UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Marko O. Obradović

Istraživanje i komparacija uticaja karakteristika ugljeva niske toplotne vrednosti na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja

Doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Marko O. Obradović

Research and comparison of the influence of low rank coals characteristics on their grindability and milling process parameters

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015.

Komisija za pregled i odbranu

Mentor:	dr Dejan Radić, vanredni profesor Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
Članovi komisije:	dr Miroslav Stanojević, redovni profesor Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
	dr Titoslav Živanović, redovni profesor Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
	dr Aleksandar Jovović, redovni profesor Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
	dr Dragana Životić, vanredni profesor Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Datum odbrane:

Zahvalnica

Ova doktorska disertacija je nastala kao rezultat višegodišnjeg rada na ispitivanjima ventilatorskih mlinova u postrojenjima za pripremu uglja u domaćim termoelektranama. Ispitivanja su vršena pod rukovodstvom prof. dr Miroslava Stanojevića i prof. dr Titoslava Živanovića, dok su laboratorijske analize meljivosti ugljeva rađene u Laboratoriji za procesnu tehniku Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Ovom prilikom izražavam svoju najiskreniju zahvalnost mentoru prof. dr Dejanu Radiću, koji je svojim znanjem i nesebičnom ličnom zalaganju, preporukama i sugestijama značajno unapredio ovaj rad.

Prof. dr Dragani Životić se zahvaljujem na nemerljivoj pomoći u oblasti petrologije i organske geohemije ugljeva. Bez njene pomoći i angažovanja ovaj rad bi u mnogome izgubio na naučnoj težini i kvalitetu.

Takođe se zahvaljujem prof. dr Kseniji Stojanović na izvršenim laboratorijskim analizama ugljeva.

Dušanu Todoroviću dugujem zahvalnost za nebrojeno dana provedenih sa mnom u laboratoriji, čineći rad mnogo manje napornim.

Zahvaljujem se članovima Katedre za procesnu tehniku na korisnim savetima i saradnji. Posebnu zahvalnost dugujem pokojnom prof. dr Milošu Kuburoviću, koji mi je omogućio da radim na Mašinskom fakultetu i svojim savetima uveo u svet nauke i mašinstva.

Svojoj porodici i prijateljima se zahvaljujem na nesebičnoj podršci i razumevanju tokom svih godina školovanja.

Na kraju, izražavam neizmernu zahvalnost Snežani Mirčetić koja je svih ovih godina verovala u mene i pomagala da ostanem na pravom putu.

Naslov:

Istraživanje i komparacija uticaja karakteristika ugljeva niske toplotne vrednosti na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja

REZIME:

Predmet disertacije predstavljaju domaći niskovredni ugljevi (ligniti), tačnije određivanje indeksa meljivosti po metodi Hardgrove-a i utvrđivanje uticaja karakteristika ovih ugljeva na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja u mlinskim postrojenjima za proizvodnju ugljenog praha.

Cilj disertacije je bio istraživanje svojstva meljivosti ugljeva niskog ranga (lignita) koji se koriste u najvećim domaćim termoenergetskim postrojenjima i postavljanje korelacionih zavisnosti uticaja pojedinih karakteristika uglja na Hardgrove-ov indeks meljivosti. Za ostvarivanje cilja doktorske disertacije realizovana su istraživanja na uzorcima ugljeva iz dva najveća domaća basena (kolubarskog i kostolačkog), koja su obuhvatila kako eksperimentalna istraživanja tako i analitičke metode koje su imale za cilj da definišu izraze kojima se mogu predvideti vrednosti Hardgrove-ovog indeksa meljivosti (HGI) domaćih ugljeva, kapacitet mlevenja i potrošnja energije za mlevenje.

U eksperimentalnom delu disertacije izvršena je laboratorijska analiza uzoraka ugljeva dva najvažnija domaća basena: kolubarskog i kostolačkog. Iz kolubarskog basena analizirano je 65 uzoraka a iz kostolačkog 24. Za sve uzroke izvršena je tehnička analiza i određene vrednosti HGI. Za izabrane uzorke (11 uzoraka iz kolubarskog i 13 uzoraka iz kostolačkog basena) izvršeno je određivanje masenog sadržaja i tipova ksilita, kao i petrografska i organo-geohemijska analiza. Takođe, izvršeno je kompletno ispitivanje geohemijskih karakteristika zbirnog uzorka lignita za oba basena čime je izvršena potpuna identifikacija porekla i sastava uglja. Izvršena je analiza uticaja meljivosti uzoraka uglja na rad ventilatorskog mlina termoenergetskog postrojenja. U tu svrhu izvršena su ispitivanja ventilatorskog mlina u termoelektrani TENT B u Obrenovcu.

Na osnovu rezultata određivanja vrednosti indeksa meljivosti primenom postupka Hardgrove-a, utvrđeno je da se standardna Hardgrove-ova metoda za određivanje indeksa meljivosti može primeniti za domaće lignite, a ovaj parametar se može koristiti za upoređivanje meljivosti domaćih lignita sa sličnim ugljevima niskog ranga.

Analizom dobijenih rezultata i vrednosti uticajnih koeficijenata, određeni su parametri i karakteristike ispitivanih ugljeva koji dominantno utiču na njihovu meljivost i koji se moraju uzeti u obzir za predviđanje ponašanja ugljeva u procesu mlevenja. Na osnovu toga izvedeni su korelacioni izrazi između vrednosti HGI i uticajnih karakteristika ugljeva, koji se mogu iskoristiti za predviđanje ponašanja domaćih ugljeva pri mlevenju u industrijskim mlinovima. Na ovaj način se vrednosti HGI mogu dobiti bez eksperimentalnog određivanja.

Najniže vrednosti koeficijenta determinacije (R^2) imaju izrazi u koje je uključena samo tehnička analiza uzoraka, dok se znatno bolji koeficijenti determinacije (R^2) dobijaju kada se izrazi formiraju sa sadržajem pojedinih litotipova, odnosno petrografskim sastavom uglja. Pokazalo se da je moguće na osnovu elemenata tehničke analize predvideti vrednosti HGI, ali ukoliko je za uzorke ugljeva poznat litotipni sastav ili petrografske analize, korišćenjem izraza koji su dati u disertaciji, dobijaju se vrednosti HGI sa visokim koeficijentom determinacije (R^2).

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. Rezultati mogu biti korisni stručnjacima u cilju optimizacije rada ne samo postrojenja za pripremu ugljenog praha nego i optimizacije rada celog termoenergetskog postrojenja.

Ključne reči:

ugalj bogat ksilitom, lignit, Hardgrove indeks meljivosti (HGI), petrografija, termoelektrane, mlevenje uglja, ventilatorski mlinovi, regresiona i korelaciona analiza

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Procesna tehnika

UDK broj: 622.73:622.332(043.3)
622.642(043.3)

Title:

Research and comparison of the influence of low rank coals characteristics on their grindability and milling process parameters

ABSTRACT:

The subject of the doctoral dissertation is Serbian low rank coal (lignite), specific the determination of coal grindability index using Hardgrove method and influence of characteristics of these coals on grinding behavior and grinding process parameters in coal pulverizers.

The aim of the dissertation was to investigate the properties of the grindability of low rank coals (lignite) used in the largest domestic thermal power plants and setting the correlations depending on the impact of individual characteristics of coal on coal grindability index. For achieving the goal of doctoral dissertation research carried out on samples of coal from the two largest domestic coal basin (Kolubara and Kostolac), which included both experimental studies and analytical methods that are aimed to define the mathematical expressions that can predict the Hardgrove grindability index (HGI) of domestic coal, mill capacity and energy consumption.

The experimental part of the dissertation included laboratory analysis of coal samples from the two most important domestic basins: the Kolubara and Kostolac. 65 samples of coal from the Kolubara basin and 24 samples from Kostolac were analyzed. For all samples proximate analysis was performed and HGI values determined. For selected number of samples (11 samples from Kolubara basin and 13 samples from Kostolac basin) analysis was performed to determine the lithotype composition, as well as petrographic and organic geochemical analysis. In order to identify origin and composition of coal, organic geochemical analysis was carried out on group sample. Also, analysis of the influence of grindability of coal samples on milling process in beater wheel mill were carried out. For this purpose, tests were made on beater wheel mill in thermal power plant TENT B in Obrenovac.

Based on the results of determining the grindability index using the Hardgrove method, it was found that the standard method for determining Hardgrove grindability index can be applied to domestic lignite, and this parameter can be used to compare the grindability of domestic lignite coals with similar low rank coals.

Based on the results of experimental research and influential coefficients, parameters and characteristics of coal samples which predominantly affect on milling process, which must be taken into account to predict the behavior of coal in the milling process were determined. Based on coal characteristics and influential coefficients, mathematical expressions between values of HGI and coal characteristics, which can be used to predict the behavior of domestic coal in comminution process, were derived. In this way, the values of HGI can be obtained without its experimental determination.

The lowest values of the coefficient of determination (R squared) have the expressions which involve only proximate analysis of coal, while a significantly higher coefficient of determination (R squared) are obtained when the expressions are formed with the lithotype or petrographic composition of coal. It has been shown that it is possible to predict the value of HGI on the basis of proximate analysis. But if the lithotype or petrographic composition of coal is known, using expressions given in the dissertation, obtained values of HGI give high coefficient of determination (R squared).

Analysis of the influence of grindability of coal and coal characteristics on mill capacity and energy consumption in power plants 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 thermal power plant mill. These results may be useful for engineers in order to optimize not only the pulverizers but also the operation of whole power plant.

Key words:

Xylite-rich coal, Lignite, Hardgrove grindability index (HGI), Petrography, Thermal power plant, Coal comminution, Beater wheel mill, Regression and correlation analysis

General scientific field:	Mechanical Engineering
Particular scientific field:	Process Engineering
UDC:	622.73:622.332(043.3) 622.642(043.3)

SADRŽAJ

1. Uvod 1
2. Poreklo, petrologija i klasifikacija ugljeva 4
   2.1. Nastanak i poreklo ugljeva 4
   2.2. Petrologija ugljeva 7
   2.3. Klasifikacija ugljeva 12
   2.4. Klasifikacija ugljeva prema međunarodnim standardima sa osvrtom na klasifikaciju domaćih ugljeva 15
3. Klasifikacija macerala mrkih ugljeva – ICCP sistem 1994. 27
   3.1. Grupa huminita 27
   3.2. Grupa liptinita 33
   3.3. Grupa inertinita 38
4. Litotipovi mrkih ugljeva 44
5. Ligniti kolubarskog i kostolačkog basena 48
   5.1. Kolubarski basen 48
   5.2. Kostolački basen 51
6. Teorijske osnove usitnjavanja 53
   6.1. Osnovni zakoni usitnjavanja 54
7. Meljivost ugljeva i Hardgrove indeks meljivosti (HGI) 58
   7.1. Karakteristike HGI 60
8. Metode određivanja koeficijenta meljivosti uglja 65
   8.1. Metoda Hardgrove-a 66
   8.2. Metoda VTI 67
   8.3. Metoda VUK 68
   8.4. Metod Centralnog kotlo-turbinskog instituta (CKTI) 69
   8.5. Laboratorijski mlin sa kuglama (mlin dobošar sa 100 čeličnih kugli) 70
   8.6. Postupak određivanja radnog indeksa u mlinu sa kuglama – standardni Bondov test 71
   8.7. Poređenje različitih metoda za određivanje koeficijenta meljivosti 76
9. Pregled postojećih rezultata i dostignuća iz oblasti doktorske disertacije 81

10. Plan eksperimentalnih istraživanja 114
10.1. Pregled uzoraka ugljeva korišćenih za istraživanje 114
10.2. Određivanje vrednosti HGI 114
10.3. Pregled metoda tehničke analize ugljeva 115
10.4. Petrografske analize uzoraka ugljeva 116
10.5. Organsko-geohemijska ispitivanja 116
10.6. Analitičke metode 118
11. Geohemijske karakteristike ispitivanih uzoraka ugljeva (zbirni uzorak) 119
11.1. Sadržaj vlage i rezultati elementarne analize organske supstance 119
11.2. Grupni sastav bitumena 120
11.3. Alkani 122
11.3.1. *n*-alkani 123
11.3.2. Izoprenoidni alkani 127
11.3.3. Seskviterpani, diterpani i triterpani 129
11.3.4. Hopanoidi 139
11.3.5. Steroidi 142
11.4. Aromatična jedinjenja 144
12. Uticaj elemenata tehničke analize uzoraka ugljeva na njihovu meljivost 154
13. Uticaj sadržaja vlage na vrednosti HGI 165
14. Uticaj petroloških i organo-geohemijskih karakteristika izabranih uzoraka lignita kolubarskog i kostolačkog basena na njihovu meljivost 171
14.1. Rezultati analiza uzoraka 171
14.1.1. Litotipovi 171
14.1.2. Maceralni sastav 172
14.1.3. Organsko-geohemijske karakteristike uzoraka 176
14.1.4. Molekularni sastav organske materije 178
14.2. Analiza rezultata 192
14.2.1. Litotipovi i vrednosti HGI 192
14.2.2. Maceralni sastav uzoraka i vrednosti HGI 193
14.2.3. Organsko-geohemijske karakteristike uzoraka i vrednosti HGI 194
14.2.4. Molekularni sastav organske materije i vrednosti HGI 197

15. Korelacione zavisnosti vrednosti HGI od tehničkih i petrografskih karakteristika ispitivanih ugljeva 200
15.1. Uzorci uglja kolubarskog basena 200
15.2. Uzorci uglja kostolačkog basena 202
15.3. Analiza korelacionih zavisnosti 204
16. Uticaj vrednosti HGI i karakteristika uglja na kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje 218
16.1. Zavisnost između potrošnje energije za mlevenje i vrednosti HGI 232
17. Zaključak 240
18. Literatura 252
Prilog 1 – Pregled korelacionih izraza P1
Prilog 2 – Fotografije litotipova P14
Prilog 3 – Identifikacija pikova u masenim spektrima alkanske frakcije P18
Prilog 4 – Identifikacija pikova u masenim spektrima aromatične frakcije P22

SPISAK OZNAKA

Veličina	Jedinica	Naziv
A	%	sadržaj pepela u radnom uzorku (maseni udeo)
A_a	%	sadržaj pepela u analitičkom uzorku (maseni udeo)
At	%	sadržaj atrinita (zapreminski udeo)
B	t/h	kapacitet mlevenja
BU	%	sadržaj barskog uglja (maseni udeo)
C^{db}_{org}	%	sadržaj organskog ugljenika bez vlage (maseni udeo)
C^{dmmfb}_{org}	%	sadržaj organskog ugljenika bez vlage i mineralnih materija (maseni udeo)
Ch	%	sadržaj korpohuminita (zapreminski udeo)
CPI	–	Carbon preference index, odnos *n*-alkana sa neparnim i parnim brojem C-atoma
Cu	%	sadržaj kutinita (zapreminski udeo)
CWDI	–	indeks degradacije četinara (Conifer Wood Degradation Index)
D_1	m	spoljni prečnik udarnog kola mlina
D_{90}	%	propad kroz sito veličine otvora 90 μm
De	%	sadržaj densinita (zapreminski udeo)
DK	%	sadržaj dopleritskog ksilita (maseni udeo)
Fn	%	sadržaj funginita (zapreminski udeo)
Fu	%	sadržaj fuzinita (zapreminski udeo)
Ge	%	sadržaj gelinita (zapreminski udeo)
HC	%	sadržaj ugljovodonika (masenu udeo)
H^{d}_{org}	%	sadržaj organskog vodonika bez vlage (maseni udeo)
H_g	MJ/kg, kJ/kg	gornja toplotna moć uglja
HGI	–	vrednost Hardgrove-ovog indeksa meljivosti uglja
HUM	%	sadržaj huminita (zapreminski udeo)
I	A	potrošnja električne energije za mlevenje (opterećenje mlina)
Id	%	sadržaj inertodetrinita (zapreminski udeo)

INER	%	sadržaj inertinita (zapreminski udeo)
I_{sp}	$A/(t \cdot h^{-1})$	specifična potrošnja električne energije za mlevenje (specifično opterećenje mlina)
K_{CKTI}	–	koeficijent meljivosti uglja prema metodi CKTI
KSI	%	sadržaj ksilinita – ukupnih ksilita (maseni udeo)
K_{VTI}	–	koeficijent meljivosti uglja prema metodi VTI
K_{VUK}	–	koeficijent meljivosti uglja prema metodi VUK
Ld	%	sadržaj liptodetrinita (zapreminski udeo)
LIP	%	sadržaj liptinita (zapreminski udeo)
Ma	%	sadržaj makrinita (zapreminski udeo)
MM_L	%	sadržaj mineralnih materija, litotipni sastav (maseni udeo)
MM_M	%	sadržaj mineralnih materija, maceralni sastav (zapreminski udeo)
N	kW	snaga za obavljanje procesa u mlinu (snaga za mlevenje)
N^d_{org}	%	sadržaj organskog azota bez vlage (maseni udeo)
N_{max}	kW	ukupna snaga pogonskog elektromotora mlina
NSO	%	polarna frakcija koja sadrži jedinjenja azota, sumpora i kiseonika
$\overline{R}_r$	%	srednji stepen refleksije vitrinita
r	–	koeficijent korelacije
R^2	–	koeficijent determinacije
R_{90}	%	ostatak na situ veličine otvora 90 μm
Re	%	sadržaj rezinita (zapreminski udeo)
S^{db}	%	sadržaj ukupnog sumpora bez vlage (maeni udeo)
S^d_{org}	%	sadržaj organskog sumpora bez vlage (maseni udeo)
S_{uk}	%	sadržaj ukupnog sumpora (maseni udeo)
$S_{uk,a}$	%	sadržaj ukupnog sumpora u analitičkom uzorku (maseni udeo)
Sf	%	sadržaj semifuzinita (zapreminski udeo)
Sp	%	sadržaj sporinita (zapreminski udeo)
Te	%	sadržaj tekstinita (zapreminski udeo)
TK	%	sadržaj trakastog ksilita (maseni udeo)

TRK	%	sadržaj trakastih ksilita – strukturni + dopleritski ksilit (maseni udeo)
U	V	napon pogonskog elektromotora mlina
Ul	%	sadržaj ulminita (zapreminski udeo)
V	%	sadržaj isparljivih materija u radnom uzorku (maseni udeo)
V_a	%	sadržaj isparljivih materija u analitičkom uzorku (maseni udeo u %)
VLK	%	sadržaj vlaknastih ksilita – mumuficirani + trakasti ksilit (maseni udeo)
W	%	sadržaj ukupne vlage (maseni udeo)
WG	%	sadržaj grube vlage (maseni udeo)
W_h	%	sadržaj higroskopne vlage u radnom uzorku (maseni udeo)
$W_{h,a}$	%	sadržaj higroskopne vlage u analitičkom uzorku (maseni udeo)
$W_{h,a,up}$	%	sadržaj higroskopne vlage u ugljenom prahu u analitičkom uzorku (maseni udeo)
W_i	kWh/t	specifična potrošnja energije za mlevenje
ZU	%	sadržaj zemljastog uglja (maseni udeo)

1. Uvod

U ložištima kotlova domaćih termoelektrana sagorevaju se ugljevi u sprašenom stanju. Istraživanje i analiza meljivosti ugljeva, što je predmet ove doktorske disertacije, treba da omoguće optimizaciju procesa mlevenja i postizanje značajnih unapređenja rada mlinskih postrojenja, a samim tim i celokupnog energetskog postrojenja u kome se ugalj koristi kao gorivo. Razvojem tehnologije sagorevanja ugljenog praha uočena je neophodnost da se definiše objektivni pokazatelj meljivosti uglja. Dosadašnja praksa je pokazala da ovaj zahtev ispunjava koeficijent meljivosti koji pokazuje koliki je specifični otpor pri mlevenju uglja.

Predmet doktorske disertacije predstavljaju domaći niskovredni ugljevi (ligniti), tačnije određivanje vrednosti Hardgrove-ovog indeksa meljivosti (HGI – Hardgrove grindability index) i utvrđivanje uticaja karakteristika ovih ugljeva na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja.

Cilj doktorske disertacije je istraživanje svojstva meljivosti niskovrednih ugljeva (lignita) koji se, između ostalog, koriste i u najvećim termoenergetskim objektima u Srbiji i to u: Termoelektrani „Nikola Tesla A“, Termoelektrani „Nikola Tesla B“, Termoelektrani „Kolubara“, Termoelektrani „Kostolac“ itd. Takođe, u radu je data i korelacija eksperimentalno dobijenih vrednosti HGI sa laboratorijskim podacima analize ugljeva a sve u cilju dobijanja zavisnosti koje se mogu iskoristiti za predviđanje indeksa meljivosti domaćih ugljeva.

Istovremeno mlevenje i sušenje uglja u ventilatorskim mlinovima se pokazalo kao najcelishodnije, naročito sa gledišta regulacije procesa sagorevanja u celini, iako se na ovaj način dobija relativno grubi ugljeni prah, naročito ako se koristi ugalj sa većim udelom teško meljivog ksilita. Ovakav ugalj ima velikog uticaja na habanje radnih elemenata ploča udarnog kola i pancira spirale kućišta mlina, a samim tim i na skraćen radni vek između dva remonta.

Meljivost ugljeva ima direktni uticaj na rad mlinova (kapacitet i snagu), a u nekim slučajevima i na kapacitet celokupnog termoenergetskog postrojenja.

Meljivost ugljeva se određuje eksperimentalno, za ugljeve prema standardnim procedurama, i najčešće izražava preko Hardgrove-ovog indeksa meljivosti. O uticaju ovog parametra na kapacitet mlinova može se zaključiti analizom određenih formula

koje se koriste pri proračunu kapaciteta mlevenja. Analize pokazuju da se povećanjem vrednosti HGI uglja za približno 10 jedinica ostvaruje povećanje projektovanog kapaciteta mlina za 8 – 10 %.

U tom smislu, za određivanje indeksa meljivosti domaćih lignita koji se koriste u našim termoelektranama, u disertaciji će se koristiti postupak Hardgrove-a, definisan standardom ISO 5074.

Kako je ugalj veoma heterogena materija, postoji veliki broj parametara koji mogu uticati na vrednosti HGI, a to su: rang uglja (ligniti, mrki, kameni, antraciti), litotipni sastav naročito kod niskovrednih ugljeva (lignita), organsko-geohemijski sastav uglja, udeo vlage i mineralnih materija u uglju itd.

Posle izvršenih ekperimentalnih i laboratorijskih ispitivanja, metodama statističke analize moguće je uspostaviti korelacionu vezu između pojedinih karakteristika ugljeva i vrednosti HGI.

Efikasno sagorevanje ugljenog praha u velikim termoenergetskim i drugim postrojenjima zahteva ugalj sa unapred definisanim opsegom prečnika čestice. Jedna od karakteristika uglja koja utiče na kapacitet i rad mlinova jeste njegova meljivosti. Iz ovih razloga, potrebno je da podatak o vrednostima indeksa meljivosti bude uključen sa ostalim podacima pri zahtevu isporučiocima uglja prilikom nabavke.

Razvojem tehnologije sagorevanja sprašenog uglja, uočena je neophodnost da se stvori veličina koja bi objektivno pokazala kako se jedan ugalj melje, tj. koliki je njegov specifični otpor mlevenju. U tu svrhu je razvijeno više postupaka za određivanje indeksa meljivosti uglja, od kojih su dva najpoznatija – Bond-ov postupak i postupak Hardgrove-a. Najčešće primenjivani postupak je Hardgrove-ov postupak, koji je prvobitno razvijen za kamene ugljeve od strane Ralfa Hardgrovea (Ralph Hardgrove).

Pregledom literature, zapaženo je da se Hardgrove-ov postupak može koristiti ne samo za kamene ugljeve već i za druga čvrsta goriva (npr. biomasu). U dostupnoj literaturi, veliki broj autora koristi ovaj postupak, često uz određene modifikacije, za određivanje indeksa meljivosti niskovrednih ugljeva, pa čak i biomase.

Usled heterogenosti ugljene materije, veliki broj parametara može imati uticaj na vrednosti HGI. Neki od tih parametara su udeo vlage, pepela, isparljivih materija i fiksnog ugljenika u uglju. Postoje i drugačiji pristupi, u kojima pojedini autori indeks meljivosti analiziraju u funkciji petrografskog sastava uglja.

Imajući ovo u vidu, čine se veliki napori da se dobije zavisnost između sastava uglja i podatka o vrednosti HGI. Zbog heterogenosti ugljene materije zavisnosti koje se pri tome dobijaju odnose se na pojedinačne lokalitete. Pre njihovog korišćenja mora se eksperimentalno utvrditi mogućnost njihove primene na dati ugalj, a često se ni dobijeni rezultati indeksa meljivosti za različite ugljeve ne mogu direktno porediti, već se moraju tumačiti uzimanjem u obzir niza karakteristika ugljeva.

Naučna opravdanost doktorske disertacije se ogleda u razmatranju i oceni mogućnosti primene Hardgrove-ovog indeksa meljivosti za predviđanje ponašanja domaćih ugljeva, niske toplotne moći koji se koristi u domaćim termoelektranama, pri njihovom mlevenju u mlinovima.

Osim toga, treba istaći da su u domaćim termoelektranama postrojenja za pripremu ugljenog praha sa ventilatorskim mlinovima, a da Hardgrove-ova metoda koja se koristi za određivanje vrednosti HGI podrazumeva upotrebu laboratorijskog mlina sa kuglama. To posebno ističe značaj ove doktorske disertacije u delu koji se odnosi na ocenu pogodnosti primene Hardgrove-ovog indeksa meljivosti za rad mlinskih postrojenja u domaćim termoelektranama. Brojni publikovani radovi iz ove oblasti ukazuju da je Hardgrove-ov indeks meljivosti dominantan način ocene meljivosti ugljeva i u ovim slučajevima.

2. Poreklo, petrologija i klasifikacija ugljeva

Pod ugljem se podrazumeva organogena sedimentna stena mrke do crne boje koja ima sposobnost da gori. Zajedno sa naftom i zemnim gasom spada u grupu kaustobiolita (kaustos – gorući, bios – život, litos – kamen) odnosno fosilnih goriva.

2.1. Nastanak i poreklo ugljeva

Ugalj je nastao akumulacijom ostataka viših i nižih kopnenih biljaka. Proces razlaganja polazne biljne materije dešava se u specifičnoj fizičkoj sredini pod dejstvom bioloških, fizičko-hemijskih i geoloških faktora. Po opštem mišljenju, da bi došlo do formiranja jednog ugljenog sloja, potrebni su sledeći uslovi [1]:

1. mora postojati bujna vegetacija koja će omogućiti stvaranje dovoljne količine matičnog materijala za nastanak treseta,
2. mora postojati dovoljno visok nivo vodenog stuba da bi pokrio nagomilani biljni materijal a istovremeno i dovoljno nizak kako bi omogućio rast novih biljaka,
3. jedan isti ishodni materijal može poslužiti za postanak raznih vrsta ugljeva,
4. prvi stadijum postanka uglja predstavlja stadijum treseta,
5. proces postanka treseta se vrši uz neposredno učešće mikrobioloških i biohemijskih faktora,
6. posle pokrivanja treseta povlatnim sedimentima, organske materije i dalje trpe izmene koje se vrše pod uticajem biohemijskih (dijageneza) i geohemijskih (katagenaza) procesa,
7. humifikacija treseta, koja se vrši sintezom huminskih kiselina i međuprodukata razlaganja celuloze, pektinovih materija i belančevina, naročito je intenzivna u neutralnoj vodenoj sredini – dok je neznatna u alkalnoj. U uslovima alkalnih tresetnih voda nastaju visoke tresave, dok se kod neutralnih vrši obrazovanje niskih tresava,
8. niske tresave sa malim sadržajem smola i voskova posle obrazovanja povlate pretvaraju se u zemljaste a kasnije u polu-sjajne mrke ugljeve. Niske tresave sa značajnim sadržajem smola i voskova pod uticajem geoloških faktora (pritisak i temperatura) mogu dati mrko-kamene ugljeve sa manje-više izraženim koksujućim

osobinama. Visoke tresave prelaze u koksne ugljeve. Krajnji metagenetski produkt izmena raznih ugljeva predstavlja antracit,

9. lignit, mrki ugljevi, kameni ugljevi i antraciti predstavljaju jedinstveni genetski niz. Ovim se potvrđuje postojanje evolucije ugljeva, što se može postići i veštačkim putem,
10. mikroskopskim ispitivanjem po mnogim znacima nesumnjivo se potvrđuje postojanje prvobitne ugljene mase u žitkom stanju. Rendgenografskim ispitivanjem potvrđuje se postojanje kristaloidne strukture kod antracita i grafita. Ovo dokazuje da ugljena materija u toku svoje evolucije prolazi kroz sledeća stanja: sol – gel – koloid – kristaloid.

Sam proces transformacije organske materije od početne biljne, preko treseta, mrkog uglja, zatim kamenog do antracita naziva se karbonifikacija. Osnovni faktori koji utiču na proces karbonifikacije su temperatura, pritisak i vreme.

Temperatura kao faktor definisana je pravilom koje se u literaturi naziva Hiltovim pravilom. Hiltovo pravilo kaže da stepen karbonifikacije uglja raste proporcionalno sa stratigrafskom dubinom sloja i javlja se usled porasta temperature sa dubinom.

Pritisak ima važnu ulogu kod hemijskih i strukturnih promena. Pritisci izazivaju trenje čestica, koje izaziva porast temperature a porast temperature izaziva hemijske promene. Pritisak može biti: bočni i vertikalni. Bočni pritisak je značajniji dok je vertikalni više povezan sa temperaturom i vremenom [2].

Vreme ima najmanje značajnu ulogu u procesu karbonifikacije uglja od tri navedena faktora.

Generalno gledano, proces stvaranja ugljeva se može podliti na dve faze:

- pripremnu ili fazu humifikacije i
- fazu gelifikacije.

Pripremnom fazom obuhvaćeni su svi procesi kojima se vrši akumulacija biljnog materijala i njegova transformacija u treset. Ova akumulacija se vrši u tresetištima. Prema ispitivanjima [3, 4] postoje dva načina nagomilavanja biljnih ostataka u basenima: autohtoni (nagomilavanje u okviru sredine u kojoj je rasla biljka) i alohtoni (nagomilavanje u sredini u kojoj biljke nisu rasle).

Detaljnije gledano, na osnovu literaturnih podataka [1, 3, 4] može se izvršiti sledeći pregled procesa koji se vrše u toku formiranja određenog uglja:

- stvaranje treseta,
- humifikacija,
- gelifikacija – biohemijska i geohemijska,
- grafitizacija.

Proces humifikacije je proces u kome se organska materija pretvara u humus. Proces se sastoji iz nekoliko procesa: vrenja ili fermentacije, saponifikacije i amonifikacije.
Tresetizacija je proces sličan humifikaciji i odvija se u močvarama, gde biljke rastu na nagomilanim ostacima uginulih biljaka. Pri tome gornji deo naslaga izoluje donji deo od uticaja vazduha pri čemu nastaju uslovi za stvaranje treseta. Treset je zajedničko ime za humusni mulj u kome se nalaze i ostaci nerazgrađene organske materije.
Sapropelizacija se odvija u uslovima bez prisustva vazduha, u redukcionoj sredini i uz dejstvo anaerobnih bakterija, pri čemu se masti i belančevine pretvaraju u masne kiseline. Ovim procesom organska masa sa pretvara u muljevitu masu neprijatnog mirisa – sapropel. Ovom priliko se izdvajaju metan, sumpor vodonik i vodonik.
Bitumenizacija je usko povezana sa procesom sapropelizacije. U procesu nastaju bitumeni od nagomilanih masnih materija, smola i voskova. Na ovaj način nastaju ugljevi bogati vodonikom i ugljenikom tzv. sapropeliti ili sapropelni ugljevi.
U mestima gde ima pretežno ugljenih hidrata nastaje humus a gde ima pretežno belančevina i masti nastaje sapropel a gde preovlađuju vosak i smole tu dolazi do stvaranja liptobiolita.
Kroz prethodno navedene procese nastaju različite vrste ugljeva dok je stepen karabonifikacije svakog uglja uslovljen procesom karbonifikacije i grafitizacije.
Prema stepenu karbonifikacije, odnosno rangu ugljevi se mogu podeliti na:

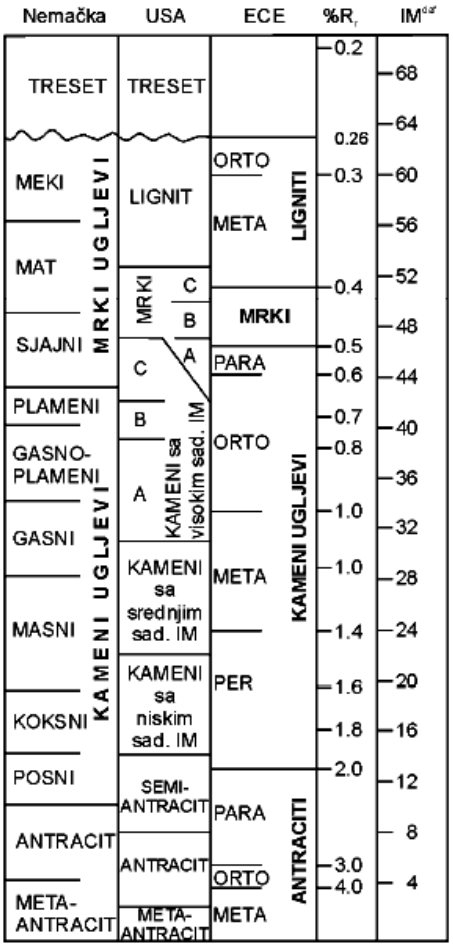
- lignite i mrke – ugljeve niskog ranga,
- kamene – ugljeve srednjeg ranga i
- antracite – ugljeve visokog ranga.

U odnosu na poreklo organske materije izdvajaju se:

- ugljevi nastali od viših biljaka – humusni i liptobioliti,

- ugljevi nastali od viših i nižih biljaka – humusno-sapropelni i sapropelno-humusni i
- ugljevi nastali od nižih biljaka – sapropelni.

Na slici 2.1. prikazane su različite klasifikacije ugljeva prema rangu.



Slika 2.1. Različite klasifikacije uljeva prema rangu [2]

ECE – Evropska Ekonomska Komisija, %R_r – srednja refleksija vitrinita, IM^{daf} – sadržaj isparljivih materija bez vlage i pepela

2.2. Petrologija ugljeva

Ugalj nije homogena materija, već je izgrađen od različitih macerala koji se udružuju u grupe i u određenim uslovima grade karakteristične litotipove. Na osnovu njihovog prisustva i količine ugljevi su izdvojeni u posebne grupe.

Macerali predstavljaju ostatke različitih biljnih organa (koren, stablo, list ili grana). Naziv potiče od latinske reči *macerare* što znači potopiti, natapati, kvasiti, raskvasiti. Međutim usled različitih faktora u procesu karbonifikacije nije uvek moguće prepoznati biljni organ od kojeg potiče određeni maceral. Na formiranje macerala utiču rane faze akumuliranja biljnih ostataka, vrsta biljaka kao i klimatski i drugi uslovi. Macerali se mogu shvatiti kao mineral kod stena. Međutim, mineral je definisan svojim hemijskim sastavom i homogenom strukturom, dok macerali, čak i istog ranga, ne predstavljaju homogeni materijal, već mašavinu nekoliko sličnih komponenata čiji hemijski sastav je različit. Većina macerala je dobila ime po poreklu, odnosno po vrstama ili delovima biljne materije od koje je postala.

Termin maceral opisuje poreklo i oblik mikroskopski prepoznatljivih sastojaka uglja. Da bi se pojedini macerali razlikovali pod mikroskopom, neophodno je bilo definistati parametre koji se mogu utvrditi gledanjem mikroskopskog prikaza. Ti parametri mogu biti, refleksija, boja, oblik i reljef ili tvrdoća površine. Da bi se uredila definisanja macerala, Međunarodni komitet za petrologiju uglja i organsku petrologiju (ICCP – International Committee for Coal and Organic Petrology) je definisao standarde i pravila petrografije uglja. Jedno od pravila je da se macerali identifikuju na osnovu svojih optičkih karakteristika kada se gledaju pod mikroskopom u odbijenoj svetlosti. Sva pitanja i probleme vezane za nomenklaturu i klasifikaciju ugljeva analizira i rešava ICCP.

Prema ICCP macerali se dele u tri grupe i u svom nazivu imaju sufiks –*init*: huminit, liptinit i inertinit. Macerali su prema svojim sličnim karakteristikama svrstani u grupe i podgrupe, tipove i podtipove. U ove karakteristike su ubrajaju: stepen refleksije, stepen očuvanosti originalnog biljnog materijala, morfološte karakteristike itd.

U zavisnosti od stepena karbonifikacije biljna materija može biti više ili manje očuvana. U tom smislu postoje i jasne razlike u očuvanosti biljne materije kod mrkih i kamenih ugljeva. Samim tim postoji i razlika u maceralima ovih ugljeva. Osnovne grupe macerala kod mrkih ugljeva su huminiti, liptiniti i inertiniti, a kod kamenih vitriniti, liptiniti i inertiniti. Tokom procesa karbonifikacije organska materija prelazi u macerale huminitske grupe kod mrkih ugljeva a zatim u macerale vitrinitske grupe kod kamenih ugljeva (tabela 2.1), odnosno macerali huminitske i vitrinitske grupe su istog porekla.

Tabela 2.1. Macerali mrkih i kamenih ugljeva [2]

Mrki ugljevi			Kameni ugljevi		
Grupa macerala	Podgrupa macerala	Maceral	Grupa macerala	Podgrupa macerala	Maceral
Huminiti	Telohuminit (Humotelinit)	Tekstinit	Vitriniti	Telovitrinit	Telinit
		Ulminit			Kolotelinit (Telokolinit)
	Detrohuminit (Humodetrinit)	Atrinit		Detrovitrinit	Vitrodetrinit
		Densinit			Kolodetrinit (Desmokolinit)
	Gelohuminit (Humokolinit)	Korpohuminit		Gelovitrinit	Korpogelinit
		Gelinit			Gelinit (Gelokolinit)
Napomena: u zagradama su dati stari nazivi macerala					

Macerali grupe huminita/vitrinita predstavljaju osnovni sastojak humusnih ugljeva. Vode poreklo od lignina i celuloze. Hemijska struktura je izražena preko aromatičnih jedninjenja. Proces kojom se biljna tkiva transformišu u huminite a kasnije u vitrinite se naziva humifikacija, gelifikacija i vitrinizacija. U normalnoj svetlosti macerali ove grupe su tamnosive, sive do svetlo sive boje. Takođe ova grupa macerala je nosilac najveće količine ugljenika i osnovnih svojstava ugljeva.

Macerali grupe liptinita (egzinita) obuhvataju: sporinit-polinit, kutinit, suberinit, rezinit, alginit, liptodetrinit, bitumit, eksudatinit, fluiorinit i florofilinit. Vode poreklo od rezistentnih delova biljaka kao što su spore, kutikule, ćelijski zidovi. Ova grupa macerala ima najveći sadržaj vodonika i kiseonika. Njihova boja u odbijenoj svetlosti je od crne do tamno braon. Većina macerala ove grupe ima sposobnost da fluoresciraju u ultraljubičastoj svetlosti, pri čemu intenzitet fluorescencije opada sa porastom ranga uglja.

