

# UTICAJ VREDNOSTI HGI I KARAKTERISTIKA UGLJA NA KAPACITET MLEVENJA I POTROŠNJU ENERGIJE ZA MLEVENJE

## INFLUENCE OF HARDGROVE GRINDABILITY INDEX AND COAL CHARACTERISTICS ON MILL CAPACITY AND POWER CONSUMPTION

**Marko OBRADOVIĆ, Dejan RADIĆ,  
Miroslav STANOJEVIĆ, Aleksandar JOVOVIĆ,  
Dušan TODOROVIĆ, Nikola KARLIČIĆ,  
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu  
mobradovic@mas.bg.ac.rs, dradic@mas.bg.ac.rs,  
mstanojevic@mas.bg.ac.rs, ajovovic@mas.bg.ac.rs,  
dtodorovic@mas.bg.ac.rs, nkarlicic@mas.bg.ac.rs**

*U radu je izvršena analiza uticaja meljivosti uglja i njegovih karakteristika na kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje u ventilatorskom mlinu M-12 na termoelektrani TENT B u Obrenovcu. U tom cilju izvršena su ispitivanja ventilatorskog mlina, pre i posle rekonstrukcije, koja su obuhvatila određivanje kapaciteta mlevenja i potrošnju energije za mlevenje kao i laboratorijska određivanja karakteristika uglja i vrednosti Hardgrove indeksa meljivosti uglja (HGI). Analizom rezultata utvrđeno je da kapacitet mlevenja ima negativnu korelaciju sa sadržajem pepela u uglju dok sadržaj analitičke vlage u uglju ima pozitivnu korelaciju sa potrošnjom električne energije i kapacitetom mlevenja. Između kapaciteta mlevenja i vrednosti HGI postoji negativna korelacija. Izvršena je analiza uticaja meljivosti uglja i njegovih karakteristika na kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje u ventilatorskom mlinu i izvedeni su izrazi za izračunavanje kapaciteta mlevenja i potrošnju električne energije u funkciji uticajnih karakteristika uglja uključujući i HGI. Pored toga, analizirana je mogućnost predviđanja specifične potrošnje energije za mlevenje na osnovu vrednosti HGI.*

*Specifična potrošnja energije dobijena na osnovu vrednosti HGI dobijenog laboratorijskom analizom je pokazala dobro slaganje sa eksperimentalno utvrđenom specifičnom potrošnjom energije u realnom mlinskom postrojenju.*

**Ključne reči:** *Hardgrove indeks meljivosti (HGI), ventilatorski mlin, kapacitet mlevenja, potrošnja energije za mlevenje, regresiona i korelaciona analiza*

*This paper analyze the effects of coal grindability and its characteristics on the mill capacity and power consumption for beater wheel mill M-12 in thermal power plant TENT B in Obrenovac. For this purpose, experiments were made on the mill, before and after its reconstruction. Experiments included the determination of mill capacity, mill*

*power consumption and laboratory determination of coal characteristics and Hardgrove grindability index (HGI). The analysis of experimental results found that the mill capacity has a negative correlation with the ash content in coal. Moisture content in analysis sample of coal has a positive correlation with the consumption of electricity and mill capacity. Between the mill capacity and the value of HGI exists a negative correlation. Analysis of the influence of grindability of coal and coal characteristics on mill capacity and energy consumption was carried out. Based on coal characteristics and values of HGI, mathematical expressions were derived for the calculation of mill capacity and electric energy consumption. In addition, ability to predict specific energy consumption of the mill on the basis of HGI values, were carried out. Specific energy consumption obtained from HGI values showed good agreement with the experimentally determined specific energy consumption in mill.*

**Key words:** *Hardgrove grindability index (HGI), Beater wheel mill, mill capacity, Mill power consumption, Regression and correlation analysis*

## I. Uvod

Kapacitet mlinova za pripremu ugljenog praha predstavlja jedno od najbitnijih ograničenja pri ostvarivanju maksimalnih mogućih kapaciteta termoenergetskih postrojenja koja kao gorivo koriste ugalj. Meljivost ugljeva je jedan od parametara koji direktno utiče na kapacitet mlinova, zbog čega je on izuzetno bitan za projektovanje i eksploataciju postrojenja za njihov mehanički tretman mlevenjem. Mlinovi uglja u termoenergetskim postrojenjima su tipičan primer ovih postrojenja. Termoelektrane u našoj zemlji ulažu značajne napore i investicije ne samo da održe svoju proizvodnju na maksimalnim projektovanim parametrima već i da povećaju snagu postojećih blokova iznad projektovanih kapaciteta. U termoelektranama u Srbiji u primeni su ventilatorski mlinovi u kojima se ugalj niske toplotne moći (lignit) melje na određenu krupnoću u cilju njegove pripreme za sagorevanje u sprasenom stanju u ložištima kotlovskih postrojenja.

