
RAZISKOVALNO DELO

Vpliv števila lopatic pri navpičnem vodnem kolesu na kotno hitrost in izhodno moč.

Avtor: Domen Osterman

Mentor: mag. Oliver Ogris

Tehnika ali tehnologija

Gimnazija Kranj

Luže, 2025

Kazalo vsebine

Povzetek / Summary	2
I. Uvod	3
II. Teoretično ozadje	5
III. Metodologija	6
IV. Rezultati in analiza	10
V. Evalvacija	18
VI. Zaključek	19
VII. Reference	20

Povzetek / Summary

Ta raziskava preučuje vpliv števila kril na navpičnem vodnem kolesu na kotno hitrost in izhodno moč. Avtor je postavil hipotezo, da bi več kril povzročilo večji navor in večjo kotno hitrost ter da bi večje razmerje hitrosti konice povzročilo večjo moč, ki bi jo kolo proizvedlo. Avtor je izvedel poskus, da bi preveril te hipoteze, in ugotovil, da večje število kril povzroči večjo hitrost vrtenja in večjo moč, ki jo proizvaja kolo. Avtor je tudi ugotovil, da je bila največja moč kolesa dosežena pri 0,2 TSR (razmerje hitrosti konice). Avtor je zaključil, da so ugotovitve te raziskave uporabne za proizvodnjo električne energije v gospodinjstvih in da bi moral posameznik, ki želi kar najboljše izkoristiti vodno kolo, uporabiti kolo z velikim številom lopatic in zobnikov, ki bi zaustavljali kolo pri razmerju hitrosti konice 0,2.

This research investigates the effect of the number of wings on a vertical water wheel on the angular speed and power output. The author hypothesized that more wings would lead to greater torque and greater angular velocity, and that the greater the tip speed ratio, the greater the power the wheel would generate. The author conducted an experiment to test these hypotheses, and found that the greater the number of wings, the greater the speed of spinning and the greater the power produced by the wheel. The author also found that the peak power performance of the wheel was achieved at 0.2 TSR (tip speed ratio). The author concluded that the findings of this research are useful for home electricity generation, and that a person who wants to get the most out of a water wheel should use a wheel with a large number of blades and gears that would stop the wheel at a tip speed ratio of 0.2.

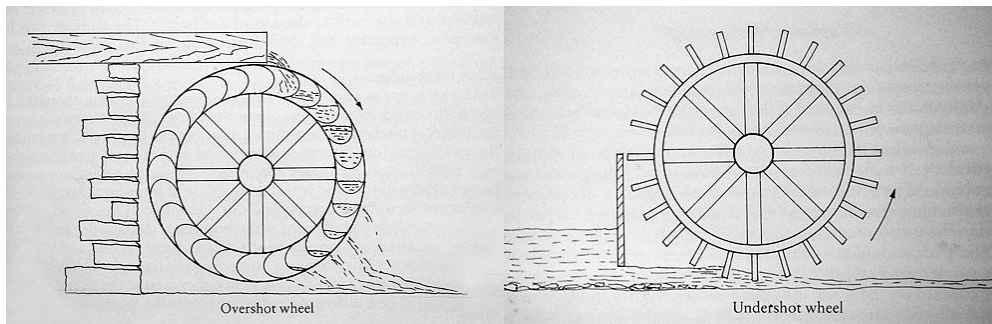
I. Uvod

V Sloveniji imamo bogato zgodovino uporabe energije iz vode. V preteklosti so se vodna kolesa uporabljala za ustvarjanje moči za težko delo. Voda potiska navpično kolo z več lopaticami, tako da se ta vrtili okoli osi, povezane s sistemom zobnikov, ki prenaša proizvedeno moč na potrebno napravo. Naši predniki so gradili mlinska kolesa na rekah in celo na dovolj velikih potokih. Mlini, ki so jih uporabljali, so bili zasnovani tako, da so pretvarjali energijo mlinskega kolesa za vrtenje mlinskega kamna in mletje semen v moko.

Poznamo različne tipe mlinov. Najpogosteje uporabljeni po vsem svetu so kolo, ki se polni s sredine (*breastshot wheel*), kolo s curkom z vrha (*overshot wheel*) in kolo, ki ga voda potiska od spodaj (*undershot wheel*). *Breastshot wheel* je kolo opremljeno z ukrivljenimi lopaticami, da se voda polni vanje. Tok je usmerjen tako, da se kolo polni s sredinskega položaja, voda pa uporablja energijo toka in tudi potencialno energijo vode, ujete v lopaticah. Podobna načela uporablja *overshot wheel*, kjer so lopatice prav tako ukrivljene, vendar voda teče na kolo od zgoraj in polni lopatice, podobne skodelicam, tako da energija vodnega toka in gravitacija skupaj prispevata za večjo izhodno moč. Najmanj učinkovito je kolo *undershot wheel*, kjer voda teče od spodaj na kolo in potiska ravne lopatice, tako da se kolo vrtili. Ta tip kolesa je pogost zaradi svoje preprostosti in zlasti zato, ker ga je mogoče postaviti v mirno široko reko. *Overshot wheel* tip koles so pogosteje prisotna v hribovskih naseljih, kjer tečejo majhni potoki. Vodni tok je usmerjen v kanal, narejen samo za vodno kolo. Največji in še delujoči mlin v Sloveniji se imenuje Babičev mlin in leži na reki Muri. Ta mlin ima široko kolo, ki plava na vodi in ga poriva od spodaj. Objekt z mlinskim kamnom za moko je postavljen na kopnem in preko gredi povezan na mlin, ki proizvaja energijo.

Slika 1

Tipi navpičnih vodnih koles



Opomba. Iz Watermill Machinery [Photograph], avtor Neville. J, 2003

Slika 2

Babičev mlin



Opomba. Iz Visit Veržej, n.d.

Raziskovalno vprašanje: Kako število lopatic na vodnem kolesu vpliva na kotno hitrost in izhodno moč, ki deluje na os pri konstantnem pretoku vode?

Pri katerem TSR bo dosežen največji izkoristek moči kolesa?

Hipoteza 1: Do določene mere bo več lopatic vodilo do večjega navora in večje kotne hitrosti.

Hipoteza 2: Razmerje bo med 0 in 1, maksimalni koeficient moči pa bo ugotovljen med tema dvema vrednostma, saj je pri obeh vrednostih TSR koeficient moči 0.