Grupa inertinita obuhvata: fuzinit, semifuzinit, fungitit (stari naziv sklerotinit), sekretinit, inertodetrinit, makrinit i mikrinit. Oni predstavljaju slabo reaktivne komponente uglja bele boje i visoke refleksije. Nastali su oksidacijom macerala huminitske i liptinitske grupe. Imaju visok sadržaj ugljenika i najniži udeo vodonika i kiseonika od svih grupa macerala.

Petrografske karakteristike i poreklo macerala gore navedenih grupa dati su detaljnije u literaturnim izvorima [5, 6].

Litotip predstavlja makroskopski prepoznatljiv sastojak uglja. Predstavlja kombinaciju jedne, dve ili sve tri grupe macerala. Pojam je uveden od strane Mari Stoups (Marie Stopes) 1919. godine kao „četiri vidljiva sastavna dela trakastih ugljeva“ [7].

Litotipovi se razlikuju po boji, zatim sjaju i strukturnim karakteristikama, tehnološkim osobinama i maceralnom i hemijskom sastavu. Razlikuju se litotipovi mrkih i kamenih ugljeva.

Mrki ugljevi obuhvataju sledeće litotipove:

- barski,
- ksilitni,
- fuzenizirani,
- zemljasti,
- dopleritski.

Litotipovi kamenih ugljeva se makroskopski razlikuju od litotipova mrkih ugljeva. Izdvaja se četiri litotipa kamenih ugljeva čiji je pregled dat u tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Litotipovi kamenih ugljeva [2, 3, 7]

Litotip	Makroskopske osobine	Karakteristike
Vitren	Sjajan, crne boje, obično lako lomljiv – krt, često ispucao	Izgrađen od macerala vitrinitske grupe, sa niskim sadržajem macerala liptinitske i inertinitske grupe U naslagama uglja obrazuje slojeve debljine 3 do 10 mm Često je pomešan sa klarenom gradeći klarovitren
Klaren	Polusjajan, crne boje, tankoslojevit	Izgrađen od macerala vitrinitske i liptinitske grupe sa niskim sadržajem macerala inertinitske grupe Često je pomešan sa vitrenom kada gradi vitroklaren a sa durenom duroklaren
Duren	Mat, crne do sivocrne boje, kampaktan, tvrd, sa grubom površinom	Izgrađen od macerala liptinitske i inertinitske grupe sa niskim sadržajem macerala vitrinitske grupe Često je pomešan sa klarenom kada gradi klaroduren a ređe sa vitrenom kada gradi vitrinerten
Fuzen	Jako sjajan, crne boje, vlaknast, mek i trošan	Izgrađen je od macerala inertinitske grupe sa niskim sadržajem macerala vitrinitske i liptinitske grupe Obično obrazuje u naslagama uglja sočiva i namaze po ravnima raslojavanja debljine 0,4 – 1 mm

Mikrolitotip označava asocijaciju macerala na mikroskopskom nivou sa minimalnom širinom proslojka od 50 μm i sa minimalnim sadržajem macerala najmanje 5 %.

Mikrolitotipovi mogu biti mono, bi ili trimaceralni a njihova imena se završavaju sufiksom *-it*. Hemijske karakteristike mikrolitotipova su slične karakteristikama dominantnih macerala, dok fizičke karakteristike ne zavise samo od macerala već i od njihove kombinacije. Od stepena heterogenosti mikrolitotipova zavise i tehnološke karakteristike ugljeva. U tabelama 2.3. i 2.4. dat je pregled mikrolitotipova mrkih i kamenih ugljeva, respektivno.

Tabela 2.3. Mikrolitotipovi i macerali mrkih ugljeva [8]

Mikrolitotip	**Podtip**	**Macerali**
Tekstit	Eu-tekstit	Tekstinit
	Medio-tekstit	Tekstinit+ulminite
	Gelo-tekstit	Ulminit
Detrit	Teksto-detrit	Atrinit
	Eu-detrit	Atrinit+densinit
	Gelo-detrit	Densinit
Gelit	Teksto-gelit	Tekstogelinit
	Detro-gelit	Detrogelinit
	Eu-gelit	Eugelinit
Liptit		Liptiniti
Inertit		Inertiniti

Vrlo značajan mikrolitotip kod lignita jeste ksilit. Pod ksilitom se podrazumevaju izmenjeni ostaci drvenastih biljaka kao što su ostaci drvenastog tkiva (ksilit), kore (suberinit), like (periblinit), korenje (radiksinit), tkiva za ojačanje (sklerenhimit) i dr. Ponekad je ksilit vrlo bogat rezinitom. Ovaj mikrolitotip može da gradi slojeve i po više desetina metara debljine [1].

Tabela 2.4. Mikrolitotipovi i macerali kamenih ugljeva [6]

Mikrolitotip	**Macerali**	**Vrsta**
Vitrit	Vitrinit (V) > 95 %	monomaceralni
Liptit	Liptinit (L) > 95 %	
Inertit	Inertinit (I) > 95 %	
Klarit	V + L > 95 %	bimaceralni
Durit	I + L > 95 %	
Vitrinertit	V + I > 95 %	
Duroklarit	V > L, I (svaki > 5 %)	trimaceralni
Vitrinertoliptit	L > V, I (svaki > 5 %)	
Klarodurit	I > V, L (svaki > 5 %)	

2.3. Klasifikacija ugljeva

Generalno gledano, sve klasifikacije ugljeva mogu se svrstati u sledeće četiri grupe:

- industrijske,
- hemijske,
- petrografske,
- genetske.

Prema industrijskoj klasifikaciji, ugalj je podeljen prema stepenu karbonifikacije, koja određuje granice i industrijsku primenu ugljeva. Ova klasifikacija najčešće stavlja u prvi plan toplotnu moć uglja.

U skladu sa gore navedenim u tabeli 2.5. data je industijska klasifikacija ugljeva prema G. Žemčužnikov-u u kojoj je prikazana veza između stepena karbonifikacije i genetske klasifikacije sa industrijskom primenom uglja, dok je u tabeli 2.6. data poznata industrijska klasifikacija Brikmana.

Takođe, u industrijske klasifikacije se mogu svrstati i podele ugljeva prema temperaturi paljenja.

Tabela 2.5. Industrijska klasifikacija ugljeva prema Žemčužnikov-u [1]

Genetske klase ugljeva	**Stepen karbonifikacije (rang uglja)**		
	Niski (mrki, plameni i gasni ugljevi)	**Srednji (kovački, koksni, posni ugljevi)**	**Visoki (polu-antracit i antracit)**
	Primena		
Humusni	Energetika Ekstrakcija	Metalurgija	Energetika
Liptobioliti	Hemijski i hemijsko tehnološka prerada (destilacija)	–	–
Sapropeli	Hemijsko tehnološka prerada Ekstrakcija	–	–

Tabela 2.6. Industrijska klasifikacija ugljeva prema Brikmanu [1]

Vrsta	**Ukupna vlaga, %**	**C, %**	**H, %**	**Koks, %**	**Toplotna moć, bez vlage i pepela kJ/kg (kcal/kg)**
Treset	45 – 50	55 – 60	5 – 6	30 – 35	20934 – 23865 (5000 – 5700)
Lignit	40 – 45	65 – 70	5	40 – 45	25120 – 25958 (6000 – 6200)
Mrki ugalj	6 – 30	70 – 78	4 – 5	45 – 55	25958 – 30564 (6200 – 7300)
Plameni	3 – 4	80 – 82	5	55 – 60	30564 – 31820 (7300 – 7600)
Gasni	3 – 2	82 – 84	5	63 – 65	32657 – 33494 (7800 – 8000)
Koksni	2 – 1	86 – 88	5	70 – 75	34750 – 35588 (8300 – 8500)
Posni	1	90 – 92	4 – 5	78 – 80	36006 – 36425 (8600 – 8700)
Antracit	0,5	94 – 98	1 – 3	90 – 98	34332 – 35588 (8200 – 8500)
Grafit	–	100	–	100	33913 (8100)

Hemijske klasifikacije ugljeva su najbrojnije. Ovo proističe iz razloga zato što je ugalj usled nedostatka drugih metoda ispitivan samo hemijskim metodama, pa se sve podele baziraju na hemijskom sastavu. Ovaj način klasifikacije u početku je često dovodio do grešaka, jer su potpuno različiti ugljevi svrstavani u istu grupu. U daljem takstu daće se kratak prikaz hemijske klasifikacije ugljeva.

Prvi pokušaji hemijske klasifikacije vršeni su na osnovu sadržaja ugljenika, vodonika, kiseonika, pepela, vlage i isparljivih materija. Najpoznatija među njima je klasifikacija Vajta koja uzima u obzir odnos ugljenika prema zbiru kiseonika i pepela.

Najstarija klasifikacija je Dauling-ova, koja uzima u obzir udeo fiksnog ugljenika (C_{fix}), ukupne vlage (W) i isparljivih materija (V) i data je izrazom

$$\frac{C_{fix} + \frac{1}{2} \cdot V}{W + \frac{1}{2} \cdot V}. \tag{2.1}$$

Daulingova klasifikacije je iskorišćena na XII međunarodnom geološkom kongresu 1913. godine za izradu nove klasifikacije. Danas, ova klasifikacija ima samo istorijsku vrednost. Prema ovoj klasifikaciji ugljevi su bili podeljeni na klase i to:

- Klasa A1 – antracit,
- Klasa A2 – poluantracit,
- Klasa B1 – viši kameni ugalj,
- Klasa B2 – kameni ugalj,
- Klasa B3 – niži kameni ugalj,
- Klasa C – kanel ugalj,
- Klasa D1 – mrki ugalj,
- Klasa D2 – ligniti.

U SAD je poznata ASTM klasifikacija (prema E. Moore), prema kojoj su ugljevi podeljeni u četiri klase (antraciti, kameni, mrki i ligniti) i trinaest grupa. Podela je izvršena na bazi sadržaja fiksnog ugljenika i ispraljivih materija, kao i toplotne moći.
Pored Moore-a, među hemijskim klasifikacijama ističu se one koje su dali E. Hoffmann i C. Seyler. Posebno je plodan na ovom polju bio Seyler, koji je dao veliki broj klasifikacija, uvodeći pri tome i originalne termine za označavanje ugljeva. Njegove klasifikacije su izrađene na osnovu odnosa elementarne analize i toplotne moći sa jedne strane, i sadržaja isparljivih materija, ugljenika i vodonika sa druge strane. Jedna od Seylerovih klasifikacija se i danas koristi u Velikoj Britaniji.
Po ugledu na strane autore, naš naučnik, Oleg Podgajni, razradio je hemijsku analizu humusnih ugljeva, polazeći od velikog broja analiza domaćih ugljeva. Prvu takvu klasifikaciju dao je 1957. godine i ona je prikazana u tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Hemijska klasifikacija humusnih ugljeva prema O. Podgajnom [1]

Vrsta uglja	V, %	C, %	O, %	H, %
Ligniti	54 – 64	57 – 67	35 – 36	iznad 5
Mrki	45 – 54	67 – 75	18 – 25	4,5 – 5,5
Kameni	10 – 45	75 – 93	4 – 18	3,8 – 5,0
Antraciti	ispod 10	93 – 96	2 – 4	ispod 3,8

Kasnije 1960. godine, isti autor daje razrađeniju klasifikaciju, pri čemu posebnu pažnju daje granici između mrkih ugljeva i lignita (tabela 2.8).

Tabela 2.8. Revidovana hemijska klasifikacija humusnih ugljeva prema O. Podgajnom [1]

Vrsta i tip uglja	V, %	C, %	O, %	H, %
Ligniti	65 – 54	57 – 67	25 – 36	iznad 5
Meki mrki ugljevi	54 – 49	67 – 70	20 – 25	5,0 – 5,5
Tvrdi mrki ugljevi	50 – 45	70 – 75	18 – 20	4,5 – 5,0
Plameni	45 – 40	74 – 79	12 – 18	4,5 – 5,5
Gasni	40 – 35	79 – 82	10 – 12	5,0 – 5,7
Kovački	35 – 28	81 – 83	7 – 10	5,0 – 5,5
Koksni	28 – 19	83 – 87	5,5 – 7	4,5 – 5,5
Posni	19 – 13	87 – 90	4,5 – 5	4,0 – 4,5
Poluantracit	13 – 10	89 – 92	3 – 5	3,0 – 4,0
Antracit	ispod 10	92 – 96	2 – 4	2,0 – 3,8

Petrografske klasifikacije ugljeva se mogu podeliti na makroskopske i mikroskopske. Makroskopske podele se zasnivaju na spoljnim, fizičkim osobinama uglja (litotip) pri čemu sjaj uglja predstavlja polaznu karakteristiku. Na taj način, makroskopska podela lignita izvršena je na barske i drvenaste, dok podela mrkih ugljeva obuhvata meke mrke ugljeve (barske i drvenaste) i tvrde mrke ugljeve (mat i sjajne).

Mikroskopska klasifikacija obuhvata definisanje mikrolitotipova i macerala pojedinih ugljeva o čemu je bilo reči na prethodnim stranicama ovog poglavlja.

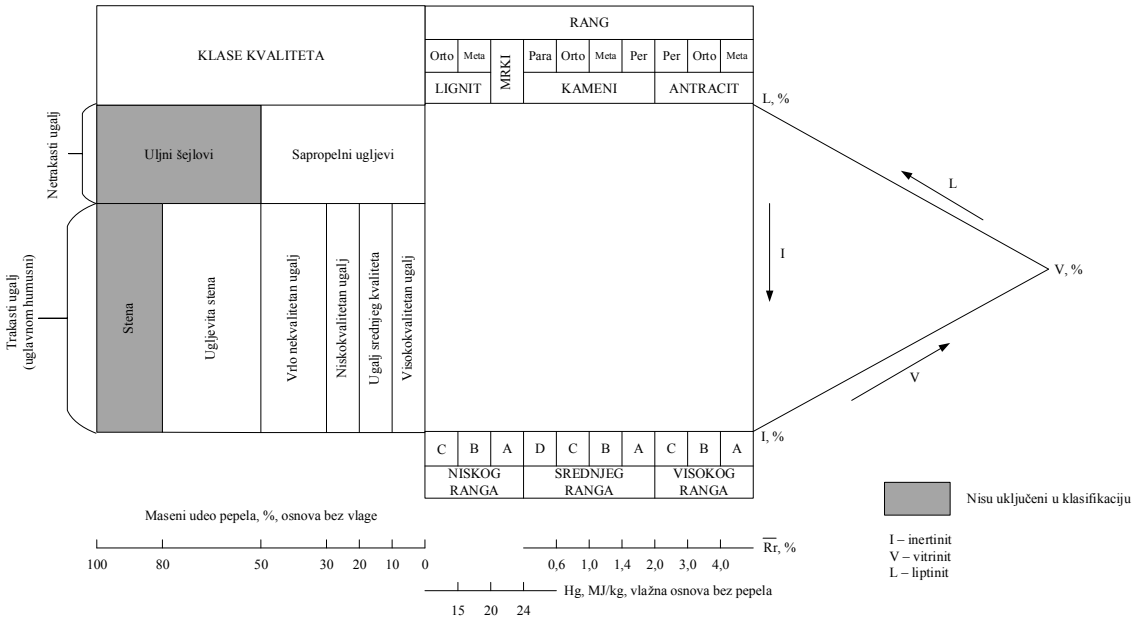
Ono što treba napomenuti, je da kod petrografske analize lignita u mikrolitotip se uračunavaju sve pojave iznad 0,1 mm debljine iz razloga što je ugljena materija lignita na znatno nižem stepenu homogenizacije. Kod mrkih ugljeva, u samostalni mikrolitotip se uračunavaju sve pojave debljine iznad 0,08 mm usled višeg ranga i jačeg stepena homogenizacije ugljene materije nego kod lignita [1].

2.4. Klasifikacija ugljeva prema međunarodnim standardima sa osvrtom na klasifikaciju domaćih ugljeva

U skladu sa međunarodnom klasifikacijom ugljeva [9], ugalj se klasifikuje poznavanjem tri osnovna parametra-karakteristike. Ove tri karakteristike potpuno definišu ugalj i uvek se razmatraju zajedno. To su:

1. rang uglja (stepen karbonifikacije),
2. petrografski sastav,
3. kvalitet uglja (dat kroz udeo pepela u uglju i toplotnu moć).

Uzimajući u obzir sve ove parametre, na slici 2.2. dat je šematski prikaz klasifikacije ugljeva.



Slika 2.2. Šematski prikaz klasifikacije ugljeva [9]

Kao što je prikazano na slici 2.2, donja i gornja granica klasifikacije su:

- donju granicu predstavaja orto-lignit ili ugalj niskog ranga C, sa manje od 75 % vlage u prijemnom stanju,
- gornju granicu predstavlja meta-antracit ili ugalj visokog ranga A sa manje od 0,8 % vodonika (osnova bez vlage i pepela).

Između ove dve granice nalaze se: ligniti, mrki, kameni ugljevi i antraciti, odnosno ugljevi niskog, srednjeg i visokog ranga. Granice između pojedinih rangova definisane su sledećim karakteristikama ugljeva:

- srednjim stepenom refleksijom vitrinita ($\overline{R}_r$, %) i
- gornjom toplotnom moći H_g u MJ/kg (vlažna osnova bez pepela).

Na osnovu vrednosti ovih karakteristika izvršena je podela ugljeva i to:

- ugljevi niskog ranga su ugljevi čija je gornja toplotna moć $H_g < 24$ MJ/kg i $\overline{R}_r < 0{,}6$ %,

- ugljevi srednjeg i visokog ranga su ugljevi čija je gornja toplotna moć $H_g \geq 24$ MJ/kg ili ako je $H_g < 24$ MJ/kg ali je srednji stepen refleksije vitrinita $\overline{R}_r \geq 0{,}6$ %. Granica između ugljeva srednjeg i visokog ranga, je prema podacima sa slike 2.2. $\overline{R}_r = 2$ %.

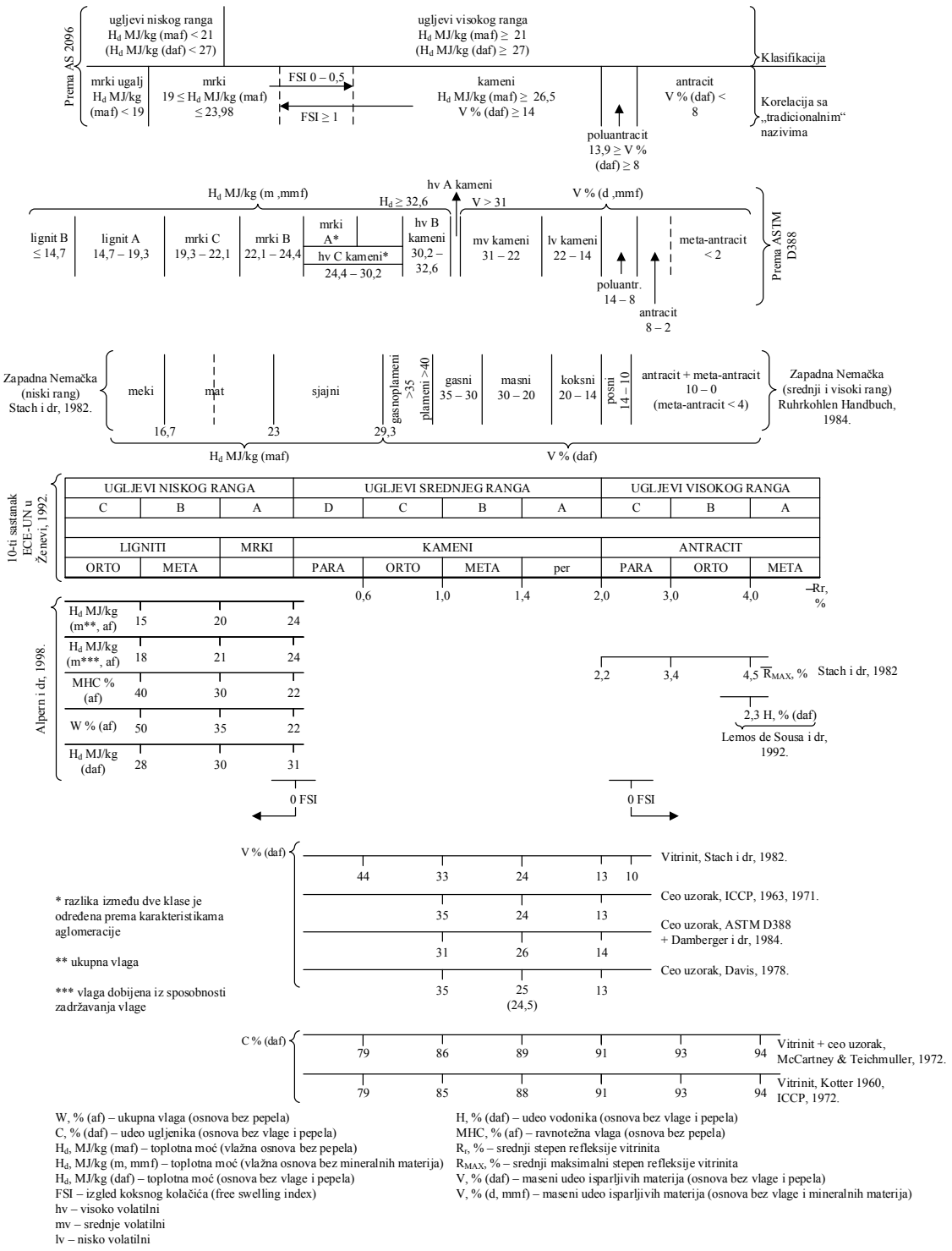
Kako ne bi dolazilo do grešaka u klasifikaciji, odlučeno je da se ugljevi klasifikuju na sledeći način:

- ukoliko je $\overline{R}_r \geq 0{,}6$ %, ugalj se klasifikuje prema srednjem stepenu refleksije vitrinita,
- ukoliko je $\overline{R}_r < 0{,}6$ %, ugalj se klasifikuje prema gornjoj toplotnoj moći (vlažna osnova bez pepela).

Brojne vrednosti granica između pojedinih rangova ugljeva su dobijene na osnovu literaturnih podataka analiza ugljeva, kao i na osnovu prethodnih klasifikacija [9]. Imajući to u vidu, na slici 2.3. dat je uporedni prikaz klasifikacije ugljeva prema rangu.
Kao što se vidi na slici 2.2, petrografski sastav ugljeva izražen je preko zapreminskih udela vitrinita, liptinita i inertinita (osnova bez mineralnih materija), dok je kvalitet uglja definisan masenim udelom pepela u uglju (osnova bez vlage). Takođe, iz klasifikacije su isključeni uljni šejlovi i stene.
Prema ovoj klasifikaciji [9, 10] ugljevi niskog ranga su podeljeni u tri kategorije (C, B i A) odnosno na lignite (orto i meta) i mrke. Granice između ovih kategorija, kao što je već rečeno, su postavljene na osnovu gornje tolotne moći (vlažna osnova bez pepela). Na taj način, granice između ugljeva niskog ranga su:

- ugljevi niskog ranga C+B ili ligniti su ugljevi gornje toplotne moći niže od 20 MJ/kg, pri čemu su
  - ugljevi niskog ranga C ili orto-ligniti su ugljevi gornje toplotne moći niže od 15 MJ/kg (granica je postavljena i odgovara granici između lignita i treseta),
  - ugljevi niskog ranga B ili meta-ligniti su ugljevi gornje toplotne moći veće ili jednake 15 MJ/kg a manje od 20 MJ/kg,

- ugljevi niskog ranga A ili mrki ugljevi su ugljevi čija je gornja toplotna moć veća ili jednaka 20 MJ/kg a manja od 24 MJ/kg, dok je srednji stepen refleksije vitrinita niži od 0,6 %.

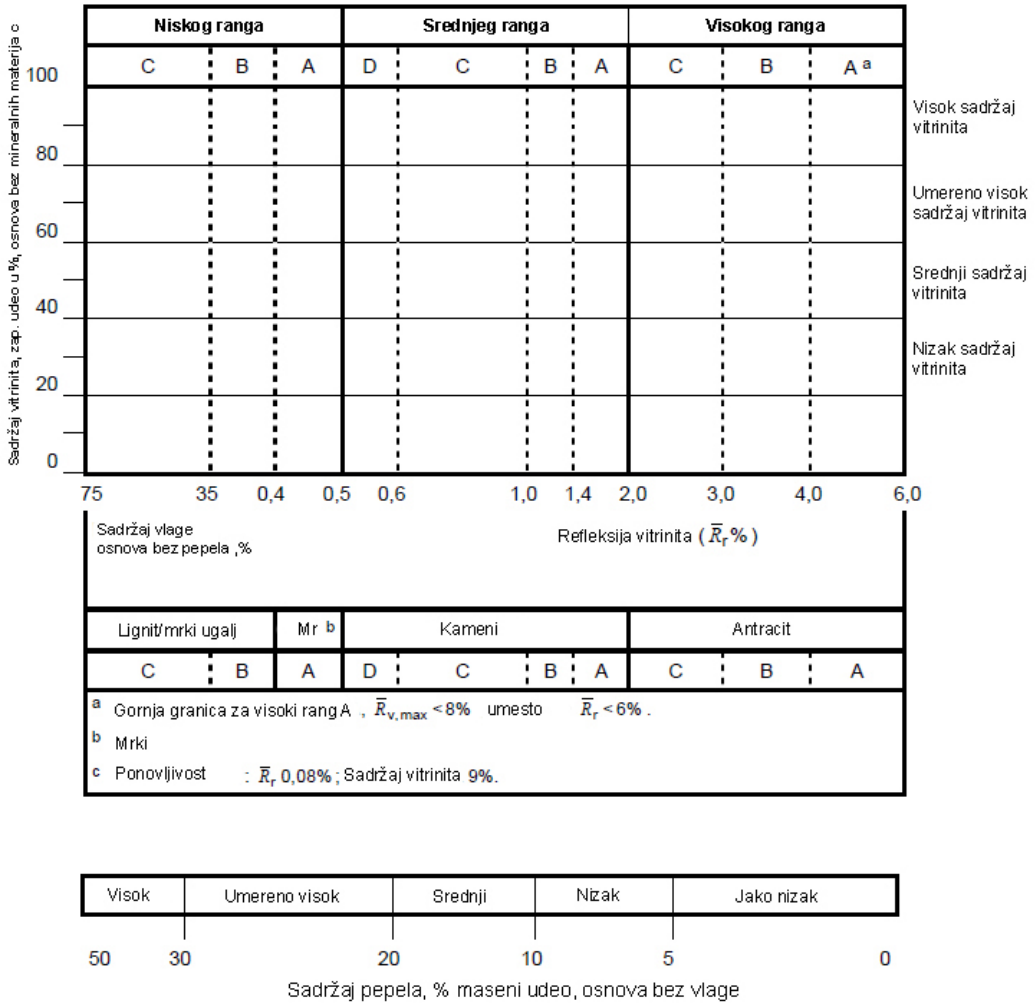


Slika 2.3. Uporedni prikaz klasifikacija ugljeva prema rangu [9]

Prema standardu ISO 11760:2005 [11], klasifikacija ugljeva se vrši na osnovu sledećih karakteristika:

- srednjeg stepena refleksije huminita/vitrinita ($\overline{R}_r$, %);
- sadržaja vitrinita u uglju (zapreminski udeo, osnova bez mineralnih materija);
- sadržaja pepela u uglju (maseni udeo, osnova bez vlage).

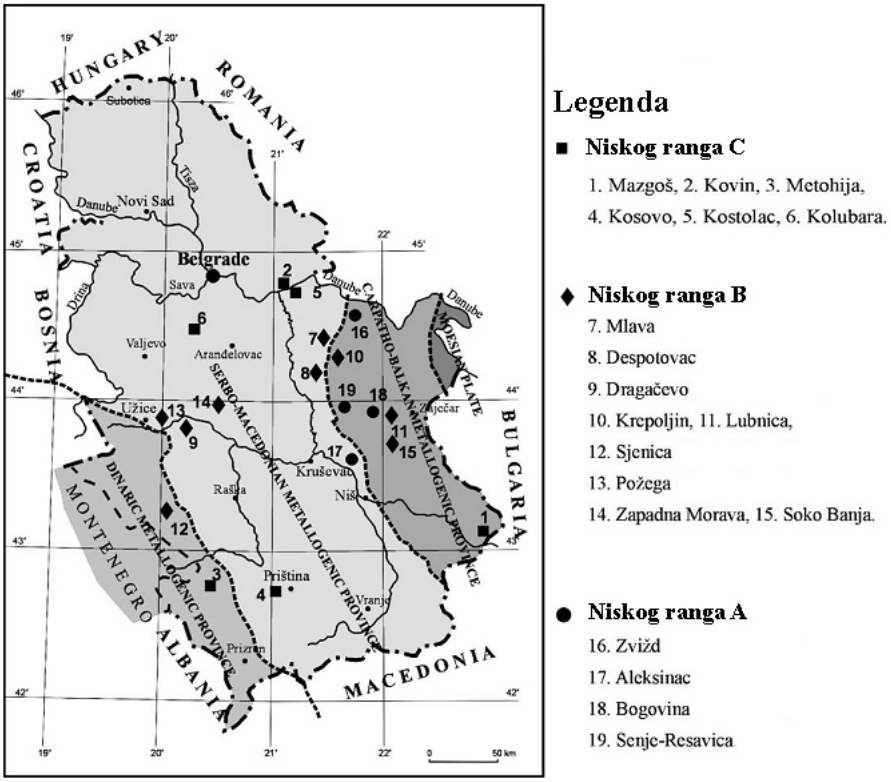
Na slici 2.4, dat je šematski prikaz klasifikacije ugljeva prema standardu ISO 11760:2005. Kao što se vidi na slici 2.4, ISO standard ne definiše toplotnu moć kao jedan od parametara na osnovu koga se vrši klasifikacija ugljeva. Osnovni parametar klasifikacije jeste stepen karbonifikacije (hemijske zrelosti) ugljeva izražen kroz srednji stepen refleksije vitrinita.



Slika 2.4. Klasifikacija ugljeva prema standardu ISO 11760:2005 [11]

U radu [12], autori daju opsežni izveštaj o genetsko-industrijskoj klasifikaciji domaćih mrkih ugljeva. Istraživanja su obuhvatila devetnaest najvažnijih basena mrkih ugljeva u Srbiji (slika 2.5), podeljenih u tri metalogenetske provincije, i to:

- karpato-balkanska, tj. istočna Srbija kojoj pripadaju baseni Mazgoš, Krepoljin, Lubnica, Soko Banja, Zvižd, Bogovina i Senje-Resavica,
- srpsko-makedonska, tj. centralna Srbija kojoj pripadaju baseni Kovin, Kosovo, Kostolac, Kolubara, Mlava, Despotovac, Dragačevo, Požega, Zapadna Morava i Aleksinac,
- dinarska, tj. zapadna Srbija kojoj pripada metohijski i sjenički basen.



Slika 2.5. Geografski položaj istraživanih ugljonosnih basena [12]

Predložena klasifikacija ugljeva obuhvata tri grupe parametara. U prvu grupu spadaju primarni ili genetski parametri kao što su srednji stepen refleksije huminita/vitrinita, udeo vlage ili udeo isparljivih materija, koji se i inače koriste za određivanje stepena karbonifikacije. Druga grupa kombinuje tehnološke i hemijske parametre kao što su udeo pepela, ukupan sumpor, gornja i donja toplotna moć, udeo tera, elementrana

analiza, hemijska analiza pepela. Treću grupu parametara čine dopunski parametri koji se koriste u cilju razdvajanja tehnoloških grupa ugljeva (sadržaj tekstinita, tačka topljenja pepela, udeo natrijuma i kalijuma).

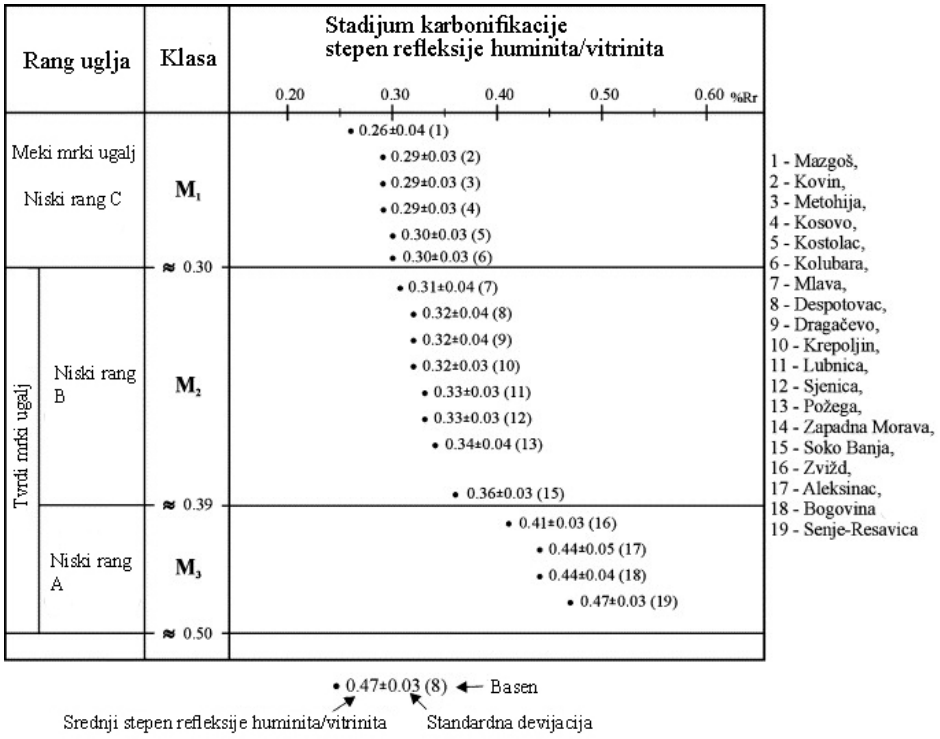
Uzorci ugljeva iz različitih basena, su analizirani mikroskopski u skladu sa ICCP (International Committee for Coal Petrology) standardnom procedurom za dobijanje podataka o stepenu refleksije, sadržaju macerala i određivanju ranga uglja.

Maceralna analiza uzoraka potvrđuje da domaći humusni ugljevi imaju visok udeo huminita, relativno mali udeo liptinita i mali udeo inertinita. Zapreminski udeo huminita se kreće od 76 % kod ugljeva iz dragačevskog basena do 97,9 % kod ugljeva metohijskog basena. Zapreminski udeo liptinita se kreće od 0,8 % kod metohijskih ugljeva do 15,5 % kod ugljeva aleksinačkog basena. Što se tiče zapreminskog udela inertinita, najmanje ga ima u ugljevima sokobanjskog basena (0,7 %), dok ga je najviše u istočnom polju bogovinskog basena (6,3 %).

Na osnovu petrografskog sastava, domaći ugljevi se mogu podeliti u četiri grupe:

1. u prvu grupu spadaju ugljevi u kojima preovlađuje telohuminit (ksilitni ugljevi) i ugljevi sa visokim udelom telohuminita i značajnim udelom detrohuminita (detro-ksilitni ugljevi). Ovoj grupi pripadaju ugljevi basena Kovin, Metohija, Kolubara, Despotovac, Lubnica, Požega, Zapadna Morava, Kosovo, Kostolac, Mlava, Dragačevo, Krepoljin, Sjenica, Sokobanja i Zvižd,
2. drugoj grupi pripadaju ugljevi u kojima preovlađuje detrohuminit i ugljevi u kojima dominira detrohuminit sa značajnim udelom telohuminita. Ovoj grupi pripadaju ugljevi basena Aleksinac i Mazgoš,
3. trećoj grupi pripadaju ugljevi sa visokim udelom detrohuminita i značajnim udelom gelinita. Ovoj grupi pripadaju ugljevi istočnog polja basena Bogovina,
4. četvrtoj grupi pripadaju ugljevi sa visokim udelom visoko gelificiranih tkiva i značajnim udelom gelinita. Ovoj grupi pripadaju ugljevi basena Senje-Resavica.

Na osnovu srednjeg stepena refleksije huminita/vitrinita, domaći mrki ugljevi su klasifikovani u tri grupe (u skladu sa [9] i [10]) i to: ugljevi niskog ranga C, ugljevi niskog ranga B i ugljevi niskog ranga A. Na slici 2.6. prikazana je klasifikacija ugljeva prema rangu na osnovu srednjeg stepena refleksije huminita/vitrinita ($\overline{R}_r$, %).



Slika 2.6. Klasifikacija domaćih mrkih ugljeva prema rangu [12]

Na osnovu podataka elementarne i tehničke analize, autori [12] su podelili ugljeve u tri grupe (tabela 2.9):

1. grupa sa visokim masenim udelom ukupne vlage (43,41 – 49,11 %) i niskom donjom toplotnom moći (5,4 – 8,4 MJ/kg),
2. grupa sa nižim masenim udelom ukupne vlage (17,05 – 37,59 %) i višom gornjom toplotnom moći (26,4 – 27,4 MJ/kg, osnova bez vlage i pepela),
3. treća grupa sa niskim masenim udelom ukupne vlage (15,03 – 27,55 %) i reletivno niskim sadržajem isparljivih materija (49,53 – 60,79 %, osnova bez vlage i pepela).

Na osnovu hemijskog sastava i termotehničkih karakteristika pepela, ugljevi su podeljeni u tri grupe (tabela 2.10) i to:

1. u prvu grupu spadaju ugljevi sa visokim udelom SiO_2 i Al_2O_3 u pepelu, što povećava tačku topljenja pepela,
2. u drugu grupu spadaju ugljevi sa značajnim udelom aluminijuma i silicijuma u pepelu, ali i sa značajnim udelom CaO i MgO,
3. u treću grupu spadaju ugljevi sa visokim udelom CaO u pepelu i značajnim udelom SiO_2 i Al_2O_3.