Realizacija programa EPS-a za postizanje veće efikasnosti i tamo gde je moguće, povećanje snage blokova, zahteva čitav niz različitih aktivnosti. Ono što je do sada iz ovog programa realizovano omogućava blokovima TENT B1 i B2 da proizvode sa povećanom snagom od 670 MW (umesto 620 MW) ali samo pod određenim uslovima. Ograničenja se pre svega odnose na kapacitete mlinova kada je reč o uglju garantovanog kvaliteta. Sadašnji prosečni kapacitet ventilatorskih mlinova iznosi približno 125 t/h što je nedovoljno za povećanu snagu bloka, za ugalj donje toplotne moći  $H_d \approx 6700$  kJ/kg. Povećana snaga bloka sa postojećim kapacitetima mlinova može se ostvariti samo ako je donja toplotna moć uglja iznad 7200 kJ/kg. Otklanjanje ili ublažavanje ovog ograničenja je moguće, povećanjem kapaciteta mlinova ali bez većih investicionih ulaganja. Izvršene geometrijske i konstrukcione izmene su date u [1, 2]. U sklopu aktivnosti oko rekonstrukcije ventilatorskog mlina M-12 bloka B1 u cilju povećanja kapaciteta mlevenja obavljena su ispitivanja koja su

prethodila rekonstrukciji u nekoliko navrata u toku 2009. i 2010. godine [3]. Posle rekonstrukcije ventilatorskog mlina M-12 obavljeno je više ispitivanja sa različitim režimima rada, odnosno više varijanti konstrukcionih rešenja [4].

U literaturi [5] su zabeleženi naponi da se utvrdi uticaj vrednosti HGI i granulometrijskog sastava ugljenog praha na potrošnju električne energije mlina. Korelacioni izrazi dobijeni na osnovu eksperimentalnih podataka pokazali su da se potrošnje energije za mlevenje povećava ukoliko je frakcioni sastav ugljenog praha manji od projektovanog, povećanje kapaciteta mlevenja i pad vrednosti HGI.

U radu [6] autor na osnovu eksperimentalnih istraživanja sagledava uticaj vrednosti HGI i karakteristika uglja kolubarskog basena na kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje i daje korelacione izraze koji se mogu koristiti za izračunavanje kapaciteta mlevenja i potrošnje električne energije za mlevenje uglja u ventilatorskim mlinovima. Takođe, na osnovu eksperimentalnih vrednosti i dobijenih korelacionih izraza autor daje vrednosti specifične potrošnje energije za mlevenje, pri čemu dobija dobro slaganje rezultata.

## II. Eksperimentalna istraživanja

U cilju određivanja uticaja karakteristika uglja na parametre rada mlin-skog postrojenja izvršena su ispitivanja ventilatorskog mlina M-12, tip N400.42 na termoelektrani TENT B u Obrenovcu. Ispitivanja su izvršena u periodu april 2009 – mart 2010 (pre rekonstrukcije) i jun 2010 – februar 2011 (posle rekonstrukcije). Svi ispitivani uzorci ugljeva potiču iz kolubarskog basena. Određivanje vrednosti HGI uzoraka ugljeva je rađeno po standardu ISO 5074, dok je granulometrijski sastav određivan prosejavanjem na laboratorijskim sitima.

Tehnička analiza uzoraka ugljeva je rađena po standardima:

- određivanje sadržaja pepela prema ISO 1171 – Solid mineral fuels – Determination of ash content;
- određivanje sadržaja ukupne vlage prema ISO 5068-1 – Brown coals and lignites – Determination of moisture content – Part 1: Indirect gravimetric method for total moisture;
- određivanje sadržaja vlage u analitičkom uzorku (higroskopna vlaga) prema ISO 5068-2 – Brown coals and lignites – Determination of moisture content – Part 2: Indirect gravimetric method for moisture in the analysis sample.

Kapacitet mlevenja je određivan merenjem mase uglja postupkom skidanja sa trake i preko geometrije dozatora a potrošnja električne energije (opterećenje mlina) merenjem pogonskim instrumentom.

Energija koja se troši za mlevenje i ostale procese po jedinici mase (specifična potrošnja energije) iznosi [7, 8]:

$$W_i = \frac{N}{B}, \text{ kWh/t}; \quad (1)$$

gde su

$N$ , kW – snaga za obavljanje procesa u mlinu (snaga za mlevenje);

$B$ , t/h – kapacitet mlevenja.

Ukupna snaga pogonskog elektromotora mlina se dobija iz izraza [7, 8]:

$$N_{\max} = \left( 1 + \frac{1}{2 \cdot D_1^{0,66}} \right) \cdot N, \text{ kW}; \quad (2)$$

gde je  $D_1$ , m, spoljni prečnik udarnog kola mlina. Za ventilatorski mlin M-12 prečnik udarnog kola iznosi  $D_1 = 4,2$  m.

