



# Moč vetra na klopotcu v Hermancih pri Ljutomeru

Mag. Karel Šmigoc

Šmarje pri Jelšah

V *Guinnessovi knjigi rekordov 2019* je zapisano:

Največji klopotec na svetu ima premer vetrnic 20,58 metra. Postavil ga je Stanko Habjanič (Slovenija) v Hermancih, Miklavž pri Ormožu. Izmerili so ga 15. avgusta 2014. [1]

**Slika 1:** Največji klopotec na svetu v Hermancih pri Ljutomeru. (Foto: Karel Šmigoc)

## Izveleček

Z uporabo osnovnih fizikalnih zakonov in preproste matematike smo pokazali, da lahko vetrnica izkoristi največ 59 % kinetične energije vetra, ki vpade nanjo, in da velika razdejanja nastanejo zaradi odvisnosti moči vetra od tretje potence hitrosti.

**Ključne besede:** največji klopotec, veter, vetrnica, moč, raziskovalna naloga

## Wind Turbine Power in Hermanci, Ljutomer

### Abstract

Using simple physics and very elementary mathematics, we showed that the blades of the wind turbine can convert 59 % of the kinetic energy of the air moving through it into useful power and that the destructive power of the wind varies with the cube of the wind speed.

**Keywords:** the largest wind turbine, wind, wind turbine, power, research paper

### Uvod

V severovzhodni Sloveniji, posebno v Halozah, Prlekiji in Slovenskih goricah, se klopotec omenja v pisnih vi-



**Slika 2:** Klopotec v šmarskih goricah, ob katerem se vsako leto zberejo sosedje. (Foto: Karel Šmigoc)

rih že ob koncu 18. stoletja. [2] Postavljanje klopotca se vsako leto začne po 15. avgustu. Za vinogradnike je ta dan poseben praznik. Sosedje se zberejo, se povesejo in za trenutek pozabijo na vsakdanje težave (slika 2). V preteklosti so bili klopotci namenjeni odganjanju ptic v vinogradih, v novejšem času pa ptice ne povzročajo več zaznavne škode, ker jih je zaradi raznih škropiv vedno manj. Zato tudi klopotci tonejo v pozabo. Le redki vinogradniki, kot na primer v Hermancih, oživljajo stare običaje in tako ohranjajo kulturno dediščino.

### Moč vetra

Veter nastane zaradi razlik v zračnem tlaku. Zaradi mnogih vplivov okolice na zrak, ki povzročijo hitre spremembe hitrosti in smeri vetra ter turbulentno gibanje zraka, je to gibanje težko opisati z osnovnimi fizikalnimi zakoni. Zato si v takih primerih pomagamo z modeli,

ki so dosti enostavnejši od realnega dogajanja, a dajo za specifične obravnavane situacije še vedno dovolj dobre teoretične napovedi. V našem modelu predpostavimo, da se zračni delci gibljejo v vodoravni tokovni cevi z enako hitrostjo pravokotno na prečni presek cevi. Pri taki poenostavitvi lahko povemo pretok mase zraka  $\Delta m$  v časovni enoti  $\Delta t$  skozi presek  $S$  tokovne cevi  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ . Zapisani količnik imenujemo masni tok, ki ga zaznamujemo s  $\Phi_m$ ,  $\Phi_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$ . Maso zraka zapišemo s produktom gostote zraka  $\rho$  in prostornine  $\Delta V$ , prostornino pa izrazimo s produktom preseka cevi  $S$  in poti  $\Delta s$ , ki jo napravi masa  $\Delta m$  v časovni enoti  $\Delta t$ :  $\Delta s = v\Delta t$ ,  $\Delta m = \rho S v \Delta t$  in zapišemo masni tok  $\Phi_m = \rho S v$ . Masa zraka  $\Delta m$ , ki se giblje v tokovni cevi s hitrostjo  $v$ , ima kinetično energijo  $\frac{1}{2}\Delta m v^2$ , pri upoštevanju pretoka energije v enoti časa  $\Delta t$  je moč  $P_v = \frac{1}{2}\frac{\Delta m}{\Delta t}v^2 = \frac{1}{2}\Phi_m v^2$ . Ker je masni tok  $\Phi_m = \rho S v$ , je moč vetra:

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S v^3. \quad (1)$$

Ovisnost moči vetra od tretje potence njegove hitrosti nam pojasni njegovo izredno rušilno moč.

