

Određivanje karakteristike ventilatora u rudniku Tehničkog muzeja Nikola Tesla

Bulat, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:931682>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKE VENTILATORA U RUDNIKU
TEHNIČKOG MUZEJA NIKOLA TESLA**

Završni rad

Ana Bulat

R4736

Zagreb, 2023



KLASA: 602-01/23-01/
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 11.09.2023.

Ana Bulat, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 27.06.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKE VENTILATORA U RUDNIKU TEHNIČKOG MUZEJA NIKOLA TESLA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditelja Dr.sc. Vjekoslav Herceg.

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

(potpis)

Dr.sc. Vjekoslav Herceg

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKE VENTILATORA U RUDNIKU TEHNIČKOG MUZEJA NIKOLA
TESLA

Ana Bulat

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom radu prikazano je određivanje karakteristike ventilatora u rudniku Tehničkog muzeja Nikola Tesla. Izmjerene su vrijednosti pada tlaka na ventilatoru i protoka zraka u vjetrenom hodniku pri šest različitih položaja vjetrenih vrata na pet različitih brzina rotacije lopatica ventilatora. U rezultatima je prikazana karakteristika ventilatora u različitim režimima rada.

Ključne riječi: karakteristika, ventilator, pad tlaka, protok zraka

Završni rad sadrži: 23 stranice, 5 tablica, 19 slika.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Mario Klanfar, izvanredni profesor RGNF

Komentor: Dr. sc. Vjekoslav Herceg, viši asistent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Klanfar, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor RGNF

SADRŽAJ

1. UVOD	5
1.1 Centrifugalni ventilator	6
2. OPIS I PRIKAZ MJERENJA.....	8
3. PRIKAZ REZULTATA I DISKUSIJA.....	14
4. ZAKLJUČAK	22
5. LITERATURA	23

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Karta rudnika u Tehničkom muzeju Nikola Tesla, M 1:100	6
Slika 1-2. Centrifugalni ventilator NVLR-12 u Tehničkom muzeju Nikola Tesla	7
Slika 1-3. Centrifugalni ventilator NVLR-12 u Tehničkom muzeju Nikola Tesla	7
Slika 2-1. Pittotove cijevi	8
Slika 2-5. Multifunkcijski mjerni uređaj TESTO 400 spojen cjevčicama sa Pittotovim cijevima	9
Slika 2-6. Krilna sonda i multifunkcijski mjerni uređaj TESTO 400	10
Slika 2-7. Krilna sonda i Pittotova cijev na stalcima	10
Slika 2-8. Zatvorena vjetrena vrata	11
Slika 2-9. Otvorena vjetrena vrata	12
Slika 2-10. Označeni položaji vjetrenih vrata prilikom mjerenja	12
Slika 2-11. Upravljačka ploča ventilatora	13
Slika 3-12. Grafički prikaz karakteristike ventilatora pri drugom položaju regulatora	15
Slika 3-13. Grafički prikaz karakteristike ventilatora pri četvrtom položaju regulatora	16
Slika 3-14. Grafički prikaz karakteristike ventilatora pri šestom položaju regulatora	17
Slika 3-15. Grafički prikaz karakteristike ventilatora pri osmom položaju regulatora	18
Slika 3-16. Grafički prikaz karakteristike ventilatora pri desetom položaju regulatora	19
Slika 3-17. Grafički prikaz svih dobivenih karakteristika ventilatora ovisno o položaju regulatora	20
Slika 3-18. Grafički prikaz tipične karakteristike ventilatora (Teplý, 1990.)	21
Slika 3-19. Grafički prikaz ovisnosti protoka o položaju regulatora brzine pri otvorenim vjetrenim vratima	21

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju dva	15
Tablica 3-2. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju četiri	16
Tablica 3-3. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju šest	17
Tablica 3-4. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju osam	18
Tablica 3-5. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju deset	19

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

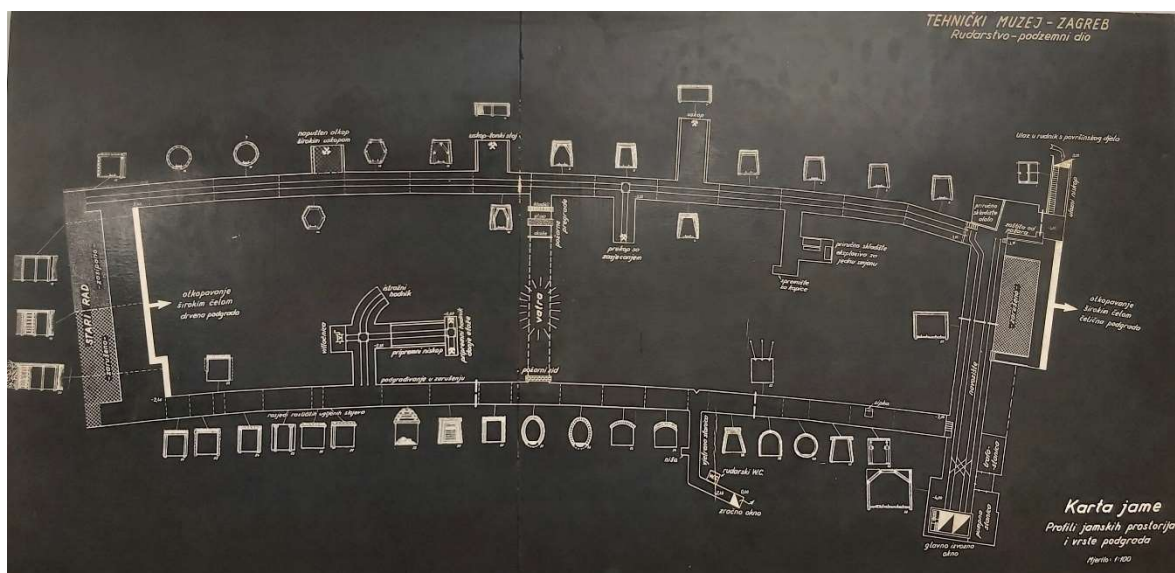
Oznaka	Jedinica	Opis
H	Pa	pad tlaka
Q	m ³ /s	protok fluida (zraka)