Tabela 2.9. Srednje vrednosti elementarne i tehničke analize izabranih uzoraka ugljeva [12]

Basen/ležište	W_t^{ar}	SW	A^{ar}	A^{db}	S_t^{ar}	S_t^{db}	V^{daf}	Q_g^{daf}	Q_n^{ar}	Q_n^{daf}	T^{daf}	C^{daf}	H^{daf}	$(N+O)^{daf}$	MM	CI_3	**Grupa**
Mazgoš	49,11	10,89	20,53	42,91	2,27	3,98	74,01	22,3	5,4	21,2	10,24	57,19	6,22	34,45	48,53	0,12	I
Kovin	46,13	5,95	17,55	31,72	0,96	1,80	59,37	26,0	7,9	24,7	6,44	54,51	6,05	28,65	35,09	0,24	
Metohija	44,33	6,04	19,28	33,96	0,88	1,58	63,34	24,6	7,4	23,4	9,17	64,13	5,82	28,25	38,23	0,27	
Kosovo	45,00	5,95	17,40	31,60	1,03	1,88	63,29	−	7,8	23,2	6,27	63,49	5,24	30,28	34,44	0,30	
Kostolac	43,41	5,28	18,83	32,02	1,03	1,83	60,69	25,9	8,4	24,6	12,51	64,31	6,10	28,83	35,82	0,22	
Kolubara	46,20	6,40	19,40	34,80	0,57	1,06	60,20	25,6	7,4	24,4	6,82	64,00	6,10	29,50	38,20	0,22	
Mlava/Melnica	28,16	2,67	25,12	34,57	2,44	3,38	56,86	26,5	11,2	25,2	9,55	63,66	6,03	26,60	39,19	0,26	II
Despotovac	34,20	2,69	17,55	32,00	n.a.	2,11	54,00	−	12,7	24,3	6,53	63,00	n.a.	n.a.	n.a.	0,28	
Dragačevo/Tijanje	35,73	3,58	20,06	30,24	2,07	3,22	59,02	26,8	10,5	25,4	n.a.	65,19	5,77	26,17	35,51	0,28	
Krepoljin/Jasenovac	24,20	1,76	17,12	22,51	1,35	1,76	57,47	27,7	14,9	26,3	8,14	66,00	5,59	27,75	25,19	0,31	
Lubnica	33,18	2,77	15,59	22,65	2,56	3,92	55,05	26,7	12,7	25,8	6,82	65,05	5,86	25,99	26,27	0,28	
Sjenica/Štavalj	30,21	2,24	12,87	18,82	1,00	1,44	56,66	26,8	13,8	25,5	7,43	66,87	5,75	26,88	21,12	0,31	
Požega/Rasna	37,59	3,55	16,08	25,23	1,91	3,06	50,45	26,4	10,8	25,0	5,17	65,58	5,56	26,61	28,91	0,31	
Zapadna Morava	24,78	2,26	25,74	33,77	3,10	4,06	56,90	27,2	12,3	25,8	10,02	64,59	6,00	25,43	38,70	0,27	
Soko Banja/Soko	17,05	1,06	19,04	22,54	2,51	3,08	62,47	27,4	17,0	26,6	6,67	65,91	5,44	25,07	25,61	0,34	
Zvižd/Derezna	27,55	2,07	16,95	23,32	3,31	4,56	52,06	26,3	13,4	25,3	n.a.	66,79	5,23	23,58	27,69	0,37	III
Aleksinac	13,18	0,80	22,53	25,83	5,67	6,54	49,73	28,5	17,2	27,3	8,50	67,75	5,82	16,61	31,50	0,37	
Bogovina/istočno polje	26,18	1,94	19,73	26,71	3,24	4,44	60,79	29,2	14,5	28,1	n.a.	65,52	5,42	21,95	30,94	0,37	
Senje-Resavica	15,03	0,80	12,54	14,70	1,13	1,35	50,89	28,5	19,5	27,3	10,30	71,26	5,29	21,76	16,57	0,42	

W_t^{ar} – ukupan sadržaj vlage, %; SW – specifična vlaga, % ($SW = W_t^{ar} / Q_n^{ar}$); A^{ar} – sadržaj pepela, %, sveden na ukupnu vlagu; A^{db} – sadržaj pepela, %, osnova bez vlage; S_t^{ar} – sadržaj sumpora, %, sveden na ukupnu vlagu; S_t^{db} – sadržaj sumpora, %, osnova bez vlage; V^{daf} – sadržaj isparljivih materija, %, osnova bez vlage i pepela; Q_g^{daf} – gornja toplotna moć, MJ/kg, osnova bez vlage i pepela; Q_n^{ar} – donja toplotna moć, MJ/kg, svedena na ukupnu vlagu; Q_n^{daf} – donja toplotna moć, MJ/kg, osnova bez vlage i pepela; T^{daf} – sadržaj katrana, %, osnova bez vlage i pepela; C^{daf} – sadržaj ugljenika, %, osnova bez vlage i pepela; H^{daf} – sadržaj vodonika, %, osnova bez vlage i pepela; $(N+O)^{daf}$ – sadržaj azota i kiseonika, %, osnova bez vlage i pepela, MM – sadržaj mineralnih materija, %; CI_3 – faktor karbonifikacije, $CI_3 = 1 - \left(42 \cdot H^{daf} + 2{,}1 + 3 \cdot (N+O)^{daf}\right) / 7 \cdot C^{daf}$

Uzimajući u obzir sve razmatrane parametre, domaći mrki ugljevi se mogu podeliti u tri grupe i to: ugljeve niskog ranga C ($\overline{R}_r = 0{,}26 - 0{,}30$ %), ugljeve niskog ranga B ($\overline{R}_r = 0{,}31 - 0{,}39$ %) i ugljeve niskog ranga A ($\overline{R}_r = 0{,}41 - 0{,}50$ %). Srednje vrednosti parametara ugljeva dati su u tabeli 2.11.

Takođe, autori daju relativno jednostavan sistem kodifikacije i klasifikacije domaćih ugljeva, zasnovan na analizi i interpretaciji relevantnih primarnih (genetskih) i sekundarnih (tehnoloških) parametara, kao i na korelaciji između datih parametara. Grafiki prikaz predložene klasifikacije ugljeva dat je na slici 2.7.

Podgrupa ΣGM+I vol.% osnova bez min. materija		> 30 (4)	20-30 (3)	10-20 (2)	< 10 (1)	> 30 (4)	20-30 (3)	10-20 (2)	< 10 (1)	> 30 (4)	20-30 (3)	10-20 (2)	< 10 (1)	> 30 (4)	20-30 (3)	10-20 (2)	< 10 (1)	> 30 (4)	20-30 (3)	10-20 (2)	< 10 (1)	> 30 (4)	20-30 (3)	10-20 (2)	< 10 (1)	Tehnološka podgrupa Pepeo % (db)	
3	> 60																									2	> 15
				191312 (Senje-Ressavica)										14314 (Mazgot) 54314 (Kostolac)												1	10-15
		151303 (Soko Banja) 171303 (Aleksinac)					102303 (Krepoljin) 1823 3 (Bogovina East Field)			83304 (Despotovac) 123302 (Sjenica)																0	< 10
2	35-60																									2	> 15
							142214 (Zapadna Morava)																			1	10-15
							72 04 (Mlava) 1622 3 (Zvižd)			932 4 (Dragačevo) 113203 (Lubnica) 133203 (Požega)				24204 (Kovin) 342 4 (Metohija) 44204 (Kosovo) 64204 (Kolubara)												0	< 10
1	< 35																									2	> 15
																										1	10-15
																										0	< 10
Klasa		1				2				3				4				5				6				Grupa Tar, % (daf)	
Maseni udeo ukupne vlage %		< 20				20-30				30-40				40-50				50-60				> 60					

64204 (Kolubara)
1 2 3 4 5

Slika 2.7. Predloženi sistem genetsko-industrijske klasifikacije domaćih mrkih ugljeva [12]

1 – oznaka basena, 2 – maseni udeo ukupne vlage, 3 - $\sum GM + I^{mmf}$ gelifikovani macerali + inertinit, 4 – maseni udeo tera, 5 – maseni udeo pepela, osnova bez vlage

Tabela 2.10. Srednje vrednosti hemijskog sastava i termotehničkih karakteristika pepela [12]

Basen/ležište	SiO_2 %	Fe_2O_3 %	Al_2O_3 %	CaO %	KP %	BP %	KP/ BP	SiO_2/ Al_2O_3 %	Fe_2O_3/ CaO %	Na_2O + K_2O %	Indeks šljakavosti	Indeks zaprljanosti	Tačka topljenja, °C	**Grupa**
Kovin	46,45	10,03	19,52	11,37	66,60	25,85	2,87	2,38	0,88	1,50	0,44	0,25	1290	I
Kostolac	43,34	9,55	22,03	10,50	66,17	24,36	3,10	1,97	0,91	1,17	0,46	0,19	1325	
Kolubara	54,10	6,10	24,80	6,70	78,70	17,10	4,69	2,18	0,91	1,70	0,25	0,10	1366	
Mlava/Melnica	46,16	9,77	22,51	8,25	69,43	23,72	3,06	2,05	1,18	2,39	0,82	0,27	1318	
Zapadna Morava	44,89	10,77	21,62	7,75	50,68	18,41	2,97	2,08	1,39	1,41	0,67	0,24	1306	
Soko Banja/Soko	46,24	11,48	24,67	6,83	70,91	21,66	3,27	1,87	1,68	n.a.	0,75	n.a.	n.a.	
Mazgoš	25,86	13,99	14,31	20,82	41,98	38,23	1,17	1,81	0,67	0,92	2,49	0,20	1287	II
Metohija	37,86	8,86	16,84	20,38	55,03	34,53	1,82	2,25	0,43	1,93	0,77	0,67	1292	
Kosovo	33,15	9,20	10,60	28,61	44,28	43,28	1,12	3,13	0,32	1,35	1,14	0,98	1261	
Krepoljin/Jasenovac	32,98	13,17	18,03	21,24	51,73	33,84	1,37	1,83	0,62	1,09	1,28	0,10	1314	
Lubnica	34,54	9,95	12,15	18,74	47,09	34,93	1,50	2,84	0,53	1,82	2,29	0,97	1259	
Zvižd/Derezna	35,83	18,21	16,70	14,72	53,17	37,14	1,45	2,15	1,24	1,43	2,41	0,45	1393	
Aleksinac	38,28	33,20	12,14	4,89	51,46	42,94	1,33	3,15	6,79	3,05	7,21	1,56	1355	
Bogovina/Istočno polje	33,05	4,87	15,64	21,81	48,98	30,42	1,82	2,11	0,22	1,01	3,30	0,32	1220	
Senje/Resavica	33,57	9,23	17,33	22,23	50,91	34,22	1,61	1,94	0,42	1,19	1,39	0,49	1350	
Sjenica/Štavalj	25,87	5,91	12,91	36,32	39,05	45,83	0,89	2,00	0,16	0,51	1,29	0,15	1246	III
Despotovac	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Drgačevo/Tijanje	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Požega/Rasna	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	

KP – kiselost pepela
BP – baznost pepela

Tabela 2.11. Srednje vrednosti genetsko-industrijskih parametara domaćih mrkih ugljeva [12]

Basen/ležište	Primarne (genetičke)			Tehnološke (hemijske)							Dopunske			Grupa
	$\bar{R}_r$, %	W_t^{ar}	$\sum GM + I^{mmf}$	A^{db}	S_t^{db}	Q_g^{daf}	Q_n^{daf}	V^{daf}	T^{daf}	C^{daf}	Te^{mmf}	Na_2O $+K_2O$	MP	
Mazgoš	0,26±0,04	49,11	67,5	42,91	3,98	22,3	21,2	74,01	10,24	57,19	14,8	0,92	1287	I
Kovin	0,29±0,03	46,13	46,0	31,72	1,80	26,0	24,7	59,37	6,44	54,51	33,1	1,50	1290	
Metohija	0,29±0,03	44,33	59,4	33,96	1,58	24,6	23,4	63,34	9,17	64,13	27,4	1,93	1292	
Kosovo	0,29±0,03	45,00	54,2	31,60	1,88	-	23,2	63,29	6,27	63,49	27,6	1,35	1261	
Kostolac	0,30±0,03	43,41	67,4	32,02	1,83	25,9	24,6	60,69	12,51	64,31	17,1	1,17	1325	
Kolubara	0,30±0,03	46,20	49,0	34,80	1,06	25,6	24,4	60,20	6,82	64,00	34,4	1,70	1366	
Mlava/ Melnica	0,31±0,04	28,16	60,1	34,57	3,38	26,5	25,2	56,86	9,55	63,66	11,4	2,39	1318	II
Despotovac	0,32±0,04	34,20	89,4	32,00	2,11	−	24,3	54,00	6,53	63,00	7,9	n.a.	n.a.	
Dragačevo/ Tijanje	0,32±0,04	35,73	60,8	30,24	3,22	26,8	25,4	59,02	n,a,	65,19	10,7	n.a.	n.a.	
Krepoljin/ Jasenovac	0,32±0,03	24,20	88,1	22,51	1,76	27,7	26,3	57,47	8,14	66,00	7,3	1,09	1314	
Lubnica	0,33±0,03	33,18	49,0	22,65	3,92	26,7	25,8	55,05	6,82	65,05	26,9	1,82	1259	
Sjenica/ Štavalj	0,33±0,03	30,21	85,4	18,82	1,44	26,8	25,5	56,66	7,43	66,87	2,7	0,51	1246	
Požega/Rasna	0,34±0,04	37,59	60,5	25,23	3,06	26,4	25,0	50,45	5,17	65,58	23,0	n.a.	n.a.	
Zapadna Morava	n.a.	24,78	47,9	33,77	4,06	27,2	25,8	56,90	10,02	64,59	39,7	1,41	1306	
Soko Banja/ Soko	0,36±0,03	17,05	86,9	22,54	3,08	27,4	26,6	62,47	6,67	65,91	1,9	n.a.	n.a.	
Zvižd/Derezna	0,41±0,03	27,55	57,3	23,32	4,56	26,3	25,3	52,06	n.a.	66,79	11,1	1,43	1393	III
Aleksinac	0,44±0,05	13,18	76,9	25,83	6,54	28,5	27,3	49,73	8,50	67,75	0,3	3,05	1355	
Bogovina/ Istočno polje	0,44±0,04	26,18	72,9	26,71	4,44	29,2	28,1	60,79	N,A,	65,52	0,8	1,01	1220	
Senje-Resavica	0,47±0,03	15,03	88,3	14,70	1,35	28,5	27,3	50,89	10,30	71,26	1,3	1,19	1350	

Te^{mmf} – sadržaj tekstinita, zapreminski udeo u %, osnova bez mineralnih materija
MP – tačka topljenja pepela, °C

3. Klasifikacija macerala mrkih ugljeva – ICCP sistem 1994.

Međunarodni komitet za ugalj i organsku petrologiju (ICCP) redovno vrši reviziju klasifikacionog sistema macerala ugljeva. Klasifikacija huminita [13], zajedno sa sistemom klasifikacije vitrinita [14], liptinita [15] i inertinita [16] čine tzv. ICCP sistem 1994.

3.1. Grupa huminita

Naziv huminiti prvi je uveo Szadecky-Kardoss 1949. godine, kao strukturni konstituent lignita, dok ICCP ovaj naziv koristi još od 1970. godine. Prema definiciji [13], huminiti označavaju grupu srednje sivih macerala čija je refleksija između refleksije tamnijih liptinita i belih inertinita. Najzastupljenija su grupa macerala u humusnim ugljevima (u nekim ugljevima udeo huminita može biti veći i od 90 %). Huminiti i macerali huminitske grupe su definisani samo za lignite (standard ASTM)/meke mrke i mat mrke ugljeve. Za mrke (sjajne mrke) ugljeve (ugljevi višeg ranga u grupi ugljeva niskog ranga) primenjuje se klasifikacija vitrinita.
Huminti su podeljeni u tri podgrupe macerala i šest macerala (tabela 3.1). Podgrupe su podeljene u zavisnosti od stepena očuvanosti delova biljaka i stepenu gelifikacije.

Tabela 3.1. Podela huminita [13]

Grupa macerala	Podgrupa macerala	Maceral	Tip	Varijetet
Huminiti	Telohuminit	Tekstinit Ulminit		A (taman) B (svetao) A (taman) B (svetao)
	Detrohuminit	Atrinit Densinit		
	Gelohuminit	Korpohuminit Gelinit	Flobafinit Pseudoflobafinit Livigelinit Porigelinit	

Boja i refleksija huminita zavisi od ranga, stepena gelifikacije, porekla i hemijskog sastava macerala. Refleksija u ulju ima vrednosti $\overline{R}_r = 0,2 - 0,4\ \%$. U poređenju sa

maceralima druge dve grupe, huminiti se karakterišu relativno visokim sadržajem kiseonika i niskim sadržajem ugljenika. Elementarni sastav zavisi od ranga uglja. Tokom procesa karbonifikacije, udeo ugljenika se povećava a kiseonika smanjuje i imaju sledeće vrednosti: ugljenik (60 – 77 %), vodonik (4 – 6 %) i kiseonik (18 – 28 %). Primarne organske komponente huminita su celuloza, hemiceluloza, lignin, tanin i proteini. Huminiti vode poreklo od drvenastih tkiva i delova ćelijskih zidova korenja, stabljika, kore i lišća biljaka. U zavisnosi od procesa razlaganja, stepena humifikacije i gelifikacije, kao i od ranga uglja, zavisi i stepen očuvanosti ćelijskih struktura.

Stepen humifikacije i gelifikacije huminita u uglju ima uticaja na industrijske procese kao što su briketiranje, gasifikacija i sagorevanje uglja.

U tabeli 3.2. date su osnovne karakteristike macerala huminita sa posebnim osvrtom na njihov uticaj na praktičnu primenu ugljeva.

Tabela 3.2. Osnovne karakteristike macerala huminita

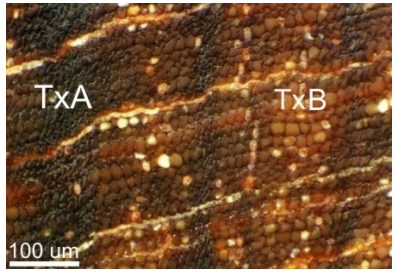
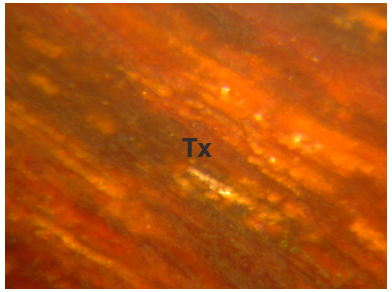
Podgrupa	Maceral	Opis	Poreklo	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom (odbijena svetlost, uljna imerzija)
Telohuminit	Tekstinit	Sastoji se od negelificiranih ćelijskih zidova ili od izolovanih celih ćelija. Ćelijski lumen je uglavnom otvoren ili ispunjen drugim maceralima ili mineralnim materijama. Najčešće ispune su rezinit, korpohuminit, porigelinit, mikrinit, minerali gline ili karbonati.	Vodi poreklo od ćelijskih zidova ili drvenastih tkiva korenja, stabljika ili kora, retko od lišća gimnospermi i angiospermi. Sastoji se od celuloze i lignina. Prekursor je macerala telinita	Tekstinit utiče na tehničke karakteristike lignita ukoliko njegov udeo nije zanemarljiv. Glavne karakteristike sa stanovišta praktičnog značaja su: • priprema uglja – kako je tekstinit elastičan, ugljevi sa visokim udelom tekstinita se teško melju. Negelificirano drvo koje se sastoji od tekstinita se raspada na vlaknaste delove što otežava prosejavanje. Koncentrisan je u krupnijoj frakciji • briketiranje – tekstinit povećava sposobnost briketiranja. Briketi dobijeni od lignita sa visokim udelom tekstinita su visoke čvrstoće • karbonizacija – zbog visokog sadržaja celuloze, tekstinit daje visoke količine kartana i gasa • ekstrakcija – tekstinit daje male količine bitumena • likvefakcija – reaktivnost je niža od gelificiranih macerala huminita • sagorevanje – ugljevi niskog ranga sa visokim udelom tekstinita sa lošim karakteristikama mlevenja stavaraju probleme u vidu nepotpunog sagorevanja i začepljenja mlaznica	 Tekstinit (Tx); A – taman, B – svetao  Tekstinit (Tx)

Tabela 3.2. Osnovne karakteristike macerala huminita – nastavak

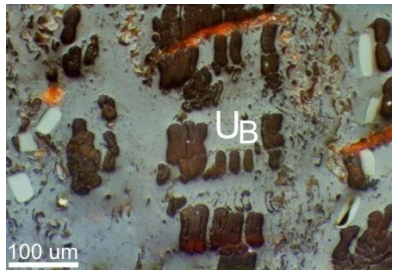
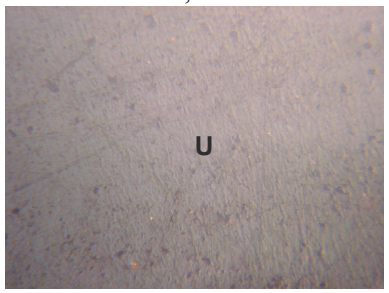
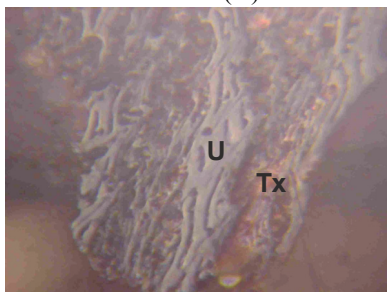
Podgrupa	Maceral	Opis	Poreklo	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom (odbijena svetlost, uljna imerzija)
	Ulminit	Obuhvata ćelijske zidove i manje ili više gelificirana tkiva. Usled kretanja gela i njegovog zapunjavanja unutar ćelijskih prostora, zidovi su slabo vidljivi. Lumen je zatvoren, dok su ćelijski zidovi naduveni. U tkivima, ćelijski zidovi su složeni jedni do drugih	Vodi poreklo od ćelijskih zidova i drvenastih tkiva korenja, stabljika, kora ili lišća. Sastoji se od celuloze i lignina travnastih i biljaka nalik drveću. Visoki udeli ulminita pokazuju visok nivo očuvanja ćelijskog tkiva u vlažnim uslovima niske pH vrednosti u okviru šumskih tresetišta ili močvara	Tehnološke karakteristike ulminita zavise od stepena gelifikacije. Glavne karakteristike su: • priprema uglja – kako gelifikacija povećava tvrdoću macerala huminita a sušenje pospešuje stvaranje pukotina, ulminit ima bolju meljivost od tekstinita. Ima ga više u sitnijoj frakciji • briketiranje – visoki udeli ulminita sprečavaju nastanak veza između čestica uglja u procesu briketiranja bez veziva. Briketi imaju nisku čvrstoću • karbonizacija – ulminit daje manje količine kartana i gasa nego tekstinit • određivanje ranga – merenje refleksije ulminita B predstavlja najpouzdaniji parametar ranga. Ima dobru korelaciju sa drugim parametrima ranga uglja kao što su toplotna moć ili sadržaj ugljenika	 Ulminit (U); A – taman, B – svetao  Ulminit (U)  Ulminit (U), Tekstinit (Tx)

Tabela 3.2. Osnovne karakteristike macerala huminita – nastavak

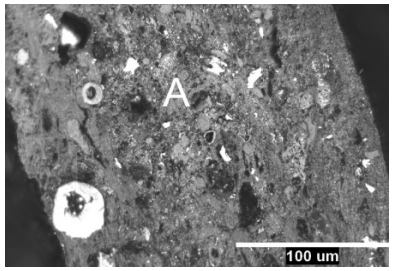
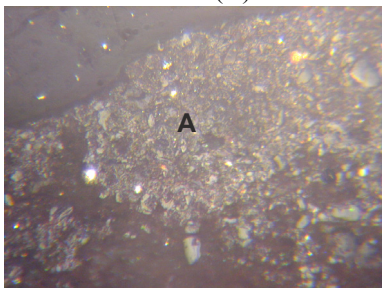
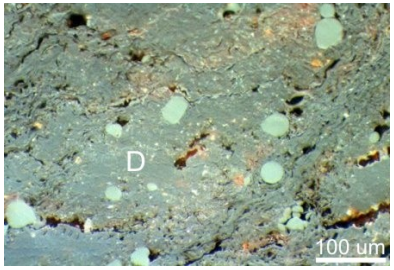
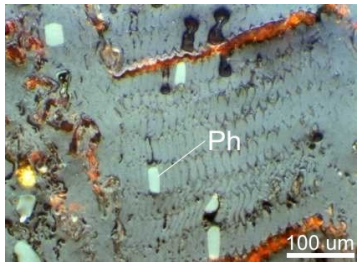
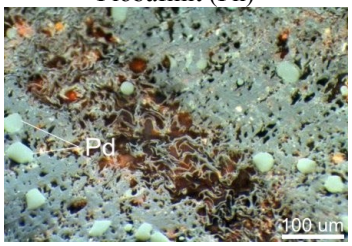
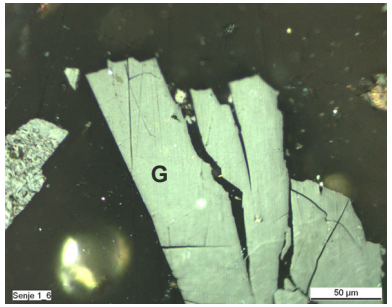
Podgrupa	Maceral	Opis	Poreklo	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom (odbijena svetlost, uljna imerzija)
Detrohuminit	Atrinit	Mešavina finih humusnih čestica (<10 µm) različitih oblika i sunđerastih do poroznih, negelificiranih amorfnih huminskih materija. Atrinit je glavna komponenta mekih mrkih ugljeva (orto lignit) i može se naći u udelima i preko 90 %. U tvrdim mrkim ugljevima (meta lignit) ga ima mnogo manje	Detritusni deo atrinita nastaje kao rezultat jakog struturnog razlaganja drvenastiog tkiva stabala, grana ili travnatih i biljaka nalik drveću. Sastoji se uglavnom od celuloze i u manjoj meri od lignina. Nastaje u aerobnim do slabo redukcionim uslovima. U procesu karbonifikacije atrinit prelazi u densinit, a u procesima geohemijske gelifikacije u kolodetrinit.	Ligniti bogati atrinitom su pogodni sa širok spektar industrijskih procesa: • priprema uglja – dobro se melje i pretežno se nalazi u česticama dimenzija 2 – 6,3 mm • briketiranje – ima jako dobre karakteristike briketiranja ukoliko ne sadrži mnogo liptinita • karbonizacija – niskotemperaturna karbonizacija daje male količine katrana i koksa. Visokotemperaturna karbonizacija daje koks visokog kvaliteta bez pukotina, visoke čvrstoće i gustine • ekstrakcija bitumena – loše karakteristike u ekstrakciji bitumena • sagorevanja – atrinit se pali na relativno niskim temperaturama	 Atrinit (A)  Atrinit (A)
	Densinit	Sastoji se od humusnih čestica (<10 µm) različitih oblika cementovanih amorfnim gustim himusnim materijama. Gelificiran je i povezuje druge komponente ugljeva. U lignitima višeg ranga, densinit je glavni maceral i formira masu u kojoj su ostali macerali (npr. liptinit) ugrađeni	Nastaje kroz dva različita procesa: 1. jakim razlaganjem drvenastog tkiva stabla i grana koji su najvećim delom izgrađeni od celuloze i lignina u vlažnoj sredini tokom tresetne faze koja je praćena biohemijskom gelifikacijom 2. geohemijskom gelifikacijom atrinita tokom procesa karbonifikacije	• priprema uglja – densinit ima dobru meljivost. Najviše je zastupljen u frakciji manjoj od 4 mm • briketiranje – densinit ima jako loše karakteristike za proces briketiranja usled njegove neelastičnosti i nereagovanja sa ostalim česticama uglja tokom procesa briketiranja bez vezivnog sredstva • karbonizacija – nema primenu	 Densinit (D)

Tabela 3.2. Osnovne karakteristike macerala huminita – nastavak

Podgrupa	Maceral	Opis	Poreklo	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom (odbijena svetlost, uljna imerzija)
Gelohuminit	Korpohuminit	Sastoji se od zasebnih homogenih humusnih tela koja se javljaju ispuna ćelijskih prostora zajedno sa tekstinitom ili ulminitom ili izolovanih sa atrinitom, densinitom ili glinom. Veličina tela zavisi od početne veličine ćelije i paleobotaničkog porekla. Može se pojaviti u sfernom, ovalnom i izduženom obliku. Dimenzije se kreću od 10 do 40 µm za sferne čestice, odnosno 20 do 170 µm za izdužene. Postoje dva karakteristična submacerala flobafinit i pseudoflobafinit	Flobafinit vodi poreklo od tanina koji izgrađuje koru drveća. Pseudoflobafinit potiče od koloidnih humusnih rastvora (hunusnog gela)	• briketiranje – sa povećanjem sadržaja korpohuminita snižava se čvrstoća briketa • karbonizacija – sem skupljanja, nisu primećene promene tokom niskotemperaturske karbonizacije (do temperature od 550 °C)	 Flobafinit (Ph)  Pseudoflobafinit (Pd)
	Gelinit	Gelinit se javlja kao homogena humusna tvorevina bez strukture ili porozna humusna supstanca. Podeljen je na dva submacerala levigelinit i porigelinit. Levigelinit je u potpunosti bez strukture, kompaktan i homogen. U nekim slučajevima mogu se prepoznati šupljine usled skupljanja pri sušenju. Porigelinit je sunđerast, porozan ili sa mikrogranulanom strukturom	Gelinit nastaje kako singenetski tako i epigenetski. Prekursor je gelinita u ugljevima srednjeg i visokog ranga. Gelinit je čest ali ne toliko zastupljen konstitutent lignita niskog ranga. Sadržaj mu raste tokom procesa karbonifikacije od orto do meta lignita	• priprema uglja – gelinit se lako melje. Najviše je zastupljen u frakciji 0 – 2 mm • briketiranje – jako loše karakteristike briketiranja. Sklonost ka stvaranju spoljašnjih pukotina dovode do male čvrstoće briketa • karbonizacija – gelinit se jako skuplja tokom procesa koksovanja i dovodi do snižavanja čvrstoće koksa • sagorevanje – toplotna moć gelinita je uopšteno ispod prosečne vrednosti uglja u sloju	 Gelinit (G)

3.2. Grupa liptinita

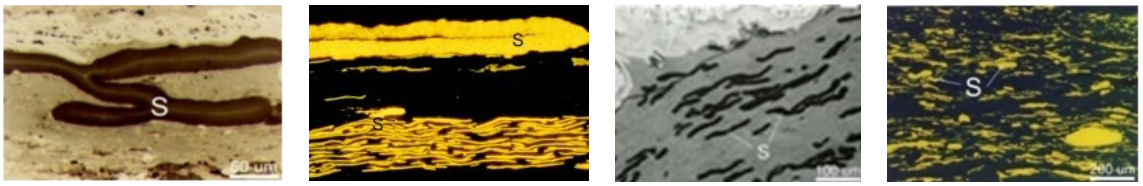
Grupa liptinita (raniji naziv egziniti) najvećim delom vodi poreklo od jednorodnih delova biljaka koji se odlikuju velikom otpornošću pri procesima razlaganja. Izgrađeni su od sporina, kutina, suberina, rezina, smola, voskova, masti i ulja biljnog porekla.

Ova grupe obuhvataju sledeće macerale [15]: sporinit, kutinit, suberinit, rezinit, alginit, liptodetrinit, bituminit, eksudatinit, fluorinit i florofilinit.

U ugljevima niskog i srednjeg ranga, macerali liptinitske grupe imaju mnogo nižu refleksiju od vitrinita, pri čemu se sa povećanjem ranga povećava i refleksija. Pokazuju svojstva fluorescencije kada se osvetle ultra ljubičastom, ljubičastom ili plavom svetlošću. Intenzitet fluorescencije opada sa povećanjem ranga uglja (stepena karbonifikacije).

U ugljevima niskog ranga razlikuju se od huminita po većem udelu vodonika. U procesu karbonifikacije daju dosta katrana i gasa. Iako su bogati vodonikom, sa odnosom H/C uglavnom preko 1, macerali liptinitske grupe ne doprinose stvaranju tečnih ugljovodonika.

Sporinit-polinit (slika 3.1) je maceral koji potiče od spora i polena biljaka. U ugljevima niskog ranga boja sporinita pod mikrsokopom je zlatno žuta do zlatno braon. Povećanjem ranga uglja boja prelazi u tamno žutu do sivu. Refleksija raste sa rangom od 0,13 % za ugljeve sa sadržajem isparljivih materija oko 36,5 % do 1,40 % za ugljeve sa sadržajem isparljivih materija 21 % [5]. U mekim mrkim ugljevima refleksija sporinita-polinita iznosi 0,05 – 0,1 %. Ima najmanju gustinu od svih komponenata uglja. Za razliku od vitrinita, koji je dosta lomljiv, ima visoku tvrdoću. Ova karakteristika je jasno vidljiva pod mikroskopom kao prekid mikropukotine u vitrinitu.

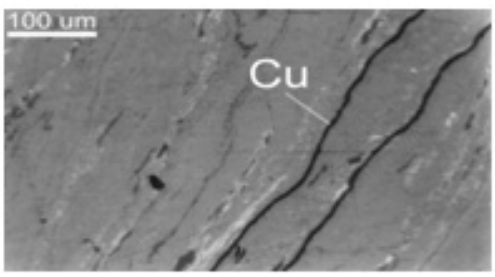


Normalna svetlost | Ultravioletna svetlost | Normalna svetlost | Ultravioletna svetlost

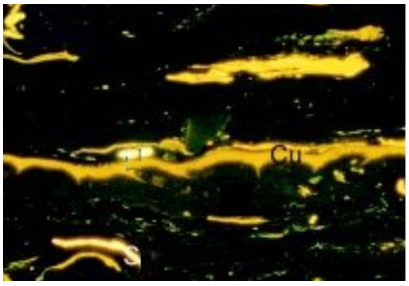
Slika 3.1. Sporinit pod mikroskopom

Kutinit (slika 3.2) vodi poreklo od egzine spoljašnje opne lišća, korenja i spoljašnje opne biljaka. U lišću ima izrazito ćelijsku strukturu i lako se prepoznaje pod mikroskopom (u poprečnom preseku ima izgled kao traka). Debljina se kreće od 0,003 mm do 0,02 mm. Ima dugu lančastu strukturu smolastu po prirodi. Prisutan je u većini ugljeva, pri čemu je dominantan u ugljevima iz perioda Mezozoika, dok je manje zastupljen u trecijarnim ugljevima.

Fizičke karakteristike su slične sporinitu. Hemijski sastav je sledeći [5]: ugljenik 70,6 – 76,4 %, vodonik 7,6 – 11,8 %, kiseonik 11,8 – 21,7 %, isparljive materije 80 % (bez vlage i pepela).



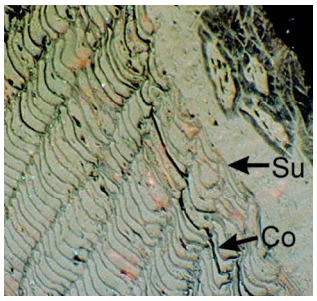
Normalna svetlost
Kuptinit (Cu)



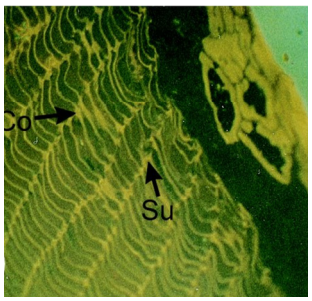
Ultravioletna svetlost
Kuptinit (Cu), Sporinit (S)

Slika 3.2. Kutinit

Suberinit (slika 3.3) potiče od suberina, koji je izgrađen od složenih visokomolekularnih masnih kiselina koja se nalazi u ćelijskim zidovima kore i štite biljku od isušivanja. Prisutan je u većini ugljeva iz perioda mezozoika i tercirajara.



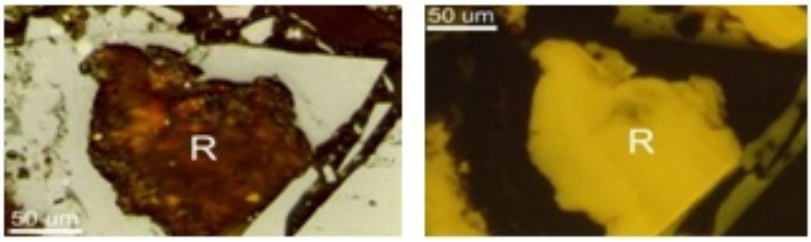
Normalna svetlost
Suberinit (Su), Korpohuminit (Co)



Ultravioletna svetlost
Suberinit (Su), Korpohuminit (Co)

Slika 3.3. Suberinit

Rezinit (slika 3.4) vodi poreklo od ostataka smola, voskova, ulja i masti unutar tkiva ćelije i predstavljaju nusproizvod metabolizma ćelije. U ugljevima, rezinit se pojavljuje kao ispuna ćelije ili u slojevima, čak i kao fino dispergovan. U poprečnom preseku ima ovalan izgled. U preparatima za odbijenu svetlost ima tamniju boju nego sporinit i kutinit. U ugljevima niskog ranga, refleksija rezinita varira u širokom opsegu (0,13 – 0,20 %) ali je uvek niža od refleksije huminita/vitrinita. U ultravioletnoj svetlosti fluorescira od beličasto žute, limun žute do žuto crvene i žuto braon boje. U normalnoj odbijenoj svetlosti rezinit ima tamno sivu boju. Elementarnom analizom rezinita dobijene su sledeće vrednosti [5]: ugljenik 77 – 85 %, vodonik 8 – 11 %, kiseonik 2,7 – 13 %.



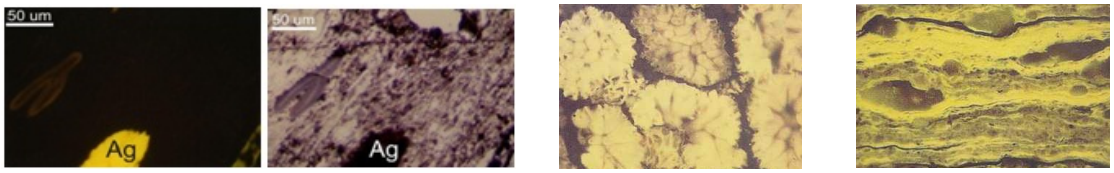
Normalna svetlost Ultravioletna svetlost

Slika 3.4. Rezinit (R)

Alginit (slika 3.5) je maceral koji se nalazi u niskim koncentracijama u humusnim ugljevima. Više prisustvo alginita konstatovano je u sapropelnim ugljevima i uljinim šejlovima. Vodi poreklo od određenih kolonija algi: *Pila, Reinschia, Botryococcus, Tasmanites, Gleocapsomorpha* i njima srodnih modro-zelenenih i zelenih algi. U normalnoj svetlosti je tamno braon do crne boje. Na osnovu morfologije deli se na dva podtipa: telalginit i lamalginit.

Telalginit se javlja u vidu većih tela (slika 3.5. a,b,c), pokazujući botaničku strukturu. Grade ga kako morske tako i slatkovodne alge. Lamalginit je izgrađen od fragmenata algi i manjih algi i javlja se u vidu traka manje ili veće debljine (slika 3.5d). Grade ga zelene alge.

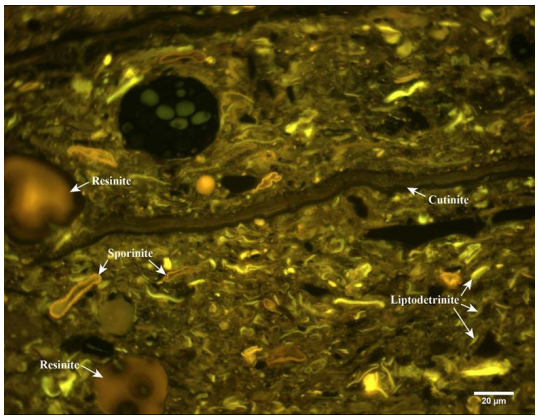
U ugljevima niskog ranga, alginit ima najnižu refleksivnost i najjaču fluorescenciju. U preparatima za odbijenu svetlost boja mu je crna do tamno siva, a u preparatima za propuštenu svetlost boja mu je bela do žuta. Sadrži visok udeo vodonika.



a) Telalginit ultravioletna svetlost | b) Telalginit normalna svetlost | c) Telalginit ultravioletna svetlost | d) Lamalginit ultravioletna svetlost

Slika 3.5. Algnit

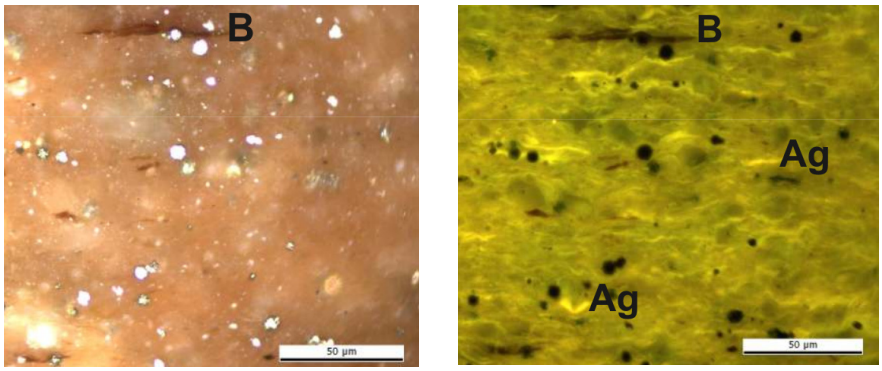
Liptodetrinit (slika 3.6) predstavlja mehanički i biohemijski degradirani liptinit i nema prepoznatljivu formu. Može da sadrži fragmente ili ostatke degradovanih spora, kutikula, algi i drugih liptinita. Široko je rasprostranjen u ugljevima. Javlja se u ugljevima kod kojih je organska materija deponovana u dubljim delovima tresetne močvare sa visokim nivoom vodenog stuba. Obično se javlja u proslojcima zajedno sa detrohuminitom, detrovitrinitom, rezinitom i sporinitom. U literaturi nema podataka o fizičkim i hemijskim karakteristikama u kamenim ugljevima. U tercijarnim mekim mrkim ugljevima ima ga dosta. U odbijenog svetlosti ga je teško razlikovati od gline. Najbolje ga je proučavati pod mikroskopom sa ultravioletnom svetlošću i velikim uveličanjem. Kao i svi macerali liptinita sadrži visok udeo ispaljivih materija i vodonika.