## Moč vetra na vetrnici

Pri računanju moči vetra na vetrnici upoštevamo tri hitrosti, tj. hitrost pred vetrnico  $v$ , na vetrnici  $v_1$ , ko veter opravlja delo, in hitrost  $v_2$  za vetrnico, ter jih po velikosti zapišemo:  $v > v_1 > v_2$ . Pojasnimo, kako so vse tri omenjene hitrosti povezane z močjo vetra na vetrnici. V kratkem časovnem intervalu  $\Delta t$  pride na vetrnico masa zraka  $\Delta m$ , ki deluje na vetrnico s silo  $F$ . Z nasprotno enako silo deluje vetrnica na veter, zato se mu spremeni gibalna količina  $\Delta G$ :  $\Delta G = \Delta m (v_2 - v)$ . Količnik spremembe gibalne količine  $\Delta G$  in časovnega intervala  $\Delta t$  je enak sili  $-F = \frac{\Delta m}{\Delta t}(v_2 - v)$  oziroma  $F = \Phi_m(v - v_2)$ , s katero vetrnica zaustavlja masni tok pri hitrosti  $v_1$  in preseku  $S$ . Ker je v tem primeru masni tok  $\Phi_m = \rho S v_1$ , pri čemer je  $\rho$  gostota zraka in  $S$  ploskev, ki jo vetrnica opisuje med vrtenjem, je sila vetra na vetrnico  $F = \rho S v_1(v - v_2)$ . [3]

Pri enakomernem gibanju zapišemo moč kot produkt sile in hitrosti, če se sila med gibanjem ne spreminja. Moč vetra na vetrnici označimo s  $P_1$  in zapišemo  $P_1 = F v_1$ :

$$P_1 = \rho S v_1^2(v - v_2). \quad (2)$$

Zaradi negativnega dela vetrnice na masni tok zraka se spremeni tudi kinetična energija:  $-A = \frac{1}{2}\Delta m(v_2^2 - v^2)$  ali  $A = \frac{1}{2}\Delta m(v^2 - v_2^2)$ .

Ker je opravljeno delo v časovni enoti  $\Delta t$  moč, sledi:

$$P_2 = \frac{A}{\Delta t} = \frac{1}{2}\frac{\Delta m}{\Delta t}(v^2 - v_2^2).$$

Ponovno upoštevamo, da je  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$  masni tok, ki je tudi v tem primeru  $\rho S v_1$ , je moč  $P_2$ :

$$P_2 = \frac{1}{2}\rho S v_1(v^2 - v_2^2). \quad (3)$$

Moč vetra na vetrnici smo zapisali z izrazoma (2) in (3), v katerih nastopa hitrost  $v_1$ , ki je ne poznamo in je tudi ne moremo izmeriti. Če izenačimo  $P_1 = P_2$ , dobimo enačbo, iz katere izračunamo  $v_1$ :  $v_1 = \frac{v+v_2}{2}$ . Dobljeno vrednost za hitrost  $v_1$  vstavimo v izraz  $P_1$  ali  $P_2$  in dobimo moč vetra  $P_k$  na vetrnici, izraženo s hitrostjo vetra pred in za vetrnico:

$$P_k = \frac{\rho S}{4}(v + v_2)^2(v - v_2). \quad (4)$$

Izraz (4) je primeren za računanje moči masnega toka na vetrnici, če je zračni tok iz vetrovnika, kjer lahko merimo obe hitrosti vetra pred in za vetrnico. Pri klopotcu, posebno v Hermancih, je mogoče meriti le hitrost pred vetrnico, to je hitrost, ki jo ima veter v določenem trenutku. Hitrost vetra po prehodu skozi vetrnico je odvisna od hitrosti vetra pred vetrnico. Največjo moč dobimo, če določimo najugodnejše razmerje med hitrostjo  $v$  in  $v_2$ . To dosežemo, če ugotovimo največjo vrednost izraza (4). Produkt  $(v + v_2)^2(v - v_2)$  označimo s  $H$ , poiščemo odvod  $\frac{dH}{dv_2}$  in iz dobljene enačbe pri pogoju  $\frac{dH}{dv_2} = 0$  izračunamo  $v_2 = \frac{v}{3}$ . Po vstavljanju te vrednosti v izraz (4) je moč  $P_k$  odvisna samo od hitrosti vetra pred vetrnico:

$$P_k = \frac{8}{27}\rho S v^3. \quad (5)$$

Iz razmerja  $P_k$  in  $P_v$  dobimo izkoristek vetra  $\eta$  na vetrnici:  $\eta = \frac{P_k}{P_v} = \frac{16}{27}$ , kar je 59 %. Ta največji izkoristek je zapisal nemški inženir Albert Betz leta 1920 in je znan kot Betzova limita. [4]