Takođe, na osnovu podatka o potrošnji električne energije za mlevenje može se izračunati ukupna snaga pogonskog elektromotora mlina korišćenjem izraza

$$N_{\max} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \text{ kW}. \quad (3)$$

Zavisnost između vrednosti HGI i specifične potrošnje energije za mlevenje data je izrazom [9]

$$W_i = \frac{435}{HGI}, \text{ kWh/t}. \quad (4)$$

U cilju uspostavljanja korelacionih zavisnosti i izraza za kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje korišćen je softverski paket IBM SPSS Statistics i Microsoft Office Excel.

### III. Rezultati i diskusija

#### A. Prikaz rezultata ispitivanja ventilatorskog mlina M-12

U tabeli 1. prikazani su podaci sa izvršenih ispitivanja ventilatorskog mlina M-12. U tabeli 2. date su dobijene vrednosti specifične potrošnje energije korišćenjem izraza (1) i (2) a na osnovu izmerenih vrednosti napona, potrošnje električne energije i kapaciteta mlevenja, odnosno korišćenjem izraza (4) tj. na osnovu podataka o vrednosti HGI.

Tabela 1. Rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12

	R. br.	$B$ [t/h]	$R_{90}$ [%]	$D_{90}$ [%]	$I$ [A]	$I_{sp}$ [A/(t·h <sup>-1</sup> )]	$HGI$ [-]	$W$ [%]	$W_{h,a}$ [%]	$A$ [%]	$W_{h,a,up}$ [%]
Pre rekonstrukcije	1	128,5	72,1	27,9	–	–	–	49,8	–	14,5	13,4
	2	132,0	70,7	29,3	–	–	44,2	51,1	–	13,9	16,2
	3	138,7	64,8	35,2	162	1,16799	38,7	49,6	19,22	12,3	15,7
	4	140,2	62,3	37,7	165	1,17689	42,9	50,1	18,87	12,1	15,1
	5	137,9	68,0	32,0	162	1,17476	39,6	49,7	19,7	13,7	12,5
	6	125,5	63,8	36,2	170	1,35458	40,6	52,7	19,64	9,4	16,4
Posle rekonstrukcije	7	137,4	50,6	49,4	198	1,44105	40,9	49,0	18,4	17,9	4,1
	8	137,4	55,4	44,6	195	1,41921	37,5	49,5	19,3	16,3	3,4
	9	159,1	56,3	43,7	187	1,17536	30,7	52,6	23,7	10,4	9,0
	10	159,2	51,9	48,1	194	1,21859	30,7	52,1	23,5	9,8	6,8
	11	154,2	59,0	41,0	200	1,29702	40,8	49,8	18,3	17,2	11,9
	12	154,3	55,1	44,9	193	1,25081	46,8	49,7	19,5	16,2	10,8
	13	129,9	61,7	38,3	188	1,44727	38,1	50,3	20,0	14,2	14,1
	14	132,4	63,5	36,5	190	1,43505	41,0	49,1	18,3	18,3	10,5
	15	152,3	58,2	41,8	190	1,24754	43,7	50,6	20,3	15,6	14,0
	16	141,9	61,2	38,8	190	1,33897	42,8	51,6	21,4	13,6	15,0
	17	156,5	59,4	40,6	199	1,27157	36,1	52,4	23,4	11,2	17,7
	18	145,2	64,7	35,3	182	1,25344	48,5	48,7	17,2	20,6	11,3
	19	148,2	70,8	29,2	174	1,17409	35,6	49,0	17,8	16,8	13,5
	20	144,0	55,2	44,8	175	1,21528	35,8	46,9	13,4	17,3	14,2
	21	147,8	63,0	37,0	175	1,18403	36,6	51,1	20,6	11,2	17,7
	22	138,4	62,9	37,1	168	1,21387	51,6	48,1	17,1	16,4	15,5
	23	137,4	72,0	28,0	175	1,27365	41,4	50,3	20,4	13,9	19,2
	24	148,6	68,8	31,2	180	1,21131	47,2	49,9	18,8	16,7	18,8
	25	146,9	64,3	35,7	180	1,22532	40,6	50,6	22,2	15,8	18,0
	26	147,2	66,7	33,3	182	1,23641	47,0	51,7	19,6	13,6	17,4
koeficijenti korelacije $r$											
kor. sa $B$		-0,242	0,242	0,231	-0,689	-0,286	0,503	0,442	-0,449	0,030	
kor. sa $HGI$	-0,286	0,355	-0,355	-0,249	0,035		-0,367	-0,402	0,571	0,306	
kor. sa $I$	0,231	-0,633	0,633		0,545	-0,249	0,360	0,377	-0,099	-0,563	
$B$ – kapacitet mlevenja; $R_{90}$ – ostatak na situ veličine otvora 90 $\mu$ m; $D_{90}$ – propad kroz sito veličine otvora 90 $\mu$ m; $I$ – opterećenje mlina (potrošnja električne energije); $I_{sp}$ – specifično opterećenje mlina ( $I/B$ ); $W$ – sadržaj ukupne vlage u uglju na ulazu u mlin (maseni udeo u %); $W_{h,a}$ – sadržaj analitičke vlage u uglju na ulazu u mlin (maseni udeo u %); $A$ – sadržaj pepela u uglju na ulazu u mlin (maseni udeo u %); $W_{h,a,up}$ – sadržaj analitičke vlage u ugljenom prahu (maseni udeo u %)											

