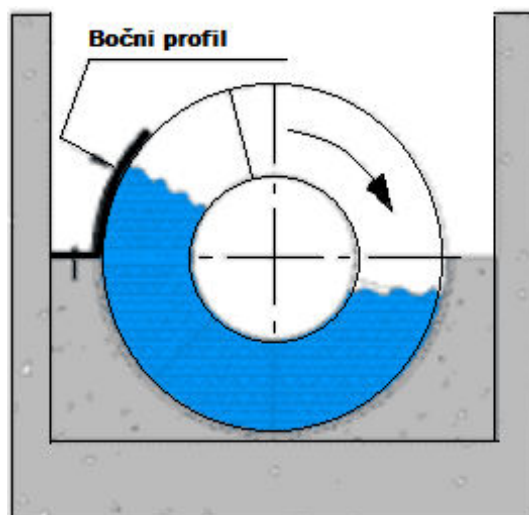
Odnosno:

$$Q_l = 2,5 \cdot 0,0123 \cdot 2,73 \cdot \sqrt{2,73} = 0,139 \text{ m}^3/\text{s}$$

Omjer gubitaka iznosi:

$$\lambda = \frac{Q_l}{Q_n} = \frac{0,139}{3} = 0,046 \quad (5.3.2)$$

Pri izradi korita potrebno je postaviti bočni profil koji će spriječiti izlivanje vode van sustava zbog prijanjanja vode za površinu lopatica. Izrađuje se od metala i može biti zavaren za metalno korito ili pričvršćen vijcima za betonsko korito. Primjer je prikazan na slici 5.14.



Slika 5.14– Bočni profil

5.4. Vrste i načini ugradnje ležajeva

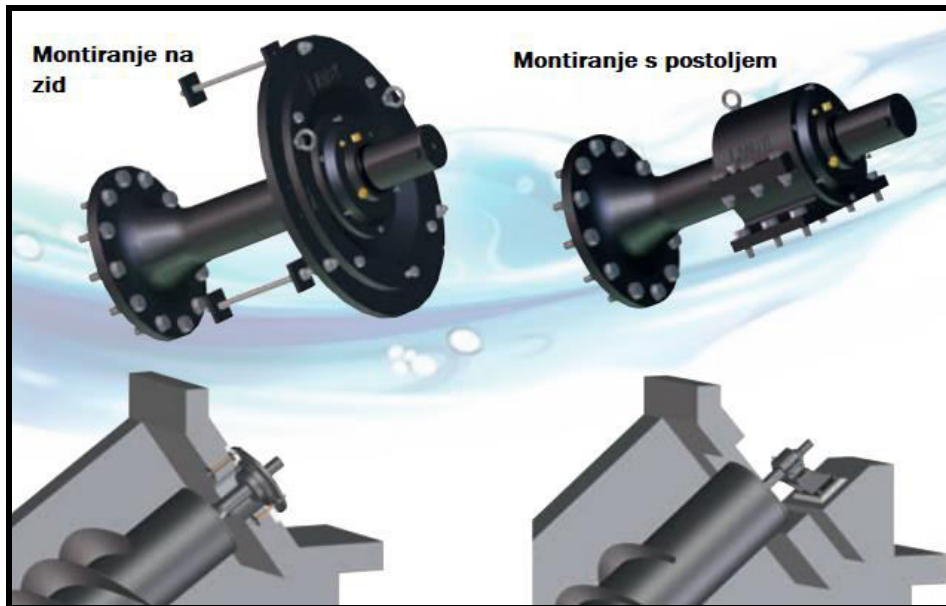
Ležajevi su bitna komponenta Arhimedove turbine. Turbina ima dva ležaja koja nose cijeli teret Arhimedovog vijka. Uz pravilan odabir ležajeva omogućeno je nesmetano okretanje turbine uz minimalne gubitke zbog trenja. Ležajevi trebaju moći podnijetistatičke i dinamičke nepravilnosti. Iako u radu neće biti obrađen odabir specifičnih ležajeva, prikazati će se koncepti ugradnje, održavanja i spomenuti će se osnovni zahtjevi koje ležajevi trebaju ispuniti.