Slika 3.6. Liptodetrinit (ultravioletna svetlost)

Bituminit (slika 3.7) predstavlja mešavinu humusnih materija i bitumena i karakterističan je sastojak sapropelnih ugljeva, dok se u humusnim ugljevima javlja u iskim koncentracijama. Nastao je razlaganjem algi, planktona i lipida pod dejstvom bakterija. Čest je sastojak kamenih ugljeva. Prepoznaje se po svom nedostatku određenog oblika. Ima optička svojstva između liptinita i vitrinita. U preparatima za

propuštenu svetlost u ultravioletnoj svetlosti ima crvenu boju dok su drugi macerali grupe liptinita imaju žutu boju. U kanel ugljevima tercijarne starosti bituminit se javlja povezan sa drugim maceralima liptinitske i vitrinitske grupe.

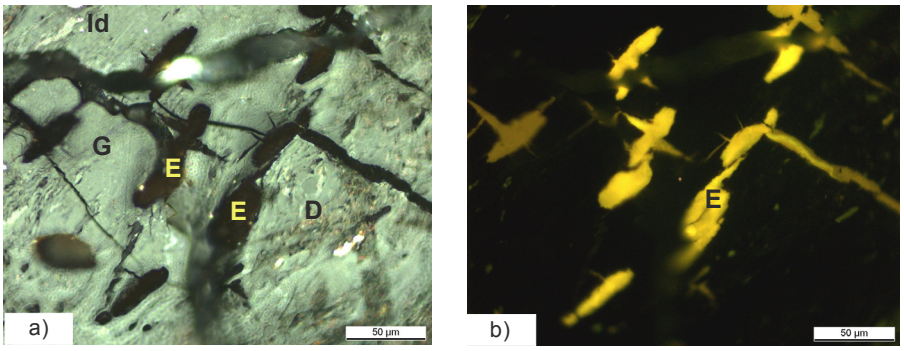


Normalna svetlost — Ultravioletna svetlost

B – bituminit — B – bituminit, Ag – alginit

Slika 3.7 Bituminit u šejlovima

Eksudatinit (slika 3.8), u literaturi poznat i kao sekundarni rezinit, je sekundarni maceral nastao od materijala bogatog lipidima tokom procesa karbonifikacije. Ispunjava prazan ćelijski prostor, praznine i pukotine. Najčešće se javlja u mrkim ugljevima i visoko volatilnim kamenim ugljevima (npr. rumunski kameni ugljevi tercijarne starosti, japanski ugljevi). Izostaje u ugljevima jako niskog ranga kao i u ugljevima čija je reflesija vitrinita veća od 0,8 % (nestaje u toku sazrevanja ugljeva).

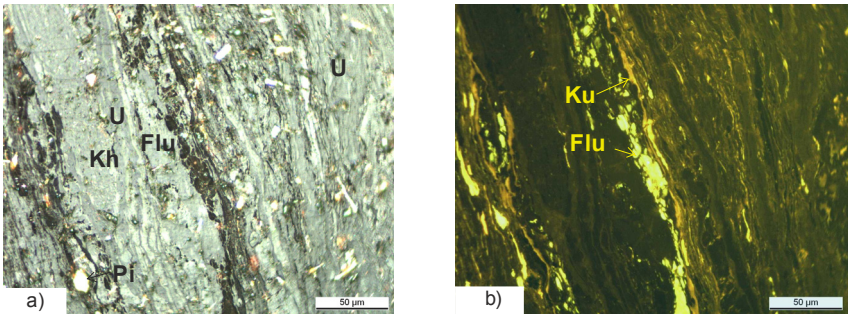


Normalna svetlost
D – densinit, G – gelinit,
E – eksudatinit, Id – inertodetrinit

Ultravioletna svetlost
E – eksudatinit

Slika 3.8. Eksudatinit

Fluorinit (slika 3.9) je maceral nastao od biljnih ulja. Ima intenzivnu fluorescenciju (žutu) na kratkim talasnim dužinama. Ranije je pogrešno tumačen kao sočiva gline usled njegovog izgleda pod mikroskopom pod normalnom odbijenom svetlošću (crne je boje). Upečatljiva optička karakteristika opravdava razvdajanje od macerala rezinita.



Normalna svetlost
U – Ulminit, Kh – korpohuminit,
Flu – fluorinit, Pi – pirit

Ultravioletna svetlost
Ku – kutinit, Flu – fluorinit

Slika 3.9. Fluorinit

Florofilinit vodi poreklo od hlorofila-biljnog zelenila. Specifičan maceral liptinitske grupe, a predstavlja bituminoznu supstancu koja podseća na hlorofil viših biljaka. U mekim mrkim ugljevima hlorofil, koji pokazuje intenzivnu crvenu fluorescenciju, ponekad je dobro očuvan.

3.3. Grupa inertinita

Naziv inertinit potiče od latinske reči iners što znači nepokretan, trom. Inertinit obuhvata grupu macerala čija je refleksija u ugljevima niskog i srednjeg ranga veća u poređenju sa maceralima vitrinitske i liptinitske grupe. Macerali inertinitske grupe se mogu podeliti na [16]:

- macerali sa strukturom ćelija biljaka – fuzinit, semifuzinit i funginit,
- macerali bez ćelijske strukture biljaka – sekretinit, makrinit i mikrinit,
- fragmentovani inertinit – inertodentrinit.

Inertiniti sa karakterišu visokim udelom ugljenika i niskim udelom kiseonika i vodonika. Udeo ugljenika zavisi od porekla macerala. Grupa inertinita obuhvata

macerale različitog porekla: tkiva biljaka, fragmenata tkiva, gelificiranog amorfnog materijala i sekreta ćelija koji su izmenjeni tokom biohemijskih procesa. Inertinit je uobičajen u svim ugljevima, i to u niskim udelima.

Visok udeo inertinita u uglju, posebno fuzinita i semifuzinita dovodi do stvaranja prašine prilikom eksploatacije. Tokom procesa sagorevanja, većina macerala inertinita podrvgava se promenama pod uslovima koji dovode do stvaranja reaktivne čađi.

U tabeli 3.3. date su osnovne karakteristike macerala inertinita sa posebnim osvrtom na njihov uticaj na praktičnu primenu ugljeva.

Tabela 3.3. Osnovne karakteristike macerala inertinita

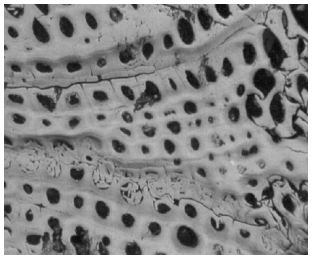
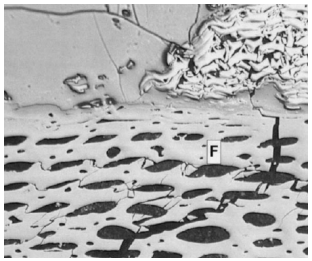
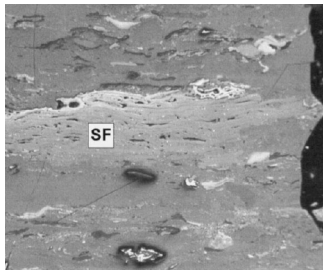
Maceral	Opis	Poreklo, karakteristike	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom
Fuzinit	Maceral koji pokazuje visok stepen refleksije koja se povećava sa rangom uglja kao i dobro očuvanu ćelijsku strukturu.	Vodi poreklo od lignoceluloznih zidova ćelije. Nastao je tokom šumskih požara ili jakih oksidacionih procesa. U uglju se nalaz i u obliku sočiva ili tankih traka. Fuzinit se karakteriše visokim udelom ugljenika (71 – 94 %) a niskim udelom vodonika (4 – 2 %) , kiseonika (20,3 – 2,2 %) i isparljivih materija. Udeo ugljenika se poveća sa povećanjem refleksije. Karakteristična je komponenta kerogena tipa IV	• fuzinit se koncentriše u veoma finim česticama uglja posle mlevenja • tokom briketiranja fuzinit ostaje neelastičan i krt. • ponaša se kao inertan prilikom mešanja ugljeva • povećava čvrstoću u procesu koksovanja • zbog visokog udela ugljenika i niskog vodonika nije pogodan za hidrogenizaciju • nije sklon spontanom sagorevanju	 Fuzinit, rurski basen, ugalj srednjeg ranga  Fuzinit (F), rurski basen, ugalj visokog ranga
Semifuzinit	Maceral sa svojim karakteristikama između fuzinita i telinita. Struktura mu je između humotelinita/vitrinita i fuzinita. Povećanjem refleksije smanjuje se udeo vodonika a povećava ugljenika.	Vodi poreklo od parenhimatoznih tkiva stabljika, travnatih biljaka i lišća sastavljnih od celuloze i lignina. Formiran je u stadijumu treseta slabom humifikacijom, dehidracijom i redoks (oksidaciono-redukcionim) procesima. Uobičajeni je maceral uglja zajedno sa vitrinitom i fuzinitom. U zavisnosti od stepena hemijske transformacije pripada kerogenu tipa III-IV	• tokom koksovanja, semifuzinit gubi isparljive materije i skuplja se • usled skupljanja može dovesti do nastanka pukotina u koksu	 Semifuzinit (SF), rurski basen ugalj srednjeg ranga

Tabela 3.3. Osnovne karakteristike macerala inertinita – nastavak

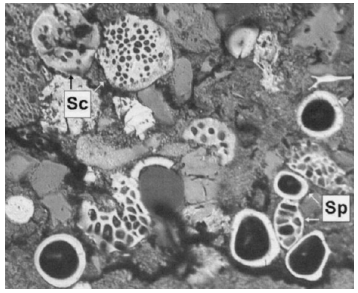
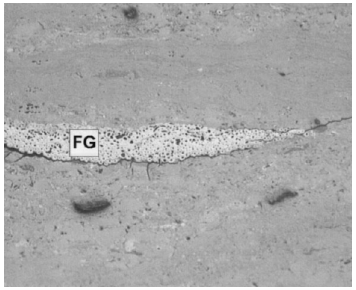
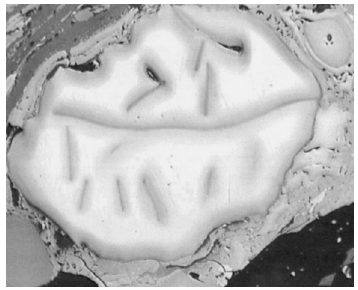
Maceral	Opis	Poreklo, karakteristike	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom
Funginit	Maceral koje se uglavnom sastoji od jedno ili višećelijskih spora gljiva, sklerocijuma, hifa, micelijuma i drugih ostataka gljiva. Kod ugljeva niskog ranga, stepen refleksije je u opsegu $\overline{R}_r = 0,4 - 1\ \%$	Vodi poreklo od spora gljiva, sklerocijuma, hifa micelijuma i drugih ostataka gljiva. Uglavnom je sastavljen od polisaharida hitina, slabih kiselina i baza. Visoka refleksija potiče od pigmenta melanina. U ugljevima niskog ranga funginit se pojavljuje zajedno sa humodetrinitom i uglavnom je koncentrisan u svetlim trakama mekih mrkih ugljeva. Deo je kerogena tipa IV	Usled jako malog udela u ugljevima, ovaj maceral nema uticaja na pripremu uglja, briketiranje kao karakteristike koksovanja. Najčešća primena je pri određivanju peleobotaničkih uslova pri stvaranju treseta, odnosno uglja.	 Funginit poreklom od spora (Sp) i sklerocijuma (Sc)  Funginit (FG) poreklom od hifa
Sekretinit	Maceral visoke refleksije sastavljen od uglavnom oblih, mehurastih do izduženih tela bez vidljive ćelijske strukture. Obično je dimenzija 60 – 400 µm, pa do 2000 µm u izduženoj formi	U literaturi nema mnogo podataka o hemijskim sastavu. Odnos O/C je manji od 0,11. Bledo sive boje i žuto bele boje. Refleksivnost mu je nešto veća od vitrinita. Poreklo još uvek nije potpuno razjašenjeno. Uobičajeno mišljenje je da je nastao oksidacionim procesima ostataka. Najčešće ga ima u ugljevima srednjeg i visokog ranga Karbona i Perma	• sekretinit ne doprinosi stvarnju prašine • ne daje znake topljenja do temperatura od 510 °C • ne stapa se tokom koksovanja ali može doprineti čvrstoći koksa	 Sekretinit, ugalj srednjeg ranga, basen Kleinkopje, Južna Afrika

Tabela 3.3. Osnovne karakteristike macerala inertinita – nastavak

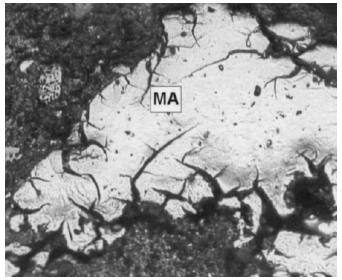
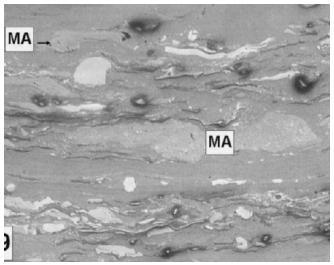
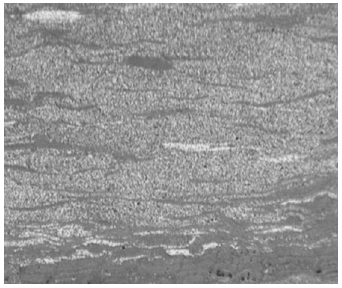
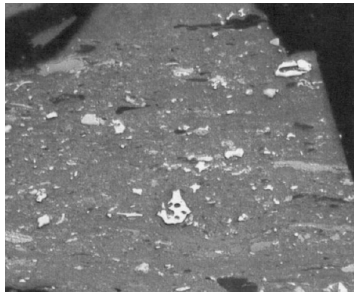
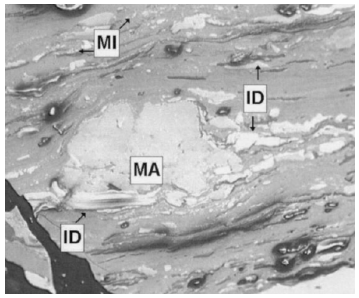
Maceral	Opis	Poreklo, karakteristike	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom
Makrinit	Relativno velik i kompaktan maceral bez ćelijske strukture. Nema karakterističan oblik. U ugljevima niskog ranga pokazuje teksturu sličnu atrinitu/densinitu koji ga okružuje. Bledo sive do bele boje	Nema podataka o hemijskom sastavu. Vodi poreklo od humusnih supstanci koje su podrvrgnute dehidrataciji i redoks procesima (oksidaciono-redukcionim) sa jako niskim nivoom vodenog stuba u ranoj fazu treseta. Takođe, može biti metabolički produkt bakterija i gljiva. U zavisnosti od hemijskih karakteristika može biti deo kerogena tip III, mada uglavnom tipa IV	• reaktivnost makrinita je povezana sa refleksijom – što je manja to je veća rekativnost	 Makrinit (MA), oblast donje Rajne, ugalj niskog ranga  Makrinit (MA), rurski basen, ugalj srednjeg ranga
Mikrinit	Maceral koji se javlja u obliku veoma malih zaobljenih zrna. Teško ga je razlikovati od drugih malih fragmenata inertinita pa se za praktične svrhe mikrinit razlikuje od inertodetrinita gornjom dimenzijom od 2 µm. Usled malih dimenzija ugljavnom se određuje udeo agregata mikrinita	Usled malih dimenzija teško je izolovati čist mikrinit te nema podataka o hemijskom sastavu. Predstavlja produkt karbonifikacije vezivnog tkiva i ostataka lipoidnih supstanci. Veoma je redak u ugljevima niskog ranga	Nema podataka o praktičnom značaju	 Mikrinit, fine bele tačke, ugalj srednjeg ranga, La Jagua, Kolumbija

Tabela 3.3. Osnovne karakteristike macerala inertinita – nastavak

Maceral	Opis	Poreklo, karakteristike	Praktični značaj	Primer izgleda pod mikroskopom
Inertodentrinit	Maceral koji se javlja kao diskretan mali fragment inertinita različitog oblika. Veličina čestica je ispod 10 μm	Potiče od ćelijskih zidova, flobafena od razloženih tkiva, oksidovanih spora. Konstituent je trimaceralnih mikrolitotipova vitrinertita i durita. Alohtoni inertodentrinit može se javiti zajedno sa mineralima glina ili piritom. Dosta ga ima u sapropelnim ugljevima. Pripada kerogenu tipa IV, mada u zavisnosti od reaktivnosti može biti i deo kerogena tipa III.	Tehničke karakteristike zavise od vrste macerala inertinita od kojih potiče	 Inertodetrinit (velika bela zrna) i mikrinit (mala bela zrna), El Cerrejon Norte, Kolumbija  Makrinit (MA), mikrinit (MI) i inertodentrinit (ID), rurski basen, ugalj srednjeg ranga

4. Litotipovi mrkih ugljeva

Pod litotipom, terminom zvanično uvedenim 1954. godine od strane Sejlera (Seyler), podrazumeva se makroskopski prepoznatljiv sastojak uglja koji predstavlja kombinaciju jedne, dve ili tri grupe macerala i ukazuju na promene uslova deponovanja organske materije u tresetnoj močvari. U literaturi, termin litotip je prvi put upotrebila Meri Stoups (Marie Stopes).

Litotipovi se mogu razlikovati po boji, sjaju i strukturno-teksturnim karakteristikama, tehnološkim osobinama, maceralnom i hemijskom sastavu.

Razlikuju se četiri litotipa mrkih ugljeva [17]: barski, ksilitni, fuzenizirani i zemljasti. Kao posebna kategorija izdvaja se dopleritski ugalj koji se javlja u vidu proslojaka unutra barskog a ređe ksilitnog litotipa. Crne je boje, staklaste sjajnosti i školjkastog preloma. Predstavlja jako gelificirane proslojke i sočiva drvenastog tkiva i sklon je usitnjavanju.

Barski litotip je uglavnom izgrađen od homogenog humusnog detritusa, sa fragmentima lišća, spora, polena, smola i voskova koji su inkorporirani u detritus. Uobičajeni je sastojak mrkih ugljeva tercijarne starosti i u visokom procentu izgrađuje ugljeni sloj (40 – 70 %). Nastaje u delovima močvara niskog nivoa podzemnih voda izgrađenih uglavnom od žbunja bez drveća, zatim u delovima močvara visokog nivoa podzemnih voda sa zeljastom vegetacijom kao i u delovima močvara sa jakim razlaganjem viših kopnenih biljaka (četinari). Boja litotipa se kreće od žute, preko braon do crne.

Barski litotip se deli na trakasti i netrakasti. Prema stepenu hemijske zrelosti se deli na:

- trakasti
  - slabo gelificirani (braon boje) – meki mrki i mat tvrdi mrki ugljevi,
  - gelificirani (crne boje) – mat i sjajni tvrdi mrki ugljevi,
- netrakasti
  - negelificirani (žute boje) – meki mrki i mat tvrdi mrki ugljevi,
  - slabo gelificirani (braon boje) – meki mrki i mat tvrdi mrki ugljevi,
  - gelificirani (crne boje) – mat i sjajni tvrdi mrki ugljevi.

Svi varijeteti imaju mrki do tamno mrki ogreb, bez sjaja su (slabo gelificirani) do mat sjajnosti (gelificirani). Pokazuju nizak stepen refleksije i imaju nepravilan prelom. Struktura im je zrnasta i trakasta.
Barski ugalj ima primenu kod briketiranja, likvefakcije i koksovanja, izuzetno je značajan kod koksovanja. Iz ovog litotipa dobija se visok sadržaj tera i voskova.

Ksilitni litotip pokazuje dobro očuvanu drvenastu strukturu. Boja mu varira od žute, žuto-braon, tamno braon do crne a u zavisnosti od stepena karbonifikacije. Žuti i žuto-braon varijeteti su karakteristični za meke mrke ugljeve (lignite). Ovaj litotip se nalazi u svim mrkim ugljevima. Najzastupljeniji je litotip u mrkim ugljevima tercijarne starosti, a ponekada dominira nad barskim litotipom. Nastaje u zoni šumske vegetacije sa dominacijom četinara. U literaturi je poznato nekoliko podela ovog litotipa prema različitim autorima (tabela 4.1).

Tabela 4.1. Pregled klasifikacija ksilita prema različitim autorima

<table>
<tr><th>Suss, 1959.</th><th>Jacob & Rammler 1960.
Jacob 1961.</th><th>Roselt 1976.</th><th>Ercegovac 1989.</th></tr>
<tr><td>Mumificirano drvo, X_1</td><td>Mumificirano drvo</td><td>Mumificirani ksilit, X_1</td><td>Mumuficirani ksilit, X_1</td></tr>
<tr><td>Celulozom bogat ksilit, X_2</td><td>Celulozom bogat ksilit</td><td>Trakasti ksilit, X_2</td><td>Trakasti ksilit, X_2</td></tr>
<tr><td>Celulozom siromašan ksilit, X_3</td><td>Strukturni ksilit sa celulozom</td><td>Trošan ksilit sa celulozom, X_3</td><td rowspan="3">Strukturni ksilit X_3 + X_4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Strukturni ksilit (svetli i tamni), X_4</td><td>Tamni strukturni ksilit</td><td>Trošan ksilit bez celuloze, X_4</td></tr>
<tr><td>Svetli strukturni ksilit</td><td>Svetli strukturni ksilit, X_5</td></tr>
<tr><td>Dopleritski ksilit, X_5</td><td>Dopleritski ksilit</td><td>Crni strukturni ksilit, X_6</td><td>Dopleritski ksilit X_5</td></tr>
</table>

U okviru ovog litotipa Ercegovac [18] izdvaja:

- mumificirani ksilit (X_1),
- trakasti ksilit (X_2),
- strukturni ksilit (X_3+X_4) i
- dopleritski ksilit (X_5).

Mumificirani ksilit predstavlja fosilno drvo, svetložute je boje i svetložutog ogreba.

Trakasti ksilit, ili celulozom bogat ksilit [19] je svetlomrke boje sa dobro očuvanom strukturom drvenastog tkiva niskog stepena gelifikacije. Javlja se u vidu izduženih zrna, retko vlakana, a izgrađen je od likinih ćelija, plute i epiderma četinara [20]. Nastaje u uslovima dugotrajne biohemijske humifikacije u anaerobnoj sredini. Svetlomrkog je ogreba, mat sjajnosti i poseduje visoku mehaničku stabilnost.

Strukturni ksilit je trakasti ugalj mrke do svetlomrke boje sa očuvanom strukturom drvenastog tkiva nižeg stepena gelifikacije sa tamnijim i svetlijim nijansama. Mrkog je ogreba, ima mat sjajnost.

Dopleritski ksilit je trakast, izrazito sjajan, crne do tamnobraon boje, visokog stepena refleksije. Predstavlja jako gelificirane proslojke drvenastog tkiva. Pokazije malu mehaničku stabilnost, tj. sklon je usitnjavanju.

Na slici 14.1. (poglavlje 14) i u Prilogu 2 date su fotografije pod mikroskopom barskog i ksilitnog litotipa uzoraka ugljeva iz kolubarskog i kostolačkog basena.

Fuzenizirani litotip je crne boje, crnog ogreba i visoke sjajnosti. Krt je i lako lomljiv. Čest je sastojak mrkih ugljeva, naročito mekih mrkih ugljeva. Unutar ugljenog sloja javlja se u vidu tankih sočiva, proslojaka ili kao uklopak unutar barskog ili ksilitnog litotipa. U građi ugljenog sloja ovaj litotip učestvuje u niskim procentima. Ima izrazito visok stepen refleksije.

Nastaje u uslovima jake oksidacije najčešće ksilitnog litotipa ili usled šumskih požara. Tokom karbonifikacije malo menja svoj hemijski sastav. Ima loša tehnološka svojstva u procesima briketiranja i sagorevanja jer je inertan.

Zemljasti litotip pokazuje mrku, tamnomrku do crnu boju, mrkog je ogreba i bez sjaja. Izgrađen je od sitnih fragmenata organske materije nižih biljaka tj. raspadnutih ostataka celuloze, hemiceluloze, kore, spora, polena, lišća, smola, voskova i drugih rezistentnih delova biljaka koji su pomešani sa neorganskom materijom. Neorgansku materiju najčešće čine minerali glina, kvarc, karbonati, sulfidi itd. Mrkog je ogreba i bez sjaja. U vlažnom stanju je lepljiv, zbog relativno visokog sadržaja minerala glina, koji su često srasli sa maceralima, dok je u suvom stanju trošan. Javlja se u tercijarnim mrkim ugljevima Srbije, Bugarske i Grčke. Najčešće se javlja zajedno sa barskim i ređe sa ksilitnim litotipom. Obično izgrađuje najniže delove ugljenog sloja. Kada u visokim

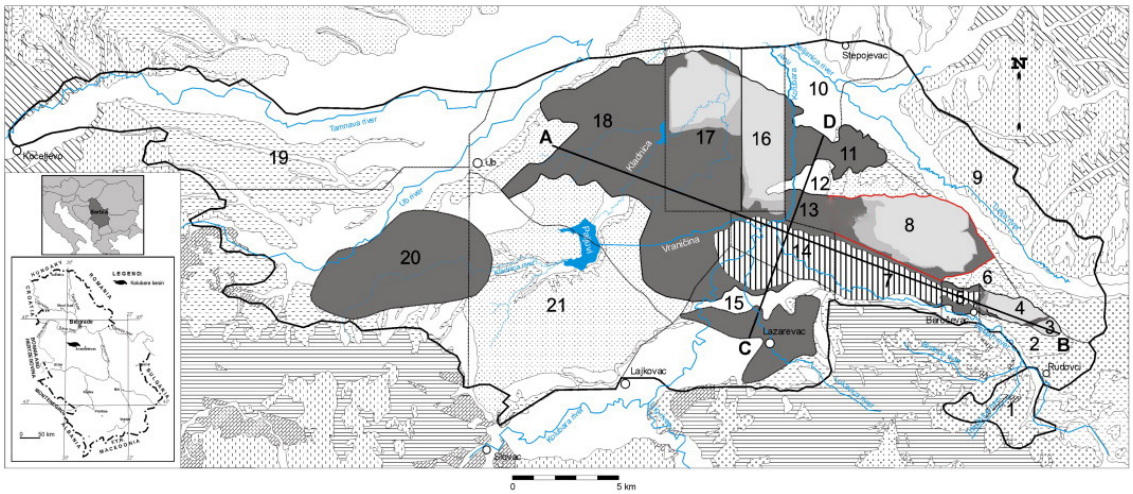
procentima izgrađuje ugljeni sloj, zemljasti litotip se javlja u vidu proslojaka i fragmenata. Nepovoljan je za briketiranje, likvefakciju i sagorevanje.

5. Ligniti kolubarskog i kostolačkog basena

5.1. Kolubarski basen

Prema geološkoj starosti, kolubarski basen pripada tercijernoj eri perioda gornjeg miocena. Ekonomski gledano, jedan je od najvažnijih kopova uglja u Srbiji. Nalazi se na oko 60 km jugozapadno od Beograda. Površine je skoro 600 km^2, pri čemu se proteže u pravcu istok-zapad 55 km a u pravcu sever-jug 15 km. U morfološkom pogledu, to je blago zatalasano zemljište, ili je ravničarskog karaktera. Najviša visinska kota na terenu je 250 m. Basen ima veoma povoljan geografski položaj i veoma dobre komunikacione veze. Njegov centralni deo preseca pruga Beograd-Bar i put prvog reda Beograd-Kraljevo-Skoplje. Dolinom reke Kolubare basen je otvoren ka rekama Savi i Dunavu.

Ceo basen je podeljen na nekoliko polja: A, B, C, D, E, F, G, Veliki Crljeni, Šopić-Lazarevac, Tamnava Istok, Tamnava Zapad, Radljevo, Zvizdar i Ruklade (slika 5.1). Lignit se eksploatiše u poljima C, D i Tamnava Zapad.

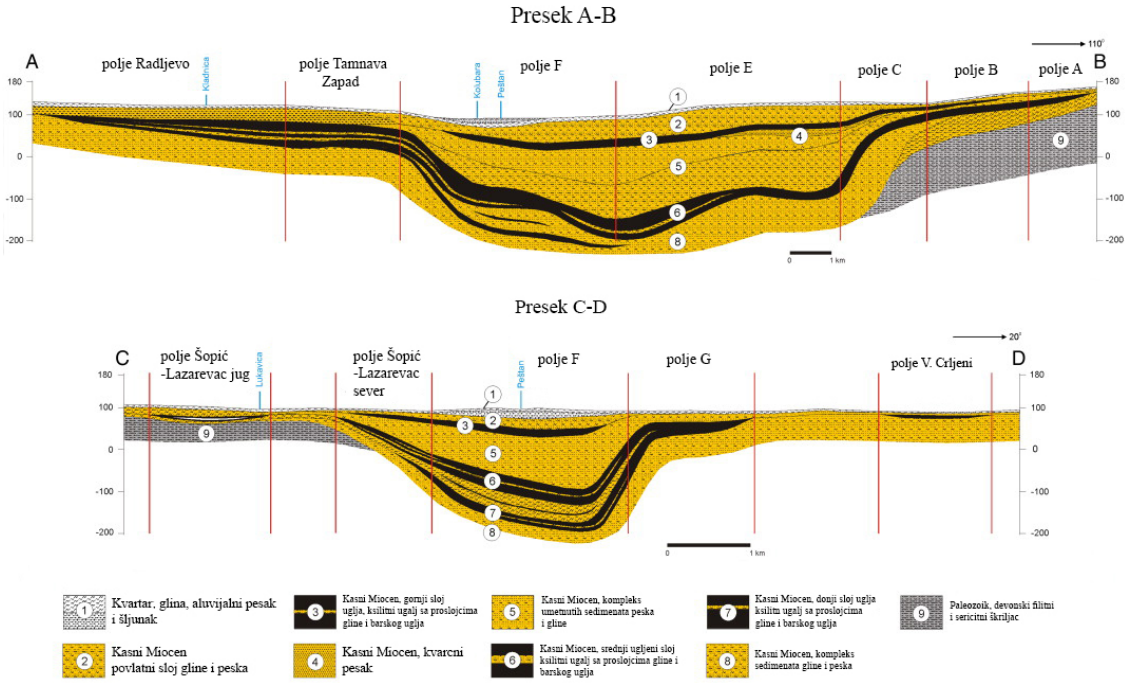


Slika 5.1. Geološka mapa kolubarskog basena [21]
1 – polje Kruševica, 2 – polje Rudovci, 3 – polje A, 4 – polje B, 5 – polje C, 6 – polje Baroševac, 7 – polje E, 8 – polje D, 9 – polje Turija, 10 – polje Stepojevac, 11 – polje Veliki Crljeni, 12 – polje Volujak-Vreoci, 13 – polje G, 14 – polje F, 15 – polje Šopić-Lazarevac, 16 – polje Tamnava Istok, 17 – polje Tamnava-Zapad, 18 – polje Radljevo, 19 – polje Trlić, 20 – polje Zvizdar, 21 – polje Ruklade

Od 1896. godine, od kada postoji eksploatacija uglja, u kolubarskom basenu je proizvedeno 883,2 miliona tona lignita, od kojih 866,8 miliona tona u otvorenim kopovima a 16,3 miliona tona u podzemnim kopovima. Godišnje, u kolubarskom basenu se proizvede oko 30 miliona tona uglja, što iznosi 70 % proizvodnje uglja u Srbiji. Rezerve uglja su procenjene na 2811 miliona tona. Većina proizvedenog uglja, oko 90 %, se koristi kao gorivo u termoelektranama Nikola Tesla u Obrenovcu i Kolubara u Velikim Crljenima, sa ukupnom instalisanom snagom od 3160 MW. Godišnje se proizvede oko 17 milijardi kWh električne energije iz kolubarskog uglja, što predstavlja 52 % ukupne proizvodnje u Srbiji.

Ugalj je najvećim delom nastao od močvarne vegetacije, uglavnom na mestu gde je egzistirao biljni materijal. Ranija istraživanja [21, 22] pokazuju da je drveće i žbunje imalo veliku ulogu u formiranju lignita (mekog mrkog uglja). Glavni izvori organske materije bile su gimnosperme i angiosperme. Osnovni preduslov formiranja uglja u kolubarskom basenu predstavlja postojanje bujne močvarne vegetacije na obodu Panonskog mora. Ovakve močvare postojale su istovremeno u širem regionu na južnom obodu Panonskog mora, od Kostolca na istoku, zatim preko Smedereva, Kolubare i dalje na zapad (Kreka, Posavina, Slovenija) [7].

Ugljeni sloj je složene građe (slika 5.2). Prošaran je jalovim proslojcima gline i peska, koji dele ugljeni sloj na više odvojenih slojeva. Debljina sloja raste sa 2 – 10 m na obodima, do 25 – 45 m u centru basena [7]. Ceo basen se sastoji od tri sloja: donjeg, glavnog i gornjeg (slika 5.2). Debljina donjeg sloja iznosi oko 20 m i formiran je u južnom delu basena, uglavnom u polju F i Šopić-Lazarevac (slika 5.1. i 5.2). Glavni sloj se pruža celim basenom. U južnom delu basena je uglavnom uniforman dok se u severnom deli na nekoliko slojeva. Debljina varira od nekoliko metara do 50 m (uključujući i stene koje se nalaze između proslojaka), lokalno čak i do 110 m (oblast Zeoke). Gornji sloj uglja se eksploatiše u celom južnom delu basena, od polja A do polja Šopić-Lazarevac (slika 5.1. i 5.2). Debljina mu varira do 25 m. Velika većina rezervi je uglavnom potrošena.



Slika 5.2. Poprečni presek kolubarskog basena (linije preseka prikazane su na slici 5.1) [21]

Kolubarski ugalj spada u grupu mekih mrkih ugljeva (niskog ranga C) [12]. Sastoji se od ksilita i zemljastog barskog uglja. Ranije studije [12, 23] su pokazale da je ugalj kolubarskog basena humusni ugalj sa visokim udelom huminita (93,5 %, zapreminski udeo, osnova bez mineralnih materija) i relativno niskim udelom liptinita (3,3 %, zapreminski udeo, osnova bez mineralnih materija) i inertinita (3,3 %, zapreminski udeo, osnova bez mineralnih materija). Najzastupljeniji macerali su tekstinit i ulminit sa promenljivim udelima densinita i atrinita. Istraživanja su takođe pokazala i varijacije u petrografskom sastavu po dubini ugljenog sloja. Najzastupljeniji macerali su tekstinit (6,5 – 87 %) i ulminit (3,5 – 50,5 %) sa promenljivim udelima atrinita (4,5 – 35,5 %), densinita (0,5 – 16 %), gelinita (2,5 – 22,5 %) i korpohuminita (0,5 – 7,5 %). Udeo liptinita se kretao 1 – 19 % a inertinita 0,5 – 13,5 %. Srednja vrednost refleksije huminita je 0,3 %. Novija istraživanja polja D kolubarskog basena [21], su imala slične rezultate kao i [12, 23]. U literaturi [24] data je i uporedna studija domaćih mrkih ugljeva iz najznačajnijih basena, sa zaključkom da su domaći mrki ugljevi tipični humusni ugljevi.

Udeo pepela (osnova bez vlage) u glavnom sloju polja D se kretao od 6,67 % za ksilitne partije do 40,45 % za partije bogate mineralnim materijama. Udeo vlage je tipičan za

lignite i kreće se od 40,38 – 53,23 %, a donja toplotna moć 8,86 – 12,58 MJ/kg (osnova bez pepela). Udeo organskog ugljenika se kretao 36,5 – 60,0 % (osnova bez vlage), dok je udeo sumpora u granicama 0 – 1,58 %. Na udeo sumpora u uglju utiče pH vrednost treseta i udeo sulfata u tresetnim vodama. Varijacija udela sumpora po dubini polja pokazuje da je tokom nagomilavanja organske materije dolazilo do promene pH vrednosti u tresetu [21].

Gustina uglja kolubarskog basena je 1,2 – 1,24 g/cm^3, zapreminska težina 1,07 – 1,16 g/cm^3, čvrstoća pri pritisku upravno na slojevitost 39,1 – 71,4 kg/cm^2, čvrstoća pri pritisku paralelnom sa slojevitošću 26,9 – 54,0 kg/cm^2 a koeficijent čvrstoće 0,39 – 0,70 kg/cm^3. Ugao unutrašnjeg trenja iznosi 21°21' – 37°40', čvrstoća pri savijanju 11,1 – 22,3 kg/cm^2, dinamička čvrstoća 1,51 – 1,80 kg/cm^2, žilavost pri udaru 920 – 1800 kg/cm^2, modul elastičnosti paralelno sa slojevitošću 970 – 2088 kg/cm^2 a poroznost 15,32 – 26,1 %.

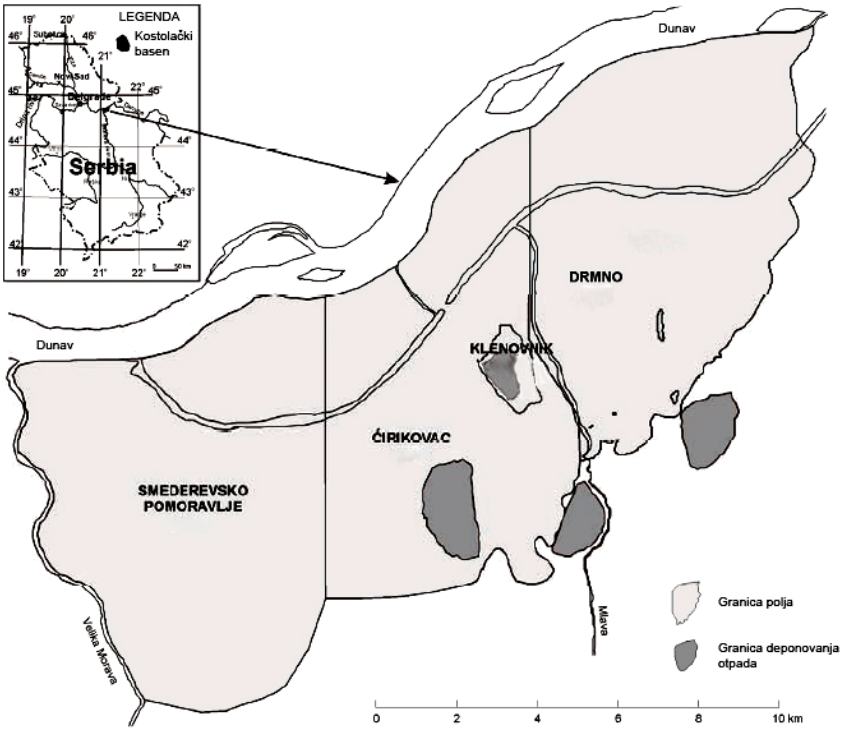
5.2. Kostolački basen

Kostolački basen (slika 5.3) nalazi se na desnoj obali Dunava. Obuhvata oblast severno, istočno i južno od Požarevca i najvećim delom se prostire između donjeg toka Velike Morave, koja čini zapadnu granicu basena, i donjeg toka reke Mlave, odakle se širi sve do naselja Ram. U ovom prostoru, sa stanovišta pojave uglja interesantni su sedimenti oko Požarevca, Kostolca, Velikog Gradišta i oko ušća Mlave u Dunav.