Tabela 2. Specifična potrošnja energije za mlevenje

	R. br.	$I$ [A]	$U$ [V]	$\cos\varphi$	$N_{\max}$ [kW]	$N$ [kW]	$B$ [t/h]	$HGI$ [-]	$W_i^{1)}$ [kWh/t]	$W_i^{2)}$ [kWh/t]
Pre rekonstrukcije	1	–	6600	0,9	–	–	128,5	–	–	–
	2	–	6600	0,9	–	–	132,0	44,2	–	9,842
	3	162	6600	0,9	1666,7	1392,4	138,7	38,7	10,039	11,240
	4	165	6600	0,9	1697,6	1418,2	140,2	42,9	10,115	10,140
	5	162	6600	0,9	1666,7	1392,4	137,9	39,6	10,097	10,985
	6	170	6600	0,9	1749,0	1461,1	125,5	40,6	11,643	10,714
sr. vredn.	165	6600	0,9	1695,0	1416,0	134,9	–	10,473	10,584	
Posle rekonstrukcije	7	198	6600	0,9	2037,1	1706,2	137,4	40,9	12,418	10,636
	8	195	6600	0,9	2006,2	1680,4	137,4	37,5	12,230	11,600
	9	187	6600	0,9	1923,9	1611,4	159,1	30,7	10,128	14,169
	10	194	6600	0,9	1995,9	1671,8	159,2	30,7	10,501	14,169
	11	200	6600	0,9	2057,7	1723,5	154,2	40,8	11,177	10,662
	12	193	6600	0,9	1985,7	1663,1	154,3	46,8	10,779	9,295
	13	188	6600	0,9	1934,2	1620,1	129,9	38,1	12,472	11,417
	14	190	6600	0,9	1954,8	1637,3	132,4	41,0	12,366	10,610
	15	190	6600	0,9	1954,8	1637,3	152,3	43,7	10,750	9,954
	16	190	6600	0,9	1954,8	1637,3	141,9	42,8	11,538	10,164
	17	199	6600	0,9	2047,4	1714,8	156,5	36,1	10,957	12,050
	18	182	6600	0,9	1872,5	1568,3	145,2	48,5	10,801	8,969
	19	174	6600	0,9	1790,2	1499,4	148,2	35,6	10,117	12,219
	20	175	6600	0,9	1800,5	1508,0	144,0	35,8	10,472	12,151
	21	175	6600	0,9	1800,5	1508,0	147,8	36,6	10,203	11,885
	22	168	6600	0,9	1728,4	1447,7	138,4	51,6	10,460	8,430
	23	175	6600	0,9	1800,5	1508,0	137,4	41,4	10,975	10,507
	24	180	6600	0,9	1851,9	1551,1	148,6	47,2	10,438	9,216
25	180	6600	0,9	1851,9	1551,1	146,9	40,6	10,559	10,714	
26	182	6600	0,9	1872,5	1568,3	147,2	47,0	10,655	9,255	
sr. vredn.	186	6600	0,9	1911,1	1600,1	145,9	–	11,000	10,904	

Za pogon ventilatorskog mlina M-12 koristi se elektromotor Sever ZKN 6230/4S. Napon motora iznosi  $U = 6600$  V a  $\cos\varphi = 0,9$  [8]

1) specifična potrošnja energije dobijena korišćenjem kapaciteta mlevenja (izraz 1 i 2)  
2) specifična potrošnja energije dobijena korišćenjem vrednosti HGI (izraz 4)

### *B. Analiza rezultata i diskusija*

Na osnovu rezultata merenja iz tabele 1, može se videti da postoji jaka negativna linearna korelacija između kapaciteta mlevenja i specifične potrošnje električne energije ( $r = -0,689$ ), odnosno pozitivna korelacija između potrošnje električne energije i kapaciteta mlevenja ( $r = 0,231$ ).

Takođe između propada kroz sito veličine otvora 90  $\mu\text{m}$  i potrošnje električne energije postoji jaka pozitivna korelacija ( $r = 0,633$ ), što znači da je potrošnja električne energije veća, odnosno opterećenje mlina veće, kada je propad kroz sito veličine otvora 90  $\mu\text{m}$  veće (veći udeo sitnije frakcije u spraćenom uglju). Suprotan zaključak važi za ostatak na situ veličine otvora 90  $\mu\text{m}$  ( $r = -0,633$ ).