Gornji ležajevi su posebno dizajnirani da podnesu aksijalnu i radijalnu silu, dok se obično koriste valjkasti ležajevi. Standardni gornji ležajevi montiraju se na postolje jer je njihova instalacija i prethodno poravnanje puno lakše nego kod gornjih ležajeva montiranih na zid. Na slici 5.15 prikazani su načini montiranja gornjeg ležaja. Za podmazivanje ležaja koriste se sustavi za samopodmazivanje, te se koriste ulja biljnog podrijetla kako bi se u slučaju izlivanja maziva spriječilo zagađenje rijeke.

Donji ležaj treba ispuniti uvjet vodonepropusnosti s obzirom na to da je tijekom rada 60% ležaja uronjeno pod vodom. Kao zaštita od prodora vode i prljavštine unutar kućišta ležaja nalaze se tri brtve koje zahtijevaju zamjenu svakih 10-15 godina.

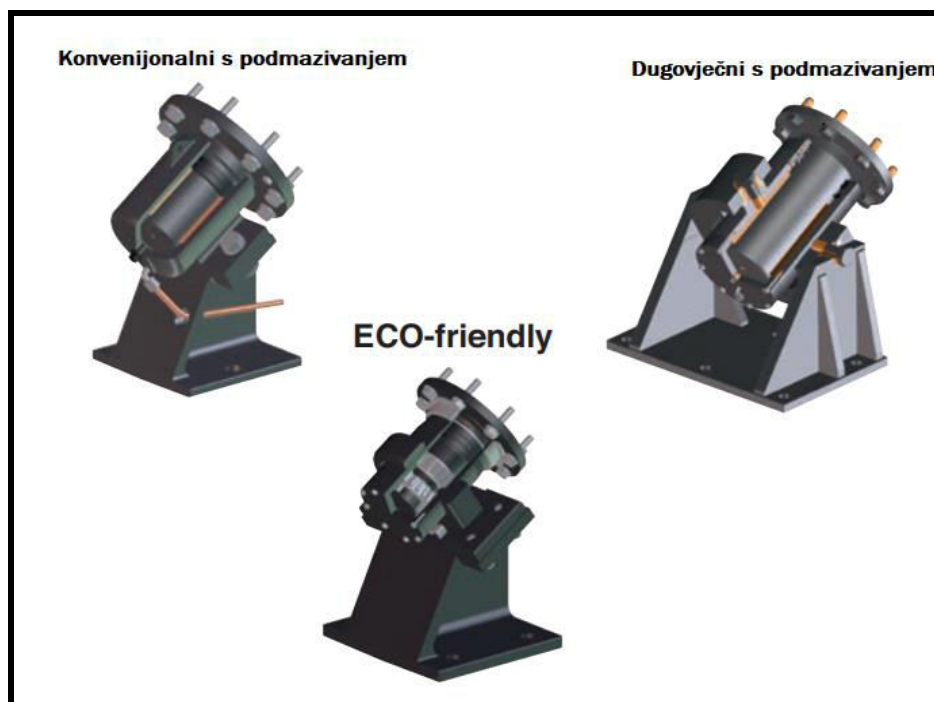
Pri odabiru je bitno da ležaj omogućuje gibanje duž osi vratila zbog mogućih promjena u duljini vijka. U ekstremnim slučajevima, pri rasponima temperatura od $\pm 50^\circ$, ako se uzme u obzir da je 20°C temperatura pri kojoj je turbina izrađena, duljina vijka može varirati i do \pm

0,575 mm po metru. Termička dilatacija utječe i na promjer turbine i također iznosi $\pm 0,575$ mm po metru, ali samo polovica tog iznosa utječe na razmak između korita i zavojnica.



Slika 5.15– Načini montiranja gornjeg ležaja [16]

Donji ležaj održava vijak poravnatim i održava točan razmak između vijka i korita koji se po potrebi može i podesiti. Najčešće korištene izvedbekućišta ležajeva prikazane su na slici 5.16.



Slika 5.16- Načini izvedbe donjeg ležaja [16]

„ECO-friendly“ izvedba kućištaležajeva podmazuje se metodom uljne kupke, sprječavajući kontakt maziva s tekućinom. Neke od prednosti ovih ležajeva uključuju jeftinu instalaciju, 3D poravnanje, te minimalno održavanje. Konvencionalni i dugotrajni ležajevi imaju slično vrijeme ugradnje i operativne troškove, dok dugotrajni ležajevi imaju dulji vijek trajanja zbog posebnog 3D poravnanja.