U seriji nagnutoj ka severu, u pravcu Dunava u naslagama debelim oko 100 m, javlja se pet ugljenih slojeva od kojih tri imaju ekonomsku vrednost: donji (III ugljeni sloj), zatim 6 – 60 m iznad njega srednji (II ugljeni sloj) i gornji sloj (I ugljeni sloj) koji leži 20 – 40 m iznad srednjeg. Najznačajniji je III ugljeni sloj i ima najveće rasprostiranje, od Ćirikovca na jugu do Dunava na severu i od Morave na zapadu do Kličevca na istoku. Debljina mu varira od 12 – 23 m. II ugljeni sloj je slabije razvijen. Debljina mu je od 1,5 do 6 m (srednja 4 m) i slabo se eksploatiše. I ugljeni sloj se javlja od Klenovika na jugu do Dunava na severu. Debljina mu je 14 – 17 m, pri čemu je gornji deo sloja kvalitetniji.

Ugalj kostolačkog basena je ksilitnog tipa. Sadrži 40 – 45 % vlage, oko 15 – 20 % pepela, do 1 % sumpora, oko 38 % isparljivih materija i donje toplotne moći 7740 – 9205 kJ/kg.

Udeo huminita u uglju iznosi 50,8 – 89,3 %, liptinita 2,5 – 6,8 % a inertinita 1,9 – 12,5 %. Udeo mineralnih materija iznosi 5,1 – 35,7 % [25]. Petrografske analize [25] pokazuju da su najzastupljeniji macerali tekstinit (3,7 – 48,3 %) i ulminit (5,4 – 38,9 %) sa promenljivim udelom atrinita (0,6 – 14,5 %) i densinita (9,4 – 39,1 %) i niskim sadržajem gelinita (0,5 – 7,2 %) i korpohuminita (0,9 – 6,4 %). Srednji stepen refleksije huminita iznosi 0,30 %.



Slika 5.3. Mapa kostolačkog basena [25]

6. Teorijske osnove usitnjavanja

Prilikom procesa usitnjavanja, neophodno je utrošiti odgovarajući rad kako bi se savladale kohezione sile između i unutar kristala čestice. Ovaj rad se sastoji od rada utrošenog na promenu zapremine prilikom deformisanja čestice i na rad koji se troši na stvaranje novih površina i dat je sledećim izrazom [26]:

$$E = e \cdot \Delta V + \sigma \cdot \Delta f \text{, kJ,} \tag{6.1}$$

gde su

e, kJ/m^3 – specifični deformacioni rad,

ΔV, m^3 – promena zapremine čestice prilikom deformacije,

σ, kJ/m^2 – rad utrošen na stvaranje jedinice nove površine,

Δf, m^2 – povećanje površine čestice, $\Delta f = S'' - S'$.

Prilikom mlevenja čestica veće dimenzije zrna (krupnoće), prvi član izraza (6.1), koji predstavlja rad koji se troši na promenu zapremine je višestruko veći od drugog člana izraza koji predstavlja rad utrošen na stvaranje nove površine. U slučajevima mlevenja sitnijih čestica situacija je obrnuta.

Prema hipotezi Charlesa [27], potrebna energija da se ostvari mala promena u dimenziji zrna dx (u μm), proporcionalna je samoj promeni dimenzije zrna a obrnuto porporcionalna dimenziji zrna na stepen n, tj.

$$dE = -C \cdot \frac{dx}{x^n} \text{, kJ,} \tag{6.2}$$

gde je C bezdimenziona konstanta proporcionalnosti.

Veći broj istraživača, predlagalo je različite hipoteze i formule koje bi dale zavisnost između promene u dimenziji zrna i urošene energije za ostvarivanje ovih promena. Te hipoteze se nazivaju i „zakoni“ usitnjavanja. Charles je pokazao, da se integracijom izraza (6.2), za različite vrednosti stepena n mogu dobiti osnovni zakoni usitnjavanja.

6.1. Osnovni zakoni usitnjavanja

Zakon Rittinger-a

Prvi tzv. zakon usitnjavanja, definisao je Rittinger 1867. godine. Prema ovom zakonu, specifična potrošnja energije na usitnjavanje, je proporcionalna novonastaloj specifičnoj površini materije koja se usitnjava:

$$E_R = K_R \cdot (s - s_0), \ \text{kWh/t}, \tag{6.3}$$

gde su

K_R, kWh/m^2 – konstanta koja predstavlja enegiju potrebnu za stvaranje 1 m^2 nove površine,

s, m^2/t – specifična površina materije nakon usitnjavanja,

s_0, m^2/t – specifična površina materije pre usitnjavanja.

Ako se pretpostavi da zrna materije koja se usitnjava imaju oblik kocke dužine ivice *d* [26, 27], specifična površina materije se može prikazati sledećim izrazima:

$$s_0 = \frac{6}{\rho \cdot D_s}, \ \text{m}^2/\text{t}, \tag{6.4}$$

$$s = \frac{6}{\rho \cdot d_s}, \ \text{m}^2/\text{t}, \tag{6.5}$$

gde su

ρ, t/m^3 – gustina materije,

D_s, m – dimenzija zrna materije pre usitnjavanja,

d_s, m – dimenzija zrna materije posle usitnjavanja.

Zamenjujući izraze (6.4) i (6.5) u izraz (6.3) dobija se Rittingerov zakon usitnjavanja

$$E_R = K_R \cdot \frac{6}{\rho} \cdot \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{D_s} \right), \ \text{kWh/t}, \tag{6.6}$$

odnosno

$$E_R = C_R \cdot \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{D_s} \right), \text{ kWh/t}. \tag{6.7}$$

Do izraza (6.7) se može doći, kako je gore navedeno korišćenjem hipoteze Charlesa. Integraleći izraz (6.2) dobija se

$$\int_0^E dE = -C \cdot \int_{D_s}^{d_s} \frac{dx}{x^n}, \tag{6.8}$$

$$E = -C \cdot \int_{D_s}^{d_s} \frac{dx}{x^n}. \tag{6.9}$$

Uvršćavajući u izraz (6.9) vrednost $n = 2$, dobija se direktno zakon Rittingera

$$E = -C \cdot \int_{D_s}^{d_s} \frac{dx}{x^2} = C \cdot \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{D_s} \right). \tag{6.10}$$

Zakon Kick-a

Kick je 1885. uveo drugu hipotezu, prema kojoj je specifična potrošnja energije potrebna za usitnjavanje funkcija promene zapremine pojedinih čestica, i data je izrazom

$$E_K = C_K \cdot \log \frac{D_s}{d_s}, \text{ kWh/t}, \tag{6.11}$$

gde je

C_K, kWh/t – konstanta proporcionalnosti, koja zavisi od mehaničkih karakteristika materije.

Uvršćujući vrednost $n = 1$ u izraz (6.2) dobija se zakon Kick-a.

Zakon Bond-a

Bond je 1952. godine formulisao treću teoriju usitnjavanja [28]. Prema ovoj hipotezi, čestice je potrebno da se prvo sabiju, a zatim se pojavljuju pukotine. Energija potrebna

za ovaj stadijum usitnjavanja je proporcionalna promeni zapremine. Daljim usitnjavanjem, dolazi do nastavka delovanja sila iz zapremine na delovanje sile na razdeonim površinama, tj. u ovom stadijumu energija usitnjavanja je proporcionalna promeni površine. Prema Bond-ovoj hipotezi, potrebna energija pri drobljenju u stvarnosti je veća od one koju daje zakon Rittinger-a. Umesto da zavisi od površine, Bond smatra da je ona proporcionalna vrednosti prečnika zrna na stepen 2,5 ($d^{2,5}$) [29]. Matematički napisano, zakon Bond-a ima oblik:

$$W = C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right), \ \mathrm{kWh/sht}, \tag{6.12}$$

gde su

C_B, kWh/sht – konstanta proporcionalnosti,

P, μm – veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80 % materije posle usitnjavanja,

F, μm – veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80 % materije pre usitnjavanja.

U svom radu [28] Bond je za konstantu C_B usvojio tzv. radni indeks W_i. Radni indeks predstavlja onu energiju da se jedna kratka tona ($1\ \mathrm{sht} = 907{,}18\ \mathrm{kg}$) materije beskonačno velike dimenzije zrna ($F = \infty$) usitni do domezije zrna pri kojoj 80 % materije prolazi kroz sito sa kvadratnim okcima veličine stranice 100 μm ($P = 100\ \mu\mathrm{m}$). Zamenom ovih uslova u izraz (6.12), dobija se

$$W = C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right), \ \mathrm{kWh/sht}. \tag{6.13}$$

Sređivanjem se dobija da je konstanta proporcionalnosti

$$C_B = 10 \cdot W_i. \tag{6.14}$$

Zamenom u polazni izraz i prebacivanjem jedinica u SI sistem dolazi se do konačnog oblika zakona Bond-a

$$W = 1{,}102 \cdot W_i \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) = W_i' \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right), \ \mathrm{kWh/t}, \tag{6.15}$$

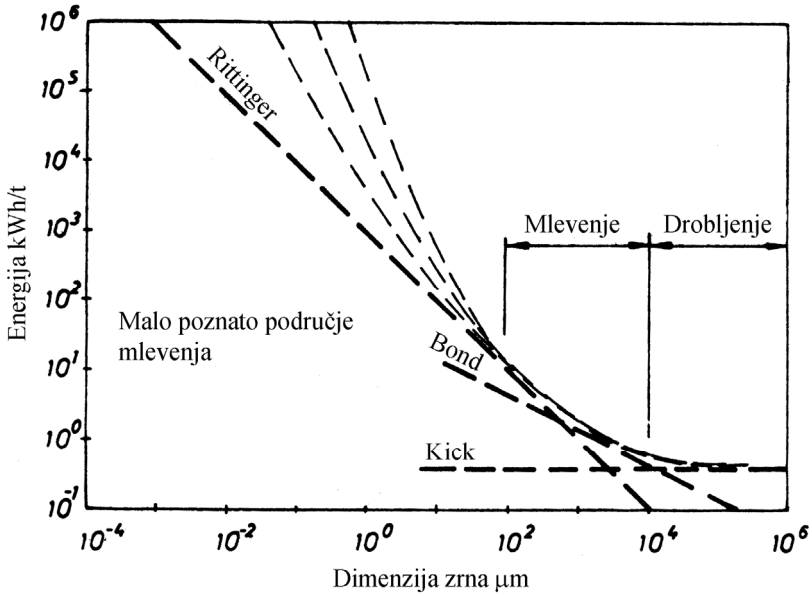
gde je

W_i', kWh/t – radni indeks izražen po toni.

Na isti način kao i kod prethodna dva zakona, korišćenjem izraza (6.2), pri čemu eksponent n ima vrednost $n = 1,5$ dobija se zakon Bond-a

$$E = -C \cdot \int_F^P \frac{dx}{x^{3/2}} = 2 \cdot C \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) = C_B \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) = W_i \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right). \tag{6.16}$$

Razni autori su pokušavali da potvrde ili opovrgnu navedene zakone. Istraživanja pokazuju [27, 30] da zakon Kick-a daje dobre rezultate za procese drobljenja, Bond-a za mlevenje a zakon Rittinger-a za vrlo fino mlevenje (slika 6.1).



Slika 6.1. Zavisnost potrebne energije od dimenzije zrna (krupnoće) pri usitnjavanju [27]

7. Meljivost ugljeva i Hardgrove indeks meljivosti (HGI)

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 utiču 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 sprašenom stanju u ložištima kotlovskih postrojenja.

U literaturi se razmatraju uticaji brojnih faktora na karakteristike meljivosti ugljeva. Uobičajeno je da se eksperimentalni podaci o vrednosti HGI u regresionoj analizi razmatraju u funkciji udela vlage, pepela, ispraljivih materija i fiksnog ugljenika u uglju. Naravno, postoje i drugačiji pristupi. Na primer, pojedini autori HGI analiziraju u funkciji petrološkog sastava uglja i na taj način definišu određene regresione zavisnosti koje omogućavaju predviđanje ponašanja ugljeva pri mlevenju.

U svakom slučaju, jasno je da na vrednost HGI ugljeva utiče veliki broj njegovih svojstava kao i sama procedura pripreme uzorka i njegovog eksperimentalnog određivanja. Zbog toga je za poređenje rezultata indeksa meljivosti određenog po metodi Hardgrove za različite ugljeve i lokalitete potrebno uzeti u obzir čitav niz drugih parametara u razmatranje, kao što su tehnička i elementarna analiza uglja, petrološki sastav uglja, udeo vlage itd. Sa druge strane, značaj HGI za rad mlinova u sastavu kotlovskih postrojenja termoelektrana koje kao gorivo koriste ugljeni prah je veliki pa je poznavanje vrednosti HGI neophodno.

Kako su sva ložišta kotlova domaće elektroprivrede predviđena za sagorevanje ugljeva u sprašenom stanju, kao veoma važan element istraživanja nameće se i analiza meljivosti. Razvojem tehnologije sagorevanja ugljenog praha uočena je neophodnost da

se definiše objektivni pokazatelj meljivosti uglja. Dosadašnja praksa je pokazala da ovaj zahtev ispunjava koeficijent meljivosti.

Meljivost uglja se definiše vrednošću HGI koji predstavlja veličinu koja pokazuje kako se jedan ugalj melje u poređenju sa ugljem uzetim kao etalon. Generalno gledano, što je vrednost HGI veća to se ugalj lakše melje. Sa druge strane, manje vrednosti HGI ukazuju da se ugalj teže melje, potrošnja energije za mlevenje je povećana a kapacitet mlevenja smanjen. Hardgrove-ov indeks meljivosti je samo jedna od karakteristika uglja koja utiče na kapacitet mlina koji je dat sledećim izrazom [26]:

$$B_{\max} = k_1 k_2 \frac{n_1^2 D_1^3 b \left(0,0034 \cdot HGI^{1,25} + 0,61\right)}{1000 \left(\frac{R_{5000}}{20}\right)^m \left(\ln \frac{100}{R_{90}}\right)^{0,5}} k_3 k_4 \tag{7.1}$$

gde su:

$B_{\max}$, kg/s – maksimalni kapacitet mlevenja ventilatorskog mlina,

k_1, – – koeficijent procesa mlevenja (zavisi od vrste, sastava i strukture uglja, količine mineralnih materija i drugih faktora, a kreće se u granicama $k_1 = 4,5 - 5,5$),

k_2, – – stepen pohabanosti udarnih tela (obično se usvaja $k_2 = 0,8 - 0,9$),

n_1, s^{-1} – broj obrtaja udarnog kola,

D_1, m – spoljašnji prečnik udarnog kola,

b, m – širina udarne ploče,

HGI, – – vrednosti indeksa meljivosti određen po metodi Hardgrove;

R_{5000}, % – ostatak na situ od 5000 μm za ugalj na ulazu u mlin,

m, – – eksponent vrste uglja (usvaja se da je za mrke ugljeve $m = 0,06$ a za lignite $m = 0,114$),

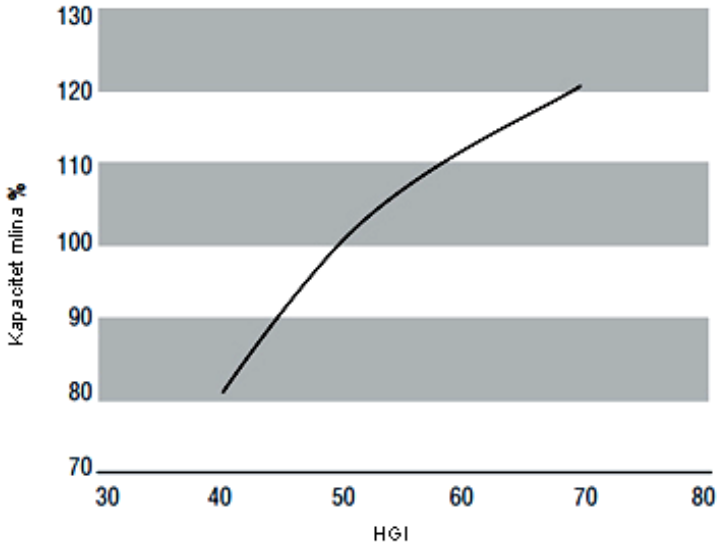
R_{90}, % – ostatak na situ od 90 μm za ugljeni prah na izlazu iz mlina,

k_3, – – koeficijent vlažnosti uglja koji zavisi od sadržaja vlage u radnom gorivu i sadržaja higroskopske vlage,

k_4, – – koeficijent vlažnosti ugljenog praha na izlazu iz mlina koji zavisi od sadržaja vlage u uglju na ulazu u mlin i sadržaja vlage u ugljenom prahu na izlazu iz mlina.

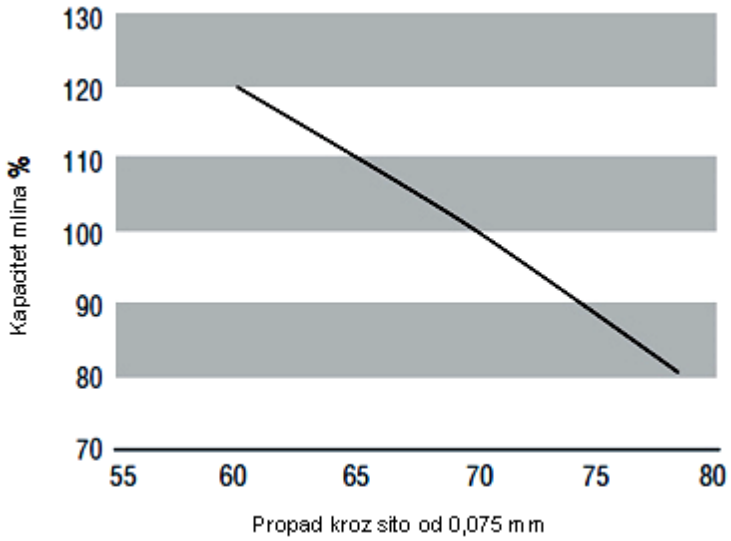
7.1. Karakteristike HGI

Hardgrove indeks meljivosti ima nekoliko bitnih karakteristika. Osnovna karakteristika je ta da je HGI eksperimentalni podatak koji karakteriše ponašanje uglja pri mlevenju. Druga karakteristika jeste da vrednosti HGI ne pokazuju linearnu zavisnost u odnosu na lakoću mlevenja. Na primer, promena u lakoći mlevenja je veća za promenu HGI od 40 do 50 nego za promenu od 60 do 70. Kapacitet mlina opada pri mlevenju uglja sa nižim vrednostima HGI (slika 7.1).



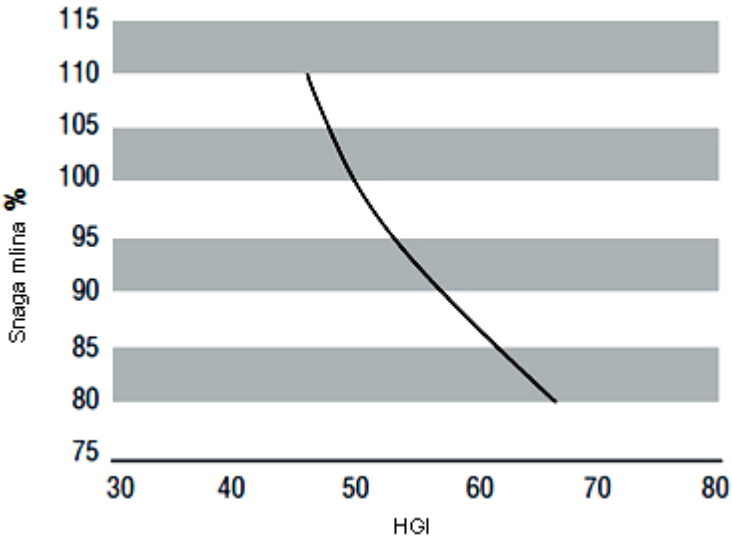
Slika 7.1. Kapacitet mlina u zavisnosti od vrednosti HGI [31]

Pri stalnoj vrednosti HGI, finoća mlevenja se menja sa kapacitetom. Kada je kapacitet mlina ispod nominalnog, mlin na izlazu daje ugljeni prah sa većim vrednostima propada kroz sito veličine otvora 75 μm. Obrnuto, kada mlin radi sa kapacitetom koji je iznad nominalnog, na izlazu iz mlina se dobija ugljeni prah sa manjim vrednostima propada kroz sito veličine otvora 75 μm (slika 7.2).



Slika 7.2. Kapacitet mlina u zavisnosti od finoće mlevenja pri stalnoj vrednosti HGI [31]

Pored toga, kada je vrednost HGI uglja manja, potrebno je više energije utrošiti na mlevenje da bi se dobio ugljeni prah iste finoće nego kada se melje ugalj sa većim vrednostima HGI (slika 7.3).



Slika 7.3. Snaga mlina u zavisnosti od vrednosti HGI pri zahtevanoj finoći mlevenja [31]

Treća karakteristika HGI se odnosi na mešavinu ugljeva. Naime, prilikom mešanja više ugljeva, vrednost HGI mešavine ne mora uvek da bude u skladu sa izrazom:

$$HGI = \sum_{i=1}^{n} \tilde{x}_i \cdot HGI_i \ , \qquad (7.2)$$

gde su

$\tilde{x}_i$, kg/kg – maseni udeo i-te komponente uglja u mešavini,

HGI_i – vrednost HGI i-te komponente uglja u mešavini.

Izraz (7.2) važi ukoliko se pravi mešavina ugljeva sličnih vrednosti HGI. Za mešavine ugljeva čije se vrednosti HGI znatno razlikuju, HGI se ne podvrgava izrazu (7.2).

Četvrta karakteristika HGI se ogleda u tome, da poznajući vrednosti HGI, udeo isparljivih materija u uglju ili reaktivnost uglja, moguće je predvideti ponašanje sistema u kome se koristi taj ugalj (npr. piroliza, sagorevanje itd).

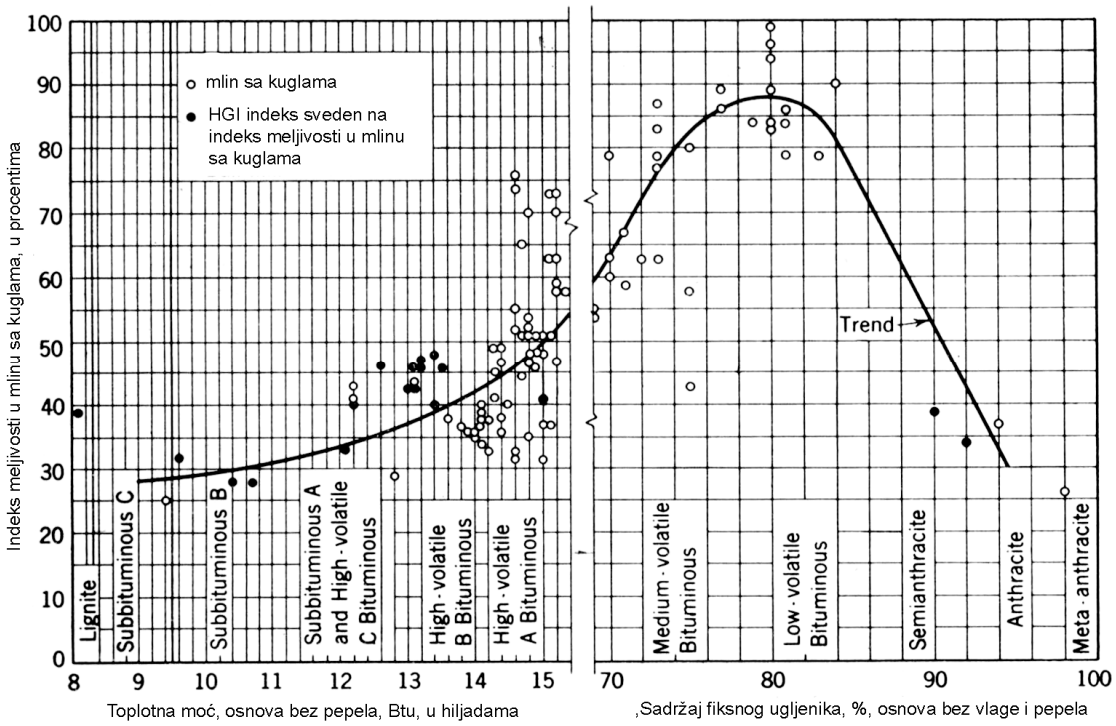
Iako je Hardgrove postupak određivanja meljivosti ugljeva jednostavan i pouzdan, on ima i svojih nedostataka:

- osnovni nedostatak Hardgrove postupka se odnosi na to da se vrednost HGI dobija iz šaržnog postupka. Kao što je poznato, proces mlevenja u mlinovima u termoelektranama je kontinualan proces,
- u postupku, uzorak uglja se suši na vazduhu do postizanja ravnotežnog udela vlage i kao takav se priprema i koristi u Hardgrove mlinu. U termoelektranama, ugalj ulazi vlažan u mlin gde se suši i melje,
- ispitivanje uglja se vrši sa određenom frakcijom (1,18 – 0,6 mm) što ne odgovara stvarnom stanju u mlinu.

Usled svih ovih ograničenja, standardni test nije toliko precizan. Ponovljivost eksperimenta u istoj laboratoriji je 2 jedinice, dok je ponovljivost između dve laboratorije 4 jedinice.

Na meljivost ugljeva utiče više faktora. Počev od ranga uglja pa sve do elemenata tehničke analize uglja (sadržaja vlage, pepela i isparljivih materija).

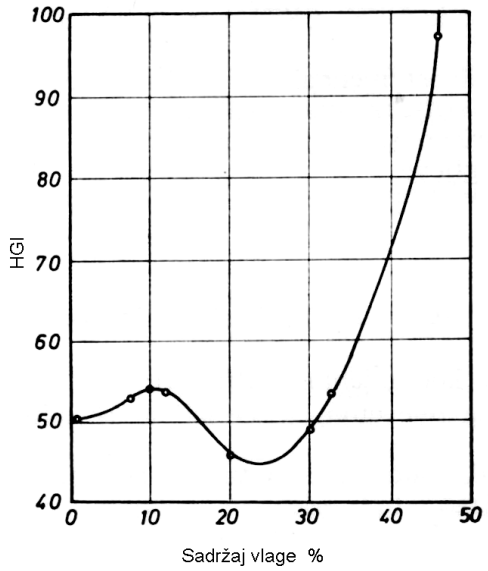
Ugljevi koji se lakše melju pripadaju grupi ugljeva sa niskim i srednjim sadržajem isparljivih materija. Oni imaju bolje karakteristike meljivosti od kako od ugljeva sa visokim sadržajem isparljivih materija tako i od antracita (slika 7.4).



Slika 7.4. Uticaj ranga uglja na njegovu meljivost [32]

Uticaj vlage na meljivost ugljeva je posebno razmatrana kod ugljeva nižeg ranga, u kojima predstavlja poseban problem. Ispitivanjima lignita iz države Dakota došlo se do podataka da pri sadržaju vlage od 10 % vrednost HGI je iznosio 55, dok pri sadržaju od 26 % njegova vrednost pada na 43 a zatim opet raste na vrednost 55 pri sadržaju vlage od 38 % [33]. Slične varijacije su pronađene i kod drugih lignita i pripisane su koheziji između čestica uglja pri visokim sadržajima vlage odnosno slabljenju strukture uglja pri nižim.

Ligniti su u vlažnom stanju po svojoj prirodi žilavi, mekani i masni. Snižavanjem sadržaja vlage ligniti postaju krhkiji. Iz ovih razloga, vrednosti HGI imaju različite vrednosti ukoliko se određuju pri različitim sadržajima vlage (slika 7.5).



Slika 7.5. Uticaj vlage na vrednosti HGI [29]

Pri najvećem sadržaju vlage, voda obrazuje klizne površine između čestica uglja i doprinosi da indeks meljivosti ima najviše vrednosti. Smanjivanjem sadržaja vlage u uglju, vrednost HGI opada do minimalne vrednosti, koja odgovara stanju uglja osušenom na vazduhu. Daljim smanjivanjem sadržaja vlage, vrednost HGI ponovo raste usled nastajanja šupljina u uglju do neke maksimalne vrednosti. Posle ovog maksimuma vrednost HGI se neznatno povećava ili se opet smanjuje do pojave novih šupljina u uglju.

8. Metode određivanja koeficijenta meljivosti uglja

Koeficijent meljivosti uglja predstavlja veličinu koja pokazuje kako se jedan ugalj melje tj. koliki je njegov specifični otpor mlevenju. Za određivanje ovog koeficijenta razvijeno je više laboratorijskih metoda. Prema tome, koeficijent meljivosti predstavlja podatak o ponašanju uglja koji se ispituje a koji je dobijen pod definisanim i kontrolisanim laboratorijskim uslovima.

Najpoznatije metode za određivanje meljivosti su metoda Hargrove-a i ruska VTI (Savezni termotehnički institut). Pored ovih metoda, postoje i metode VUK, CKTI (Centralni kotlovsko-turbinski institut) i metoda ASTM – mlin dobošar sa 100 čeličnih kugli.

Navedene metode su po principu slične podrazumevaju ili odnos finoće mlevenja pri konstantnom radu ili odnos utroška energije pri mlevenju etalonskog uglja i ispitivanog uglja. U oba slučaja se polazi od iste krupnoće zrna, a u drugom slučaju i do jednake finoće samlevenog uglja.

Postojeće metode za određivanja koeficijenta meljivosti se mogu podeliti prema osnovama na kojima se zasnivaju. U primeni su tri načina određivanja koeficijenta meljivosti:

1. koeficijent se određuje pomoću finoće samlevenog uglja pri čemu je konstantan rad mlevenja,
2. finoća samlevenog uglja treba da je konstantna, a koeficijent meljivosti se određuje potrebnim radom za postizanje te finoće,
3. treći način polazi od zahteva da se samlevena frakcija određene finoće uklanja i zamenjuje istom količinom uglja početne granulacije.

Hardgrove, VTI i VUK metoda zasnivaju se na prvoj osnovi, metoda ASTM na drugoj a metoda CKTI na trećoj osnovi.

8.1. Metoda Hardgrove-a

Princip Hardgrove-ove metode (ISO 5074 [34], ASTM D409 [35]) se zasniva u obradi pripremljenog uzorka uglja definisane frakcije pod određenim uslovima u laboratorijskom mlinu. Vrednost indeksa meljivosti se određuje na bazi analiza prosejavanja samlevenog uglja.

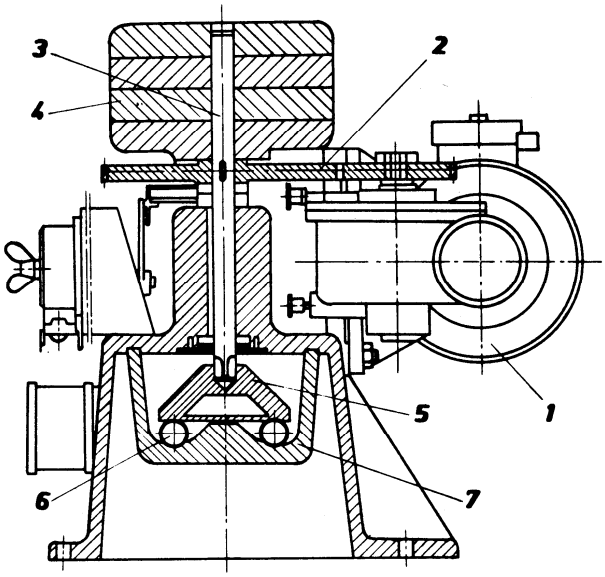
Ispitivanje se vrši u laboratorijskom mlinu sa osam kugli (slika 8.1) prečnika 25,4 mm smeštenih u nepokretnoj posudi za mlevenje. Kugle pokreće radno kolo koje rotira brzinom 19 – 21 min^{-1} i koje je spojeno za vratilo koje dobija pogon od elektromotora preko reduktora. Radno kolo je opterećeno tegovima mase 25,9 kg. Ukupna masa koja deluje na kugle (tegovi, osovina i zupčanik i radno kolo) iznosi 29 kg.

Pre ispitivanja u mlinu, uzorak uglja se suši na vazduhu do sadržaja ravnotežne vlage a zatim se priprema na granulaciju od 0,6 – 1,18 mm. Uzorak mase 50±0,01 g, granulacije 0,6 – 1,18 mm, se zatim ravnomerno rasporedi po nepokretnoj posudi za mlevenje a posuda pričvrsti za kućište mlina. Uzorak se melje u mlinu u trajanju od 3 minute pri broju obrtaja od 20 min^{-1}. Nakon zaustavljanja mlina, samleveni uzorak se prosejava na situ veličine otvora 75 μm. Posle prosejavanja, izmeri se propad i ostatak na situ otvora 75 μm pri čemu se vrednost HGI dobija korišćenjem sledećeg izraza

$$HGI = 13 + 6,96 \cdot \left(50 - m_1\right), \tag{8.1}$$

gde je m_1, g, masa dela uzorka za ispitivanje koja je ostala na situ (ostatak) veličine otvora 75 μm.

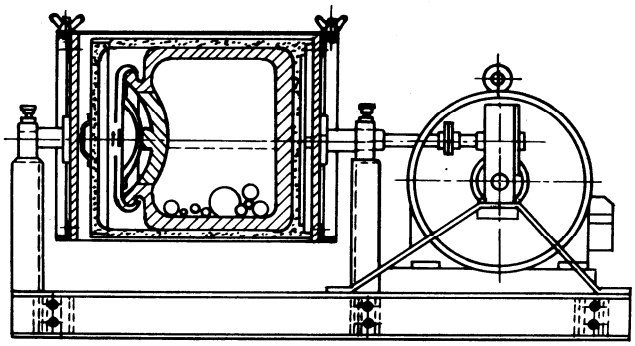
Hardgrove-ov indeks meljivosti se izražava kao broj zaokružen na jednu decimalu.



Slika 8.1. Laboratorijski mlin za određivanje Hardgrove indeksa meljivosti [29, 34]
1 – elektromotor sa reduktorom, 2 – zupčasti prenos, 3 – vratilo, 4 – tegovi, 5 –radno kolo, 6 – kugle, 7 – posuda za mlevenje

8.2. Metoda VTI

Kod metode VTI (GOST 15489.1-93 [36]), za određivanje koeficijenta meljivosti koristi se dobošasti mlin sa kuglama (slika 8.2). Unutrašnji prečnik doboša mlina je 270 mm a dužina 210 mm. Unutrašnjost doboša mlina je ispunjena porculanskim kuglama, prečnika 30 – 36 mm ukupne mase 6 kg i kuglama prečnika 15 – 20 mm ukupne mase 2 kg.



Slika 8.2. Laboratorijski mlin po metodi VTI [29]

Broj obrtaja doboša mlina iznosi 41,6 min^{-1}, a mlevenje uglja traje 15 minuta (624 obrtaja) Ovim se obezbeđuje jednakost utrošenih radova za mlevenje ispitivanog i etalonskog uglja. Uzorak uglja je mase 500 g sortimana 1250 – 3200 μm. Samleveni ugalj se zatim prosejava na situ sa otvorom 90 μm. Koeficijent meljivosti se određuje korišćenjem izraza

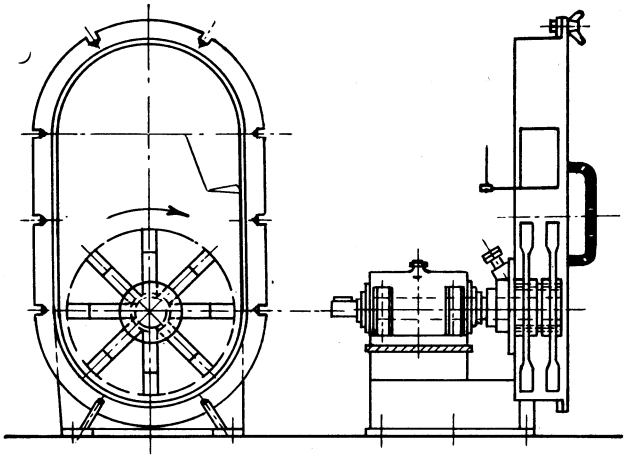
$$K_{VTI} = 2 \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{\frac{2}{3}}, -, \tag{8.2}$$

gde je R_{90}, %, ostatak na situ od 90 μm.

Kao etalon uglja je korišćen donjecki antracit čiji je koeficijent meljivosti $K_{VTI} = 1$, čemu odgovara ostatak na situ $R_{90} = 70\ \%$.

8.3. Metoda VUK

Po ovoj metodi, koeficijent meljivosti se određuje u laboratorijskim mlinu čekićaru (slika 8.3). Broj obrtaja vratila rotora, prečnika 300 mm, iznosi 1500 min^{-1}. Masa ispitivanog uzorka, granulacije od 90 – 1500 μm, iznosi 200 g a vreme mlevenja je 2 min. Uzorak se ubacuje u mlin tek kada rotor dostigne broj obrtaja od 1500 min^{-1}. Samleveni ugalj se zatim prosejava na seriji sita otvora 600, 200 i 90 μm. Merilo meljivosti predstavlja ostatak na situ otvora 90 μm.



Slika 8.3. Laboratorijski mlin po metodi VUK [29]

Meljivost uglja prema ovoj metodi je data izrazom Bonda. Prema Bond-u, rad potreban za mlevenje iznosi

$$E = k \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{d_s}{D}}\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{d_s}}, \ \frac{\text{kWh}}{\text{t}}, \tag{8.3}$$

gde su

d_s, mm – srednji prečnik zrna samlevenog uzorka,

D, mm – srednji prečnik zrna pripremljenog uzorka.

Srednji prečnik zrna pripremljenog uzorka za metodu VUK iznosi $D = 1$ mm. Pri konstantom radu E i početnoj veličini zrna $D = 1$ mm, koeficijent meljivosti iznosi

$$K_{VUK} = \sqrt{\frac{1}{d_s}} - 1, -. \tag{8.4}$$

8.4. Metod Centralnog kotlo-turbinskog instituta (CKTI)

Za određivanje koeficijenta meljivosti po ovoj metodi, uzima se uzorak od 230 cm^3 uglja sortimana 90 – 950 μm. Uzorak se melje u porculanskom dobošastom mlinu sa kuglama zapremine 1,66 dm^3. Kugle su prečnika 25,4 mm a broj kugli u mlinu je 44. Broj obrtaja mlina iznosi 47 min^{-1}.