Obseg in omejitve: V poskusu sem testiral samo 3, 4, 6, 8 in 12 lopatic. Te lopatice so pod koti, ki omogočajo uporabo istih izrezov. Trenje na osi in pretok zraka se v tem eksperimentu zanemari.

II. Teoretično ozadje

- **Kotna hitrost:** je definirana kot sprememba kota v času. Celoten obrat kroga je enak 2π , čas za 1 obrat pa je perioda obhoda, označena s t_0 . Enačba za kotno hitrost je: $\omega = \frac{\text{opisani kot}}{\text{porabljen čas}} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ (Tsokos, 2023). Za izračun kotne hitrosti bi uporabili celoten obrat kolesa (2π) in periodo (t_0).
- **Moč:** natančneje opredelimo kot fizikalno količino, ki opisuje hitrost, s katero se delo opravlja ali s katero se energija pretvarja iz ene oblike v drugo. Izraža se v vatih (W) in je ključni koncept v fiziki in inženirstvu, ki nam omogoča razumevanje in merjenje učinkovitosti različnih sistemov. $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$ or $P = \frac{F\Delta x}{\Delta t} = Fv$ (Tsokos, 2023) sta obe enačbi za moč. V tej nalogi je uporabljena kotna hitrost, zato enačbo preoblikujemo v: $P = Fr \cdot \frac{v}{r} = \tau \cdot \omega$.
- **Navor:** je vektorska količina s smerjo, ki deluje okoli vrtilišča. Rezultanta sil vedno deluje v smeri gibanja in pravokotno na palico. Izračuna se z enačbo: $T = F \cdot L \cdot \cos\theta$ (NASA Glenn Research Center, 2021). Navor se bo uporabil za izračun izhodne moči vodnega kolesa.
- **Dinamika tekočin:** Dinamika tekočin opisuje tok vode. Masa in energija se ohranjata, uporablja pa se drugi Newtonov zakon (Wendt, 2009). Danes se za reprezentativne podatke uporabljajo računalniški programi za računalniško dinamiko tekočin (CFD - computational fluid dynamics).
- **Trenje:** To je sila med dvema površinama, ki drsita ena ob drugi, in deluje v negativni smeri gibanja. V eksperimentu bi vplivalo na nižjo izmerjeno izhodno moč, ker bi se del moči izgubil zaradi trenja. Poskušal sem se izogniti velikemu trenju z dobro naoljenimi ležaji, da bi tekli gladko in z minimalnim trenjem.

III. Metodologija

Postavitev eksperimenta:

Poskus je bil izveden na modelu vodnega mlina. Les je bil natančno razrezan z laserskim rezalnikom CNC. Laserski rezi zagotavljajo natančne dimenzije kosov, tako da so bila krila vsa enake velikosti in so bili vsi koti enaki. Kolo je bilo pritrjeno na kovinsko palico, da se prepreči upogibanje in da se kolo pritrdi na želeni položaj. Na stojalu za mlinsko kolo so ležaji, ki omogočajo prosto gibanje kolesa. Kanal, ki sem ga naredil, je bil postavljen pod kolo pod kotom $1,5^\circ$, tako da je vodni tok tekkel v želeni smeri. Voda je bila najprej prečrpana v prelivno vedro. Od tam je voda vstopila v 2,5 m dolg kanal, kar je omogočilo, da je voda ustvarila laminarni tok. Mlin je bil postavljen na razdaljo 2,2 m od vedra, kjer je bil tok laminaren in konec ni mogel povzročiti nobenega učinka. Na koncu osi vrtenja je bil privezan navoj, tako da se je med vrtenjem kolesa navoj z bremenom na koncu ovil okoli palice. S tem je bila izmerjena izhodna moč. Eno od kril je bilo označeno s trakom, tako da bi lahko izmerili čas na vrtljaj in s tem kotno hitrost. Čas je bil merjen s kamero telefona, ki je snemala pri 60 FPS.

Neodvisna spremenljivka:

- **Prvi del:** Število lopatic
- **Drugi del:** Razmerje hitrosti konice lopatice (Tip speed ratio - TSR); razmerje med hitrostjo konice lopatice in hitrostjo vode, ki poganja kolo (povečanje mase bremena vpliva na povečanje navora – τ , večji navor pa vpliva na nižji TSR).

Odvisne spremenljivke:

- **Prvi del:**
 - Kotna hitrost; merjeno s snemanjem 40 vrtljajev kolesa in odčitavanjem časa. Po izračunu periode, ki smo jo izračunali tako, da smo čas delili s številom vrtljajev in nato izračunali kotno hitrost.
 - Izhodna moč; merjeno kot čas, potreben za dvig znane mase bremena za znano število vrtljajev. Navoj se je pri dvigovanju bremena 40-krat ovil okoli palice. Masa bremena za začetne meritve je bila konstantna ($0,030 \text{ kg} \pm 0,001 \text{ kg}$), kar je vodilo do konstantnega navora.
- **Drugi del:**
 - Izhodna moč; merjena kot čas, potreben za dvig znane mase bremena za znano število vrtljajev ($N=40$) in spreminjanje mase bremena $P = \frac{mg\Delta h}{\Delta t} = mg\tau$

Kontrolirane spremenljivke:

- Pretok vode; pretok vode se je vzdrževal konstanten, saj je črpalka dovajala vodo v vedro s konstantno hitrostjo, to je bilo odrezano, da se zagotovi enaka količina vode, ki teče naprej v kanal. Z uporabo dolgega kanala z gladko površino je bil tok laminaren.
- Nivo vode; nivo vode pri mlinu je bil kontroliran tako, da je bilo območje lopatice enako potopljeno pod vodo pri katerem koli številu izmerjenih lopatic.