Nizozemska kompanija „Landustrie“ razvila je alarm za detekciju vode u ulju ležajeva, a kako bi se pojednostavnio postupak inspekcije ležajeva koji su uronjeni u vodi. Kada određena količina vode prođe u donji ležaj i zaprlja ulje unutar kućišta ležaja, oglasiti će se alarmni sustav. Ovim putem se smanjuje potreba za obavljanjem skupih pregleda donjeg ležaja.

6. Zaštita vijka od korozije

Zaštita od korozije je bitna stavka pri proizvodnji Arhimedovog vijka s obzirom na to da je vijak konstantno u dodiru s vodom. U praksi se koriste više različitih načina zaštite od korozije, kao što je cinčanje, bojanje ili korištenje nehrđajućeg čelika.

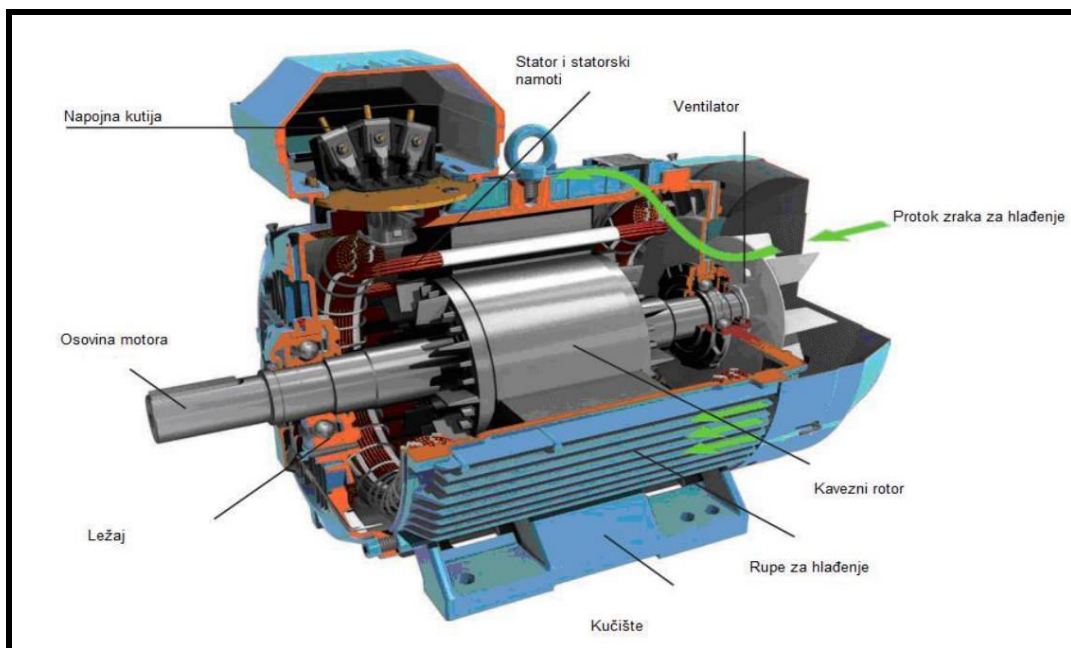
Korištenje nehrđajućeg čelika uvelike povećava troškove proizvodnje turbine i zbog toga se rijetko koristi.

Zaštita korozije prevlakama zahtjeva pažljivi odabir bojila te povećava troškove održavanja zbog potrebe za nanošenjem novog sloja boje u određenim vremenskim intervalima, ovisno o potrebi. Pri svakom novom premazu potrebno je pripremiti površinu. Najčešće se to provodi brušenjem, četkanjem, poliranjem ili pjeskarenjem.