Prvi ciklus mlevenja traje 3 – 5 minuta. Posle ovog vremena uzorak se prosejava na situ od 90 μm. Ostatak na situ se meri a zatim dopunjava do početne zapremine iz pripremljene frakcije. U skladu sa podacima iz prvog ciklusa mlevenja, izračunava se vreme koje je potrebno da se dobije propad od 10 % kroz sito od 90 μm. Drugi ciklus mlevenja se vrši u tom vremenu. Posle mlevenja, propad se odbacuje i zamenjuje odgovarajućom masom pripremljene početne frakcije. Ukupno se vrši osam ciklusa mlevenja, svaki put u vremenu koje je potrebno da se dobije propad od 10 % kroz sito od 90 μm. U većini slučajeva, količina propada se menja u toku prva tri ili četiri ciklusa da bi kasnije postala stalna. Vrednost koeficijenta meljivosti dobijenog u prva tri ciklusa se odbacuju zbog nestacionarnosti. Vreme jednog ciklusa iznosi 5 – 10 minuta za lakše i 20 – 30 minuta za teže meljive ugljeve.

Koeficijent meljivosti se dobija kao odnos kapaciteta laboratorijskog mlina sa ispitivanim ugljem u jednom ciklusu B_c, g/s i kapaciteta mlina sa etalon ugljem (0,013 g/s), tj.

$$K_{CKTI} = \frac{B_c}{0,013}, -. \tag{8.5}$$

Prema [29], za jedinicu otpornosti mlevenju u metodi CKTI usvojena je vrednost 1,29, dobijena pri mlevenju antracita srednje meljivosti. Otpornost mlevenju se izražava kroz suprotnu veličinu, tj. meljivost, što je pogodnija veličina, jer su vrednosti koeficijenta meljivosti u većini slučajeva veće od jedinice. Uprošćena formula za izračunavanje indeksa meljivosti po ovoj metodi glasi [29]:

$$K_{CKTI} = 0,775 \cdot \frac{g}{t}, -, \tag{8.6}$$

gde su

g, g – propad kroz sito veličine otvora 90 μm;

t, min – vreme mlevenja.

8.5. Laboratorijski mlin sa kuglama (mlin dobošar sa 100 čeličnih kugli)

Opis metode se daje kao istorijski pregled metoda za određivanje koeficijenta meljivosti, pošto je ovaj standard (ASTM D408-37T) povučen iz upotrebe.

Mlin je čelični valjak prečnika 206,3 mm i dužine 203,2 mm. Snabdeven je sa tri podižuće poluge svaka prečnika 11,1 mm. Ove poluge su postavljene po dužini prema unutrašnjem zidu mlina na rastojanju od 120°. Punjenje mlina se sastoji od 100 čeličnih kugli prečnika 25,4 mm. Količina uglja kod jednog punjenja iznosi 500 g, granulacije 0,75 – 1,68 mm. Za vreme ispitivanja mlin se obrće brzinom od 40 min^{-1} [29].

Uzorak se melje u ciklusima pri čemu je u svakom ciklusu broj obrtaja mlina takav da se samelje 10 % od ukupnog uzorka da prođe kroz sito otvora 75 μm. Posle svakog ciklusa uzorak se prosejava na situ otvora 75 μm, pri čemu se odsev vraća nazad na mlevenje.

Indeks meljivosti se određuje prema ukupnom broju obrtaja mlina potrebnog da samelje izmereni uzorak uglja do standardne krupnoće (80 % prolaza kroz sito veličine otvora 75 μm). Indeks meljivosti uglja je definisan izrazom

$$K = \frac{50000}{\text{broj obrtaja}}. \tag{8.7}$$

Vreme koje je potrebno da se obavi kompletan test iznosi oko 9 h.

U Srbiji je uobičajeno da se za određivanje koeficijenta meljivosti koristi postupak Hardgrove-a.

8.6. Postupak određivanja radnog indeksa u mlinu sa kuglama – standardni Bondov test

Bondov mlin sa kuglama ima glatku unutrašnju površinu doboša dimenzija 305×305 mm. Brzina rotiranja doboša iznosi 70 min^{-1}. Punjenje mlina čine 285 gvozdenih kugli ukupne mase 20,125 kg i to:

- 43 kugle prečnika 29,72 mm;
- 10 kugli prečnika 25,4 mm;
- 71 kugla prečnika 19,05 mm i
- 94 kugle prečnika 15,49 mm.

U mlinu se vrši suvo mlevenje, pri čemu se simulira zatvoreni ciklus do uspostavljanja cirkulativne šarže od 250 %, što se postiže posle 7 do 10 ciklusa mlevenja. Cirkulativna šarža predstavlja odnos između količine materije koja se vraća u mlin i sveže materije na ulazu u mlin. U daljem tekstu je taksativno naveden postupak izvođenja testa [37].

1. Uzorak sirovine se usitnjava do krupnoće 100 % ispod dimenzije sita 3,327 mm. Za jedan test je potrebno 10 kg uzorka.
2. Određuje se granulometrijski sastav uzorka i prikazuje se grafički. Sa grafika se određuje veličina otvora sita F kroz koje prolazi 80 % uzorka. Takođe, određuje se i sadržaj Y klase – P_k + 0 mm u uzorku, gde je P_k veličina otvora komparativnog sita.

3. Uzima se uzorak zapremine 700 cm^3 i izmeri se njegova masa M.
4. Uzorak mase M se ubacuje u mlin i melje se pri proizvoljno odabranom broju obrtaja N_1 (obično 50 ili 100 obrtaja).
5. Nakon mlevenja, uzorak se vadi iz mlina i prosejava se na komparativnom situ otvora P_k.
6. Izmeri se masa Z_1 proseva komparativnog sita.
7. Izračuna se masa proseva C, u gramima, komparativnog sita kod ustaljenog ciklusa sa cirkulativnom šaržom od 250 % po sledećem izrazu

$$C = \frac{M}{3,5} \ . \tag{8.8}$$

8. Izračuna se masa G_1 novoostvarenog proseva komparativnog sita po jednom obrtaju mlina iz izraza

$$G_1 = \frac{Z_1 - M \cdot Y}{N_1}, \ \frac{\text{g}}{\text{obr}} . \tag{8.9}$$

9. Izračuna se broj obrtaja mlina N_2 za drugi ciklus mlevenja

$$N_2 = \frac{C - Z_1 \cdot Y}{G_1}, \ \text{obr} . \tag{8.10}$$

10. Odsevu kompartivnog sita iz prvog ciklusa doda se sveži uzorak mase koja je jednaka masi proseva komparativnog sita iz prvog ciklusa Z_1, tako da ukupna masa uzorka ponovo iznosi M. Ovako formiran uzorak ubacuje se u mlin i melje za vreme od N_2 obrtaja.
11. Posle mlevenja, uzorak se vadi iz mlina i ponovo prosejava na komparativnom situ otvora P_k.
12. Izmeri se masa Z_2 proseva komparativnog sita iz drugog ciklusa.
13. Izračuna se masa novoostvarenog proseva komparativnog sita po jednom obrtaju mlina u drugom ciklusu

$$G_2 = \frac{Z_2 - Z_1 \cdot Y}{N_2}, \ \frac{\text{g}}{\text{obr}} . \tag{8.11}$$

14. Izračuna se broj obrtaja mlina N_3 za naredni ciklus mlevenja

$$N_3 = \frac{C - Z_2 \cdot Y}{G_2}, \ \text{obr} . \tag{8.12}$$

15. Nadalje se postupak ponavlja od tačke 10 do 14, sve dok masa novoostvarenog proseva komparativnog sita po jednom obrtaju mlina G ne bude konstantna u

zadnja tri ciklusa, što je dokaz da je ostvarena cirkulativna šarža od 250 %. Tada je masa proseva komparativnog sita Z jednaka ili bliska željenoj vrednosti C. U svakom sledećem ciklusu važi

$$G_i = \frac{Z_i - Z_{i-1} \cdot Y}{N_i}, \ \frac{\text{g}}{\text{obr}}, \tag{8.13}$$

$$N_i = \frac{C - Z_{i-1} \cdot Y}{G_{i-1}}, \ \text{obr}. \tag{8.14}$$

16. Određuje se granulometrijski sastav proseva komparativnog sita iz poslednjeg ciklusa i prikazuje grafički. Sa grafika se određuje veličina otvora sita P kroz koje prolazi 80 % proseva.
17. Izračunava se Bondov radni indeks W_i u laboratorijskom mlinu sa kuglama po formuli

$$W_i = 1{,}1 \cdot \frac{44{,}5}{P_k^{0,23} \cdot G^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)}, \ \frac{\text{kWh}}{\text{t}}, \tag{8.15}$$

gde su

P_k, μm – dimenzija otvora komparativnog sita,

G, g – masa novoostvarenog proseva komparativnog sita po jednom obrtaju mlina, prosek iz tri zadnja ciklusa mlevenja,

F, μm – dimenzija kvadratnog otvora sita kroz koje prolazi 80 % polaznog uzorka,

P, μm – dimenzija kvadratnog otvora sita kroz koje prolazi 80 % proseva komparativnog sita iz poslednjeg ciklusa.

U zavisnosti od vrednosti Bondovog radnog indeksa materije se mogu podeliti prema meljivosti u četiri grupe:

1. lako meljivi (meki) – $W_i = 7 \div 9$ kWh/t,
2. srednje meljivi (srednje tvrdoće) – $W_i = 9 \div 14$ kWh/t,
3. teško meljivi (tvdi) – $W_i = 14 \div 20$ kWh/t,
4. jako teško meljivi (veoma tvrdi) – $W_i > 20$ kWh/t.

Po definiciji Bond-a, radni indeks W_i predstavlja potrebnu energiju da se unapred definisana masa sirovine beskonačno velike krupnoće ($F = \infty$) usitni do krupnoće pri kojoj 80 % sirovine prolazi kroz sito sa kvadratnim otvorima veličine 100 μm ($P = 100\,\mu\text{m}$). Što je Bondov radni indeks manji, meljivost sirovine je veća i obrnuto. Bond je 1952. godine formulisao "treću teoriju usitnjavanja". Više o ovoj teoriji može se videti u radovima samog Bond-a [28, 38].

Istraživanjima na različitim sirovinama (bakar, andezit, boksit, dolomit) pokazano je da se proces mlevenja u laboratorijskom mlinu sa kuglama odvija po zakonu kinetike prvog reda. Autor u [37, 39] daje dva različita skraćena postupka određivanja Bondovog radnog indeksa koji se razlikuju po broju potrebnih ciklusa mlevenja (dva i tri) za određivanje W_i i po tačnosti koje oni daju. Suština navedenih postupaka se svodi na korišćenje konstante brzine mlevenja k iz prethodnog ciklusa za izračunavanje broja obrtaja mlina u narednom ciklusu, koji obezbeđuje cirkulativnu šaržu od 250 %. Takođe, autor daje i teorijsku zasnovanost postupaka. U svojim istraživanjima, autor je dobio srednje kvadratne relativne razlike između Bondovog postupka i skraćenih testova sa dva i tri ciklusa 4,9 % i 2,75 %, respektivno.

Kapacitet mlina (Q, t/h) se određuje masom izmlevene sirovine u jednici vremena, od krupnoće (F, μm) do krupnoće (P, μm). Po postupku F. C. Bond-a, kapacitet mlina se izračunava iz izraza

$$Q = \frac{N_k}{W},\ \frac{\text{t}}{\text{h}}, \tag{8.16}$$

gde su

N_k, kW – korisna snaga mlina [38],

W, kWh/t – specifična potrošnja energije.

Prema Bondu, specifična potrošnja energije u mlinovim sa šipkama i kuglama određuje se iz izraza

$$W = \left(k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_n\right) \cdot W_i \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right),\ \frac{\text{kWh}}{\text{t}}, \tag{8.17}$$

gde su $k_1, \ldots, k_n$ – popravni koeficijenti.

Popravni koeficijenti kojih, prema C. A. Rowland, ima osam [27] obuhvataju vrstu mlina (sa šipkama ili kuglama), geometrijske karakteristike mlina, način mlevenja (mokro ili suvo, otvoreni ili zatvoreni ciklus), krupnoću ulazne sirovine i izlaznog proizvoda, vrednosti stepena usitnjavanja i načina pripreme sirovine (načina drobljenja).

Pri proračunu specifične potrošnje električne energije u mlinu sa kuglama, nepohodno je poznavati vrednosti Bondovog radnog indeksa W_i određenog u laboratorijskom mlinu, pri finoći proizvoda mlevenja P_l u laboratoriji koja je bliska ili jednaka finoći proizvoda mlevenja P industrijskog mlina. Ovo je neophodno jer se vrednost Bondovog radnog indeksa menja sa promenom finoće proizvoda mlevenja. Čest je i slučaj da je $P_l \neq P$. Tako se pri projektovanju mlina čine manje ili veće greške (u zavisnosti od raspoloživih vrednosti radnih indeksa dobijenih u laboratoriji), a u zavisnosti od finoće proizvoda mlevenja u laboratorijskom mlinu i industrijskom mlinu.

U literaturi [27, 37] dat je proračunski postupak kojim se na bazi poznate vrednosti radnog indeksa određenog u laboratorijskom mlinu sa kuglama pri finoći proizvoda P_l, može izračunati vrednost radnog indeksa pri finoći proizvoda mlevenja P industrijskog mlina. Za poznate vrednosti dobijene eksperimentom: P_{kl}, G_l, P_l i F_l, prema predloženim izrazima dobijaju se vrednosti za industrijski mlin

$$P_k = \frac{P_{kl}}{P_l} \cdot P \text{, µm,} \tag{8.18}$$

$$G = G_l \cdot \sqrt{\frac{P}{P_l}} \text{, µm.} \tag{8.19}$$

Na osnovu izračunatih vrednosti P_k i G izračunava se Bondov radni indeks.

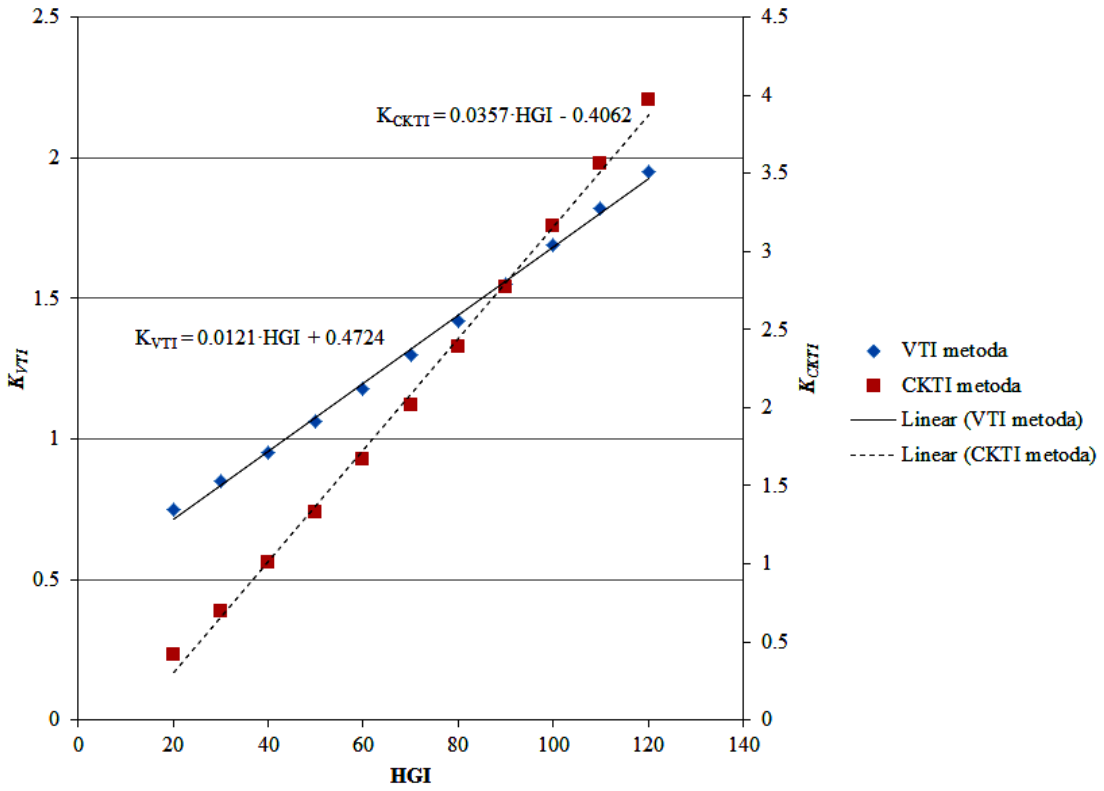
Pored toga, u navedenoj literaturi [27], mogu se naći i analize faktora koji utiču na kapacitet mlina. Faktori se mogu svrstati u tri grupe: prva grupa koja zavisi od sirovine koja se melje (meljivost i finoća sirovine i proizvoda), druga grupa koja zavisi od konstrukcije mlina (prečnik i dužina, način pražnjenja, oblik obloga mlina) i treća grupa koja zavisi od uslova rada mlina (koeficijent punjenja mlina meljućim telima i njihove geometrijske karakteristike, brzina rotiranja doboša mlina, cirkulativna šarža, stepen korisnosti klasifikatora itd).

8.7. Poređenje različitih metoda za određivanje koeficijenta meljivosti

Odnos između gore navedenih koeficijenata meljivosti data je u tabeli 8.1 i na slici 8.4.

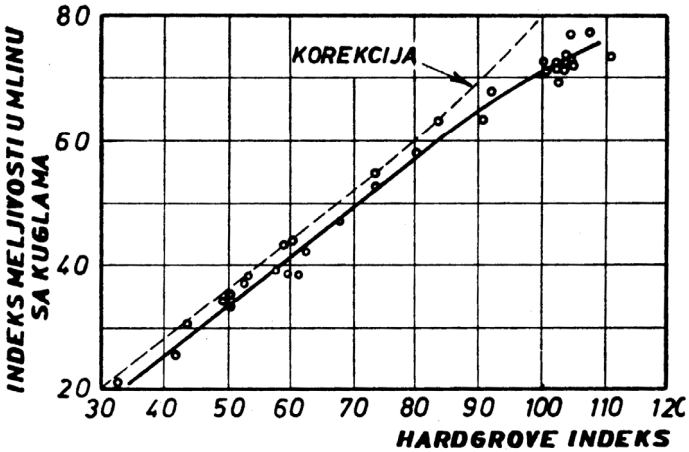
Tabela 8.1. Preračunavanje koeficijenata meljivosti određenih po metodama Hardgrove-a, VTI i CKTI [26]

Koeficijent	**Vrednost**										
HGI	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
K_{VTI}	0,75	0,85	0,95	1,06	1,18	1,30	1,42	1,55	1,69	1,82	1,95
K_{CKTI}	0,42	0,70	1,01	1,33	1,67	2,02	2,39	2,77	3,16	3,56	3,97



Slika 8.4. Zavisnost između koeficijenata meljivosti prema tabeli 8.1.

Bez obzira što se metoda za određivanje indeksa meljivosti po Hardgrove-u i u mlinu sa kuglama bitno razlikuju, američki i britanski naučnici su utvrdili dobru korelaciju. Između koeficijenta meljivosti određenog u skladu sa ove dve metode pokazano je da postoji približna pravolinijska zavisnost (slika 8.5).



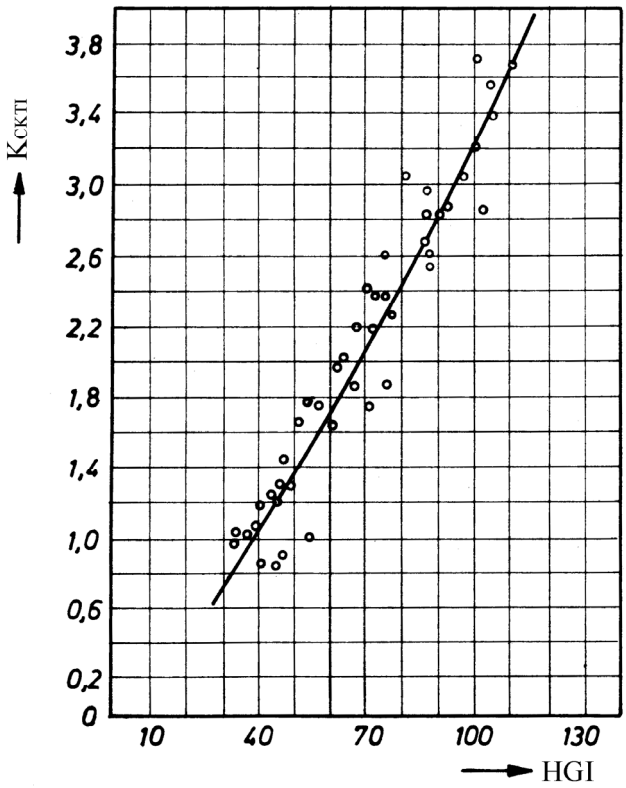
Slika 8.5. Zavisnost između vrednosti HGI i koeficijenta meljivosti po metodi ASTM – mlin sa kuglama [29]

Kako bi se dobila zavisnost između koeficijenata K_{VTI} i K_{CKTI} vršeno je paralelno određivanje indeksa meljivosti istih uzoraka ugljeva. Na osnovu ovih ispitivanja dobijen je izraz za preračunavanje indeksa meljivosti prema metodama VTI i CKTI [29]

$$K_{VTI} = 0,34 \cdot K_{CKTI} + 0,61. \tag{8.20}$$

Sa druge strane, Sokolov [29], daje rezultate ispitivanja iz kojih sledi da ne postoji stalan odnos između koeficijenata K_{VTI} i K_{CKTI}. Poredeći rezultate koje je dobio Sokolov vidi se da je koeficijenti meljivosti po CKTI metodi značajno veći nego po VTI metodi, sem naravno za etalon ugalj.

Svojevremeno je u SSSR vršeno istovremeno određivanje meljivosti ugljeva po metodama CKTI i Hardgrove-a u širokom dijapazonu koeficijenta meljivosti. Dobijeni rezulati su predstavljeni na slici 8.6.

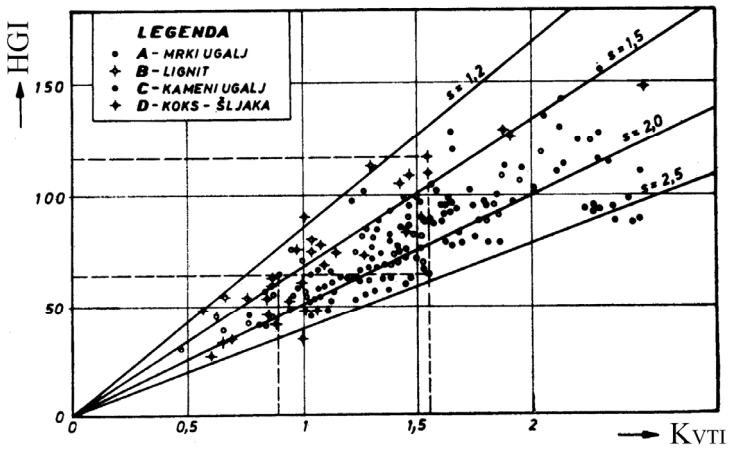


Slika 8.6. Poređenje koeficijenta meljivosti po metodama CKTI i Hardgrove-a [29]

Novaković u svom radu [29] navodi da nije moguće jednostavnim odnosom pretvarati HGI i koeficijent meljivosti po metodi VTI i obrnuto. Kao primer navodi da je ugalj koji po metodi VTI ima koeficijent meljivosti koji iznosi $K_{VTI} = 1,95$, moguće naći ugalj koji ima vrednosti HGI u opsegu 80,6 – 130,6. Ako se kao osnova uzme indeks meljivosti prema Hardgrove-u moguća razlika ide čak i do 45 % (za ugljeve koji imaju vrednost $HGI = 90$ koeficijent meljivosti po metodi VTI se kreće u opsegu $K_{VTI} = 1,32 - 1,90$).

Prema ranijim istraživanjima u bivšem SSSR-u, ugljevi se mogu podeliti u skupove koji se ograničavaju familijama pravih koje kreću iz koordinatnog početka, odnosno linijama za koje je konstantan odnos $S = \frac{K_{VTI}}{HGI} \cdot 100$ (slika 8.7).

Na primer za kamene ugljeve odnos *S* se kreće između 2,5 i 2, za mrke između 2 i 1,5 dok je za lignite taj odnos između 1,5 i 1,2. Kao zaključak se navodi da važan uticaj ima i izbor načina mlevenja na meljivost pojedinih vrsta ugljeva.

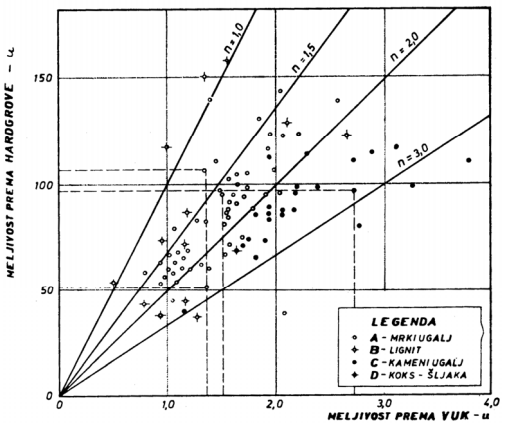


Slika 8.7. Poređenje koeficijenta meljivosti po metodama VTI i Hardgrove [29]

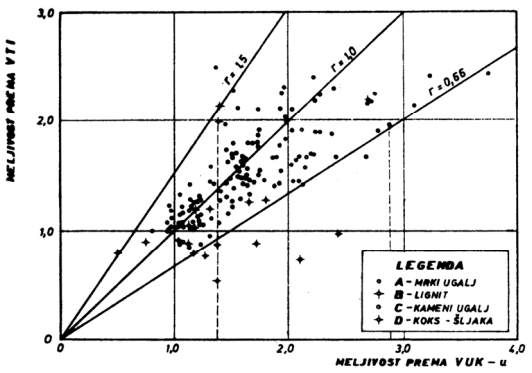
Na isti način, na slikama 8.8. i 8.9. data je zavisnost između koeficijenata meljivosti po metodi VUK u odnosu na Hardgrove i VTI metodu, respektivno.

Na slikama 8.8 i 8.9. se vidi da su kameni ugljevi označeni pravama $n = 3-2$, mrki pravama $n = 2-1{,}5$ a ligniti prelaze i preko $n = 1$, pri čemu je veličina n data izrazom

$$n = \frac{K_{VUK}}{HGI} \cdot 100 . \tag{8.21}$$



Slika 8.8. Poređenje koeficijenta meljivosti po metodama VUK i Hardgrove [29]



Slika 8.9. Poređenje koeficijenta meljivosti po metodama VUK i VTI [29]

Dimenzionisanje mlinova za ugalj se može vršiti i preko Bond-ovog radnog indeksa W_i. U literaturi [29, 38, 40, 41] daju se različite zavisnosti između vrednosti HGI i W_i i to:

$$W_i = \frac{435}{HGI}, \text{ prema [29];} \tag{8.22}$$

$$W_i = \frac{435}{HGI^{0,91}}, \text{ prema [38, 40];} \tag{8.23}$$

$$W_i = \frac{1662}{HGI^{1,08}}, \text{ prema [38, 40];} \tag{8.24}$$

$$W_i = \frac{88}{HGI^{0,5}}, \text{ prema [38];} \tag{8.25}$$

$$W_i = \frac{468}{HGI^{0,82}}, \text{ prema [41].} \tag{8.26}$$

9. Pregled postojećih rezultata i dostignuća iz oblasti doktorske disertacije

U monografiji [29], navodi se da je osnovni zadatak u oblasti upoznavanja osobina mlevenja ugljene materije poznavanje karakteristika uglja. Sam način mlevenja se ne može zanemariti ali je od sekundarnog značaja. Prilikom razmatranja problematike mlevenja ugljene materije treba obratiti pažnju na fizičke i hemijske karakteristike uglja, petrološki sastav, reprezentativnost uzorka, sadržaj i kvalitet mineralnih materija, sadržaj vlage i granulometrijski sastav uzorka uglja.

U radu [29], autor razmatra 18 ugljeva iz devet basena sa prostora bivše Jugoslavije: Kosovo (tri uzorka), Kolubara (tri uzorka), Kostolac (četiri uzorka), Velenje (tri uzorka), Kreka, Kakanj, Trbovlje, Banovići i Ibar. Za navedene uzorke navodi njihove hemijske i fizičke karakteristike – tehničku i elementarnu analizu, sastav i temperature topljenja pepela, zatim petrološke i mehaničke karakteristike.

Za sve uzorke izvršena su laboratorijska ispitivanja koeficijenta meljivosti. Pokušano je da se utvrdi uticaj različitih faktora na koeficijent meljivosti kao što su: geološka starost, petrološko poreklo, hemijski sastav, mehaničke karakteristike i sadržaj mineralnih materija. Za ispitivanje koeficijenta meljivosti korišćene su Hardgrove-ova metoda, metoda VTI i VUK.

Za ispitivanja uzeti su ligniti kod kojih se mogu ručno izdvojiti dve osnovne grupe:

- grupa ksilitnog porekla, koja predstavlja stupanj ugljenizacije drvene materije,
- grupa neodrvljene biljne materije i početno ugljenisanih materija životinjskog porekla – barski ugalj.

Kod svih lignita uzeta su tri uzorka: prosečan uzorak, uzorak čistog ksilitnog uglja i uzorak čistog barskog uglja.

Ispitivanje uticaja različitih mlinova na raspored granulacije a samim tim i na koeficijent meljivosti izvršeno je sa tri laboratorijska mlina: mlin sa diskovima, mlin čekićar i mlin sa ozubljenim diskovima. Autor zaključuje da je za geološki starije ugljeve i barske partije lignitnih ugljeva najpodesniji mlin sa diskovima dok je geološki mlađe ugljeve i partije ksilitnog porekla najbolje pripremati u mlinu sa ozubljenim diskovima.

Za ispitivanje uticaja drobljenja i mlevenja na sadržaj mineralnih materija korišćeni su uzorci uglja iz rudnika Kosovo. Uzorci su pripremani na drobilici a zatim u mlinu sa diskovima. Ispitivanja su izvršena sa ciljem da se proveri kretanje sadržaja mineralnih materija u pripremi uzoraka za ispitivanje indeksa meljivosti i uticaj pripreme, kao i mineralnih materija na meljivost. Rezultati analize pokazuju da uzorci posle drobljenja, frakcije –1,2+0,6 mm imaju najviše mineralnih materija, dok uzorci prvog mlevenja imaju vise mineralnih materija od svakog kasnijeg mlevenja. Dobijeni razultati ukazuju na veoma veliki značaj pripreme uzorka na sadržaj mineralnih materija. Na osnovu rezultata ispitivanja, zaključeno je da mineralne materije u uglju pravilno utiču na vrednosti HGI, ali njihov efekat može biti pozitivan i negativan, a u zavisnosti od kvaliteta mineralnih materija. Pored toga, kvalitet i sadržaj mineralnih materija se menja i u istom rudniku od sloja do sloja, a u zavisnosti od geoloških uslova.

Sadržaj ugljenika je kod svih ksilitnih partija, sa izuzetkom uglja iz kostolačkog basena, niži nego kod barskih partija. Povećan sadržaj ugljenika je praćen i višim vrednostima indeksa meljivosti, što znači da se barske strukture lignita, koje imaju viši sadržaj ugljenika, lakše melju od ksilitnih partija. Rezultati potvrđuju stanovište da karakteristike koje nisu strukturno definisane ne mogu da budu od koristi kod određivanja indeksa meljivosti. Karakteristično je da su kod lignita polazne materije koje su ugljenisane kod ksilitnih partija bitno različite od barskih partija, a ispitivanja meljivosti ovih partija potvrđuje izuzetnu pravilnost u zavisnosti vrednosti HGI od sadržaja ugljenika, što ne važi za ugljeve višeg ranga.

Razmatra se mlevenje dve bitno različite grupe: barske i ksilitne. Barske strukture i karakter mineralnih materija su toliko različiti od ksilitnih partija da se barske partije po pravilu znatno lakše melju. Na osnovu rezultata se vidi da barske partije imaju za oko 23 % veći indeks meljivosti kod lignita iz rudnika Kosovo, 94 % kod lignita iz rudnika Kolubara i 36 % kod lignita iz rudnika Kostolac. Karakteristično je da se prosečni uzorci daleko lakše melju od barskih partija kod onih ugljeva kod kojih postoji istovremeno i znatno veći sadržaj mineralnih materija.

Autor navodi značaj genetskog porekla i neophodnost da se kod svih ispitivanih ugljeva izvrši kvanitativna i kvalitativna petrološka analiza. Značaj ovih analiza je najveći kod onih ugljeva, kod kojih karbonifikacija nije umanjila početne genetske razlike, te se mogu izdvojiti ksilitne i barske partije. Kako mlevenje lignita najviše zavisi od

prosečnog petrološkog sastava ugljene materije, neophodno je za svaki basen odrediti međusobni odnos između ksilitnih i barskih partija.

Kao zaključak, autor navodi da je pored iskazanog indeksa meljivosti, da bi se stekla celovita slika, neophodno poznavati i druge karakteristike ugljeva, kako tehničku i elementarnu analizu tako i petrološki sastav uglja. To jest, samo brojčani podatak o indeksu meljivosti uglja nije dovoljan da se projektom pouzdano predvidi finoća mlevenja i kapacitet mlinskog postrojenja.

U radu [42], prikazana su ispitivanja na termoelektrani na ugalj snage 28 MW na Aljasci, u cilju analize uticaja frakcionog sastava mlevenog uglja (frakcije koja predstavlja propad kroz sito veličine otvora 76 μm) na potrošnju energije mlina. Namera je bila da se pokaže u kojoj meri utiče frakcioni sastav na potrošnju energije za mlevenje.

Korelacioni model dobijen na osnovu eksperimentalnih rezultata pokazuje da na povećanje potrošnje energije za mlevenje utiče ukoliko je frakcioni sastav samlevenog uglja manji od predviđenog, povećanje kapaciteta mlina kao i pad vrednosti HGI.

Korelaciona analiza je obuhvatila dvadeset eksperimentalnih rezultata. Vršena su merenja potrošnje električne energije mlina, frakcionog sastava (sadržaj ugljenog praha koji predstavlja propad kroz sito veličine otvora 76 μm), kapaciteta mlevenja, protoka uglja, vrednosti HGI i specifične potrošnje električne energije za mlevenje (količnik utrošene električne energije u amperima u mlinu i kapaciteta mlevenja). Vrednosti HGI uzoraka su se kretale od 31 do 39,5.

U prvom korelacionom modelu zavisno promenljivu je predstavljala specifična potrošnja električne energije, dok je nezavisno promenljiva bila propad kroz sito veličine otvora 76 μm (D_{76}). U ovom slučaju koeficijent determinacije R^2 je imao nisku vrednost i iznosio je $R^2 = 0,22$.

Uključenjem vrednosti HGI za uzorke uglja, izvršena je nova korelaciona analiza, takođe linearna, pri čemu je koeficijent determinacije u ovom slučaju imao vrednost $R^2 = 0,53$, što potvrđuje uticaj meljivosti uglja na potrošnju električne energije u mlinu.

Dobijeni model je imao sledeći izraz

$$I_{sp} = 0,004211 + 0,000043 \cdot D_{76} - 0,000081 \cdot HGI, \; R^2 = 0,53. \tag{9.1}$$

Treća korelaciona analiza je umesto specifične potrošnje električne energije u mlinu obuhvatila zavisnost potrošnje električne energije od kapaciteta mlevenja B (u kg/h), D_{76} i vrednosti HGI. Pri tome je dobijena sledeća linearna zavisnost sa poboljšanjim koeficijentom determinacije

$$I = -26,3113 + 0,908 \cdot D_{76} - 1,652 \cdot HGI + 0,00523 \cdot B\,,\ R^2 = 0,64\,. \tag{9.2}$$

U literaturi [43], analizirana je korelacija vrednosti HGI sa tehničkom analizom uglja. Analiza je obuhvatila preko 300 uzoraka uglja iz basena Indije sa širokim opsegom vrednosti HGI od 35 do 115. Tehničkom analizom uglja su dobijene sledeće vrednosti parametara (osnova suva na vazduhu):

- maseni udeo vlage ($W_{h,a}$) – 0,7 do 19 %,
- maseni udeo pepela (A_a) – 3 do 65 %,
- maseni udeo isparljivih materija (V_a) – 16 do 45 %,
- maseni udeo fiksnog ugljenika (FC_a) – 15 do 66 %.

Dobijen je sledeći korelacioni izraz sa koeficijentom determinacije $R^2 = 0,93$

$$\begin{aligned} HGI &= 93,25 + W_{h,a} \cdot \left(0,256 + 0,196 \cdot W_{h,a}\right) + 3 \cdot A_a \cdot \left(1,097 - 0,009 \cdot A_a\right) \\ &-3 \cdot V_a \cdot \left(1,165 - 0,029 \cdot V_a\right) - 5 \cdot FC_a \cdot \left(1,103 - 0,0166 \cdot FC_a\right). \end{aligned} \tag{9.3}$$

Ovde je neophodno napomenuti da se visok koeficijent determinacije objašnjava time da je korelaciona analiza uzela u obzir sve elemente tehničke analize uglja, tj, razlog dobrog slaganja treba tražiti u tome da su u korelacioni izraz uvršćene sve četiri komponente tehničke analize, čiji je zbir masenih udela jednak 100 %.
Autori upućuju na sinergijski uticaj svih elemenata tehničke analize na vrednosti HGI. Tako da nije opravdano razmatrati uticaj pojedinačnih elemenata na Hardgrove indeks meljivosti.

U cilju analize uticaja vlage na vrednosti HGI izvršene su analize uglja iz kopa Collie u zapadnoj Australiji. Ugalj u radu [44] je bio mrki ugalj niskog ranga, opsega vrednosti HGI od 47 do 59. Karakteristike uglja iz kopa Collie su visok sadržaj vlage, niska vrednost toplotne moći i niske vrednosti HGI. Ugalj iz ovog kopa je u suštini lignit po

sastavu. Eksperiment je obuhvatio pet dana sušenja uzoraka uglja na vazduhu a zatim u sušari kako bi se eksperiment ubrzao. Kako bi simulirali sušenje na vazduhu, autori su zaključili da smanjenje vlage od 3 % u toku od 2 h sušenja u sušari odgovara jednom danu sušenja na vazduhu. Uzorci ugljeva su sušeni na vazduhu tokom noći a zatim u sušari na temperaturi od 40 °C u toku 2 h, odnosno 4 h (u zavisnosti od uzorka). Ukupno trajanje eksperimenta je bilo osam dana, i obuhvatilo je pet uzoraka, čistog uglja i mešavina uglja u različitim odnosima. Početni sadržaj vlage u uzorcima je bio oko 28 % a krajnji oko 19 %.

Određivanje vrednosti HGI je vršeno svakog dana za sve uzorke, pri čemu su se vrednosti kretale od 46 do 59. Eksperimentalni podaci su pokazali trend povećanja vrednosti HGI sa povećanjem zaostale vlage (higroskopne vlage) u uglju, do neke vrednosti udela vlage preko koje vrednosti HGI ne rastu. Rezultati su pokazali dobru korelaciju higroskopne vlage i vrednosti HGI, sa vrednostima koeficijenta determinacije $R^2 = 0,5 - 0,9$ u zavisnosti od uzorka uglja.

Petrografske analize uglja su pokazale uticaj petrografskog sastava uglja na vrednosti HGI. Autori daju podatke da sadržaj vitrinita u uglju ima uticaj na vrednosti HGI, pri čemu vrednosti HGI opadaju kako sadržaj vitrinita u uglju raste.