Računska ocena teoretično največje mogoče moči klopotca na sliki 1 pri hitrosti vetra  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ : če upoštevamo, da je gostota zraka  $\rho = 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , ploskev  $S$  krog, ki ga opisuje vetrnica med vrtenjem,  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ ,  $D = 20$  m in hitrost vetra  $v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , je moč  $P_k$  približno 120 kW.

## Pripis in zaključek

Fizikalni pouk lahko popestrimo tudi z eksperimentalnim delom v naravi. Zato so posebno ugodne razmere na podeželju, kjer lahko po želji izbiramo ustrezen prostor za poskus. Čeprav takšen način dela zahteva več priprave in časa, je pridobljeno znanje bolj doživeto in trajnejše. Poglejmo to na primeru merjenja moči vetra v naravi. V tem primeru je učilo klopotec. Os, na kateri so pritrjena kladivca, zamenjamo z vretenom, na katerem je pritrjena vrstica z utežjo. Ob vetrovnem vremenu izberemo primeren prostor v naravi, kjer lahko postavimo klopotec na višjo lego, merimo čas, v katerem se dvigne utež pri vrtenju vetrnice na določeno višino, in iz potencialne energije in izmerjenega časa izračunamo moč vetra na vetrnici klopotca. Oglejmo si še merjenje moči vetra v šolskih prostorih ali celo v učilnici (slika 4). Učenci OŠ Šmarje pri Jelšah so v šolskem letu 2001/02 izdelali raziskovalno nalogo *Od klopotca do vetrne elektrarne*, v kateri so uporabili vetrovnik kot izvor vetra. [5]



**Slika 3:** Model vetrne elektrarne z raziskovalno nalogo. (Foto: Karel Šmigoc)

Klopotec so postavili pred vetrovnik in z vetromerom – anemometrom merili hitrost zraka pred klopotcem in za njim. Iz spremembe kinetične energije masnega toka zraka so za moč vetra na vetrovnici dobili rezultate, kot jih napoveduje izraz (4).



**Slika 4:** Merjenje hitrosti vetra iz vetrovnika v šolskem prostoru. (Foto: Karel Šmigoc)

Ob vpisu klopotca v Hermancih v Guinnessovo knjigo rekordov je raziskovalna naloga postala ponovno zanimiva. Znanje in izkušnje, ki smo si jih pridobili v raziskovalni nalogi, sem poglobil in nekatere predpostavke iz naloge utemeljil z ustreznimi fizikalnimi zakoni. Prilnost obrazca (5) sem preveril tako, da sem klopotec postavil pred vetrovnik in meril hitrost vetra samo pred vetrnico. V okviru natančnosti merjenja je bila vrednost za moč, dobljena po obrazcu (5), približno enaka vrednosti, ki smo jo dobili, ko smo merili obe hitrosti in izračunali moč po obrazcu (4).

Uporaba izraza (5) za izračun moči vetra na vetrnici v Hermancih je skromen prispevek k prepoznavnosti Guinnessovega rekorderja in tudi Slovenije v svetu.

## Viri

- [1] *GUINNESS world records 2019* [slovenska izdaja] (2018). Tržič: Učila International.
- [2] Jože Krivec. (1942). *Dom med goricami*. Ljubljana: Ljudska tiskarna.
- [3] Rudolf Kladnik. (1996). *Pot k maturi*. Ljubljana: DZS.
- [4] Petar Kulišič. (1991). *Novi izvori energije*. Zagreb: Školska knjiga Zagreb.
- [5] T. Grobelšek, J. Mužerlin (raziskovalna naloga, mentor K. Šmigoc). (2002). *Od klopotca do vetrne elektrarne*. Osnovna šola Šmarje pri Jelšah.