- Dimenzije in material kanala; uporabljen kanal je bil enak pri vsakem poskusu. Uporabljen material je bil vodoodporen les, tako da les ne bi absorbiral vode in se razširil, zato se širina in višina nista spreminjali skozi poskus. Ta les ima gladko površino, ki omogoča laminarni tok, potreben za natančne meritve.
- Površina lopatic; vsaka lopatica je bila natančno izrezana z CNC laserskim strojem, vse v isti seriji iz iste lesene plošče. Vse lopatice so bile dobro pritisnjene v zarezo, tako da so bile vse enako potopljene pod vodo.
- ΔH (glej sliko 3): vzdrževal sem stalno razliko v višini, da bi zagotovil konstanten pretok vode, saj je $\phi_V = A \cdot v$, kjer je ϕ_V prostorninski pretok, A prečni prerez kanala in v hitrost vode (ES Systems, 2021). V je funkcija ΔH in igra ključno vlogo.
- Masa bremena; breme (z maso $30 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$), ki ga je mlin dvigoval, je bilo vedno enako, tako da je bilo mogoče primerjati izhodno moč.
- Kot med vsako lopatico; rezi, pripravljeni za pritrditev lopatic, so bili vsi pod kotom 15° , natančno narisani v programu in nato izrezani na CNC laserskem stroju. Za vsako meritev so bile lopatice razporejene simetrično, tako da se je kolo vrtelo z enako hitrostjo pri katerem koli kotu.
- Masa bremena; breme (z maso $30 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$), ki ga je mlin dvigoval, je bilo vedno enako, da lahko primerjamo izhodno moč.
- Število obratov; kolo je bilo vsakič merjeno 40 obratov. Pri obremenjenem kolesu je pri natanko 40 obratih kolo vrtelo s konstantno hitrostjo in se je nit ovila do prave višine. Ko ni bilo obremenjeno, je bilo 40 obratov pravo število obratov za zmanjšanje napake pri 1 obratu in možno meriti.
- Gostota vode; temperatura je bila izmerjena 10°C , tako da je gostota $0,99975 \text{ kg/m}^3$ (U.S. Geological Survey, n.d.).
- Število lopatic: V prvem delu so bile lopatice preštete in simetrično nameščene na kolo, v drugem delu so bile vse meritve opravljene na kolesu z 12 lopaticami.
- Navori zaradi trenja ležajev in trenja zraka so zanemarljivi.

Postopek:

1. Priprava poskusa; dovod vode v vedro, od koder kanal vodi vodo do mlina.
2. Privežite nit na konec osi. Nit mora biti daljša od razdalje, ki mora biti večja od višine od tal do osi, tako da je mogoče pri merjenju brez bremena nit držati v roki in nato spustiti.
3. Izmerite čas vrtenja (t_0), ko je mlin brez bremena, z uporabo telefonske kamere pri 60 sličic na sekundo (FPS), posnemite 40 vrtljajev kolesa, tako da je mogoče izračunati čas za 1 vrtljaj.
4. Po snemanju časa spustite nit iz roke, tako da se začne ovijati okoli osi. Spet s posnetkom bo bil izmerjen čas, potreben za dvig bremena.
5. Po vseh meritvah so bili posnetki uvoženi v program za urejanje videa, kjer je bilo mogoče šteti posamezne sličice. Iz videa je bilo mogoče natančno določiti, kdaj se je breme začelo dvigovati in kdaj je doseglo končno višino. Število sličic med začetno in končno točko je bilo deljeno s 60 (snemal sem pri 60 FPS) in tako izračunal čas v sekundah.

6. Za čas vrtenja (potrebna vrednost za izračun kotne hitrosti) je bil posnetek vnesen v program za urejanje videa in prešteto število vrtljajev. Pomembno je, da se čas ustavi, ko je kolo v istem položaju kot na začetku. Spet z istim postopkom pretvorite število sličic v sekunde. Čas za določeno število vrtljajev je treba deliti s tem številom in to nam da čas na vrtljaj.
7. Za drugi del poskusa je bilo uporabljeno fiksno število lopatic (12) in spreminjanje mase bremena. Masa je bila spremenjena s skrbnim tehtanjem peska v vrečki.

Zbiranje podatkov:

Podatki so bili zbrani s snemanjem videa in nato so bile štete sličice. Tako je bila vzpostavljena natančnost v času. Še posebej za čas vrtenja je bil video ustavljen točno na istem položaju in vrtljaji so bili skrbno prešteti. Za vsako število kril so bili izvedeni 3 poskusi. Število poskusov je dovolj veliko za izračun povprečja in napake. Večje število poskusov ni potrebno, ker so bile vse kontrolne spremenljivke dobro nadzorovane, zato so bile razlike majhne.

Sistematične napake:

- Trenje; trenje v osi mlinskega kolesa v ležajih vodi do sistemske podcenjenosti izhodne moči mlina. Trenje bi lahko bilo večje pri višji hitrosti.
- Konsistentnost pretoka vode; če voda ni bila črpana dovolj hitro, mehanizem prelivanja ni bil popolnoma konsistenten, kar je povzročilo razlike v hitrosti pretoka vode.
- Razlike v obliki lopatic; tudi laser ne naredi popolnoma ravnega navpičnega reza v 8 mm debel les, kar povzroča razlike med lopaticami. Razlike v površini lopatic bi lahko povzročile večji pritisk vode na njo in neenakomerno vrtenje.

Naključne napake:

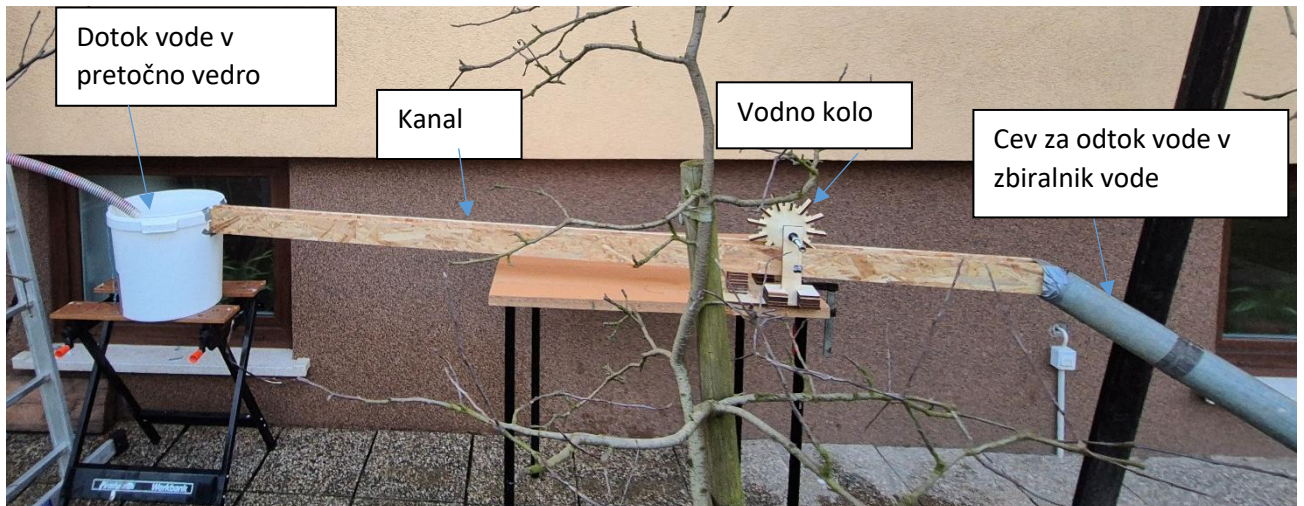
- Nihanja pretoka vode: Turbulenca v pretoku vode lahko povzroči naključna nihanja sile, ki deluje na mlinsko kolo. Čeprav je bil pretok pričakovan laminaren, lahko manjše nepredvidljive spremembe v tlaku dovoda vode povzročijo tudi naključna nihanja pretoka.
- Merilne napake: Odčitavanje časa, zlasti pri dvigovanju bremena. Težko je bilo ugotoviti, kdaj se je breme začelo dvigovati. Tudi kamera bi lahko preskočila sličico in s prostim očesom napake ne bi opazili.
- Nihanja trenja osi: Kljub mazanju lahko pride do manjših, naključnih nihanj trenja osi.