1. UVOD

Ventilator je uređaj koji proizvodi mehaničku energiju i predaje ju fluidu (zraku) prilikom čega se ostvaruje prirast tlaka i protok fluida (zraka) (Teply, 1990.). Uloga ventilatora je dovođenje svježeg zraka u prostorije gdje to nije moguće postići prirodnim vjetrenjem, smanjivanje vlage i koncentracije štetnih i otrovnih plinova kako bi atmosfera za boravak ili rad ljudi bila ugodnija i sigurnija (Klanfar, 2018.). Mjerenjem pada tlaka i protoka zraka u vjetrenom kanalu tj. hodniku pri različitim otporima strujanju zraka i različitim brzinama rotacije lopatica ventilatora može se konstruirati karakteristika ventilatora. Pad tlaka je razlika izmjerene vrijednosti tlaka prije ventilatora pri atmosferskim uvjetima i izmjerene vrijednosti tlaka u vjetrenom hodniku.

1.1 Centrifugalni ventilator

S obzirom na prolazak fluida kroz rotor u odnosu na njegovu os, ventilatore možemo podijeliti na: aksijalne, centrifugalne (radijalne) i poprečno protočne (tangencijalne). Centrifugalni ventilator sastoji se od: pogonskog električnog motora, reduktora brzine, vratila, ležajeva, kućišta u obliku pužnice, rotora i ulaznog lijevka. U njega zrak ulazi aksijalno u centar rotora. Uslijed rotacije lopatica koje daju zraku ubrzanje javlja se centrifugalna sila koja uzrokuje pad tlaka u centru rotora i povećanje tlaka na obodu te se zbog toga zrak giba radijalno prema izlazu (Klanfar, 2018.). Muzejska postava, koja prikazuje dobivanje ugljena različitim metodama, Tehničkog muzeja Nikola Tesla (Slika 1-1.), dugačaka je oko tristo metara i najveće dubine šest metara, koristi se centrifugalni ventilator NVLR-12 (Slika 1-2. i Slika 1-3.) snage 7 kW kao prisilni način vjetrenja podzemnih prostorija s depresijskim (usisnim) načinom rada. Depresijski način rada postiže se tako što se lopatice ventilatora okreću i usisavaju onečišćen zrak iz prostorija te on izlazi iz njega preko spojenih cijevi u okolinu. Pri tome tlak u rudniku je manji od atmosferskog tlaka (Klanfar, 2018.).



Slika 1-1. Karta rudnika Tehničkog muzeja Nikola Tesla, M 1:100



Slika 1-2. Centrifugalni ventilator NVLR-12 u Tehničkom muzeju Nikola Tesla



Slika 1-3. Centrifugalni ventilator NVLR-12 u Tehničkom muzeju Nikola Tesla

2. OPIS I PRIKAZ MJERENJA

Odnos tlaka koji stvara ventilator kako bi savladao različite otpore strujanju i protoka zraka koji se time postiže dobivamo točke čijim spajanjem nastaje krivulja koju nazivamo karakteristika ventilatora. Mjerenje je izvedeno u rudniku Tehničkog muzeja Nikola Tesla pri izmjerenoj temperaturi zraka $17,2^{\circ}\text{C}$ i tlaku $100\ 060\ \text{Pa}$. Vrijednosti tlaka ispred i iza ventilatora u vjetrenom hodniku mjerene su Pittotovim cijevima (Slika 2-4.) koje su bile na stalku i cjevčicama spojene na multifunkcijski uređaj za mjerenje TESTO 400 (Slika 2-5.) na čijem ekranu je očitana vrijednost pada tlaka.



Slika 2-4. Pittotove cijevi

Pittotova cijev je uređaj koji ima savinut gornji dio cijevi te mjeri brzinu strujanja zraka koja prolazi kroz nju što se očitava kao razlika tlaka na manometru koji je integriran u multifunkcijski uređaj za mjerenje TESTO 400 s kojim je spojena. Njome se može očitati totalni ili statički tlak ovisno o potrebama ili čak izračunati i dinamički tlak kao razliku izmjerenog totalnog i statičkog tlaka.



Slika 2-5. Multifunkcijski mjerni uređaj TESTO 400 spojen cjevčicama sa Pittotovim cijevima

Multifunkcijski mjerni uređaj TESTO 400 je uređaj koji može mjeriti i analizirati više vjetrenih parametara kao što su: brzina strujanja zraka, protok zraka, temperatura (s točnošću $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$), razlika tlakova (s točnošću ± 3 hPa) i vlažnost (Testo, 2022.). Na multifunkcijski mjerni uređaj TESTO 400 je, osim Pittotovih cijevi, bežičnim putem bila spojena i krilna sonda (Slika 2-6.) čija su se krilca okretala uslijed brzine strujanja zraka. S obzirom da se površina poprečnog presjeka vjetrenog hodnika (Slika 2-7.) nije mijenjala i iznosila je $1,53$ m², na uređaju se odmah mogao očitavati protok koji je umnožak brzine strujanja zraka i površine poprečnog presjeka hodnika.