Korelacija kapaciteta mlevenja sa udelom pepela pokazuje negativnu korelaciju ( $r = -0,449$ ) dok sa vlagom u ugljenom prahu pokazuje da nema povezanosti između ovih veličina ( $r = 0,030$ ). Nasuprot tome, udeo analitičke vlage u uglju na ulazu u mlin u ispitivanim režimima pokazuje pozitivnu korelaciju sa potrošnjom električne energije (opterećenjem mlina) i kapacitetom mlevenja ( $r = 0,377$  odnosno  $r = 0,442$ , respektivno). To znači da se sa povećanjem udela vlage u uglju na ulazu u mlin troši više električne energije (što je očekivano u radu mlina), ali istovremeno ostvaruje i veći kapacitet. Veći utrošak energije je posledica povećanog kapaciteta mlevenja, a verovatno i delimično ranije objašnjenog uticaja vlage na meljivost, gde ugljevi veće vlažnosti mogu imati poboljšanu meljivost i sklonost ka pojavi pukotina u strukturi.

Međutim, između kapaciteta mlevenja i vrednosti HGI postoji negativna korelacija ( $r = -0,286$ ), što na prvi pogled ne može biti logično. Treba očekivati je da će sa povećanjem vrednosti HGI, kao veličine koja takođe direktno utiče na kapacitet mlevenja, doći do povećanja kapaciteta mlevenja. Rezultati određivanja vrednosti HGI pokazuju da vrednosti HGI rastu sa povećanjem sadržaja pepela u lignitu ( $r = 0,571$ ). Međutim, lignit sa većim sadržajem pepela ima nižu toplotnu moć pa je samim tim za isto opterećenje kotla veća potrošnja uglja (lignita). Sa druge strane sagorevanjem iste količine lignita u kotlu sa većim sadržajem pepela (lignita sa većom vrednosti HGI), odnosno niže toplotne moći, imaće za rezultat smanjenje snage kotla, odnosno niže temperature dimnih gasova. Pošto se deo dimnih gasova recirkulacionim kanalom koristi za sušenje lignita u mlinu, logično je da je niža temperatura dimnih gasova uzrok lošijeg sušenja i ventilacije mlina, zbog čega se njegov kapacitet smanjuje. U realizovanim ispitivanjima je očigledno opisan negativan efekat lošijeg sušenja i ventilacije u mlinu kao dominantan u odnosu na uticaj veće vrednosti HGI, što je rezultovalo negativnu korelaciju vrednosti HGI sa kapacitetom mlevenja.

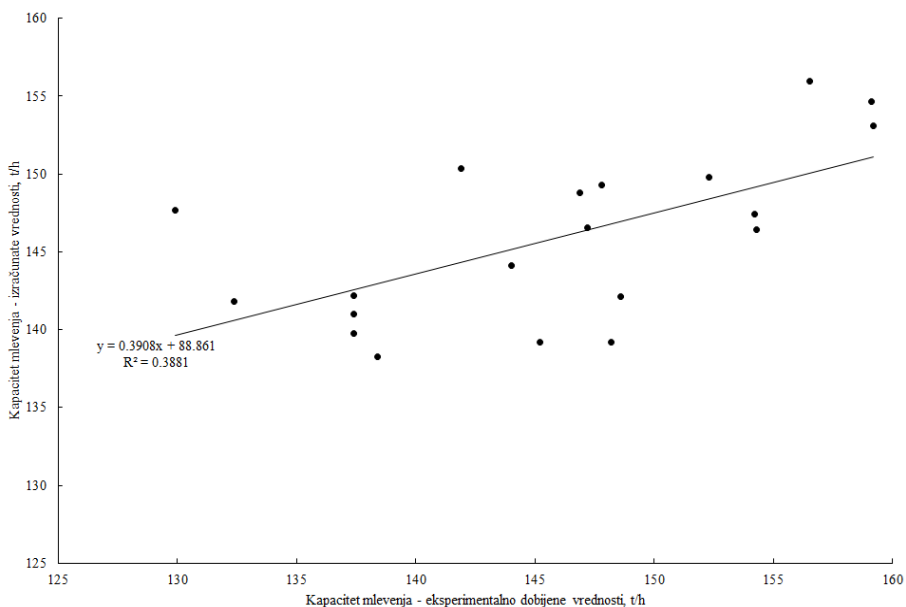
Na osnovu podataka iz tabele 1. izvršena je korelaciona analiza u cilju dobijanja izraza koji će moći da predvide kapacitet mlevenja (slika 1) i potrošnju električne energije za mlevenje (slika 2) na osnovu podataka tehničke analize i vrednosti HGI. Za analizu su uzeti samo rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 posle njegove rekonstrukcije.