Način zaštite koji se predlaže u ovom radu je vruće cinčanje, obzirom da se turbina nalazi u slatkoj, kemijski nezagađenoj vodi, nema potrebe za korištenjem skupljih metoda. Pocinčavanje je dobro poznata metoda zaštite metala od korozije. Najčešći način pocinčavanja metala je vruće pocinčavanje, koje uključuje uranjanje metala u cink na temperaturu od 450°C. Ovo je također jedna od najstarijih i najisplativijih metoda zaštite metala. U pravilu, pocinčavanje bi trebalo omogućiti zaštitu od korozije tijekom cijelog životnog vijeka turbine. Mogući problem može nastati u slučaju fizičkog oštećenja cinka, u tom slučaju korozija se podvlači ispod sloja cinka te se širi po površini vijka. Takva oštećenja jako je teško sanirati. Da bi se to spriječilo, na ulazu vode u turbinu potrebno je postaviti branik u obliku metalnih rešetaka koji će zaustaviti veće komade otpada koji se mogu naći u vodi.

7. Generator i mjenjačka kutija Arhimedove turbine

Za pretvorbu mehaničke energije u električnu koristiti će se alternator. U svrhu toga potrebno je povećati broj okretaja vijka multiplikatorom, odnosno, mjenjačkom kutijom. Pretvorba energije bila bi moguća i bez mjenjačke kutije, ali tada bi alternator bio velikih dimenzija. Primjer alternatora i njegovih dijelova prikazan je u presjeku na slici 7.1. Kao odabir koristiti će se alternator izlazne snage 55 kW.

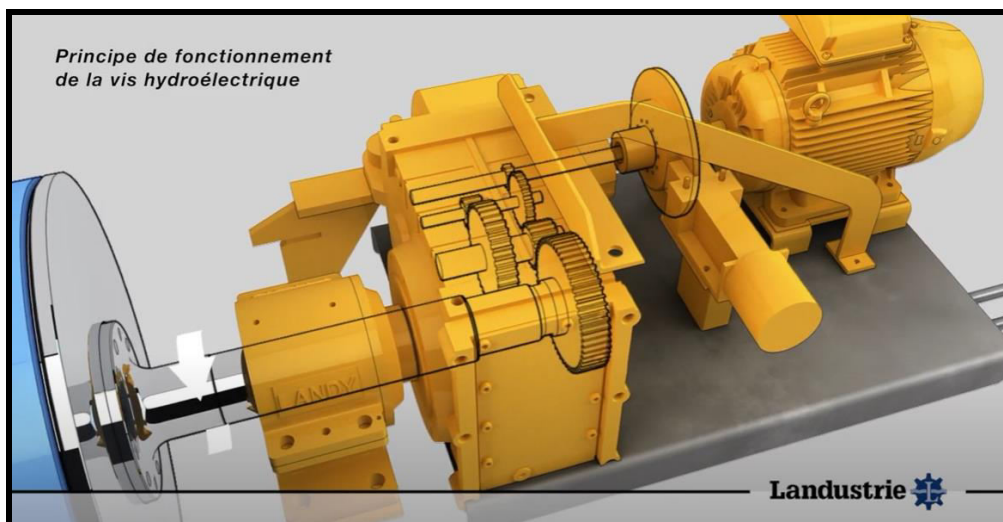


Slika 7.1– Presjek alternatora [17]

Alternator je vrsta električnog generatora koji pretvara mehaničku energiju u izmjeničnu struju. Većina alternatora koristi rotirajuće magnetsko polje s fiksnom armaturom zbog troškova i jednostavnosti. Povremeno se također može upotrijebiti rotirajuća armatura sa stacionarnim magnetskim poljem ili linearni alternator. Iako se u teoriji svaki AC električni generator može nazvati alternatorom, izraz se često odnosi na kompaktne rotirajuće strojeve koje pokreću motori s unutarnjim izgaranjem koji se mogu vidjeti u automobilima i drugim vozilima.