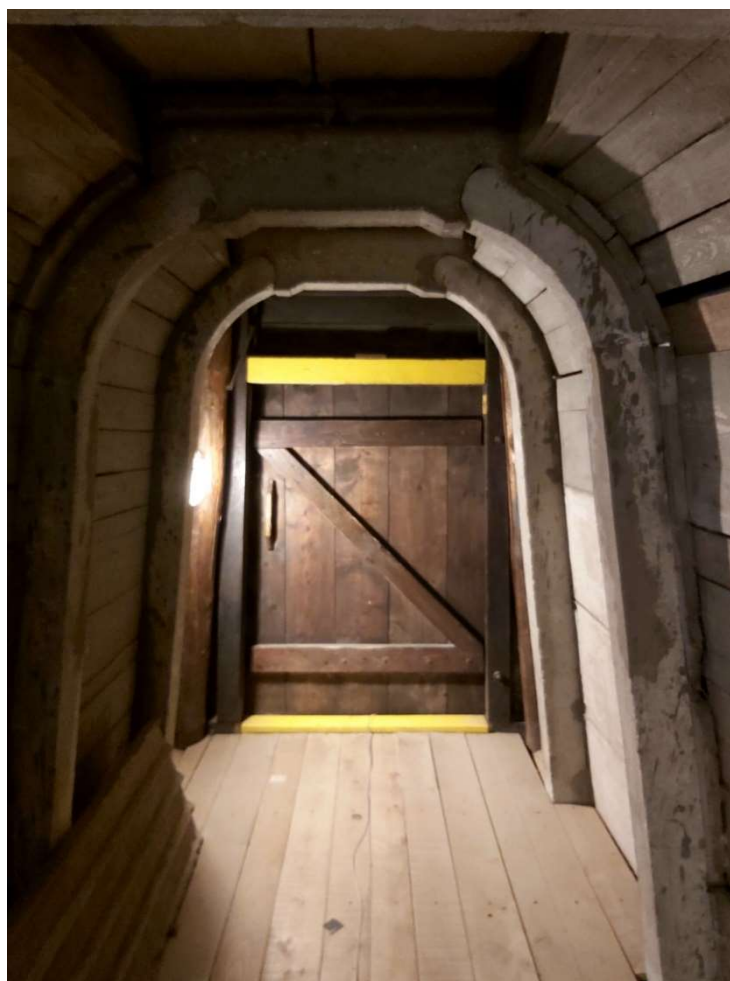


Slika 2-6. Krilna sonda i multifunkcijski mjerni uređaj TESTO 400



Slika 2-7. Krilna sonda i Pittotova cijev na stalcima

Različiti otpori strujanju zraka postignuti su različitim položajem vjetrenih vrata. Vjetrena vrata su izrađena od drveta (Slika 2-8.) površine 1,62 m² te služe za sprječavanje prolaska zračne struje niz hodnik, a otvaraju se (Slika 2-9.) prilikom prolaska ljudi. Imaju kosi ovjes na šarkama kako bi se sama zatvorila u smjeru zračne struje (Klanfar, 2018.). Mjerenja protoka zraka u vjetrenom hodniku i totalnog tlaka ventilatora provodila su se u slučajevima (Slika 2-10.) kada su vrata potpuno otvorena (položaj 1), u položajima 2, 3, 4, 5 i potpuno zatvorena (položaj 6).



Slika 2-8. Zatvorena vjetrena vrata



Slika 2-9. Otvorena vjetrena vrata



Slika 2-10. Označeni položaji vjetrenih vrata prilikom mjerenja

Brzina rotacije ventilatora regulira se na njegovoj upravljačkoj ploči (Slika 2-11.) te ima mogućnost odabira deset različitih brzina rotacije. U ovom radu napravljena su mjerenja pri pet različitih položaja regulatora brzine i to kada je regulator u položajima: 2, 4, 6, 8 i 10.



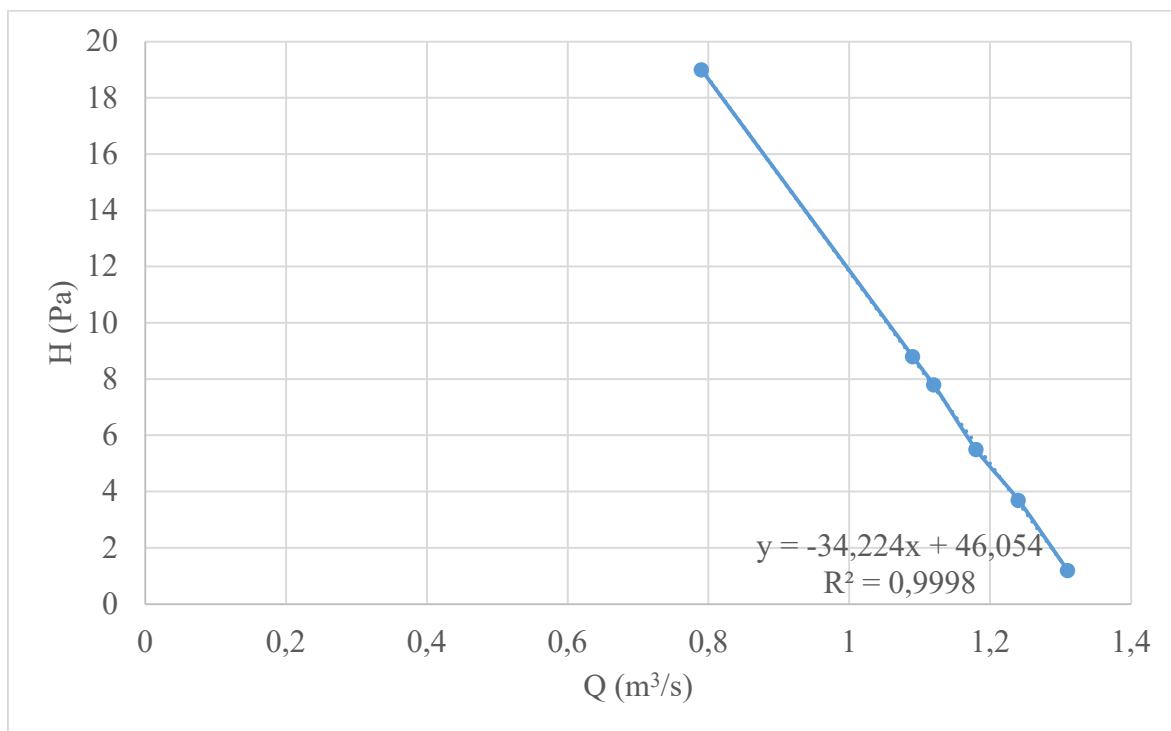
Slika 2-11. Upravljačka ploča ventilatora