Kao zaključak autori konstatuju da vlaga ima značajan uticaj na meljivost ugljeva. Što se tiče vrednosti HGI mešavine ugljeva, nisu mogli da daju nekakav opšti zaključak o aditivnosti vrednosti HGI mešavine ugljeva, tj. da se vrednost HGI mešavine ugljeva ne može odrediti na osnovu masenog udela uglja u mešavini i pojedinačnih vrednosti HGI komponenata mešavine, već da se vrednost HGI mešavine mora odrediti ekperimentalnim putem.

Istraživanje uticaja mineralnih materija na vrednosti HGI za turske ugljeve niskog ranga je obrađeno u radu [45]. Eksperiment je obuhvatio 29 uzoraka ugljeva čije vrednosti HGI su se kretale od 39 do 83. Rang ugljeva je određen na osnovu refleksije huminita i iznosio je $\overline{R}_r = 0,21 - 0,27$ %. Sadržaj huminita (zapreminski udeo u %, osnova bez mineralnih materija) varirao je između 88,3 % i 99,2 %. U uzorcima uglja određivan je sadržaj kvarca, minerala gline, karbonata, getita, gipsa kao i sadržaj minerala rastvorljivih u vodi i kiselini. Izvršena je korelaciona analiza i najbolji koeficijent determinacije dao je sledeći izraz

$$HGI = 2,532 + 0,487 \cdot Q + 1,165 \cdot NM,\ R^2 = 0,916, \tag{9.4}$$

gde je Q maseni udeo kvarca u %, a NM maseni udeo minerala rastvorljivih u vodi i kiselini u %.

Analizom rezultata je dobijeno da značajan uticaj na vrednosti HGI ima sadržaj minerala rastvorljivih u vodi i kiselini. Takođe, uzorci ugljeva sa višim udelom pepela i višim udelom minerala rastvorljivih u vodi i kiselini imaju više vrednosti od uzoraka sa visokim udelom pepela a niskim udelom minerala rastvorljivih u vodi i kiselini.

U radu [46] dati su eksperimentalni podaci o meljivosti mađarskih lignita kao i pojedinih izdvojenih frakcija (litotipova). Uzorci ugljeva potiču iz basena istočne Mađarske. U tom smislu iz izabranih uzoraka su izdvojene sledeće frakcije:

- ksilitna frakcija, gustine manje od 1,2 kg/dm^3, masenog udela pepela 10,19 % i vlage 12,02 %, koja reprezentuje preko 28 % rovnog lignita. Ksilitna frakcija ima izrazito drvenastu strukturu i visoki sadržaj humične kiseline,
- mineralne materije, gustine veće od 1,6 kg/dm^3, masenog udela pepela 75,14 % (suva osnova), vlage 5,61 % (analitički uzorak). Ova frakcija sastoji se od silikata, kalcijum karbonata i kvarcnog peska,
- „srednja“ frakcija, gustine 1,2 – 1,6 kg/dm^3, masenog udela pepela 35,3 % (suva osnova), vlage 10,89 % (analitički uzorak). Sadrži organsku materiju sa značajnim udelom silikata i ksilita.

Određivanje vrednosti HGI izvršeno je kako na rovnom lignitu tako i na izdvojenim frakcijama. Podaci dobijeni eksperimentom ukazuju da se meljivosti mineralnih materija i ksilita znatno razlikuju. Ksilitne frakcije se znatno teže melju. To pokazuju i dobijene vrednosti HGI. Vrednosti HGI ksilitne frakcije iznosio je 42,94, mineralnih materija 69,87, dok je vrednost HGI „srednje“ frakcije iznosila 58,98.

Autori su takođe, odredili i meljivost prema Bondu, izabranih frakcija i uzoraka. Eksperimentalno dobijene vrednosti indeksa Bonda su sledeće: 30,11 kWh/t za ksilitnu frakciju, 26,93 kWh/t za „srednju“ frakciju i 14,03 kWh/t za mineralne materije.

Analizom, autori zaključuju da petrografske komponente uglja pokazuju značajno različita ponašanja u zavisnosti od načina mlevenja.

Na osnovu rezultata eksperimenata, autori predlažu da se u cilju poboljšanja meljivosti i sagorevanja uglja u ložištima kotlova ugalj prethodno mehanički tretira. Analizirajući literaturne podatke, došli su do zaključka da optimalna dimenzija frakcije uglja koja se šalje na sagorevanje je ispod 4 mm. Lignit, se posle drobljenja prosejava. Odsev, dimenzija većih od 4 mm se uglavnom sastoji od ksilitne frakcije i bogat je humičnim kiselinama. Odsev ima nizak maseni udeo pepela (18 %) i može se koristiti kao đubrivo. Prosev, frakcija manja od 4 mm, ima maseni udeo pepela od 45,6 % i šalje se na sagorevanje u kotao.

Pored toga, za Mađarske lignite, autori predlažu i smanjenje sadržaja vlage, Flajsnerovim postupkom, a sve u cilju dobijanja kvalitetnijeg goriva koje će se sagorevati u kotlovima.

U radu [47], Hower daje pregled zavisnosti vrednosti HGI od petrološke analize ugljeva. Autor navodi da je meljivost ugljeva, kao jedna od njegovih karakteristika povezana sa rangom uglja, petrografskim sastavom i sadržajem mineralnih materija.

Na samom početku, autor skreće pažnju na jedan od problema standardizovane procedura dobijanja vrednosti HGI, a to je da se za dobijanje vrednosti HGI koristi samo jedna frakcija uglja, pri čemu se petrogravski sastav frakcije koja se koristi u Hardgrove mlinu razlikuje od petrografskog sastava početnog uzorka uglja. U nekim slučajevima greška može biti i značajna ukoliko ugalj sadrži kompleksne litotipove. Najmanji uticaj na gore navedeni problem imaju ugljevi sa visokim udelom vitrinita, usled njegovih sklonosti ka usitnjavanju.

U prethodnim studijama, razni autori su pokušavali da uspostave korelacije između tehničke analize uglja i vrednosti HGI. Jedan od izraza koji se navodi je i korelacija Humphreys-a i Lawrence-a. Izraz uzima u obzir sadržaj pepela, sumpora i isparljivih materija za veliki broj uzoraka ugljeva iz baze iz američkog biroa za rudarstvo (US Bureau of Mines). Jednačina koju su dobili ima sledeći oblik

$$\begin{aligned} HGI &= 223,26 - 6,327 \cdot V + 0,0369 \cdot V^2 + 1,354 \cdot S - 0,5243 \cdot S^2 + 0,2268 \cdot V \cdot S + \\ &+ 1,173 \cdot A - 0,0851 \cdot A^2 + 0,217 \cdot V \cdot A - 0,1907 \cdot S \cdot A \end{aligned} \tag{9.5}$$

gde su V, S, A, maseni udeli u % isparljivih materija, sumpora i pepela u uglju, respektivno.

Hower, ističe napomenu za korelacione izraze koje navodi kao ranije radove iz ove oblasti, a to je da pored visokog koeficijenta determinacije, dobijeni izrazi imaju i visoku standardnu vrednost greške (za neke čak i 5,58), što otežava njihovu primenu u praksi.

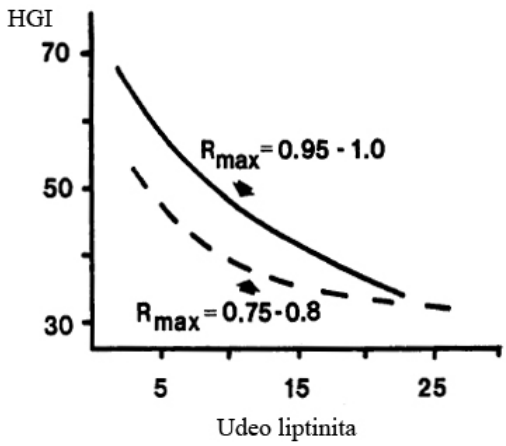
Iz tog razloga, autor predlaže da se u analizu uključi i petrografski sastav uglja, pogotovo zbog razloga što parametri tehničke analize variraju usled variranja petrografskog sastava. Međutim, jedan od većih nedostataka petrografske analize jeste, da dobijanje podataka o maceralnom sastavu i udelu pojedinih litotipova u uglju je vremenski zahtevan posao, što se za određivanje tehničke analize ne može reći.

Počeci analize zavisnosti između ranga uglja i petrografije na meljivost datiraju još iz 1942. godine kada je McCabe ukazao na važnost uticaja sastava uglja na njegovu pripremu i kasnije korišćenje. Prve korelacione izraze daje Leonard, 1965. godine, za 20 kamenih visokovolatilnih A ugljeva iz oblasti Pitsburga i Kentakija. Analiza je obuhvatila sledeće macerale: semifuzinit, fuzinit, mikrinit, egzinit, rezinit, vitrinit i mineralne materije. Svaki od izraza je imao koeficijent determinacije od $R^2 = 0,88$.

U opsežnim istraživanjima autor je analizirao 656 uzoraka visokovolatilnih kamenih ugljeva sa istoka i zapada države Kentaki, sa masenim udelom pepela manjim od 20 % (suva osnova). Analiza je obuhvatila, kako petrografski sastav uglja (liptinit, inertinit, vitrinit, maksimalnu refleksivnost vitrinita $R_{\max}$), tako i tehničku i elementarnu analizu (ukupni sadržaj sumpora S_{uk}). Korelacionim analizama došao je do izraza, čiji je koeficijent determinacije iznosio $R^2 = 0,61$ i standardna greška 4,89

$$HGI = 40,21 - 11,63\ln\left(liptinit\right) + 1,76\ln\left(inertinit\right) - 0,08\frac{vitrinit}{liptinit} + \\ +20,01 \cdot R_{\max} + 0,92 \cdot S_{uk}. \tag{9.6}$$

Analizirajući rezultate, autor zaključuje da rang uglja (predstavljen kroz $R_{\max}$) ima značajan uticaj na vrednosti HGI (povećavanjem ranga uglja raste i vrednost HGI) i da se povećanjem udela vitrinita u uglju smanjuje vrednost HGI. Međutim, značajniju ulogu daje sadržaju liptinita u uglju, što je predstavljeno na slici 9.1.



Slika 9.1. Uticaj liptinita na vrednosti HGI za uzorke sličnog ranga [47]

Kako bi istražio uticaj petrografskog sastava ugljeva istog ranga na vrednosti HGI, autor je u jednom od svojih radova ispitivao 44 uzorka uglja iz istog rudnika ali iz dva ležišta. Ugljevi su okarakterisani kao kameni visokovolatilni A sa $R_{\max} = 0,78$. Korelacionom analizom je dobio izraz ($R^2 = 0,67$)

$$HGI = 37,80 + 0,15 \cdot vitrit + 2,40 \cdot liptit - 1,21 \cdot vitrinertoliptit - \\ -0,12 \cdot karbominerit + 0,32 \cdot A. \tag{9.7}$$

Generalno gledano, pepeo i mono i bi-maceralni mikrolitotipovi bogati vitrinitom imaju pozitivan uticaj na vrednosti HGI, dok durit i trimaceralni mikrolitotipovi, uključujući i karbominerit smanjuju vrednost HGI. Pozitivan doprinos liptita u izrazu je diskutabilan, jer je njegov sadržaj bio nizak i ima najmanji značaj.

Pored gore navedenih analiza, autor u radu daje i pregled literature koja se bavi problematikom uticaja HGI na potrošnju energije ili snagu potrebnu za mlevenje uglja *N*. U tom smislu, Hower daje izraz koji daje vezu između vrednosti HGI i energije potrebne da se proizvede 3,25 t/h uglja čija je frakcija ispod 0,075 mm u mlinu sa kuglama

$$N = 153,9 - 64,2 \cdot \log HGI, \text{ kW}. \tag{9.8}$$

Skorupska, u svom radu koji analizira karakteristike uglja i njihov uticaj na performanse termoelektrane, naglašava da smanjenje vrednosti HGI za 15 jedinica, može sa smanji

kapacitet mlina za 25 %. Takođe, u literaturi se navodi i podatak da kapacitet mlina opada za 1 % usled smanjenja vrednosti HGI za jednu jedinicu.

Usled svega ovoga, odnosno veze između HGI i kapaciteta mlina, u praksi je običaj da se ugalj sa nižim vrednostima HGI od projektovanih odbaciju i ne koristi za sagorevanje.

Neki od autora navode da je pritisak potreban za mlevenje uglja (grinding pressure – GP) u vertikalnom mlinu, direktno vezan za vrednosti HGI, pri čemu se daje zavisnost

$$GP = \frac{1}{0,091 \cdot HGI - 0,256}\ ,\ R^2 = 0,88\,, \tag{9.9}$$

odnosno za specifičnu potrošnju energije (W_i, kWh/t)

$$W_i = 1,09 \cdot GP + 5,15\,,\ R^2 = 0,85\,. \tag{9.10}$$

Bez obzira na nedostatke i ograničenja Hardgrove metode, ona je i dalje dosta primenljiva u praksi, pre svega zbog svoje jednostavnosti i brzine dobijanja rezulata analize. Iz tog razloga, jedan broj istraživača je pokušao da nađe vezu između vrednosti HGI i drugih postupaka koji se odnose na meljivost ili čvrstoću uglja.

Jedna od karakteristika uglja predstavlja i čvrstoća na pritisak (σ). Autor Spiro [48], daje izraz koji povezuje ove dve karakteristike

$$HGI = 234 \cdot \sigma - 36\,,\ R^2 = 0,64\,. \tag{9.11}$$

Takođe, u literaturi se daje veza između indeksa udarne čvrstoće (Impact Strenght Index – ISI) i vrednosti HGI

$$ISI = 0,015 \cdot HGI^2 - 2,62 \cdot HGI + 159\,. \tag{9.12}$$

Bond je predložio dva izraza koji povezuju Bondov radni indeks sa indeksom meljivosti po metodi Hardgrove-a

$$W_i = \frac{88}{HGI^{0,5}}\ , \tag{9.13}$$

$$W_i = \frac{435}{HGI^{0,91}}\,. \tag{9.14}$$

Kako bi eleminisali uticaj ranga uglja na HGI, Trimble i Hower [48], su analizirali uzorke ugljeva podeljenih u tri grupe prema maksimalnoj refleksiji vitrinita $R_{\max}$:

1. $R_{\max} = 0,75 - 0,80\ \%$,
2. $R_{\max} = 0,85 - 0,90\ \%$,
3. $R_{\max} = 0,95 - 1,00\ \%$.

Svi analizirani ugljevi su pripadali istočnom basenu države Kentaki (Kentacky) i po karakteristikama su pripadali visokovolatilnim kamenim ugljevima. Korelacione jednačine obuhvatile su veliki broj uzoraka. Posebna pažnja se posvetila kako izboru promenljivih, tako i uniformnosti među uzorcima ugljeva. Najveću devijaciju među uzorcima imali su oni sa najvećim udelom mineralnih materija. Dobar način za smanjenje uticaja ovakvih uzoraka na ishod statističkih analiza jeste uzimanje u obzir samo onih uzoraka koji su imali nizak sadržaj pepela.

U prvoj grupi, koja je obuhvatala ugljeve sa vrednostima refleksije od 0,75 do 0,80 %, analizirano je 45 uzoraka (opseg vrednosti HGI od 33 do 49). U prvom krugu korelacione analize, obuhvaćeni su svi uzorci pri čemu je koeficijent determinacije iznosio $R^2 = 0,429$. Razlog u ovako niskom koeficijentu determinacije leži da su u analizu uzeti u obzir i ugljevi sa visokim udelom pepela. Ovakvi ugljevi u svom sastavu nemaju silikate ili materijale slične glini, koji veštački povećavaju vrednost HGI. Za svrhu ove studije, ugljevi sa udelom pepela većim od 20 % (12 uzoraka), su izdvojeni iz analize. Na taj način se dobio veći koeficijent determinacije $R^2 = 0,763$, a jednačina oblik

$$HGI = 47,766 - 0,446 \cdot A - 0,274 \cdot CD + 0,208 \cdot VT - 0,281 \cdot DC + 1,039 \cdot SIL, \qquad (9.15)$$

gde su: A – maseni udeo pepela u %, CD – zapreminski udeo u % klarodurita, VT – zapreminski udeo u % vitrita, DC – zapreminski udeo u % duroklarita i SIL – zapreminski udeo u % silikata u uglju.

Iz izraza (9.15) se vidi da monomaceralni mikrolitotip vitrit i silikati imaju pozitivan uticaj na vrednosti HGI, dok trimaceralni, klarodurit i duroklarit imaju negativan uticaj.

U drugoj grupi, analiziran je 41 uzorak (opseg vrednosti indeksa meljivosti 37 do 65). Na isti način kao i u prethodnoj grupi, analiza je obuhvatila sve uzorke ugljeva. Na ovaj

način dobijen je koeficijent determinacije $R^2 = 0,681$ (korelacioni izraz je obuhvatio sadržaj durita, vitrinertita, duroklarita, klarodurita i karbominerita). Eliminišući ugljeve sa visokim udelom pepela (sadržaj pepela viši od 20 %), dobijen je koeficijent determinacije $R^2 = 0,679$. Posle izuzimanja iz analize ugljeva sa visokim udelom pepela dobijen je veći uticaj liptinita na vrednosti HGI u odnosu na karbominerit, kroz izraz

$$HGI = 54,193 - 0,327 \cdot DU + 0,566 \cdot VI - 0,280 \cdot DC - 0,454 \cdot CD - 3,035 \cdot LP, \qquad (9.16)$$

gde su: *DU* – zapreminski udeo u % durita, *VI* – zapreminski udeo u % vitrinertita, *DC* – zapreminski udeo u % duroklarita, *CD* – zapreminski udeo u % klarodurita i *LP* – zapreminski udeo u % liptinita u uglju.

Analizirajući izraz, bimaceralni vitrinertit ima pozitivan uticaj na vrednosti HGI, dok duroklarit, klarodurit i bimaceralni durit i monomaceralni liptit negativan.

Treća grupa uzoraka obuhvatila je 43 uzorka uglja (opseg vrednosti indeksa meljivosti 35 do 66). Analizom svih uzoraka dobijen je koeficijent determinacije $R^2 = 0,686$. Izdvajanjem samo dva uzorka sa visokim udelom pepela dobijen je koeficijent determinacije $R^2 = 0,730$. Parametri koji su uzimani u obzir u prvom i drugom slučaju se nisu promenili. Dobijena jednačina je imala oblik

$$HGI = 40,834 + 0,334 \cdot A - 0,426 \cdot EXN + 0,227 \cdot VT - 0,640 \cdot VL + 0,399 \cdot VI, \qquad (9.17)$$

gde su: *EXN* – zapreminski udeo u % egzinita, *VL* – zapreminski udeo u % vitrininertoliptita u uglju.

Analizom izraza vidi se da pepeo, vitrit i vitrinertit imaju pozitivan uticaj na vrednosti HGI, dok trimaceralni egzinit i vitrininertoliptit negativan.

U radu [49], autori analiziraju uticaj macerala, pepela, elementarne analize i vlage na vrednosti HGI. Analiziran je veliki broj uzoraka ugljeva iz Kentakija, ukupno 548. Rad je pokušaj da se odgovori da li postoji veza između maceralnog sastava uglja, pepela i vlage na vrednosti HGI, kao i da li je moguće poboljšati koeficijent determinacije korelacionih izraza zamenom pepela elementarnom analizom uglja. Toplotne moći

ugljeva (osnova suva na vazduhu) su se kretale u opsegu 23,65 – 34,68 MJ/kg. Opseg vrednosti HGI ispitivanih ugljeva je iznosio 30 – 60.

Opseg vrednosti udela pepela i vlage (maseni udeo, osnova suva na vazduhu) je bio 0,73 – 19,95 %, odnosno 0,93 – 12,30 %, respektivno. Predloženi korelacioni izraz je bio linearan

$$HGI = 42,978 + 0,201 \cdot W_{h,a} + 0,201 \cdot A_a \,,\; R^2 = 0,034 \,. \tag{9.18}$$

Usled jako niske vrednosti koeficijenta determinacije, autori zaključuju da se sadržaj pepela i vlage ne može koristiti za predviđanje vrednosti HGI.

Elementarna analiza uzoraka ugljeva obuhavatila je određivanje udela MgO, Fe_2O_3, SO_3, Al_2O_3, SiO_2, TiO_2, Na_2O i K_2O. Takođe, korelacioni izraz je linearan i ima oblik

$$\begin{aligned} HGI = {} & 22,955 + 3,670 \cdot \mathrm{Na_2O} + 0,303 \cdot \mathrm{Fe_2O_3} + 0,002 \cdot \mathrm{Al_2O_3} - 2,801 \cdot \mathrm{TiO_2} - \\ & -3,359 \cdot \mathrm{MgO} + 0,737 \cdot \mathrm{SO_3} + 1,614 \cdot \mathrm{K_2O} + 0,386 \cdot \mathrm{SiO_2} \end{aligned} \tag{9.19}$$

pri čemu je koeficijent determinacije $R^2 = 0,42$. Viši udeli Al_2O_3 i TiO_2 rezultuju nižim vrednostima HGI, dok viši udeli Fe_2O_3 daju više vrednosti HGI. Rezultati analize pokazuju da koeficijent determinacije nije prihvatljiv, pa se elementarna analiza sama ne preporučuje ze predviđanje vrednosti HGI.

Petrografska analiza uglja obuhvatila je određivanje zapreminskih udela mikrinita (Mi), egzinita (Ex), makrinita (Ma), rezinita (Re) i vitrinita (Vit) u uglju. Jednačina koja predviđa koeficijent meljivosti ima oblik

$$\begin{aligned} HGI = {} & 59,401 - 1,075 \cdot Ex + 3,470 \cdot Ma - 0,779 \cdot Mi - \\ & -0,989 \cdot Re - 0,064 \cdot Vit \end{aligned} \quad R^2 = 0,68 \,. \tag{9.20}$$

Povećanjem udela mikrinita i egzinita u uglju smanjuje se vrednost HGI, dok viši udeli vitrinita imaju pozitivana uticaj na vrednosti HGI.

Uključujući sadržaj vlage i pepela, kao i petrografski sastav uglja, autori dobijaju sledeće izraze

$$\begin{aligned} HGI = {} & 55,365 - 0,541 \cdot W_{h,a} + 0,072 \cdot A_a - 1,004 \cdot Ex + 3,818 \cdot Ma - \\ & -0,792 \cdot Mi - 0,888 \cdot Re \end{aligned} \quad R^2 = 0,68 \,, \tag{9.21}$$

$$HGI = 58,613 - 1,463 \cdot W_{h,a} + 0,459 \cdot A_a - 1,722 \cdot Ex - 1,114 \cdot Mi$$
$$+4,832 \cdot Ma - 0,649 \cdot Re + 0,073 \cdot W_{h,a}^2 - 0,023 \cdot A_a^2 + 0,041 \cdot Ex^2 + \quad R^2 = 0,76 . \qquad (9.22)$$
$$+0,047 \cdot Mi^2 + 0,007 \cdot Re^2 - 0,575 \cdot Ma^2$$

Konačno, uzimajući u ubzir sve izvršene analize uzoraka uglja, autori daju sledeće jednačine koje predviđaju vrednost HGI

$$HGI = 59,963 - 0,69 \cdot W_{h,a} - 0,93 \cdot Ex + 3,085 \cdot Ma - 0,814 \cdot Mi -$$
$$-0,823 \cdot Re - 2,266 \cdot \mathrm{MgO} + 1,889 \cdot \mathrm{Na_2O} + 0,053 \cdot \mathrm{SiO_2} \qquad R^2 = 0,797 , \qquad (9.23)$$

$$HGI = 57,752 - 1,632 \cdot W_{h,a} - 1,469 \cdot Ex - 1,061 \cdot Mi +$$
$$+3,967 \cdot Ma + 0,22 \cdot Vit - 1,042 \cdot Re - 2,241 \cdot \mathrm{MgO} - 0,334 \cdot \mathrm{Al_2O_3} +$$
$$+2,47 \cdot \mathrm{Na_2O} - 0,033 \cdot \mathrm{SiO_2} + 0,068 \cdot \mathrm{Fe_2O_3} + 0,081 \cdot W_{h,a}^2 +$$
$$+0,033 \cdot Ex^2 + 0,037 \cdot Mi^2 + 0,168 \cdot Re^2 - 0,001 \cdot Vit^2 - \qquad R^2 = 0,817 . \qquad (9.24)$$
$$-0,44 \cdot Ma^2 + 0,025 \cdot \mathrm{MgO}^2 - 0,405 \cdot \mathrm{Na_2O}^2 + 0,001 \cdot \mathrm{SiO_2^2} -$$
$$-0,001 \cdot \mathrm{Fe_2O_3^2} + 0,004 \cdot \mathrm{Al_2O_3^2}$$

U novije vreme, autori koriste i veštačke neuronske mreže (ANN – Artificial neural network) u cilju poboljšanja korelacija između postojećih podataka o vrednostima HGI sa vrednostima HGI koje se predviđaju. Jedan od takvih napora učinjen je u radu [50]. U ovom radu, autori su analizirali 632 uzorka ugljeva sa ciljem da uspostave korelacionu zavisnost između tehničke, elementarne i petrografske analize i vrednosti HGI. Prvo su koristili ”klasične” statističke metode korelacione analize a zatim ANN. Uzorci ugljeva imali su vrednosti HGI od 33 do 60.

Koristeći korelacionu analizu autori su dobili sledeće izraze:

1. zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize

$$HGI = 102,67 + 4,227 \cdot \mathrm{S}_{uk,a} - 1,634 \cdot V_a - 0,569 \cdot A_a - 0,237 \cdot W_{h,a}, \; R^2 = 0,77, \qquad (9.25)$$

2. zavisnost vrednosti HGI od elementarne analize i udela vlage i pepela

$$HGI = 77,162 + 3,994 \cdot \ln \mathrm{S}_{uk,a} - 10,92 \cdot \mathrm{H} + 1,904 \cdot W_{h,a} -$$
$$-0,424 \cdot A_a - 11,765 \cdot \ln \frac{\mathrm{O+N}}{\mathrm{C}} \qquad R^2 = 0,75 , \qquad (9.26)$$

Iz izraza (9.26) vidi se da viši udeli vodonika u uglju daju niže vrednosti HGI, dok viši udeli sumpora daju više vrednosti HGI

3. zavisnost vrednosti HGI od petrografskih analiza i maksimalne refleksije vitrinita $R_{\max}$

   Analizom eksperimentalni podataka, autori su došli do zaključka da najbolji koeficijent determinacije daje izraz koji je uključio sledeće parametre: $R_{\max}$, sadržaj egzinita (*Ex*), semifuzinita (*SF*), mikrinita (*Mi*), makrinita (*Ma*), rezinita (*Re*)

$$HGI = 48{,}175 - 7{,}679 \cdot \ln Ex + 13{,}269 \cdot R_{\max} + 0{,}137 \cdot SF - \\ -0{,}584 \cdot Mi + 1{,}237 \cdot Ma - 1{,}171 \cdot Re \qquad R^2 = 0{,}81 . \qquad (9.27)$$

Korišćenjem ANN, čije su osnovne zakonitosti i principi dati u [50] i [51] autori su dobili veće vrednosti koeficijenta determinacije, koristeći se istim podacima kao i za „klasičnu“ korelacionu analizu. Osnovna karakteristika neuronskih mreža jeste da morate izvršiti njihov „trening“. Za „trening“ je korišćeno u sva tri slučaja 400 uzoraka, dok je za test korišćeno 232, 200 i 201 uzorka, respektivno. Dobijeni rezultati pokazuju značano bolje koeficijente determinacije. U prvom slučaju $R^2 = 0{,}89$, drugom $R^2 = 0{,}89$ i trećem $R^2 = 0{,}95$.

Na ovaj način, autori su pokazali da se neuronske mreže mogu koristiti za proširenje klasičnih korelacionih modela za predviđanje vrednosti HGI.

Analiza zavisnosti između tehničke analize i vrednosti HGI kineskih ugljeva obrađena je u radu [52]. Analiza je izvršena korišćenjem korelacionih zavisnosti i neuronskih mreža. Radom je obuhvaćeno 67 uzoraka ugljeva. Od ovih 67, rezultati tehničke analize su preuzeti iz literaturnih podataka, dok je 15 uzoraka obezbeđeno iz termoelektrane. Rezultati analize ugljeva dali su sledeće podatke (maseni udeli u %, izraženi na osnovi suvoj na vazduhu):

- sadržaj vlage od 0,7 do 5,5 %,
- sadržaj pepela od 8,72 do 46,0 %,
- sadržaj isparljivih materija od 12,2 do 53,1 %,
- sadržaj fiksnog ugljenika od 14,4 do 73,7 %,
- vrednost donje toplotne moći od 12588 do 28127 kJ/kg,
- vrednosti HGI od 50,8 do 115,6.

Na osnovu eksperimentalnih podataka, autori su došli do sledećih korelacionih zavisnosti:

- linearna zavisnost

$$HGI = 95{,}11266 - 1{,}869 \cdot W_{h,a} - 0{,}9145 \cdot V_a + 0{,}46 \cdot A_a\,,\ R^2 = 0{,}66\,, \tag{9.28}$$

- kvadratna zavisnost

$$\begin{aligned} HGI &= -167{,}5 - 10{,}1 \cdot W_{h,a} + 4{,}933 \cdot A_a + 2{,}17 \cdot V_a + \\ &+2{,}55 \cdot FC_a + 1{,}99 \cdot W_{h,a}^2 - 0{,}0356 \cdot A_a^2 - 0{,}015 \cdot V_a^2 - \quad R^2 = 0{,}73\,, \\ &-0{,}0038 \cdot FC_a^2 \end{aligned} \tag{9.29}$$

- zavisnost trećeg reda

$$\begin{aligned} HGI &= 112 - 39{,}8 \cdot W_{h,a} + 7{,}4 \cdot A_a + 3{,}4 \cdot V_a - 0{,}92 \cdot FC_a + \\ &+13{,}8 \cdot W_{h,a}^2 - 0{,}13 \cdot A_a^2 - 0{,}089 \cdot V_a^2 + 0{,}077 \cdot FC_a^2 - \qquad R^2 = 0{,}767\,, \\ &-1{,}37 \cdot W_{h,a}^3 + 0{,}001 \cdot A_a^3 + 0{,}001 \cdot V_a^3 - 0{,}00065 \cdot FC_a^3 \end{aligned} \tag{9.30}$$

- zavisnost četvrtog reda

$$\begin{aligned} HGI &= -243{,}5 - 45{,}5 \cdot W_{h,a} - 9{,}78 \cdot A_a + 8{,}15 \cdot V_a + 21{,}46 \cdot FC_a + \\ &15{,}7 \cdot W_{h,a}^2 + 0{,}79 \cdot A_a^2 - 0{,}35 \cdot V_a^2 - 0{,}78 \cdot FC_a^2 - 1{,}43 \cdot W_{h,a}^3 - \\ &-0{,}019 \cdot A_a^3 + 0{,}0076 \cdot V_a^3 + 0{,}0132 \cdot FC_a^3 - 0{,}018 \cdot W_{h,a}^4 + \\ &+0{,}00016 \cdot A_a^4 - 0{,}00006 \cdot V_a^4 - 0{,}000078 \cdot FC_a^4 \end{aligned} \qquad R^2 = 0{,}767\,. \tag{9.31}$$

Kao što se vidi, korišćenjem korelacionog izraza četvrtog reda ne dobija se veća vrednost koeficijenta determinacije. Autori, takođe zaključuju, da pored elemenata tehničke analize, u obzir prilikom traženja ragesionih zavisnosti treba uključiti i petrografski sastav uglja.

Primenjujući opštu regresiju korišćenjem neuronskih mreža (GRNN – Generalized regression neural netvork) autori su dobili veću preciznosti prilikom dobijanja vrednosti HGI nego korišćenjem nelinernih korelacionih izraza. Zaključuju da korišćenjem podataka tehničke analize i primenom GRNN mogu se dobiti vrednosti HGI sa zadovoljavajućom tačnošću.

Oslanjajući se na eksperimentalne podatke o ugljevima iz rada [52], autori rada [53] koriste metod nosećih vektora (SVR – Suport vector regression) kao alternativni postupak predviđanja vrednosti HGI, a na osnovu podataka tehničke analize ugljeva.

Korišćenjem podataka o udelu vlage, isparljivih materija i udela pepela, autori su dobili jako dobre korelacione koeficijente. Prilikom „treninga“ SVR metoda korišćenjem podataka o 61 uozorku, koelacioni koeficijent je imao vrednost $R^2 = 0,8902$. Validacija modela je izvršena korišćenjem 6 uzoraka pri čemu je koeficijent determinacije imao vrednost $R^2 = 0,8084$.

Još jedna primena neuronskih mreža za predviđanje vredosti HGI izvršena je u radu [54]. Analiza je obuhvatila 163 uzoraka turskih mrkih ugljeva (vrednosti HGI su iznosile od 21 do 88), korišćenjem 11 karakteristika ugljeva koji su obuhvatili tehničku analizu, petrografsku analizu i rang uglja. Obrada rezultata je izvršena linearnim i nelinearnim korelacionim modelima kao i neuronskim mrežama.

Ulazni parametri, odnosno podaci o ugljevima koji su korišćeni za predviđanje vrednosti HGI su: maseni udeli vlage (*W*), pepela (*A*), isparljivih materija (*V*), fiksnog ugljenika (*FC*), zapreminski udeli huminita (*Hu*), liptinita (*Li*), inertinita (*In*), pirita (*Py*), kvarca (*Q*), mineralnih materija (*MM*) i R_{max}.

Linearna regresija obuhvatila je sve uzorke ugljeva. Srednja vrednost razlike između procenjenje i eksperimentom dobijene vrednosti HGI iznosila je 6,54.

Za nelinearnu regresiju, iskorišćeno je 153 uzorka za ”trening” i 10 uzoraka za proveru dobijenog izraza. Dobijena je sledeći korelacioni izraz

$$HGI = 87,32 \cdot W^{-0,2135} \cdot A^{0,0897} \cdot V^{-0,0877} \cdot FC^{0,0595} \cdot Hu^{-0,1370} \cdot Li^{-0,0367} \cdot \\ \cdot In^{-0,0148} \cdot Py^{-0,0081} \cdot Q^{-0,0251} \cdot MM^{-0,0266} \cdot R_{max}^{-0,1673}. \tag{9.32}$$

Srednja vrednost razlike između procenjene i eksperimentalne vrednosti HGI iznosila je u ovom slučaju 5,36.

Primenom neuronskih mreža, vrednost razlike između modelom dobijenih vrednosti i eksperimentalnih iznosila je 4,74.

Kao zaključak se nameće da primena neuronskih mreža ima svoje opravdanje za predviđanje vrednosti HGI, jer se njenom primenom dobijaju veće vrednosti koeficijenta determinacije.

Autori zaključuju da je nelinearna korelaciona analiza pokazala da vrednost HGI zavisi od udela vlage, udela huminita i R_{max}. Sa druge strane, vrednost HGI malo zavisi od

udela liptinita, inertinita i mineralnih materija. Povećanjem udela pepela i fiksnog ugljenika povećava se i vrednost HGI, dok se vrednost HGI smanjuje povećanjem udela vlage, isparljivih materija i R_{max}. Prethodno izneti zaključci su u skladu sa literaturnim podacima.

Jedan od najkompleksnijih korelacionih izraza koji predviđaju vrednosti HGI a u zavisnosti od tehničke analize, toplotne moći i udela sumpora dat je u literaturi [55]. Model je obuhvatio 735 uzoraka ugljeva (kameni) i predstavljali su ugljeve koji su se tada koristili u SAD. Vrednosti HGI su bile u opsegu 40 – 110 (srednja vrednost 66,9). Tehnička analiza je dala sledeće podatke (maseni udeli u procentima):

- toplotna moć BT (osnova bez pepela) 15123 – 36193 kJ/kg (srednja vrednost 32487 kJ/kg),
- fiksni ugljenik FC (osnova bez vlage i pepela) 45,7 – 87,6 % (srednja vrednost 63,7 %),
- sadržaj vlage WAT (ukupna vlaga) 1,3 – 43,8 % (srednja vrednost 6,51 %),
- isparljive materije VD (osnova bez vlage) 12,8 – 49,2 % (srednja vrednost 33,59 %),
- fiksni ugljenik FX (osnova bez vlage) 37,4 – 81,4 % (srednja vrednost 56,55 %),
- sadržaj pepela AD (osnova bez vlage) 1,9 – 24,0 % (srednja vrednost 9,87 %),
- sadržaj sumpora SL (osnova bez vlage) 0,2 – 8,7 % (srednja vrednost 1,75 %).

Autori su, pre svega izračunali linearne koeficijente korelacije za elemente tehničke analize i njihove transformacije. One veličine koje su imale najveće vrednosti koeficijenta korelacije uzete su u obzir pri regresionoj analizi. Dobijen je sledeći kompleksni korelacioni izraz

$$
\begin{aligned}
HGI &= 1,2905645\cdot 10^{3} + 48,887035\cdot WAT + 29,087288\cdot AD + 860,48021\cdot \frac{VD}{FX} + \\
&+132,75922\cdot SL - 4,4491717\cdot FC - 0,83831248\cdot WAT\cdot VD - 1,3516192\cdot WAT\cdot SL - \\
&-0,26852324\cdot AD\cdot VD - 25,086554\cdot AD\cdot \frac{VD}{FX} - 0,63219884\cdot AD\cdot SL + \\
&+3,1813304\cdot 10^{-3}\cdot AD\cdot BT - 1,5980983\cdot VD\cdot SL + 0,92516776\cdot VD\cdot FC - \\
&-2,4358097\cdot 10^{-3}\cdot VD\cdot BT - 1,1301949\cdot SL\cdot FC - 1,1068219\cdot 10^{-3}\cdot FC\cdot BT + \\
&+1,1555370\cdot 10^{-3}\cdot WAT\cdot FC\cdot AD + 0,026097159\cdot WAT\cdot FC\cdot SL - \\
&-3,1682251\cdot 10^{-5}\cdot WAT\cdot FC\cdot BT - 4,7932782\cdot 10^{-5}\cdot FC\cdot BT\cdot AD + \\
&+3,2265178\cdot 10^{-8}\cdot WAT\cdot FC\cdot BT\cdot AD + 3,7266704\cdot 10^{-7}\cdot WAT\cdot FC\cdot BT\cdot VD - \\
&-1,9572999\cdot 10^{-4}\cdot (WAT\cdot FC)^{2} + 4,3494489\cdot 10^{-8}\cdot (WAT\cdot FC)^{3} + \\
&+2,0335521\cdot 10^{-3}\cdot \left(\frac{WAT\cdot BT}{1000}\right)^{2} - 4,9464998\cdot 10^{-7}\cdot \left(\frac{AD\cdot BT}{1000}\right)^{3} + \\
&+1,8102988\cdot 10^{-7}\cdot \left(\frac{FC\cdot BT}{1000}\right)^{3} + 1,9722109\cdot 10^{3}\cdot \frac{SL}{\exp \mathrm{SL}} - \\
&-1,4488470\cdot 10^{6}\cdot \frac{\frac{FC}{4}}{\exp\frac{FC}{4}} - 1,0301954\cdot 10^{4}\cdot \frac{\frac{VD}{FX}}{\exp\frac{VD}{FX}} - \\
&-2,7609855\cdot 10^{3}\cdot \frac{\frac{SL}{\exp SL}\cdot\frac{VD}{FX}}{\exp\frac{VD}{FX}} - 190,88758\cdot \frac{\frac{SL}{\exp SL}\cdot\frac{FC}{4}}{\exp\frac{FC}{4}\cdot BT} + \\
&+0,40691093\cdot \frac{BT\cdot\frac{VD}{FX}}{\exp\frac{VD}{FX}} - 17,062624\cdot \frac{FC\cdot SL}{\exp SL}.
\end{aligned}
\tag{9.33}
$$

Srednja greška modela iznosila je 5,58.