Postavitev poskusa

Poskus sem v celoti zasnoval sam, celo kanal sem naredil sam. Kolo je bilo narejeno s pomočjo prijatelja, vendar sem izris pripravil jaz.

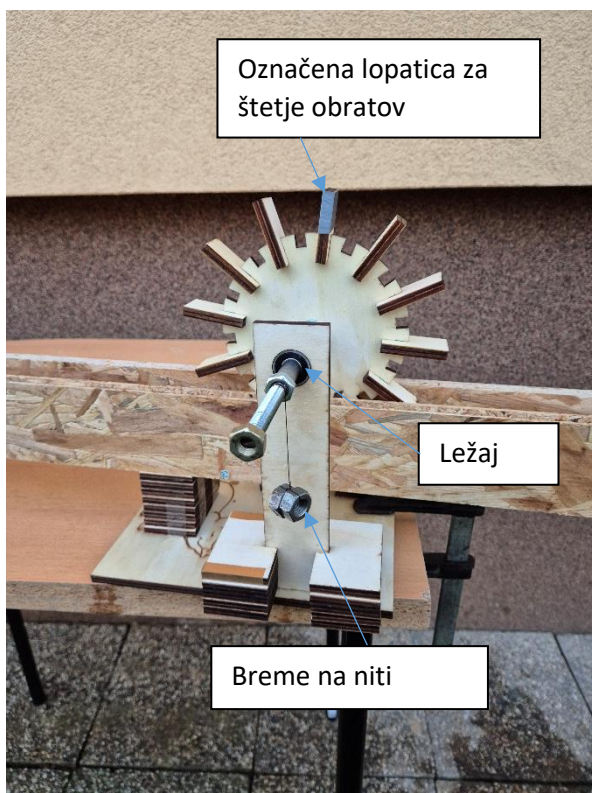
Slika 3

Postavitev poskusa



Slika 4

Postavitev kolesa



IV. Rezultati in analiza

Predstavitev podatkov:

Vsi neobdelani podatki so predstavljeni v spodnji tabeli. Za vsako poskusno meritev je označen čas, izmerjen za 40 vrtljajev kolesa. Čas je bil izmerjen s štetjem sličic, ko je kamera snemala video s 60 FPS. To pomeni, da ima meritev časa napako 0,05 s. Nato je bil čas za 1 vrtljaj (t_0) izračunan z uporabo formule $t_0 = \frac{(\text{čas } 40 \text{ vrtljajev})}{40}$. V zadnjem stolpcu je predstavljen čas, potreben za dvig bremena (t_{dvig}).

Tabela 1

Podatki za meritve časa neobremenjenega kolesa.

Število lopatic	Številka poskusa	Čas za 40 obratov T (s) ± 0,05s	Perioda 1 obrata t_0 (s) ± 0,01s
3	1	51,72	1,29
	2	51,32	1,28
	3	51,00	1,28
4	1	48,00	1,20
	2	48,32	1,21
	3	48,56	1,21
6	1	46,20	1,16
	2	46,40	1,16
	3	46,20	1,16
8	1	46,52	1,16
	2	46,52	1,16
	3	46,48	1,16
12	1	45,96	1,15
	2	45,88	1,15
	3	45,52	1,14

Tabela 2

Podatki za čas dviga bremena z maso 0,030kg ± 0,001kg za izračun moči.

Število lopatic	Številka poskusa	Čs dviga bremena 116,5cm ± 0,1cm visoko t_{dvig} (s) ± 0,05s
3	1	60,48
	2	61,02
	3	61,25
4	1	53,58
	2	54,03
	3	53,28
6	1	51,07
	2	51,24
	3	51,32
8	1	51,07
	2	51,04
	3	51,07
12	1	50,11
	2	48,27
	3	48,36

V spodnji tabeli so predstavljeni podatki iz zgornjih tabel s povprečnimi vrednostmi t_0 in $t_{d\text{vig}}$ ter njihovimi napakami. Iz teh podatkov sta bili izračunani kotna hitrost in moč. Tabela je razdeljena na dva dela za boljše razumevanje, kateri podatki se nanašajo na kotno hitrost in kateri na izračun moči. Kotna hitrost je bila izračunana z enačbo: $\omega = \frac{2\pi}{t_0}$, kjer ω predstavlja kotno hitrost, t_0 predstavlja periodo 1 obrata, kot 2π pa je bil uporabljen, ker predstavlja en celoten obrat krožnega mlina. Moč je izračunana kot $P = \omega\tau$.