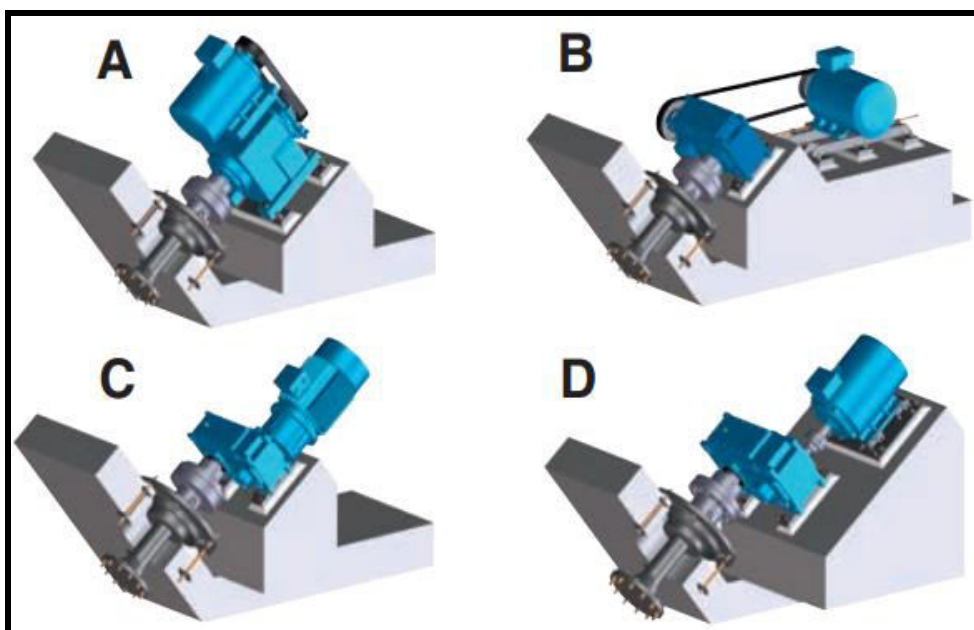
Za alternator izlazne snage $P = 55$ kW potrebna je brzina okretanja od 1600 okr/min. Kako bi se to omogućilo potrebno je ugraditi mjenjačku kutiju koja će povećati broj okretaja vratila Arhimedova vijka na potrebni iznos. Na slici 7.2 prikazana je shema mjenjačke kutije.

Rotacijsko gibanje s Arhimedova vijka prenosi se na mjenjačku kutiju preko posebno izrađenog vratila na kojem se na jednom kraju nalazi prirubnica pomoću koje se spaja s vijkom, a na drugoj strani se spaja s mjenjačkom kutijom. Navedeno vratilo je osim na uvijanje opterećeno i na savijanje, zato ga je potrebno pravilno dimenzionirati i termički obraditi što u ovom završnom radu nije obrađeno.



Slika 7.2– Prikaz mjenjačke kutije [18]

Veza između alternatora i mjenjačke kutije može biti izvedena na više načina. Dostupno je nekoliko rasporeda pogonskih jedinica koji ovise o lokalnim uvjetima, kao što je prikazano na slici 7.3.



Slika 7.3– Izvedbe spojeva između alternatora i mjenjačke kutije [16]

Raspored A i B imaju dodatni prijenos remena između mjenjača i motora. Motor je u opciji A na vrhu mjenjačke kutije, a u opciji B iza mjenjačke kutije. Izravna veza postoji u izvedbama C i D. Opcija C ima motor s prirubnicom dok je kod izvedbe D motor montiran do betonske podloge. Prednosti remenskog prijenosa su što se remenice mogu prilagođavati. To omogućuje korištenje standardiziranih mjenjačkih kutija što smanjuje troškove ulaganja. Kao najčešća izvedba prijenosa koristi se trostupanjski prijenos čelnicima koji može biti izveden u različitim omjerima. Odabir generatora i mjenjačke kutije ovisi o odabiru načina izvedbe spoja alternatora i mjenjačke kutije prikazanih na slici 7.3. Da bi se odabrao način izvedbe potrebno je prvo poznavati zahtjeve i mogućnosti za ugradnju na lokaciji instalacije, koji u ovom slučaju nisu poznati. Zbog navedenog razloga u ovom radu nisu odabrani konkretni alternator i mjenjačka kutija.

8. Odabir načina ugradnje turbine na potrebnu lokaciju

Veliki dio troškova postavljanja Arhimedove turbine odnosi se na građevinske radove na lokaciji ugradnje. Građevinski radovi mogu biti izvedeni na više načina ovisno o zahtjevima turbine i mogućnostima izvedbe radova na terenu. Na sljedećim slikama prikazani su neki od mogućih načina. Prvobitna istražena konfiguracija gradilišta prikazana na slici 8.1 koristi dugi ulazni transportni kanal od betona. Ovaj betonski transport je prepoznat kao značajna troškovna komponenta projekta.