3. PRIKAZ REZULTATA I DISKUSIJA

Izmjereni parametri, pad tlaka na ventilatoru i protok zraka u vjetrenom hodniku, pri šest različitih položaja vjetrenih vrata pri brzini rotacije ventilatora kada je regulator u položaju dva (Tablica 3-1.), u položaju četiri (Tablica 3-2.), u položaju šest (Tablica 3-3.), u položaju osam (Tablica 3-4.) i položaju deset (Tablica 3-5.) su prikazani u navedenim tablicama. Kad je regulator u položaju većeg broja, brzina rotacije lopatica ventilatora je veća. Zbog jednostavnijeg prikaza rezultata, grafičkim prikazom (Slika 3-12., Slika 3-13., Slika 3-14., Slika 3-15. i Slika 3-16.) predstavljene su izmjerene vrijednosti pada tlaka i protoka zraka za svaki pojedini položaj regulatora. Uz svaku dobivenu krivulju naveden je koeficijent determinacije R^2 , koji se kreće u rasponu od 0 do 1,0. Ako je koeficijent determinacije bliži 0, jednadžba koja opisuje dobivenu krivulju je manje precizna i pouzdana. Ako je koeficijent determinacije bliži broju 1,0, postavljena jednadžba krivulje je preciznija i odgovara dobivenom modelu. U ovom slučaju, koeficijenti determinacije su u rasponu od 0,9892 do 0,9999 što ukazuje da su jednadžbe dobro postavljene te opisuju približno linearno ponašanje podataka na grafičkim prikazima. Iznad svakog koeficijenta determinacije navedena je jednadžba pojedinog pravca te svaka započinje s negativnim predznakom što označava negativan nagib prikazanog pravca. Stoga, što je izmjereni pad tlaka manji, protok zraka u vjetrenom hodniku je veći i obrnuto. U svakom od navedenih položaja regulatora brzine rotacije lopatica ventilatora, najmanji pad tlaka je u slučaju potpuno otvorenih vjetrenih vrata jer se stvara manji otpor strujanju zraka te on može slobodno prolaziti bez prepreka koje treba savladati. Najveći pad tlaka na ventilatoru, u bilo kojem položaju regulatora brzine, je u slučaju kada su vjetrena vrata potpuno zatvorena jer zrak ne može slobodno prolaziti. Također, kada su vjetrena vrata potpuno otvorena, tj. označenom položaju jedan, protok zraka u vjetrenom hodniku je najveći. Protok zraka u prostoriji se smanjuje što su vjetrena vrata bliže zatvorenom položaju, tj. označenom položaju šest.

Tablica 3-1. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju dva

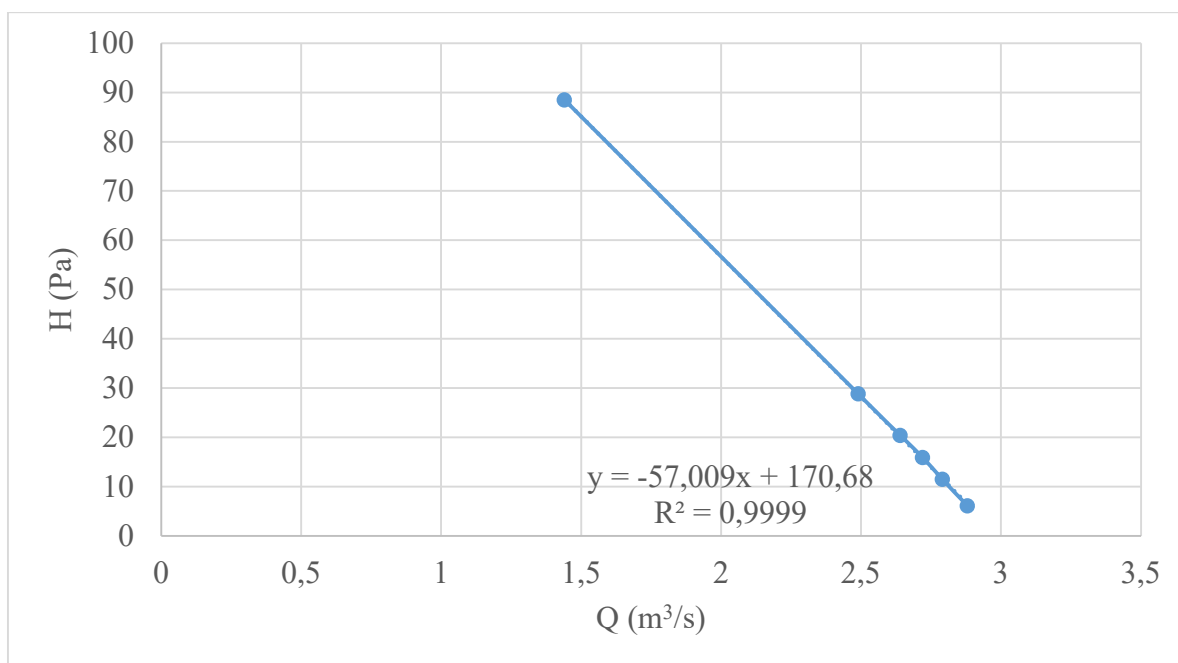
Broj točki mjerjenja	Položaj vjetrenih vrata	H (Pa)	Q (m ³ /s)
1.	1 (otvorena)	1,2	1,31
2.	2	3,7	1,24
3.	3	5,5	1,18
4.	4	7,8	1,12
5.	5	8,8	1,09
6.	6 (zatvorena)	19	0,79