Tabela 3

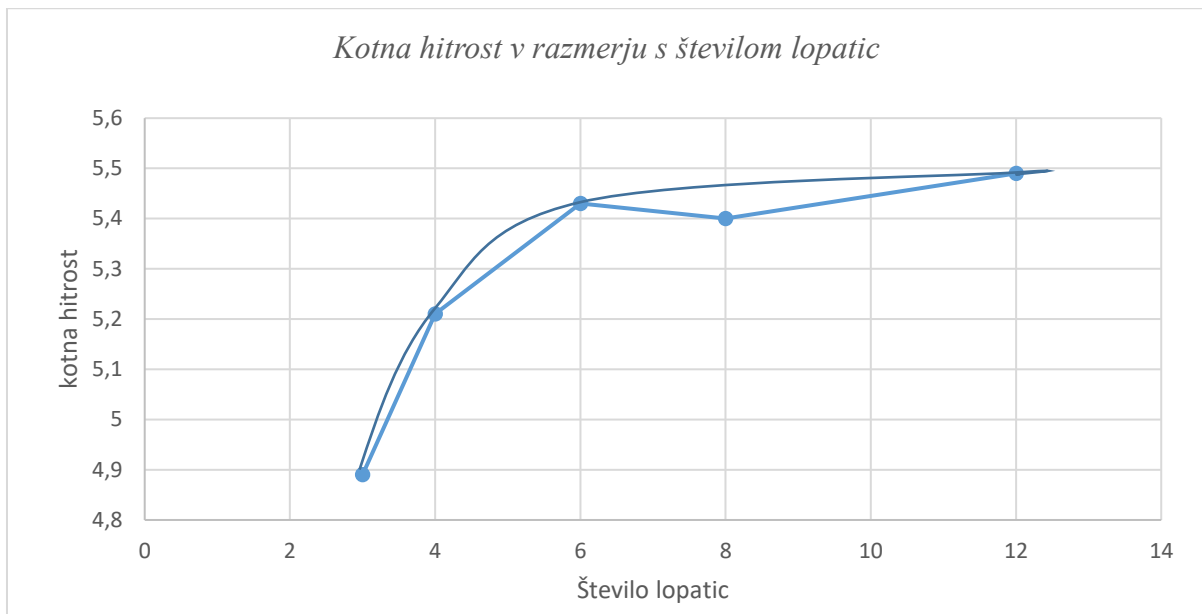
Povprečne vrednosti in izračunane vrednosti za kotno hitrost in moč.

Število lopatic	Neobremenjeno kolo		0,030kg ± 0,001kg breme	
	Povprečni t_0 (s) ± 0,01	Kotna hitrost (rad/s) ± 0,01	Povprečni $t_{d\text{vig}}$ (s) ± 0,01	Moč (mW) ± 0,01
3	1,28	4,89	60,92	6,07
4	1,21	5,21	53,63	6,90
6	1,16	5,43	51,21	7,22
8	1,16	5,40	51,06	7,24
12	1,15	5,49	48,91	7,56

Podatki iz tabel so bili predstavljeni v grafih za boljšo interpretacijo podatkov. Trend je viden v obeh grafih. Ker ne obstaja specifična formula, ki bi opisovala povezavo med številom lopatic in kotno hitrostjo, niti med številom lopatic in izhodno močjo, so bili trendi narisani v Excelu. V spodnjih grafih so vidni trendi, negotovosti pa so premajhne, da bi jih bilo mogoče videti v grafih.

Graf 1

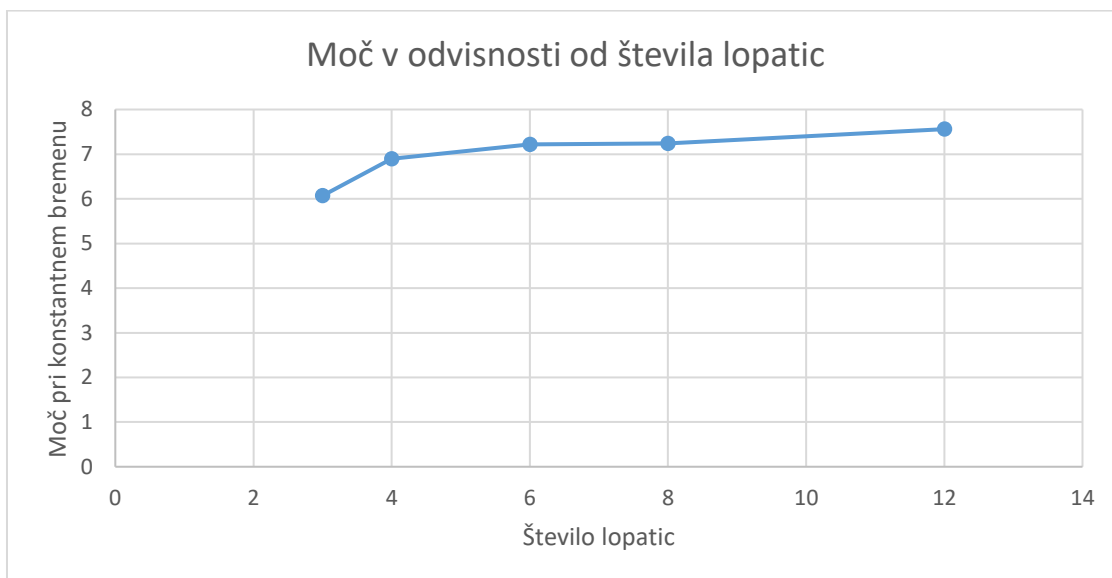
Graf kotne hitrosti v odvisnosti od števila lopatic



Opomba. Napake niso vidne zaradi majhnih vrednosti, ker so pike večje od napak.

Graf 2

Graf izhodne moči v odvisnosti od števila lopatic



Opomba. Napake niso vidne zaradi majhnih vrednosti, ker so pike večje od napak.

Analiza trendov:

Trend kaže pozitivno korelacijo, saj se koeficient moči povečuje s številom lopatic. Prva najvišja učinkovitost je vidna pri 6 lopaticah, druga pa pri 12 lopaticah. Zdi se, da trend pri 12 lopaticah preneha naraščati, torej je dosežena nasičenost. V primeru mojega vodnega mlina je

bilo optimalno število 2,5 potopljenih lopatic v vodi doseženo pri 12 lopaticah. Z večanjem števila lopatic se učinkovitost kolesa najverjetneje ne bi izboljšala.

Pri 8 lopaticah hitrost pade pod ocenjeno vrednost. Zanimivo je, da je vrednost pri 8 lopaticah manjša kot pri 6 lopaticah. Trend na grafu moči v odvisnosti od števila lopatic prav tako kaže pozitivno korelacijo. Najvišja moč je bila dosežena pri 12 lopaticah. Na tem grafu izstopajo podatki za meritve pri 8 in 4 lopaticah.

Analiza anomalij in napak:

Meritve pri 8 lopaticah so odstopale od trenda. Hitrost in moč pri 8 lopaticah sta bili nižji kot pri 6 lopaticah, vendar sta bili pri 12 lopaticah spet višji. Vse meritve so bile dosledne in izvedene z visoko natančnostjo, zato je zanesljivost meritev visoka. Končna razlaga je, da se tok vode ravno prav ustavi ob lopatici in upočasni naslednjo lopatico. Torej je težava v kotu med lopaticami.