Slika 8.1– Izvedba s betonskim kanalom za dotok vode do turbine [9]

Premještajući turbinu kako bi se iskoristila postojeća struktura brane u drugoj konfiguraciji prikazanoj na slici 8.2, zamijenjen je dugi ulazni transport iskopanim ispusnim kanalom. Investicijski troškovi navedenih konfiguracija značajno se razlikuju, pri čemu je drugo predložena izvedba znatno jeftinija.



Slika 8.2 – Izvedba s kraćim dotokom vode i s iskopima za ispuštanje vode [9]

Prethodne slike 8.1 i 8.2 nisu slike sa stvarne lokacije ugradnje nego su primjeri uzeti iz literature [9]. Na stvarnoj lokaciji ugradnje predviđena je izvedba slična izvedbi sa slike 8.2 iz razloga što se mogu iskoristiti neki od već postojećih konstrukcijskih elemenata u svrhu jednostavnije i jeftinije izgradnje. U ovom radu se neće ulaziti u detalje građevinskih radova jer isti ovise o raznim faktorima koje je teško predvidjeti bez detaljnije analize i planiranja na stvarnom mjestu ugradnje.

Uzvodno od vijka, potrebno je planirati izvedbu otvora za kontrolu volumnog protoka u postrojenje i pregrade za sprječavanje ulaska otpada u sustav. Na slici 8.3 prikazani su već postojeći otvori za kontrolu protoka vode koji se mogu iskoristiti kao ulaz za dotok vode do turbine, uz potrebne dodatne građevinske radove.

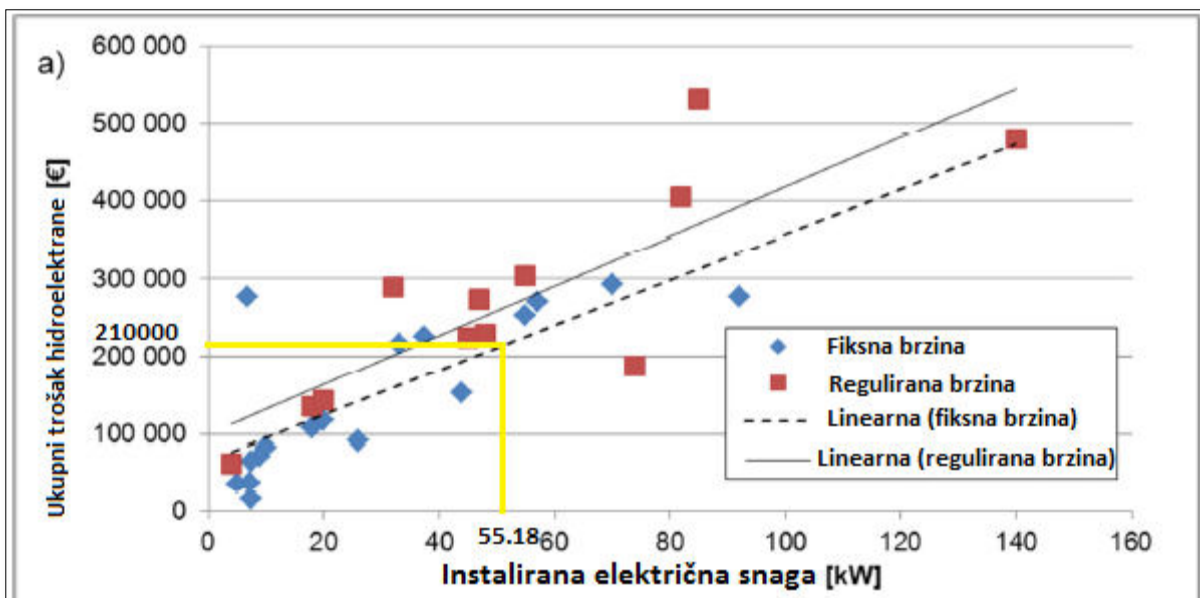
Potrebno je osigurati evakuiranje vode i sušenje vijka za potrebe pregleda i održavanja ležajeva. Sav protok trebao bi se moći zaustaviti pomoću otvora. Također je potrebno osigurati da su sve električne komponente zaštićene od vode i vlage. To se može postići podizanjem generatora na određenu visinu iznad vode ili brtvljenjem elektrane.