1. Izraz za izračunavanje kapaciteta mlevenja

$$B = 3,041 \cdot HGI^{-0,094} \cdot \left( \ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,139} \cdot W^{1,025} \cdot A^{0,063} \cdot W_{h,a,up}^{0,054}, R^2 = 0,388. \quad (5)$$

2. Izraz za izračunavanje potrošnje električne energije za mlevenje

$$I = 64,847 \cdot HGI^{-0,049} \cdot \left( \ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,164} \cdot W_{h,a}^{0,301} \cdot A^{0,169}, R^2 = 0,667. \quad (6)$$

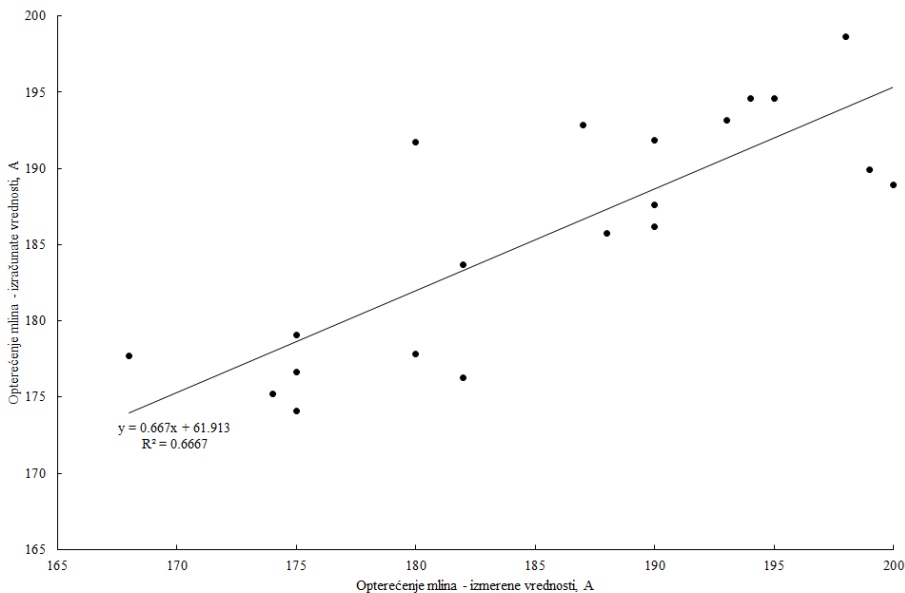


Slika 1. Grafički prikaz rezultata dobijenih korišćenjem izraza (5)

Na osnovu podataka iz literature [8], projektne karakteristike ventilatorskog mlina M-12 su: snaga potrebna za mlevenje iznosi 2000 kW, maksimalni kapacitet 40 kg/s (144 t/h) pri vrednosti HGI uglja od 56, ostatku na situ veličine otvora 90 μm od 65 % i sadržaju vlage u ugljenom prahu od 10 %, dok je specifična potrošnja energije za mlevenje 11,7 kWh/t. Na osnovu ispitivanja mlina [8] dobijeno je da je za sadržaj vlage u ugljenom prahu od 7,65 %, maksimalni kapacitet mlina iznosio 45,79 kg/s (168,4 t/h), pri čemu je snaga



potrebna za mlevenje iznosila 1763,4 kW, potrebna ukupna snaga pogonskog elektromotora 2110,8 kW a specifična potrošnja energije 10,7 kWh/t.



Slika 2. Grafički prikaz rezultata dobijenih korišćenjem izraza (6)

Ispitivanjem ventilatorskog mlina M-12 pre rekonstrukcije, dobijeno je da je pri srednjem kapacitetu mlevenja od 134,9 t/h potrebna snaga za mlevenje iznosila 1416,0 kW (tabela 2). Prema tome, ispitivanja pre rekonstrukcije su pokazala da je specifična potrošnja energije iznosila 10,473 kWh/t što se dobro slaže sa specifičnom potrošnjom energije iz literaturnog izvora [8].