Napaka, ki je prinesla največjo negotovost, je bil turbulentni tok vode. Kljub poskusom vzpostavitve laminarnega pretoka ta ni bil popolnoma laminaren, zato se kolo ni vrtelo s konstantno hitrostjo. Večje kot je nihanje hitrosti, večja je razlika v izhodni moči, kar vedno povzroči daljši čas, potreben za dvig bremena, in s tem zmanjšanje moči. Ko voda zadene lopatico, se začnejo oblikovati vrtinci, kar pri meritvah pri 8 lopaticah vpliva na podatke.

Drugi del:

V tem delu sem različno obremenil mlin z 12 lopaticami in izmeril kotno hitrost. Meritve se nadalje uporabijo za izpostavitve zanimivega razmerja med razmerjem hitrosti konice (TSR) in koeficientom moči (Cp). V spodnji tabeli so predstavljeni neobdelani podatki:

Tabela 4

Podatki za meritve časa obratov pri različnih obremenitvah.

Masa (kg) ± 0,001kg	Številka poskusa	Čas 40 obratov ± 0,05	Obhodni čas 1 obrata ± 0,01
0,200	1	60,47	1,51
	2	60,69	1,52
	3	60,34	1,51
0,400	1	76,19	1,90
	2	76,31	1,91
	3	76,88	1,92
0,600	1	94,15	2,35
	2	93,87	2,35
	3	94,04	2,35
0,800	1	112,91	2,82
	2	112,83	2,82
	3	113,29	2,83
1,000	1	138,16	3,45
	2	137,90	3,45
	3	137,76	3,44
1,200	1	172,17	4,30
	2	171,81	4,30
	3	172,44	4,31
1,400	1	211,46	5,29
	2	211,68	5,29
	3	212,05	5,30
1,600	1	258,24	6,46
	2	257,82	6,45
	3	258,06	6,45
1,800	1	306,85	7,67
	2	307,41	7,69
	3	307,49	7,69
2,000	1	388,53	9,71
	2	388,28	9,71
	3	388,54	9,71

Za oceno zmogljivosti vodnih koles pri različnih racionalnih hitrostih se uporablja razmerje hitrosti konice (TSR), nedimenzijski parameter - λ . Definiran je kot $\lambda = \frac{\omega R}{v}$ (Ragheb, 2014), kjer je ω kotna hitrost (rad/s), R predstavlja polmer vodnega kolesa od središča do konca krila (m) in v je hitrost toka vode (m/s). Voda je potovala skozi 2.500 m ± 0,001 m dolg kanal, čas

pa je bil izmerjen $2.647 \text{ s} \pm 0,005 \text{ s}$. Hitrost vstopnega toka vode je bila izmerjena $0,9445 \frac{\text{m}}{\text{s}} \pm 0,002 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Če izračunamo TSR za kolo, ki dviguje 0,2 kg težko breme, račun izgleda takole:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{v_{vode}} = \frac{4,15 \cdot 0,1}{0,945} = 0,440 \pm 0,005$$

Koeficient moči se računa kot moč proizvedena s kolesom in se deli z močjo, ki jo daje voda. Moč, ki jo proizvaja kolo, je izražena: $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ in razgrnjena, da vsebuje to, kar imamo izmerjeno: $P = \tau \cdot \omega$

$$Cp = \frac{P_{izmerjena}}{P_{vode}} = \frac{\omega \cdot M}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3}$$

Je brez-dimenzijska količina, nima enot (ScienceDirect, 2018).

Koeficient moči za 0,200kg težko breme:

$$Cp = \frac{4,15 \cdot 0,200 \cdot 9,81 \cdot 0,005}{0,5 \cdot 999,75 \cdot 0,00124 \cdot 0,945^3} = 0,067 \pm 0,002$$

Tabela 5

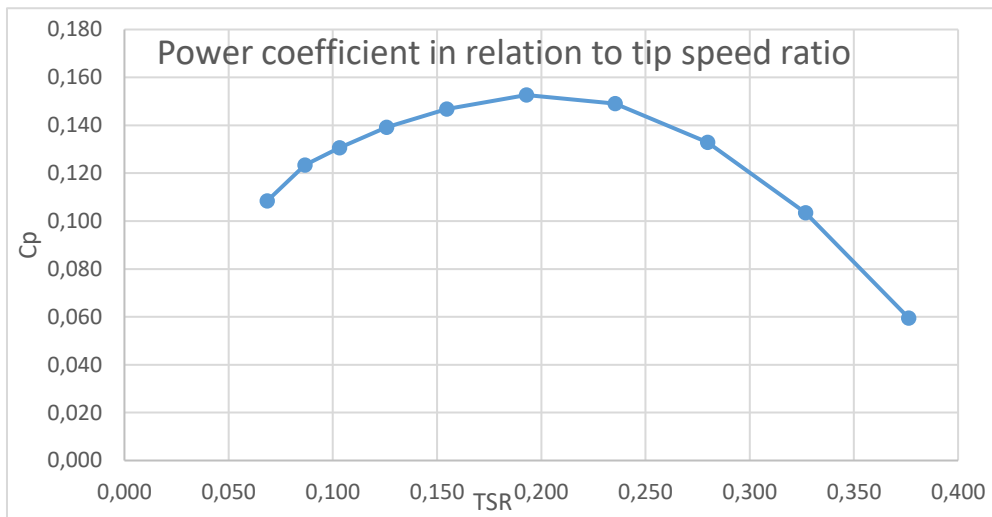
Povprečne vrednosti in izračunane vrednosti kotne hitrosti in moči.

Masa (kg) $\pm 0,001$	Povprečna perioda t_0 (s) $\pm 0,05$	Kotna hitrost ω (rad/s) $\pm 0,01$ rad/s	Razmerje hitrosti konice TSR $\pm 0,005$	Koeficient moči $C_p \pm 0,002$
0,200	1,51	4,15	0,440	0,070
0,400	1,91	3,29	0,348	0,110
0,600	2,35	2,67	0,283	0,134
0,800	2,83	2,22	0,235	0,149
1,000	3,45	1,82	0,193	0,153
1,200	4,30	1,46	0,155	0,147
1,400	5,29	1,19	0,126	0,139
1,600	6,45	0,97	0,103	0,131
1,800	7,68	0,82	0,087	0,123
2,000	9,71	0,65	0,069	0,108

Podatki iz zgornje tabele so predstavljeni v grafu, kjer je narisana povezava med razmerjem hitrosti konice lopatice (TSR) in koeficientom moči. Ta tabela vsebuje povprečno periodo za izračun kotne hitrosti, ki se uporablja za izračun TSR in koeficienta moči. Podatki so za natančnejše risanje grafa zaokroženi na 3 decimalna mesta, napaka pa je ponovno predvidena na 0,002.