Slika 3-12. Grafički prikaz karakteristike ventilatora kada je regulator u položaju 2

Tablica 3-2. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju četiri

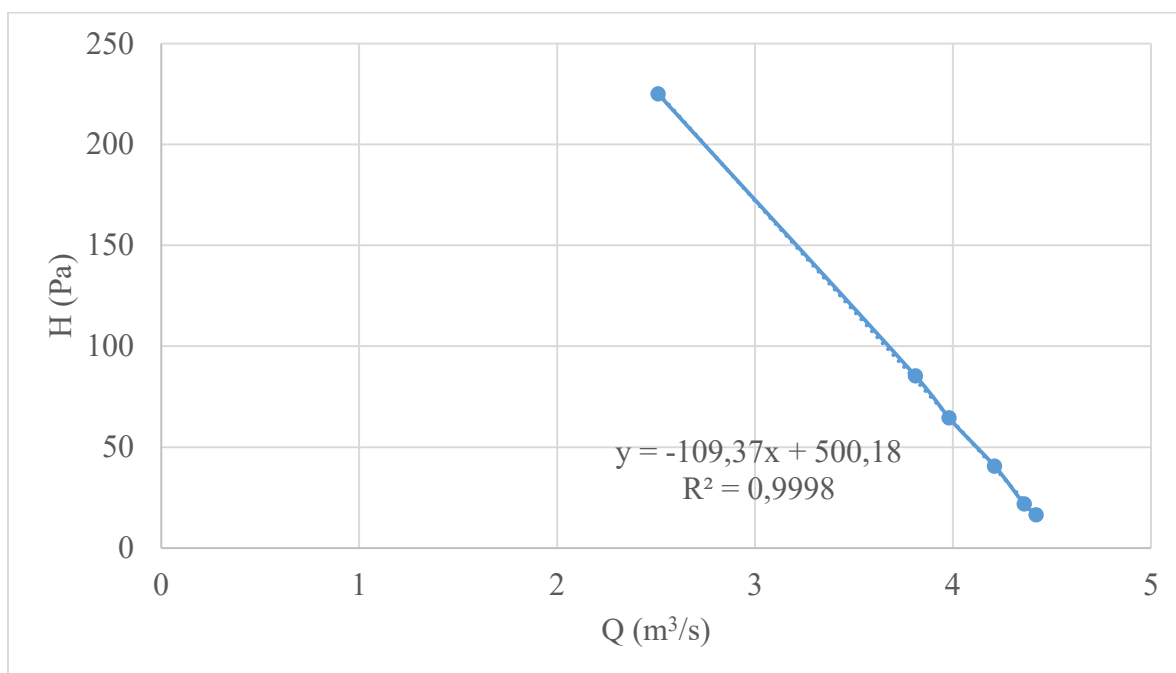
Broj točki mjerjenja	Položaj vjetrenih vrata	H (Pa)	Q (m ³ /s)
1.	1 (otvorena)	6,1	2,88
2.	2	11,5	2,79
3.	3	15,9	2,72
4.	4	20,4	2,64
5.	5	28,8	2,49
6.	6 (zatvorena)	88,5	1,44



Slika 3-13. Grafički prikaz karakteristike ventilatora kada je regulator u položaju četiri