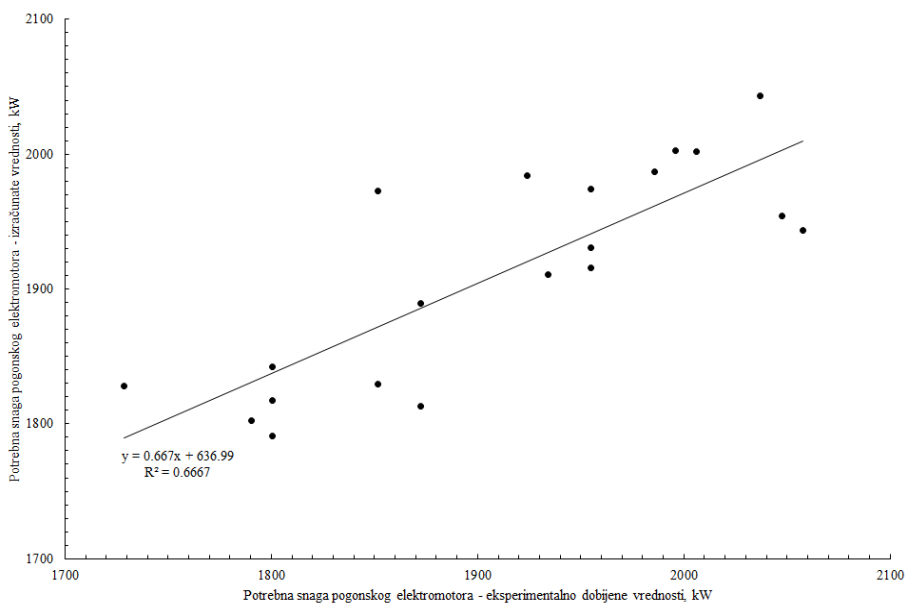
Ispitivanjem ventilatorskog mlina M-12 posle rekonstrukcije, dobijeno je da pri srednjem kapacitetu mlevenja od 145,9 t/h potrebna snaga za mlevenje iznosila 1600,1 kW (tabela 2) a specifična potrošnja energije 11,0 kWh/t.

Na osnovu tabele 2, potrebna ukupna snaga pogonskog elektromotora mlina pre rekonstrukcije iznosila je 1695,0 kW a posle rekonstrukcije 1911,1 kW.

Što se tiče pojedinačnih vrednosti specifične potrošnje energije (tabela 2), u nekim slučajevima dolazi do znatnog odstupanja vrednosti dobijenih ispitivanjem mlina i izračunatih vrednosti korišćenjem izraza (4). Ovo se može objasniti problematikom određivanja kapaciteta mlevenja i greškama koje mogu da se jave, kao i negativnoj vrednosti korelacije između kapaciteta mlevenja i vrednosti HGI (o ovome je govoreno ranije).

Korišćenjem izraza (3) i dobijenog korelacionog izraza za opterećenje mlina (potrošnju električne energije) koje je dato izrazom (6), moguće je na osnovu podataka o vrednosti HGI, podataka o tehničkoj analizi uglja i ugljenog praha, kao i o granulometrijskim podacima ostatka na situ veličine otvora 90

$\mu\text{m}$ , izračunati potrebnu ukupnu snagu pogonskog elektromotora mlina. Podaci dobijeni proračunom su dati u tabeli 3, a grafička interpretacija rezultata na slici 3.



*Slika 3. Prikaz rezultata proračuna potrebne snage pogonskog elektromotora mlina korišćenjem izraza (3) i (6)*

Može se videti da se vrednosti dobijene korišćenjem korelacionih izraza u dobroj meri slažu sa izmerenim vrednostima (tabela 3), što znači da se dobijeni izrazi mogu koristiti pri proračunu opterećenja i potrebne snage za mlevenje uglja posmatranog mlinskog postrojenja.

#### IV. Zaključak

Na osnovu izmerenih rezultata ispitivanja mlina, dobijene su korelacione zavisnosti koje sa visokim koeficijentom determinacije ( $R^2 = 0,667$ ) predviđaju potrošnju električne energije za mlevenje (odnosno opterećenje mlina). Pored toga, dobijeni su i korelacioni izrazi koji predviđaju kapacitet mlevenja a na osnovu vrednosti HGI uglja, tehničke i sitovne analize. Veoma visoki koeficijent determinacije izraza za potrošnju električne energije i zadovoljavajuće vrednosti koeficijenta determinacije izraza za izračunavanje kapaciteta mlevenja, pokazuju da se dobijeni izrazi mogu koristiti za izračunavanje ovih procesnih parametara na ventilatorskim mlinovima TENT-a B.

U literaturi postoje izrazi koji povezuju vrednosti HGI i radni indeks Bonda, odnosno specifičnu potrošnju energije za mlevenje. Na osnovu ovih

izraza i eksperimentalno dobijenih vrednosti HGI, izračunate su vrednosti specifične potrošnje energije za mlevenje kolubarskih lignita. Izračunata srednja vrednost specifične potrošnje energije iznosila je 10,904 kWh/t. Ova vrednost je u skladu sa projektnim vrednostima mlina (11,7 kWh/t) kao i ranijim ispitivanjima mlina (10,7 kWh/t).