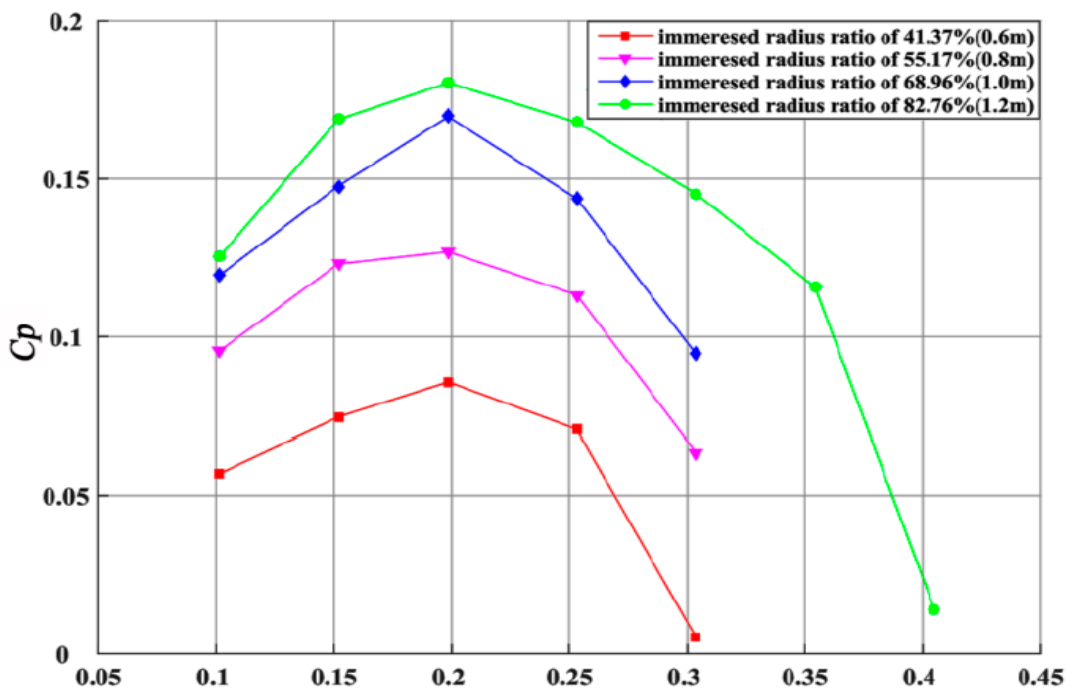
Graf 3

Graf koeficienta moči v odvisnosti od TSR.



Graf 4

Grafi različnih razmerij globine radijev koeficienta moči v odvisnosti od TSR



Opomba. Iz *Performance Investigation of the Immersed Depth Effects on a Water Wheel Using Experimental and Numerical Analyses* [Graph], avtor M. Zhao, Y. Zheng, C. Yang, Y. Zhang, and Q. Tang, 2020, Water, (<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/4/982>).

Analiza podatkov: Za pomembnost podatkov je bil uporabljen graf iz študije (Zhao in drugi, 2020), kjer so raziskovali vlogo odstotka potopitve kolesa med razmerjem konične hitrosti in koeficientom moči. Moj graf se skoraj ujema z njihovim grafom. Razmerje polmera potopljenega kolesa pri mojem poskusu je bilo 50 %, saj so bila krila dolga 5 cm in so bila popolnoma potopljena pod vodo, polmer kolesa pa je bil dolg 10 cm.

Analiza trendov:

Trend kaže, da je največja moč dosežena pri razmerju konične hitrosti (TSR) 0,2. Moji podatki se ujemajo s podatki iz študije, kjer so prav tako ugotovili največjo moč pri razmerju konične hitrosti 0,2. Pri TSR nižjem od 0,2 koeficient moči pada, še hitreje pa pade pri TSR večjem od 0,2.

V. Evalvacija

Evalvacija metodologije: Metodologija v mojem poskusu je bila dobro razvita, saj je bil konstanten in laminaren tok vzpostavljen za najbolj konsistentne meritve podatkov. Kolo je bilo potopljeno pod vodo samo med vrtenjem, po končanem poskusu pa je voda odtekla iz kanala. To je pomembno, ker les ne bi mogel absorbirati vode na eni strani, kar bi lahko povzročilo, da bi bil težji in bi premaknil težišče iz središča kroga. Čas je bil izmerjen natančno, vendar bi lahko bil še boljši. Z napravo, ki meri čas za vrtenje, bi bili podatki še natančnejši. Nit se je ovijala okoli navojne palice, tako da se je premikala po žlebu in ne na istem mestu. Obstaja prostor za izboljšave, da bi se nit ovijala okoli iste točke. To težavo bi lahko rešili z namestitvijo matice, ki bi preprečila, da bi se nit premikala naprej po žlebu. Voda je bila uporabljena iz zadrževalnega rezervoarja, tako da sveža voda ni bila uporabljena. Voda, ki je tekla skozi kanal, je bila usmerjena nazaj v rezervoar. Prelivna voda je odtekala v tla. Tako je bilo med poskusom reciklirano čim več vode.

Primerjava s teorijo: Podatki se ujemajo s teorijo. Še posebej moč v odnosu do razmerja konične hitrosti se ujema s študijo (Zhao in drugi, 2020). Ko so bili grafi primerjani, je bil opazen enak trend in največja moč je bila dosežena pri enakem TSR. Razlika v grafih je bila opazena v tem, da vrednosti v grafu mojega poskusa dosegajo višji koeficient moči pri enakem TSR v primerjavi z grafom podatkov iz študije za 55 % razmerja potopljenega polmera. Razlaga za to razliko bi bila, da je bilo v mojem primeru kolo zasnovano tako, da so bile lopatice le do polovice kolesa, medtem ko so v študiji zasnovali kolo lopaticami, ki segajo do središča. V njihovem primeru je bila voda ujeta med dvema kriloma in je ustvarila nasprotno silo, medtem ko se je v mojem kolesu voda lahko iztekla čez lopatico in ni bila ujeta znotraj.