Tablica 3-3. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju šest

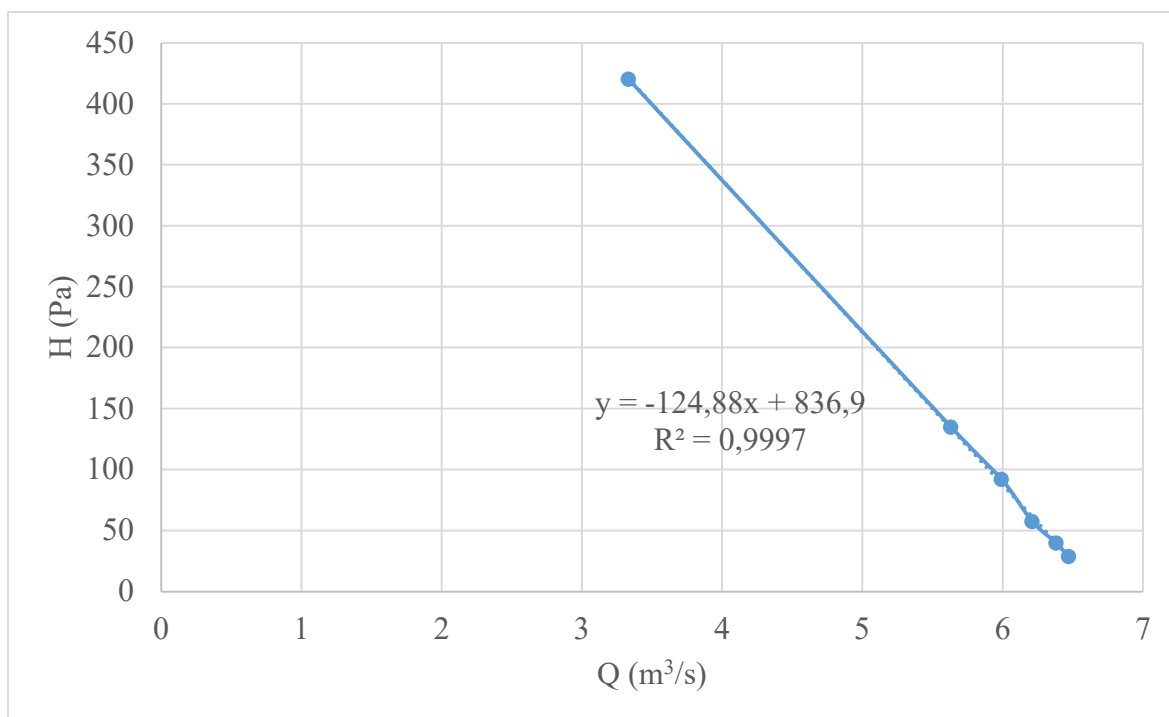
Broj točki mjerjenja	Položaj vjetrenih vrata	H (Pa)	Q (m ³ /s)
1.	1 (otvorena)	16,5	4,42
2.	2	21,8	4,36
3.	3	40,6	4,21
4.	4	64,5	3,98
5.	5	85,4	3,81
6.	6 (zatvorena)	225,1	2,51



Slika 3-14. Grafički prikaz karakteristike ventilatora kada je regulator u položaju šest

Tablica 3-4. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju osam

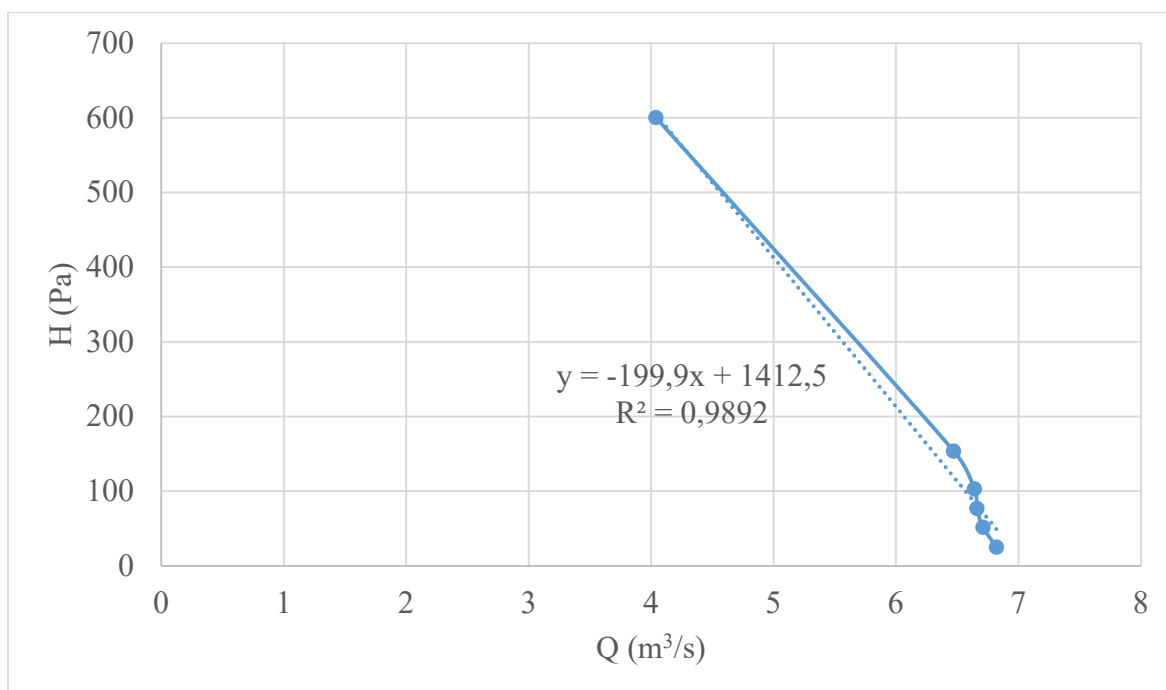
Broj točki mjerjenja	Položaj vjetrenih vrata	H (Pa)	Q (m ³ /s)
1.	1 (otvorena)	28,8	6,47
2.	2	39,9	6,38
3.	3	57,6	6,21
4.	4	92,3	5,99
5.	5	135,1	5,63
6.	6 (zatvorena)	420,5	3,33



Slika 3-15. Grafički prikaz karakteristike ventilatora kada je regulator u položaju osam