*Tabela 3. Snaga pogonskog elektromotora mlina dobijena na osnovu izmerenih i izračunatih vrednosti i korišćenjem izraza (6)*

	R. br.	$I^1$ [A]	$N_{\max}^2$ [kW]	$I^3$ [A]	$N_{\max}^4$ [kW]
Posle rekonstrukcije	7	198	2037,1	198,6	2043,4
	8	195	2006,2	194,6	2001,8
	9	187	1923,9	192,8	1984,1
	10	194	1995,9	194,6	2002,3
	11	200	2057,7	188,9	1943,5
	12	193	1985,7	193,2	1987,2
	13	188	1934,2	185,7	1911,0
	14	190	1954,8	186,2	1915,8
	15	190	1954,8	191,9	1973,9
	16	190	1954,8	187,6	1930,5
	17	199	2047,4	189,9	1954,0
	18	182	1872,5	183,7	1889,5
	19	174	1790,2	175,2	1802,8
	20	175	1800,5	176,7	1817,7
	21	175	1800,5	179,1	1842,6
	22	168	1728,4	177,7	1828,1
	23	175	1800,5	174,1	1791,0
	24	180	1851,9	177,8	1829,4
	25	180	1851,9	191,7	1972,6
	26	182	1872,5	176,2	1813,3
sr. vrednost		186	1911,1	185,8	1911,7
1) izmerena vrednost					
2) izračunata vrednost na osnovu izmerenih vrednosti					
3) izračunata vrednost korišćenjem izraza (6)					
4) izračunata vrednost korišćenjem izraza (6) i (3)					

Vrednosti specifične energije su izračunate na dva različita načina. Prvi način je korišćenjem izraza koji povezuje vrednosti HGI i specifičnu energiju a drugi način je da se izračuna potrebna snaga motora mlina, a zatim deljenjem sa kapacitetom mlevenja dobije vrednost specifične energije. Poređenjem ova dva

načina, dobijaju se bliske srednje vrednosti (10,904 kWh/t odnosno 11,000 kWh/t) ali se pojedinačne vrednosti u nekim slučajevima znatno razlikuju. Ovo se može objasniti problematikom merenja kapaciteta mlevenja i greškama koje se čine pri merenju.

Na osnovu rezultata ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 i dobijenih korelacionih izraza za vrednosti potrošnje električne energije za mlevenje ( $R^2 = 0,667$ ) izračunata je potrebna snaga pogonskog elektromotora mlina koja je neophodna za mlevenje uglja. Proračunom dobijena srednja vrednost potrebne snage pogonskog elektromotora mlina iznosila je 1911,7 kW dok je izračunata vrednost preko izmerene veličine potrošnje električne energije (struje) iznosila 1911,1 kW.

Može se zaključiti da se dobijene korelacione zavisnosti mogu koristiti pri definisanju opterećenja i potrebne snage za mlevenje uglja posmatranog mlinskog postrojenja, a izvedena metodologija formiranja korelacionih zavisnosti na osnovu pogonskih merenja i poznavanja karakteristika ugljeva je primenljiva i na druga mlinska postrojenja istog tipa.

## V. Literatura

- [1] **Živanović, T., D. Tucaković, Lj. Brkić, B. Ivljanin, R. Galić**, *Pregled stanja udarnih kola ventilatorskog mlina N400.42 i izrada projekta adaptacije mlina, Sveska 2 – Projekat adaptacije mlina u cilju njegovog ispitivanja, Deo 2-1 – Proračun kapaciteta mlevenja i konstruktivne mere za njegovo povećanje*, Izveštaj broj 09/07/24, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, 2009.
- [2] **Živanović, T., D. Tucaković, Lj. Brkić, G. Stupar, B. Ivljanin, R. Galić**, *Pregled stanja udarnih kola ventilatorskog mlina N400.42 i izrada projekta adaptacije mlina, Sveska 3 – Projekat izvedenog stanja adaptiranog ventilatorskog mlina, Deo 3-1 – Analiza rezultata merenja pre i posle adaptacije i projekat adaptacije*, Izveštaj broj 10/09/24, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, 2010.
- [3] **Stanojević, M., D. Radić, A. Jovović, M. Obradović, D. Todorović**, *Izveštaj o ispitivanju mlina M-12 na TENT B1 pre i posle rekonstrukcije*, Izveštaj broj 507/707/2010, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, 2010.
- [4] **Stanojević, M., D. Radić, A. Jovović, M. Obradović, D. Todorović**, *Izveštaj o ispitivanju mlinova posle rekonstrukcije na blokovima TENT B1 i B2 u cilju određivanja efekata rekonstrukcije*, Izveštaj broj 503/707/2011, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, 2011.
- [5] **Ganguli, R., S. Bandopadhyay**, Field-scale investigation of pulverized coal mill power consumption, *Minerals&Metallurgical Processing*, 25 (2008), 3, pp. 139-142, 2008.

- [6] **Obradović, M.**, *Istraživanje i komparacija uticaja karakteristika ugljeva niske toplotne vrednosti na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, 2015.
- [7] **Živanović, T.**, *Postrojenja za pripremu ugljenog praha sa ventilatorskim mlinovima*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2000.
- [8] **Gulič, M., Lj. Brkić, T. Živanović, B. Petković**, *Proračun ventilatorskih mlinova*, Minel Kotlogradnja, Beograd 1982.
- [9] **Novaković, Lj.**, *Ugljena materija i njena meljivost*, Rudarski institut, Beograd 1976.