Omejitve: Trenje v ležajih je bilo zanemarjeno, prav tako tudi zračni upor. Čeprav vreme ni bilo vetrovno, je zrak še vedno vplival na rezultate, kar je upočasnilo vrtenje in vplivalo na kotno hitrost. Poskus je bil izveden le do 12 lopatic in ocenjeno je bilo, da smo tam dosegli nasičenost.

Predlogi za nadaljnje raziskovanje: Za meritve moči bi bilo treba uporabiti Pronijevo zavoro za boljše in natančnejše meritve moči (Maghfiroh in drugi, 2022). Z navijanjem niti okoli palice pride do velikih negotovosti, saj nit sledi utoru palice ali pa se palica odebeli in polmer, potreben za izračun navora, naraste. Preizkus več lopatic bi bil potreben za dokazovanje nasičenosti ali za iskanje optimalnega števila lopatic. Prav tako bi bilo potrebno preoblikovati kolo, da bi bilo mogoče preizkusiti različne globine potopitve in poiskati optimalno razmerje potopljenega polmera. V študiji Verhaart (1983) je raziskava vključevala torzijo, hidravlično silo in upogibni moment ob vstopu vodnega curka v strugo. Za raziskovanje v širšem pogledu bi lahko upoštevali tudi te dejavnike.

VI. Zaključek

V tem poskusu je bilo pokazano, da večje število lopatic na vertikalnem vodnem kolesu vodi do večje hitrosti vrtenja in večje moči, ki jo proizvaja kolo. Trend kaže, da z večanjem števila lopatic pri konstantni moči se razlika med kotno hitrostjo prejšnjega števila lopatic in dejanskega števila lopatic manjša. V drugem delu raziskave je bila prikazana povezava med koeficientom moči in razmerjem hitrosti konice lopatice (TSR). Koeficient moči narašča v odvisnosti od TSR 0,2 in nato upada. Logično je, da pri TSR=0 breme ustvarja takšen navor, da se kolo ne vrti, zato je kotna hitrost 0, moč pa je zaradi enačbe $P = \omega\tau$ tudi nič. Po drugi strani pri TSR=1 ni bremena in se kolo prosto vrti, zato navor ne deluje in je moč tudi enaka 0.

Kako število lopatic na vodnem kolesu vpliva na kotno hitrost in izhodno moč, ki deluje na os pri konstantnem pretoku vode? Iz poskusa trend kaže, da večje število lopatic povzroči večjo kotno hitrost in večjo izhodno moč. Tako smo sprejeli hipotezo 1. V študiji Cleynen et al. (2020) je bilo pokazano, da je optimalno število lopatic, potopljenih v vodo, 2,5. V mojem primeru je bilo to ugotovljeno pri 12 lopaticah in se ujema s to študijo. Pri katerem TSR bi bila dosežena najvišja moč kolesa? Trend iz poskusa in iz študije kaže, da je najvišja moč kolesa pri 0,2 TSR. Hipoteza 2 je bila dokazana, saj trend kaže, da je maksimalni koeficient moči pri 0,2 TSR, kot je bilo pričakovano v hipotezi, da bo med 0 in 1. V študiji Gjorgievski & Cico (2016) so z različnimi vrstami lopatic uspeli vzpostaviti večja razmerja hitrosti konice lopatice, zato je bil optimalni koeficient moči pri večjem TSR.

Ugotovitve poskusa so uporabne za proizvodnjo električne energije v gospodinjstvu, če hiša stoji ob reki. Gospodinjstvo, ki želi iz kolesa iztisniti največ, ve, da je optimalno 2,5 lopatic, potopljenih v vodo. Nato bi se s pomočjo zobnikov kolo ustavilo pri razmerju hitrosti konice lopatice 0,2, da bi kolo proizvedlo največjo moč.

VII. Reference

Cleynen, O., Engel, S., Hoerner, S., & Thévenin, D. (2020). Optimal design for the freestream water wheel: A two-dimensional study. *Energy*, 213, 118880.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118880>

Derakhshan, S., & Ashjaee, M. (2015). Performance analysis of Savonius turbine as a marine current turbine. *Applied Thermal Engineering*, 81, 152-160.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.071>

ES Systems. (2021). How to measure air velocity and flow rate?
<https://esenssys.com/news/air-velocity-flow-rate-measurement/>

Gjorgievski, V., & Cico, B. (2016). A parametric study about blade shapes and blade numbers of water wheel type tidal turbine by numerical method. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/305642594_A_Parametric_Study_about_Blade_Shapes_and_Blade_Numbers_of_Water_Wheel_Type_Tidal_Turbine_by_Numerical_Method

Maghfiroh, H., Titus, A. J., Sujono, A., Adriyanto, F., & Saputro, J. S. (2022). Induction motor torque measurement using Prony brake system and close-loop speed control. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(3), 594-605.
<https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i3.782>

NASA Glenn Research Center. (2021). *Torque*. In N. Hall (Ed.), NASA Glenn Research Center. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/torque.html>

Neville, J. (2003). Watermill machinery. *Norfolk Mills*.
<https://www.norfolkmills.co.uk/watermill-machinery.html>

Ragheb. (2014). *Optimal tip speed ratio*.
https://users.wpi.edu/~cfurlong/me3320/DProject/Ragheb_OptTipSpeedRatio2014.pdf

ScienceDirect. (2018). *Power coefficient*.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/power-coefficient>

Tsokos, K. A. (2023). *Physics for the IB Diploma Coursebook (7th edition)*. Cambridge: Cambridge University Press.

Verhaart, P. (1983). Blade calculations for water turbines of the Banki type. (EUT report. WPS, Vakgr. warmte-, proces- en stromingstechniek; Vol. WPS3-83.03.R351). Technische Hogeschool Eindhoven. https://pure.tue.nl/ws/files/4274066/19153.pdf?utm_source

Visit Veržej. (n.d.). Babičev mlin. [Photograph]. Visit Veržej.
https://imgs.pnvnet.si/img/1190/595/90/1/c/www.visitverzej.si/assets/content_head/0777276001645013537.jpg

Water Science School (WSS). (2018). *Water density*. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-density>

Wendt, J. F. (Ed.). (2009). *Computational Fluid Dynamics: An Introduction* (3rd ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-85056-4>

Zhao, M., Zheng, Y., Yang, C., Zhang, Y., & Tang, Q. (2020). Performance investigation of the immersed depth effects on a water wheel using experimental and numerical analyses. *Water*, 12(4), 982. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/4/982>