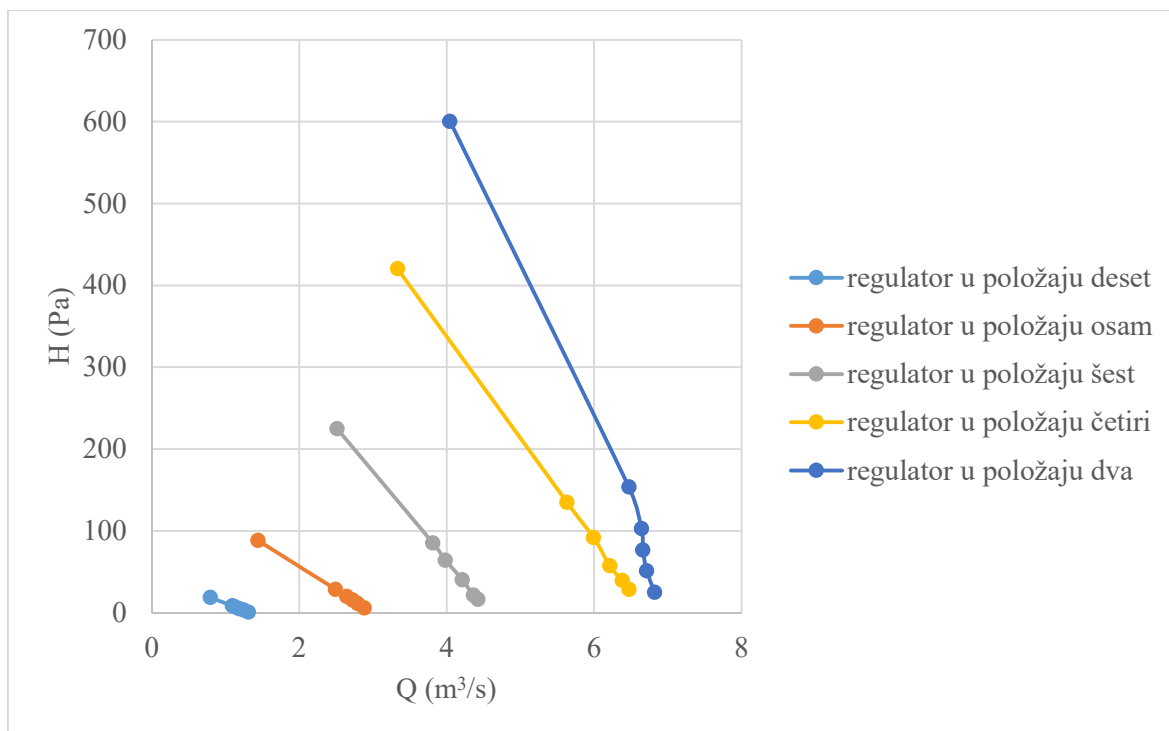
Tablica 3-5. Tablica s izmjerenim vrijednostima kada je regulator u položaju deset

Broj točki mjerjenja	Položaj vjetrenih vrata	H (Pa)	Q (m ³ /s)
1.	1 (otvorena)	25,1	6,82
2.	2	51,6	6,71
3.	3	76,8	6,66
4.	4	102,9	6,64
5.	5	153,8	6,47
6.	6 (zatvorena)	600,4	4,04



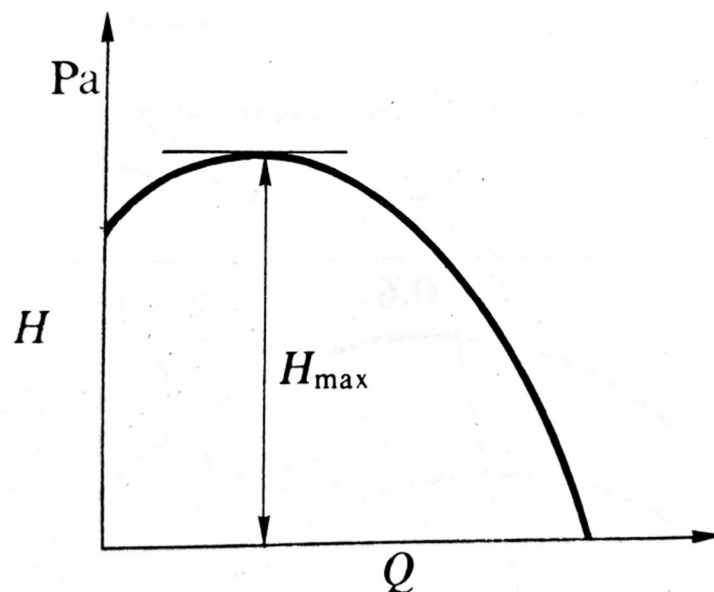
Slika 3-16. Grafički prikaz karakteristike ventilatora kada je regulator u položaju deset

Na grafičkom prikazu (Slika 3-17.) prikazano je svih pet pravaca pri pet različitih položaja regulatora kako bi se jednostavnije prikazao njihov međuodnos. Povećanjem brzine rotacije lopatica ventilatora, ventilator može savladati sve veći otpor strujanju zraka jer nastaje veći pad tlaka u odnosu na manju brzinu. Također, protok zraka u hodniku raste s porastom brzine rotacije lopatica, odnosno kada je regulator postavljen u viši položaj.



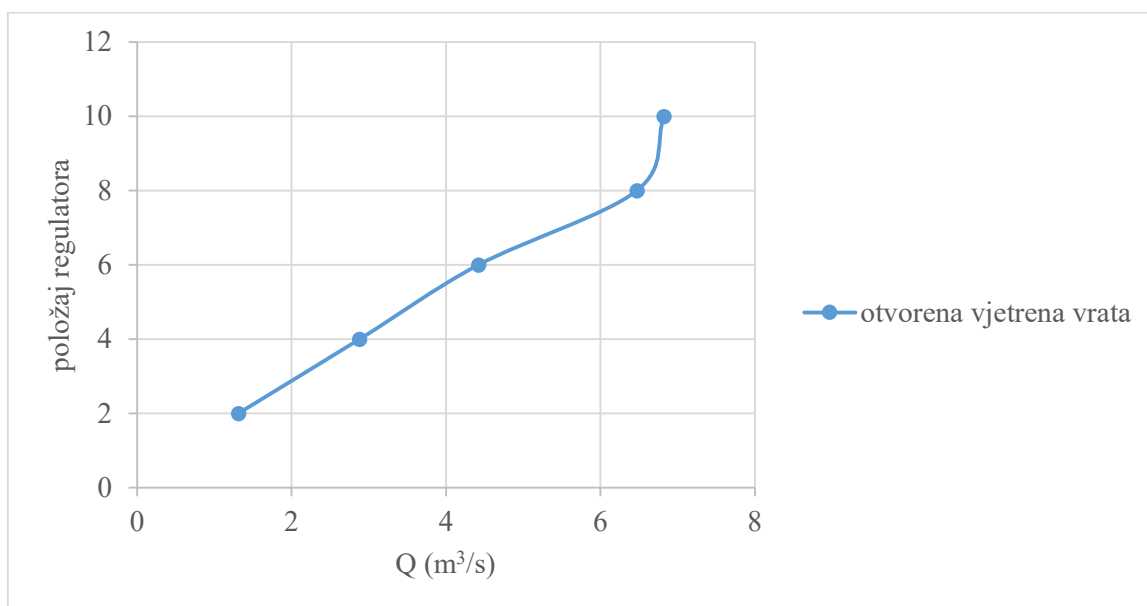
Slika 3-17. Grafički prikaz svih dobivenih karakteristika ventilatora ovisno o položaju regulatora