Slika 8.3– Otvori za kontrolu protoka vode

9. Izračun isplativosti

U literaturi [19] ispitana su operativna iskustva korisnika male hidroelektrane s Arhimedovom turbinom i područje primjenjivosti u šest europskih zemalja (Austrija, Italija, Njemačka, Ujedinjeno Kraljevstvo, Irska i Švicarska). Korisnicima je dostavljen upitnik o dizajnu postrojenja, građevinskim radovima i puštanju u pogon. Također je dostavljen i upitnik o iznosima za svaku kategoriju troškova i godišnjoj proizvodnji električne energije. Pomoću tog upitnika izrađen je graf s regresijskom krivuljom koji je prikazan na slici 9.1. Prikazani su ukupni troškovi ulaganja kao funkcija izlazne električne snage sustava. Na pojedinačne troškove značajno utječu lokalni uvjeti i okolnosti na lokaciji ugradnje što čini prikazane vrijednosti uvjetno pouzdanima. Graf prikazuje regresijske krivulje za troškove fiksnih i promjenjivih sustava kontrole brzine.



Slika 9.1– Ukupni troškovi ulaganja [19]

Prema grafu na slici 9.1 proizlazi procijenjeni investicijski trošak koji će se koristiti za izračun isplativosti projekta. Troškovi održavanja i troškovi priključka na gradsku mrežunisu uzeti u obzir u ovoj analizi. Kao otkupna cijena proizvedenog kilovat sata električne energije uzeti su podaci prema tarifama u Portugalu, koja iznosi 0,07€/kWh (jesensko razdoblje, 2022.). Ako se uzme u obzir da je protok vode kroz turbinu uvijek konstantan, osim za vrijeme suše koja u prosjeku traje 15 dana u godini, proizlaze rezultati prikazani u tablici 9.2.

Tablica 5.4.1 - Izračun povrata investicije

Snaga sustava	55	kW
Specifični investicijski trošak	3.818,18	€/kW
Ukupni iznos investicije	210.000	€
Proizvedena energija	456.890	kWh/god
Otkupna cijena	0,07	€/kWh
Godišnji prihodi	31.982,3	€/kWh
Povrat investicije	6,69	godina

Važno je napomenuti da je izračunati period povrata investicije procijenjena vrijednost koja ovisi o mnogobrojnim parametrima, kao što su na primjer varijabilnost i specifičnosti građevinskih radova na lokaciji izvedbe male hidroelektrane, varijabilnost raspoloživog vodenog toka, trošak prijenosa električne energije do potrošača, i tako dalje.

10. Zaključak

U radu je prikazan pojednostavljeni postupak dimenzioniranja male hidroelektrane koja koristi Arhimedovu turbinu u svrhu opskrbe malog naselje s električnom energijom. Prikazan je postupak dimenzioniranja vijka Arhimedove turbine s pripadajućim proračunima, te su predloženi načini izrade vijka i korita, odabir vrste generatora i mjenjačke kutije, odabir ležajeva te način izvedbe građevinskih radova.

Objašnjen je način održavanja i zaštite vijka u cilju postizanja željenog vijeka trajanja. Na osnovu raspoloživih podataka o padu i volumnom protoku, odabrana je Arhimedova turbina nazivne snage oko 55 kW. S obzirom da se radi o relativno novoj tehnologiji sa specifičnostima izvedbe i izgradnje, pripadajući proračuni bazirani su na iskustvima istraživača koja proizlaze iz analiza rada pumpi s Arhimedovim vijkom. Neke od veličina, kao što su kut instalacije i broj lopatica, odabrane su na osnovu preporuka i iskustva proizvođača i znanstvenika, odnosno nemaju konkretnu matematičku formulu koja bi egzaktno odredila njihove vrijednosti. Navedene veličine odabrane su u cilju maksimiziranja vrijednosti iskoristivosti sustava, koja se u ovom slučaju predviđa od 70 do 75%.

S obzirom na raspoloživost vodotoka i snagu turbine, procijenjena je godišnja proizvodnja električne energije u iznosu od 456,9 MWh. Na osnovu iskustvenih podataka izvršena je procjena investicijskih troškova izvedbe male hidroelektrane s Arhimedovom turbinom u iznosu od 210.000 €, odnosno, specifičnog investicijskog troška od 3,82 €/W. Konačno, pojednostavljenom ekonomskom analizom, proizašla je procjena povrata investicije od oko 6,7 godina.