Međutim, očekivani oblik karakteristike ventilatora u grafičkom prikazu (Slika 3-18.) ima blaži nagib krivulje pri većim tlakovima (gornji dio krivulje), često i obrnuti nagib, koji počinje od točke (0, H) te završava u točki (Q, 0). Oblik krivulje nekada se točnije opisuje polinomom, a nekada je dovoljan pravac. Kako bi se prilikom mjerenja postigao iznos protoka zraka u vjetrenom hodniku jednak nuli, vjetrena vrata bi trebala biti potpuno zatvorena bez propuštanja zraka što u ovom slučaju nije bilo moguće. Vjetrena vrata u rudniku Tehničkog muzeja Nikola Tesla u zatvorenom položaju označenom kao šest, propuštaju zrak između vrata i drvenog okvira te nisu idealno zatvorena. Najveći izmjereni pad tlaka je u slučaju kada je regulator u položaju deset, a vrata su zatvorena, tj. u položaju šest, iznosi 600,4 Pa. Kako bi prilikom određivanja karakteristike ventilatora postigli polinom drugog stupnja kao u teoriji, vjerojatno je potrebno potpuno zatvoriti vjetrena vrata, spriječiti bilo kakav prolazak zraka i napraviti više mjerenja. S obzirom da je centrifugalni ventilator u rudniku muzejski primjerak, izlaganjem ventilatora dužem radu pri maksimalnom položaju regulatora brzine rotacije lopatica i tlaku približnom ili većem od 600,4 Pa, riskira se moguće uništavanje istog, stoga to nije izvedeno iz sigurnosnih razloga.



Slika 3-18. Grafički prikaz tipične karakteristike ventilatora (Teply, 1990.)

Prisilni način provjetravanja rudnika ventilatorom koristi se zbog održavanja vlažnosti, postizanja ugodne atmosfere za rad i boravak ljudi, stoga je u grafičkom prikazu (Slika 3-19.) prikazana mogućnost odabira željenog protoka zraka pri određenoj regulaciji brzine rotacije lopatica ventilatora ovisno o potrebama kada su vjetrena vrata potpuno otvorena jer je u tom slučaju protok zraka najveći.



Slika 3-19. Grafički prikaz ovisnosti protoka o položaju regulatora brzine pri otvorenim vjetrenim vratima

4. ZAKLJUČAK

Centrifugalni ventilator NVLR-12 prema izmjerenim vrijednostima može postići najveće protoke zraka u slučaju otvorenih vjetrenih vrata neovisno o položaju regulatora brzine rotacije lopatica ventilatora. Postupnim pritvaranjem vjetrenih vrata, kretanjem od otvorenih prema zatvorenim vratima, pri bilo kojem položaju regulatora, protok zraka u vjetrenom hodniku se smanjuje, a pad tlaka na ventilatoru raste. Tipična karakteristika ventilatora u teoriji je uobičajeno krivulja koja pri većim tlakovima ima blaži nagib, ali u ovom radu je grafičkim prikazom izmjerenih vrijednosti pada tlaka na ventilatoru i protoka zraka pri različitim položajima vjetrenih vrata i regulacijama brzine dobiveno pet linearnih funkcija koje s obzirom na visok koeficijent determinacije najbolje opisuju dobivene podatke. Rezultati ukazuju da je ovim radom dobiven dio karakteristike ventilatora, ali ne potpuna krivulja zbog nesavršenih vjetrenih vrata u zatvorenom položaju, označenom brojem šest, koja su propuštala zrak te se nisu mogla više zatvoriti, stoga nemamo izmjerenu vrijednost pada tlaka kada je protok zraka približan ili jednak nuli. S obzirom da je najveći izmjeren pad tlaka iznosio 600,4 Pa, dodatnim opterećenjem ventilatora i dužim radom pri većim brzinama rotacije lopatica s ciljem dobivanja više izmjerenih vrijednosti, riskirali bi moguće oštećenje ovog muzejskog primjerka.

5. LITERATURA

KLANFAR, M. 2018. Sustavi vjetrenja rudnika. URL: https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7862486/mod_resource/content/0/Sustavi%20vjetrenja.pdf (6.7.2023.)

KLANFAR, M. 2018. Ventilatori. URL: https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7862489/mod_resource/content/0/Ventilatori.pdf (6.7.2023.)

TEPLY, E. 1990. Rudnička ventilacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

TESTO, 2022. Multifunkcijski mjerni uređaj TESTO 400. URL: <https://www.testo.com/hr-HR/testo-400/p/0560-0400> (25.8.2023.)