Literatura

1. SpaansBabcockbv, ArchimedeanScrew Turbine. [Online]. Dostupno na: http://www.spaansbabcock.com/wp-content/uploads/2017/03/SB15009_Screw_Turbine_EN_LR.pdf
2. Archimedes Water Pump, Dr. KeyurPatel. [Online]. dostupno na: <https://physicsbridgecourse.blogspot.com/2014/07/archimedes-water-pump.html>
3. YoosefDoost A., David Lubitz W. : ArchimedesScrewTurbines: A SustainableDevelopment Solution for Green andRenewableEnergy Generation—A ReviewofPotentialandDesign Procedures, str 5., objavljeno: 8 September 2020
4. Rohmer J., Knittel D., Sturtzer G., Flieller D., Renaud J.: ModelingandexperimentalresultsofanArchimedesscrew turbine, str. 137, objavljeno:9 March 2016
5. HydropowerScrewTurbines, dostupno na: https://www.youtube.com/watch?v=1Nm0aaCZ4iY&ab_channel=LexdePrie%C3%ABlle
6. Müller G., Senior J. : SimplifiedtheoryofArchimedescsrews, Journal ofHydraulic Research, 47:5, 666-669, objavljeno 2009. Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.3826/jhr.2009.3475>
7. Charisiadis C. : Anintroductorypresentation to the „ ArchimedeanScrew“ as a LowHeadHydropower Generator, objavljeno:2015. Dostupno na: <http://www.energiazero.org/idroelettrico/archimede/Archimedean%20Screw%20Turbine%20book.pdf>
8. Dragomirescu A.: Design considerations for anArchimedescsrewhydro turbine, objavljeno: 2021, dostupno na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/664/1/012034/pdf>
9. Nagel G 1968 ArchimedeanScrewPumpHandbook (SchwäbischGmünd: RITZ-Pumpenfabrik OHG)
10. M Mueller : optimizationofArchimedesScrew for Use inHydroelectricProjects, objavljeno 2020. Dostupno na: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1608698>
11. Rorres C 2000 Journal ofHydraulicEngineering 126 72–80
12. Lyons M W K 2014 LabTestingandModelingofArchimedesScrewTurbinesMaster'sthesis University ofGuelph. Guelph, Canada. Dostupno na: https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-OGU-8647&op=pdf&app=Library&oclc_number=1033224946

13. New Century Forging Co., Ltd. Dostupno na: <https://www.ncmflange.com/carbon-steel-flange/58455410.html>
14. Hi-Tech Metal & Tubes, dostupno na: <https://www.hitechoverseas.com/din-2458-stainless-steel-pipe.html>
15. Nauka o čvrstoći - Bože Plazibat, Ado Matoković, Vladimir Vetma.pdf. Dostupno na: https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Nauka%20o%20%C4%8Dvrsto%C4%87i%20-%20Bo%C5%BEe%20Plazibat%2C%20Ado%20Matokovi%C4%87%2C%20Vladimir%20Vetma.pdf
16. Rorres C., Nuernbergki D., Hrding S. 2018, ExperimentalevaluationofadvancedArchimedeshydrodynamicsscrewgeometries. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/482709159/Straalsund-JHE-2018>
17. Spaans-Babcock-Screw-Pumps-EN, dostupno na: <https://www.spaansbabcock.com/wp-content/uploads/2018/10/Spaans-Babcock-Screw-Pumps-EN.pdf>
18. LANDY_Archimedes_Screw_Pumps, dostupno na: https://www.landustrie.nl/fileadmin/user_upload/LANDY_Archimedes_Screw_Pumps.pdf
19. Deni M., 2018. Izrada nastavne makete trofaznog asinkronog kaveznog motora za proučavanje ekscentričnosti, dostupno na: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A2106/datastream/PDF/view>
20. Preuzeto s videa: https://www.youtube.com/watch?v=QpVhWmp-oXE&ab_channel=Landustrie
21. Lashofer A., Hawle W., Kappel I., Kaltenberger F.: State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/281347248_State_of_technology_and_design_guidelines_for_the_Archimedes_screw_turbine
22. Stranica: <https://www.renewablesfirst.co.uk/project-blog/archimedean-hydro-turbines/>

Prilog