Kako bi testirali model, autori si iskoristili podatke o ugljevima za 1953, 1954, 1955, 1965 i 1966. godinu. Ukupan broj uzoraka je iznosio 1029. Uvršćivanjem podataka analize ugljeva u jednačinu dobili su da je 67 % uzoraka imalo grešku manju od ±1 jedinica HGI, 95 % grešku manju od ±2 a 99 % uzoraka grešku manju od ±3.

Takođe autori u radu daju model koji predviđa vrednosti HGI za jedan kop. U tu svrhu koriste 160 uzoraka ugljeva. Nezavisno promenljive su bile sadržaj vlage, isparljivih materija, fiksnog ugljenika, pepela, sumpora i indeksa nadimanja. Kako opseg analitičkih vrednosti nije bio velik, dobijeni izraz koji predviđa vrednosti HGI je imao

znatno jednostavniju formu, pri čemu indeks nadimanja nije značajno doprinosio pa nije ušao u analizu. Standardna greška modela iznosila je 5,71 a $R^2 = 0,933$. Izraz je imao oblik

$$HGI = 328,7519 + 0,11167831 \cdot WAT - 2503,9253 \cdot \frac{1}{VOL} - 0,00274043 \cdot AD^3 + \\ +0,66989154 \cdot SL^2 - 298,3781 \cdot \frac{VOL}{FC} + 180,82428 \cdot \left(\frac{VOL}{FC}\right)^3, \tag{9.34}$$

gde su:

WAT, % – maseni udeo ukupne vlage,

FC, % – maseni udeo fiksnog ugljenika, osnova bez vlage i pepela,

VOL, % – maseni udeo isparljivih materija, osnova bez vlage i pepela,

AD, % – maseni udeo pepela, osnova bez vlage,

SL, % – maseni udeo ukupnog sumpora, osnova bez vlage.

Pored prethodna dva modela, u radu je analiziran i uticaj petrografskog sastava uglja na vrednosti HGI. Analiza je obuhvatila uticaj isparljivih materija, fiksnog ugljenika, vitrinita i egzinita na vrednosti HGI, pri čemu je dobijen sledeći izraz sa greškom od 3,17

$$HGI = -190,68725 - 232,73325 \cdot \frac{VOL}{FC} - 5781,3015 \cdot \frac{\frac{VOL}{FC}}{\exp\frac{VOL}{FC}} + \\ +0,56197543 \cdot VIT - 1,6082502 \cdot EXIN + 8779,3683 \cdot \frac{\frac{VOL}{100}}{\exp\frac{VOL}{100}}, \tag{9.35}$$

gde su:

FC, % – maseni udeo fiksnog ugljenika, osnova bez vlage i pepela,

VOL, % – maseni udeo isparljivih materija, osnova bez vlage i pepela,

VIT, % – zapreminski udeo vitrinita,

EXIN, % – zapreminski udeo egzinita.

U literaturi se mogu naći podaci o uticaju mikrotalasa na meljivost ugljeva [56, 57, 58, 59, 60, 61]. Organske komponente ugljeva su relativno loši apsorbenti mikrotalasne energije. Međutim, voda u uglju se smatra da je relativno dobar apsorbent ove energije. Molekuli vode su polarni i kada se izlože električnom polju, pozicioniraju se u pravcu, smeru i frekvenciji tog polja. Ovo repozicioniranje dovodi do povišenja temperature usled trenja. Prosečna vrednost povišenja temperature vode iznosi 0,9 °C/s, kada je izložena mikrotalasnom zračenju snage 0,65 kW i frekvencije 2,45 GHz [58]. Kada se ugalj izloži mikrotalasnom zračenju, molekuli vode se zagrevaju, menjaju fazu i šire se pri čemu stvaraju unutrašnji pritisak unutar strukture uglja, najčešće slabeći njegovu strukturu. Mineralne materije u uglju se razlikuju po svojoj sposobnosti da apsorbuju mikrotalasno zračenje (npr. pirit se zagreva dok je kvarc transparentan).

Rad [56] uključuje u razmatranje da li se otpor uglja mlevenju može smanjiti dejstvom mikrotalasa. Primenjeni su mikrotalasi visoke snage (8,5 kW) a vreme izlaganja uglja je isnosilo 2 minuta. Izbor mikrotalasa visoke snage je izvršen na osnovu praktične tačke gledišta. Naime, u praksi, na realnom postrojenju, je nemoguće tretirati ugalj niskom snagom mikrotalasa duži vremenski period, naročito u postrojenjima u kojima su veliki protoci uglja. Takođe, niske snage imaju za rezultat male stepene zagrevanja odnosno sporije isparavanje vlage iz uglja.

Razmatran je ugalj iz rudnika Thoresby (Velika Britanija), za koji su podaci tehničke analize sledeći (maseni udeli): sadržaj vlage 2,1 %, isparljivih materija 29,3 %, fiksnog ugljenika 52,5 % i pepela 16,1 %. Sadržaj (zapreminski udeo) liptinita u gulju je iznosio 5,9 %, vitrinita 86 % a inertinita 8,1 %. Srednji stepen refleksije iznosio je 0,70 %. Meljivost uzoraka je određena metodom Bonda. Uzorak uglja je podeljen na sedam frakcija a zatim tretiran u eksperimentalnoj instalaciji.

Ispitivanja meljivosti pokazuju da tretirani uzorci ugljeva imaju bolju meljivost (približno 20 %) od netretiranih, u celom opsegu frakcija. Najveći uticaj na meljivost mikrotalasi su imali za veće frakcije. Takođe, vreme zadržavanja uglja u mlinu je kraće za one uzorke ugljeva koji su tretirani mikrotlasima. To dovodi do zaključka da se na ovaj način može povećati i kapacitet mlina.

Sadržaj vlage u uglju se nije značajno promenio posle tretmana. Najverovatnije objašnjenje ovoga je da vlaga prolazi kroz promene faze nekoliko puta tokom transporta

kroz ugalj, jer se ugalj ne zagreva značajno za tako kratka vremena izlaganja. Sadržaj pepela se smanjuje kako se veličina čestica uglja povećava, usled karakteristika uglja da se pepeo koncentriše u nižim frakcijama uglja. Sadržaj isparljivih materija ostaje skoro nepromenljiv.

Najveći uticaj mikrotalasa na petrografski sastav se može ogledati u smanjenju udela liptinita, jer liptinit počinje da devolatilizuje na temperaturama oko 300 °C. Međutim, tokom eksperimenta nije došlo do značajne promene udela liptinita u uzorcima uglja.

Izlaganje uglja mikrotalasima dovodi do određenog stepena oksidacije. Ova oksidacije ne može da dovede do preraspodele udela macerala u uglju, ali može dovesti do promene refleksivnosti. Promene stepena refleksije biće uočene na vitrinitu. Međutim tokom eksperimenta nije došlo do promene u stepenu refleksije uzoraka ugljeva.

Autori su pokušali da izvrše eksperiment sa većim snagama mikrotalasa (15 kW). Međutim najkraće vreme zadržavanja uzorka uglja u instalaciji je bilo 1 s, što je dovelo do značajne promene strukture uglja kao i do početka sagorevanja. Oni navode da se uz smanjenje vremena zadržavanja mogu postići još bolja poboljšanja meljivosti uglja bez promene strukture.

Uticaj mikrotalasnog zračenja na hemijske i petrografske karakteristike uglja je razmatran u radu [57]. Poznato je da se meljivost ugljeva poboljšava izlaganjem mikrotalasima, međutim malo podataka ima kako se ugalj menja u ovom procesu, sa stanovišta sagorevanja. Pet različitih uzoraka ugljeva izlagano je relativno visokim nivoima mikrotalasnog zračenja (3, 7,5, 10 i 15 kW) u trajanju od 0,1 s. Uzorci su pripremani na isti način, pri čemu je njihova frakcija bila 1,18 – 3,00 mm.

Autori su zapazili da kratkotrajna primena mikrotalasa visoke snage na ugalj ne dovodi do značajnog gubitka vlage u uglju (udeli vlage u uglju su se kretali u opsegu 1,1 do 5,6 %). Sadržaj isparljivih materija u uglju se takođe neznatno smanjio kao i odnos fiksnog ugljenika i isparljivih materija. Isti zaključci važe i za petrografski sastav uglja posle tretmana mikrotalasima. Ovaj rezultat nije iznenađujući jer da bi se jedan maceral transformisao u drugi potrebne su značajnije promene. Međutim, rezultati pokazuju da se reaktivnost uglja menja sa izlaganjem uglja mikrotalasima.

U radu [58], uzorak uglja je izložen dejstvu mikrotalasnog zračenja (različitim dužinama trajanja) a zatim je vršeno određivanje komparativnog radnog indeksa (RWI). Komparativni radni indeks u suštini predstavlja odnos između Bondovog radnog indeksa netretiranih i tretiranih uzoraka ugljeva. RWI se koristi kada se želi uporediti meljivost različitih materijala a njegovo izvođenje i analiza tačnosti se može naći u literaturi.

Uzorci su pripremani u mlinu sa šipkama u trajanju od 90 minuta. Zatim je uzorak uglja (mrki ugalj) izložen mikrotalasnom zračenju snage 0,65 kW i frekvencije 2,45 GHz u trajanju od 1, 3, 5 i 8 minuta. Meljivost uzoraka je analizirana odmah nakon tretmana kako bi se isključio uticaj vlage koju bi uzorak uglja mogao da primi. Uzorak uglja izložen mikrotalasima 1 minut nije imao promenu u meljivosti. Ugalj izložen u trajanju od 3 ($RWI = 80\ \%$) i 5 ($RWI = 50\ \%$) minuta ima bolju meljivost od netretiranog uzorka, pri čemu se meljivost poboljšava povećenjem dužine trajanja izloženosti. Međutim, izlaganje uglja vremenu dužem od 5 minuta nema više uticaja na poboljšanje meljivosti. Jedno od objašnjenja ovog rezultata je u zaostaloj vlagi u uglju koja ostaje nepromenjena.

Ponovnom tehničkom analizom uglja (posle izlaganja zračenju od 8 minuta), sadržaj vlage u uglju se značajno smanjio (za 55,5 %, od 4,70 % do 2,26 %). Takođe, sadržaj isparljivih materija se smanjio (za 4 %), što dovodi do zaključka da dolazi do reakcije između dela isparljivih materija i vazduha, što može da dovede do nastajanja šupljina u uglju. Međutim, usled smanjenja udela isparljivih materija snižava se i toplotna moć uglja (za 5 %). Uticaj zračenja na sadržaj pepela je zanemarljiv. Tokom izlaganja zračenju, temperatura uglja je rasla sa početnih 20 °C (netretiran ugalj) do 253 °C (ugalj tretiran 8 minuta). Uticaj mikrotalasnog zračenja na toplotnu moć uglja ima isti efekat kao i sušenje uglja.

Kako bi analizirali uticaj zračenja na ugljeve različitog ranga, autori su izložili šest različitih uzoraka ugljeva (od lignita do antracita) mikrotalasnom zračenju. Početna masa svih uzoraka je bila ista, kao i granulacija i način pripreme. Vreme izlaganja uzoraka iznosilo je 8 minuta, dok je snaga i frekvencija zračenja bila 0,65 kW i 2,45 GHz, respektivno. Rezultati pokazuju da izlaganje mikrotalasima ima uticaja ne sve uzorke ugljeva ali u različitom obimu. Najveći uticaj je ostvaren na ugljevima niskog ranga (niži sadržaj ugljenika), gde je RWI iznosio oko 50 %, pri čemu se RWI povećava

kako rang uglja raste. Ovaj efekat se može objasniti samom prirodom vlage u uglju. Kod ugljeva niskog ranga vlaga je higroskopna i ima je procentualno više nego u ugljevima višeg ranga, gde je vlaga više hemijski vezana.

Uticaj mikrotalasa snage 8 kW i trajanja 0,1 s, na četiri različite frakcije (3,35 – 4,7 mm, 6,7 – 9,5 mm, 9,5 – 19 mm, 19 – 22,4 mm) pet ugljeva analiziran je u radu [59]. Korišćena aparatura je ista kao i u radovima [56] i [57]. Eksperimentima je potvrđeno povećanje meljivosti uzoraka ugljeva i to u proseku za 40, 78, 137 i 181 % počevši od najmanje frakcije.

U radu [60], uzorci turskih lignita sa visokim udelom piritnog sumpora (3,89 %) i pepela (24,63 %) su podeljeni u tri frakcije. Tretman mikrotalasima izvršen je u Bosch mikrotalasnoj pećnici snage 850 W, i frekvencije 2,45 GHz. Posle tretmana mikrotalasima izvršena je analiza ponašanja ugljeva prilikom mlevenja.
Autori su izvršili tretman uglja mikrotalasima snage 850 W u trajanju 12 minuta. Posle tretmana u mikrotalasnoj pećnici, svaka frakcija uglja je mlevena u mlinu sa kuglama 2 minuta. Rezultati ekperimenta pokazuju da kako se dimenzije uglja smanjuju, pozitivan uticaj mikrotalasa na ponašanje ugljeva pri mlevenju se sve više smanjuje.
Eksperimenti koji se odnose na meljivost ugljeva Hardgrove postupkom pokazuju da se vrednosti HGI ugljeva tretiranih u mikrotalasnoj povećao za 23 % u odnosu na ugalj koji nije tretiran.

Sahoo i Meikap [61] tretirali su ugalj sa visokim udelom pepela mikrotalasima snage 900 W. Za analizu izabrana su dva indijska uglja, sa visokim udelima pepela 38 % i 32 %. Početni uzorak uglja iznosio je 15 kg. Zatim je uzorak usitnjen u čeljusnoj drobilici a onda prosejavan. Za dalju analizu uzeta je frakcija 12,7 – 19,05 mm.
Pre unošenja uzoraka u mikrotalasnu, pećnica je ispirana pet minuta azotom kako bi se stvorila inertna atmosfera. Uzorci oba uglja tretirani su u mikrotalasnoj pećnici snage 900 W i to u trajanju od 30, 60, 90 i 120 sekundi. Temperatura uglja je merena termoparom. Posle tretmana u mikrotalasnoj, uzorci uglja frakcije 12,7 do 19,05 mm su mleveni u mlinu sa kuglama u trajnju od 20 minuta. Na svakih 5 minuta, ugalj je izdvajan iz mlina i prosejavan na sitima veličine otvora 295, 211, 152, 104 i 75 μm u

trajnju od 5 minuta. Svaka frakcija je merena a odsev veći od 295 μm se vraćao na mlevenje. Ovaj postupak vršen je sve dok više nije bilo uglja na situ veličine otvora 295 μm.

Indeks meljivosti je određivan po metodi Hardgrove-a i Bonda. Tehnička analiza netretiranog uglja i uglja tretiranog u mikrotalasnoj (posle 30, 60, 90 i 120 sekundi) rađena je za svaku od frakcija.

Rezultati tehničke analize pokazuju da se sadržaj pepela u tretiranim uzorcima smanjio. Sadržaj pepela se povećava kako veličina čestica uglja raste. Ovo se objašnjava karakteristikama indijskih ugljeva da se pepeo koncentriše u većim frakcijama. Sadržaj vlage u tretiranim uzorcima je takođe niži od netretiranih uzoraka. Sadržaj isparljivih materija i fiksog ugljenika je viši u tretiranim uzorcima.

Analize rađene na elektronskom mikroskopu pokazuju pukotine duž granice zrna u uzorcima tretranim u mikrotalasnoj. Pukotine nastaju usled nastanka napona zbog brzog zagrevanja u mikrotalasnoj. Opaženo je širenje pukotina kako se vreme izlaganja mikrotalasima povećava.

Analiza uzoraka X zracima (X-ray powder diffraction) pokazuje da tretirani uzorci imaju veći pik nego netretirani što pokazuje da kristalnost uglja povećava tretiranjem uglja mikrotalasima.

Temperatura uglja se takođe povećava izlaganjem uglja mikrotalasima, pri čemu je ugalj sa višim udelom pepela uvek imao višu temperaturu od uglja sa nižim udelom pepela, što se objašnjava time da je apsorpcija mikrotalasne energije 2 – 3 puta veća u mineralima nego u osnovnoj masi uglja.

U oba slučaja došlo je do povećanja vrednosti HGI ugljeva. Vrednosti HGI netretiranih ugljeva iznosile su 63 za ugalj sa višim udelom pepela odnosno 72 sa nižim udelom pepela. Maksimalna vrednost HGI sa prvi ugalj (sa višim udelom pepela) postiže se posle 30 sekundi izlaganja i iznosi 71, dok za ugalj sa nižim udelom pepela posle 60 sekundi i iznosi 74.

Bondov test pokazuje da se energija potrebna za melvenje uglja smanjuje kako se vreme tretiranja uglja povećava (Bondov radni indeks netretiranog uglja iznosio je 13 kWh/t, dok je uglja tretiranog 120 sekundi iznosio 11 kWh/t). Ovo smanjenje iznosilo je 15,4 %.

Uticaj mešanja ugljeva na karakteristike meljivosti obrađena je u radu [62]. Generalno gledano, mešanjem ugljeva vrednosti HGI ne ispoljavaju karakteristike aditivnosti. Usled toga ne postoji opšti metod predviđanja vrednosti HGI mešavine ugljeva već se on mora eksperimentalno odrediti od slučaja do slučaja. U tu svrhu autori su izabrali tri uglja od viskovolatilnog do antracita, sa različitim vrednostima HGI i analizali njihove mešavine. Dva uzorka uglja su imala niske vrednosti HGI (34 i 47) doke je treći uzorak imao 91.

Karakteristika svih izabranih ugljeva je nizak sadržaj pepela (6,3 – 9,3 % na suvoj osnovi) kako bi se smanjio uticaj mineralnih materija na meljivost. Od uzoraka su pravljene binarne mešavine sa 25, 50 i 75 % masenih udela. Vrednosti HGI binarne mešavine ugljeva je određen posle mešanja frakcija 0,60 – 1,18 mm odgovarajućih ugljeva u gore navedenim masenim udelima.

Rezultati eksperimentalnog određivanja vrednosti HGI pokazuju da Hardgrove indeks meljivosti nema svojstva aditivnosti kada je mešavina uglja niske i visoke vrednosti HGI (ima izrazito nelinearan karakter). Mešavina sastavljena od ugljeva sa nižim vrednostima HGI je pokazala veću linearnost (aditivnost). Međutim, u svim slučajevima vrednost HGI mešavine se ne može predvideti iz pojedinačnih vrednosti HGI ugljeva i njihovih masenih udela u mešavini.

Autor u radu [63] povezuje meljivost (HGI) sa mehaničkim karakteristikama uglja, pri čemu naglašava praktičnost mehaničkih testova u predviđanju vrednosti HGI. Neke od karakteristika ugljeva sa kojima se povezuje vrednost HGI su tvrdoća, čvrstoća, karakteristike loma (energija loma i otpornost na lom), mikro tvrdoća po Vikersu, otpor sečenju. Pri tome dolazi do smanjenja vrednosti HGI kako vrednosti gore navedenih karakteristika rastu.

Korišćeni ugalj za analizu je turski lignit iz Cayirhan basena. Basen se sastoji od dva proslojka uglja razdvojeni glinom. Tehnička analiza je dala sledeće rezultate (maseni udeli): sadržaj ugljenika – 23,94 %, sadržaj vlage – 22,06 %, sadržaj pepela – 30,17 % i sadržaj sumpora 4,02 %. Toplota moć uglja je iznosila 12008 kJ/kg. Srednje vrednosti HGI analiziranih proslojaka iznosile su 34,57 – 64,80.

Autori su u radu pokušali da povežu karakteristike tvrdoće uglja sa vrednostima HGI. Tvrdoća uglja je analizirana Šorovim skleroskopom, Šmitovim čekićem (sklerometarska

tvrdoća) i utiskivanjem konusa (NCB cone indenter) i kugle (point load test) u cilju dobijanja jednoaksijalne tvrdoće uglja na pritisak.

Analizom eksperimentalnih podataka došlo se do dobre korelacije između vrednosti HGI i tvrdoće uglja po Šoru ($R^2 = 0,9983$, kvadratna zavisnost) i Šmitu ($R^2 = 0,9815$, linearna zavisnost). Između jednoaksijalne čvrstoće uglja na pritisak i vrednosti HGI dobijena je linearna zavisnost ($R^2 = 0,9874$).

Autori zaključuju da je za ispitivane ugljeve moguće koristiti eksperimentalno dobijene podatke o tvrdoći ugljeva u cilju procene vrednosti HGI, pri čemu daju prednost korišćenju podataka o tvrdoći dobijenih po Šoru i Šmitu.

U radu [64] autori analiziraju mogućnost određivanja vrednosti HGI u zavisnosti od podataka flotacijske analize ugljeva. U tu svrhu iskoristili su dva različita uglja (jedan sa površinskog kopa vrednosti $HGI = 110$, a drugi iz podzemnog kopa vrednosti $HGI = 76$).

Oba uglja su flotacijskom analizom podelili u sedam oblasti specifičnih gustina, i za svaku od oblasti izvršili određivanje vrednosti HGI. Vrednosti HGI celog uzorka uglja su dobili na osnovu masenih udela pojedinih frakcija i vrednosti HGI svake frakcije. Takođe, u cilju poređenja, izvršeno je eksperimentalno određivanje vrednosti HGI celog uzorka. Proračunom dobijene vrednosti se slažu sa eksperimentalnim.

Vrednosti HGI opadaju kako specifična gustina frakcije raste. Na primer vrednost HGI frakcije čija je specifična gustina manja od 1,3 iznosio je 95, a frakcije specifične gustine veće od 1,8 iznosio je 71. Izračunata vrednost HGI celog uzorka iznosila je 74.

Regresionom analizom, autori su dobili linearnu zavisnost između kumulativne srednje vrednosti specifične gustine i vrednosti HGI frakcija, sa koeficijentom determinacije R^2 većim od 0,9.

Autori su u radovima [65, 66, 67] unapredili metodu karakterizacije mlevenja uglja u mlinovima. U prvom radu [65] daju opis modifikovane eksperimentalne instalacije i rezultate eksperimenta na dva različita uglja. Ideja autora je da se dobije veza između energije potrebne za mlevenje i granulometrijskog sastava. Standardni Hardgrove mlin je modifikovan pridodatim uređajem za merenje momenta, pri čemu se uspostavalja veza između ulaza i izlaza iz mlina.

Za eksperiment su korišćena dva različita uglja koja se sagorevaju u termoelektranama, prvi australijski, vrednosti $HGI = 53$, veoma abrazivan i sa udelom pepela od 30 % (osnova suva na vazduhu). Analiza pepela ovog uglja je dala visoke udele SiO_2 i Al_2O_2. Drugi ugalj je kineski vrednosti $HGI = 80$ i udela pepela 34 % (osnova suva na vazduhu). Sadržaj pirita u ovom uglju na osnovu analiza je bio visok. Uzorci uglja su uzeti sa trake pre ulaska u mlinove, zatim su razvrstani prema raziličitim veličinama frakcije i relativne gustine.

Izvršene su dve vrste testova. Prvi test je imao za cilj da ustanovi vezu između energije potrebne za mlevenje uglja i veličine čestica uglja. U tu svrhu, uzorci uglja su podeljeni na četiri frakcije i tretirani u eksperimentalnom mlinu tokom četiri vremenska perioda (razlitiče energije). Drugi test je tzv. višekomponentni test, pri čemu je ugalj podeljen na četiri grupe u zavisnosti od relativne gustine a zatim na četiri frakcije kao iz prvog testa. Svaki ovako dobijeni uzorak je tretiran u mlinu tokom četiri vremenska perioda (ukupno 64 testova). Umesto standardnih 50 g uzorka za Hardgrove mlin, autori su tretirali 60 ml uzorka u cilju održanja stalne visine napunjenosti posude. Po završetku mlevenja, vršena je sitovna analiza samlevenog uglja u mlinu.

Sitovna analiza je vršena u cilju dobijanja podatka o parametru t_{10} koji se koristi u predloženom modelu. Na primer, za frakciju 0,6 – 1,18 mm (geometrijska sredina frakcije iznosi 0,84) na ulazu u mlin, ako je $t_{10} = 20$ to znači je u produktu mlina 20 % čestica uglja ima manje dimenzije od 0,084 mm (jedna desetina od 0,84 mm). Pored parametra t_{10}, postoje i drugi (t_2, t_4, t_{25}, t_{50}, t_{75}) između kojih postoji zavisnost koja se može odrediti [66, 68]. Na primer, za Hardgrove test, koristi se masa frakcije koja propada kroz sito dimenzija otvora 0,075 mm, što je ekvivalentno parametru $t_{11,2}$.

Analizom eksperimentalnih rezultata, autori su zaključili da čestice većih dimenzija daju veće vrednosti t_{10} kada se izlože istoj specifičnoj energiji. Na primer uzorak specifične gustine manje od 1,4 (što odgovara čistoj ugljenoj materiji), pri specifičnoj energiji 2 kWh/t, frakcija 0,6 – 1,18 mm daje $t_{10} = 10$, dok je za frakciju 3,35 – 4,75 mm $t_{10} = 35$. Efekat dimenzija čestice je izraženiji za uzorke manjih specifičnih gustina (pri istim uslovima, za čestice specifične gustine veće od 1,8, razlika u vrednosti t_{10} je 12 jedinica). Jedan od nedostataka Hardgrove metode je da se koristi samo jedna frakcija u

mlinu, pri čemu se rezultati primenjuju na ceo opseg frakcija koje ulaze u mlin uglja u termoelektrani, što može dovesti do nepreciznog određivanja kapaciteta mlina.

Takođe, na osnovu rezultata je pokazano da se komponente uglja veće gustine (relativna gustina veća od 1,8, što odgovara mineralnim materijama u uglju) teže melju, tj. daju niže vrednosti t_{10} (i obrnuto) a pri istim specifičnim energijama za mlevenje. Kako se dimenzije čestica smanjuju, tako se i uticaj gustine na vrednosti t_{10} smanjuje. Za frakciju 0,6 – 1,18 mm uticaj gustine u potpunosti se može zanemariti. Međutim, čestice uglja većih dimenzija, imaju izražen efekat gustine. Kako je njih znatno teže mleti, imaju tendenciju da se duže zadržavaju u mlinu. Akumulacijom ovih čestica u mlinu, njegov kapacitet opada. Ovaj fenomen nije moguće predvideti standardnim Hardgrove testom.

Nastavljajući eksperimente [66], autori su razvili tzv. višekomponentni model usitnjavanja kako bi povezali energiju utrošenu u mlinu sa veličinom čestica i njihovom gustinom. Naime, na osnovu modela, moguće je analizirati usitnjavanje (mlevenje) čestica kada se na njih deluje određenom specifičnom energijom, ili sa druge strane dobiti podatak koliko je energije potrebno uložiti da bi se dobila željena količina frakcije (stepen usitnjavanja). Na osnovu prethodnih radova [69], autori su razvili sledeći model koji povezuje energiju sa dimenzijama čestica

$$t_{10} = \frac{M}{\left(\frac{RD}{RD_{\min}}\right)^{c}} \cdot \left[1 - \exp\left(-f_{mat} \cdot x \cdot E\right)\right], \tag{9.36}$$

gde su

M, % – maksimalna vrednost t_{10} materijala koji se melje,

x, m – početna dimenzija materijala,

RD, – – relativna gustina čestice,

$RD_{\min}$, – – minimalna relativna gustine čestice (za ugalj iznosi 1,25),

c, – – parametar,

f_{mat}, – – parametar modela,

E, J/kg – specifična energija za mlevenje.

Specifična energija za mlevenje E se može odrediti na osnovu podatka o obrtnom momentu mlina i masi uglja koji se melje

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot \overline{T}}{m}, \ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}, \tag{9.37}$$

gde su:

N, s^{-1} – broj obtaja mlina,

$\overline{T}$, Nm – srednja vrednost obrtnog momenta,

m, kg – masa uglja koji se melje.

Kao rezultat model predviđa vredost t_{10} koja predstavlja kumulativni procenat produkta čiji je propad 1/10 početne veličine frakcije. Parametar predstavlja finoću proizvoda kada se melje određenom energijom.

Autori su izvršili kalibraciju i validaciju modela na osnovu eksperimentalnih rezultata na uzorcima ugljeva, pri čemu su dobili zadovoljavajuće rezultate.

Koristeći razvijeni model, predložen je novi metod koji povezuje vrednosti parametra t_{10} sa vrednostima HGI [67]. Autori su pošli od pretpostavke da je uticaj sastava uglja, frakcione i tehničke analize, kao i petrografskog sastava obuhvaćen parametrima modela koji su razvili.

Za ulaznu frakciju Hardgrove postupka 0,6 – 1,18 mm veličina t_{10} ima vrednost $t_{10} = \frac{1}{10} \cdot \sqrt{0,6 \cdot 1,18} = 0,084$ mm. To znači da će predloženi model kao rezultat dati podatak o procentu uglja čiji će propad biti ispod 0,084 mm. Za dobijanje vrednosti HGI, koristi se masa uzorka uglja koja propadne kroz sito veličine otvora 0,075 mm što odgovara vrednosti $t_{11,2}$. Kao što je već navedeno, između ova dva parametra postoji jednoznačna zavisnost koja se može odrediti. Autori su dobili da je ta veza u slučaju ispitivanih uzoraka uglja linearna $t_{11,2} = 0,9266 \cdot t_{10} - 0,2417$ ($R^2 = 0,999$). To znači, primenom predloženog modela, poznavajući vrednost parametra t_{10}, može se izračunati vrednost HGI.

Kako bi se došlo do podatka o vrednosti HGI neophodno je definisati veličine u modelu. Veličina x ima konstantnu vrednost od 0,84 mm. Specifična gustina se dobija na osnovu flotacijskih eksperimenata, a srednja vrednost momenta, u slučaju konstantne veličine čestica iz izraza $\overline{T} = c_0 + c_1 \cdot \ln RD$ (gde se konstante c_0 i c_1 dobijaju na osnovu izmerenih vrednosti obrtnog momenta). Specifična energija se izračunava na osnovu gore navedenog izraza pri čemu je $N = 60\ \mathrm{s}^{-1}$ a $m = 0,05\ \mathrm{kg}$. Na osnovu kalibrisanog modela (na osnovu poznatih eksperimentalnih podataka o uzorcima, dobijene su vrednosti parametara M, c i f_{mat}) izračunava se vrednost t_{10} odnosno $t_{11,2}$, a zatim i vrednost HGI. Primenom ovog modela, dobijene vrednosti HGI su bile u okviru ±5 jedinica, što se smatra zadovoljavajućim.

Standardnim eksperimentom za određivanje vrednosti HGI, autori su izmerili potrošnju energije u opsegu 1,67 – 2,03 kWh/t. Razlika u potrošnji energije se može objasniti promenama vrednosti koeficijenta trenja materijala koji se melje, zatim udelom vlage i oblikom čestica. Kako se energija menja, menjaće se i količina propada kroz sito veličine otvora 0,075 mm odnosno vrednosti HGI.

Predloženim modelom, može se i objasniti nelinearna zavisnost kapaciteta mlina od vrednosti HGI. Na primer, razlika u kapacitetu mlina pri promeni vrednosti HGI uglja od 40 na 50 je znatno veća od razlike pri promeni vrednosti HGI od 80 na 90 (slika 7.1, poglavlje 7). Objašnjenje ovog fenomena leži u količini energije koje se koristi za mlevenje uglja a pri istom izlaznom kapacitetu mlina. Autori su izveli simulaciju proračuna potrebne energije da se dobije isti kapacitet mlina (da propad iznosi 20 % kroz sito veličine otvora 75 μm) a za promene vrednosti HGI uglja sa 40 na 50, odnosno 80 na 90. Rezultati pokazuju, da za isti kapacitet mlina a pri promeni vrednosti HGI sa 50 na 40, energija koja se koristi za mlevenje se povećava sa 6 kWh/t na 8,1 kWh/t. Za promenu od istih 10 jedinica (sa 90 na 80), potrošnja energije se povećava sa 2,8 kWh/t na 3,3 kWh/t.

Autori su zapazili još jednu zanimljivost tokom istraživanja koja se može objasniti predloženim modelom. Australijski ugalj koji je korišćen u eksperimentima imao je vrednost HGI od 53, a kineski 80. Usled ove razlike, moglo bi se pretpostaviti da kineski mlinovi imaju veći kapacitet nego australijski. Međutim, podaci govore da je efikasnost korišćenja energije za mlevenje uglja slična kod oba mlina. Na primer, za ulaznu frakciju od 2 mm (koja je bliska frakciji uglja koji ulazi u Hardgrove mlin) i

relativne gustine 1,4, kineski ugalj ima vrednost $t_{10} = 35,3$ a australijski $t_{10} = 23,2$, što je razlika od 12,1 % (relativno 52 %). Može se primetiti i da je razlika u vrednosti HGI 51 %. Međutim, kako ulazna frakcija uglja raste, na primer na 4 mm, razlika u vrednosti t_{10} pada na 9,3 %, tj. kako frakcija uglja na ulazu u mlin raste, tako se razlike u vrednosti t_{10} sve više smanjuju. Tipično, ulazna frakcija uglja u mlinovima termoelektrana iz kojih su ispitivani uzorci uglja je oko 30 mm. Iz svega navedenog proizilazi, da se Hardgrove postupak ispitivanja vrši samo na česticama manjih dimenzija, i pretpostavlja da se čestice veličine preko 30 mm do ispod 0,075 mm usitnjavaju na isti način, što nije validna pretpostavka. Zbog toga se prilikom korišćenja podataka o vrednosti HGI, mora uzeti u obzir niz korekcija da bi se pravilno dimenzionisao mlin uglja.

Pored toga, relativna gustina čestica ima značajan uticaj na kapacitet mlina. Za relativne gustine čestica preko 2 (čiji sastav čine pretežno mineralne materije) razlika u vrednosti t_{10} iznosi 3,7 %. Mineralni sastav ispitivanih ugljeva je jako različit, australijski ima visok sadržaj oksida silicijuma i aluminijuma a kineski pirita. Čestice velike gustine se uglavnom nalaze u recirkulaciji mlina, pri čemu njihove karakteristike mlevenja imaju uticaj na kapacitet samog mlina. Iz tog razloga, kineski mlinovi imaju sličan kapacitet mlevenja kao i australijski bez obzira na veliku razliku u vrednostima HGI.

U literaturi [70] se mogu naći pokušaji da se Hardgrove postupak primeni i na šejlove a ne samo na ugljeve. Međutim, kako je njihova gustina različita od gustine uglja, umesto 50 g uzorka koji se unosi u mlin, neophodno je preći na odgovarajuću zapreminu uzorka. Standardni Hardgrove test favorizuje ugljeve veće gustine odnosno manje zapremine.

Osnova za prelazak na zapreminski a ne na maseni uzorak leži u činjenici da bi se standardizovao postupak mlevenja uzorak treba da sadrži odgovarajuću količinu čestica uniformnih dimenzija koje imaju konstantnu vrednost ukupne površine. U praksi to znači da uzorak treba pažljivo klasifikovati pri čemu treba imati konstantnu vrednost ukupne zapremine čestice uzorka, odnosno konstantnu nasipnu zapreminu uzorka.

Autori daju podake o zapreminama koje zauzimaju 50 g uglja i šejlova, koje se znatno razlikuju. Velikim brojem ispitivanja, dolaze do zaključka da je nezavisno od gustine,

optimalna zapremina uzorka za analizu u Hardgrove mlinu 75 cm^3 (ova zapremina je ekvivalentna masi uglja od 50 g). Ovu veličinu, autori opravdavaju eksperimentalnim podacima da se tom prilikom, količina produkta veličine ispod 0,075 mm, najmanje menja pri varijaciji veličine uzorka. Takođe, predlažu sledeći izraz za određivanje vrednosti HGI na zapreminskoj osnovi

$$HGI = 13 + 6,93 \cdot \frac{1,37}{\rho} \cdot m, \tag{9.38}$$

gde su

1,37, g/cm^3 – gustina tipičnog kamenog uglja čija zapremina od 75 cm^3 ima masu 50 g,

ρ, g/cm^3 – gustina uzorka uglja,

m, g – masa propada kroz sito veličine otvora 75 μm.

Koristeći predloženu korekciju, autori su u radu [71], poredili rezultate dobijene modifikovanim i standardnim Hardgrove testom. Standardna ispitivanja su izvršili na 30 uzoraka kamenih ugljeva, čiji se opseg vrednosti HGI kretao od 43 do 101, dok su za modifikovani test izabrali petnaest uzoraka. Poredeći rezultate uočili su da nema velikih odstupanja između standardnog i modifikovanog testa. Srednja vrednost odstupanja vrednosti HGI na 15 uzoraka iznosila je ±2.

10. Plan eksperimentalnih istraživanja

Eksperimentalna istraživanja obuhvatila su ugljeve niske toplotne vrednosti iz dva najveća domaća basena: kolubarskog i kostolačkog.

10.1. Pregled uzoraka ugljeva korišćenih za istraživanje

Uzorci iz kolubarskog basena (tabela 12.1) potiču iz perioda maj 2009 – mart 2012. godine (ukupno 65 uzoraka), dok iz kostolačkog basena (tabela 12.2) januar 2010 – februar 2010. godine (ukupno 24 uzorka). Uzorkovanje ugljeva (sem uzoraka 62 – 65 kolubarskog basena) vršeno je nakon njegove dopreme iz rudnika a pre ulaska u mlinsko postrojenje. Uzorci 62 – 65 (kolubarski basen) su uzeti sa polja C kolubarskog basena sa bušotina PR-2, PR-3 i PR-4 respektivno. Uzorkovanje i priprema uzoraka je vršena u skladu sa standardima SRPS B.H9.001 i SRPS B.H9.003.

Masa svakog od uzoraka je iznosila oko 5 kg, pri čemu je za određivanje tehničke analize i vrednosti HGI pravljen uzorak mase oko 2 kg dobijen standardnom procedurom uzimanja reprezentativnog uzorka. Od ovog uzorka masa od oko 0,5 – 1 kg je korišćena za petrografska i organo-geohemijska ispitivanja.

Za petrografska i organo-geohemijska ispitivanja izabrano je 11 uzoraka kolubarskog basena i 13 uzoraka kostolačkog basena. Izbor uzoraka je obavljan na način da se njima pokrije cela oblast prethodno određenih vrednosti HGI, tj. da se obuhvate minimalne i maksimalne vrednosti.

10.2. Određivanje vrednosti HGI

Određivanje vrednosti HGI uzoraka uglja izvršeno je u skladu sa standardom ISO 5074 u Laboratoriji za procesnu tehniku na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Na osnovu dostupne literature ova metoda određivanja vrednosti HGI je najčešće korišćena u svetu. U tu svrhu se koristila sledeća oprema definisana standardom:

- drobilica za drobljenje i pripremu krupnijih komada uglja,
- mlin za pripremu uzorka uglja do zahtevanog opsega krupnoće,
- razdelnik uzorka 0 – 10 mm i 0 – 5 mm,

- uređaj za prosejavanje (laboratorijska treskalica) – proizvodnja EKO-LAB, tip LAB-11-200;
- kontrolna laboratorijska sita, 4 komada, veličine otvora 4,75 mm, 1,18 mm, 0,6 mm i 0,075 mm, proizvođača EKO-LAB,
- vaga Gibertini, Italy, serijski broj 104355, opsega 0 – 10200 g sa podelom 0,1 g,
- vaga KERN tip 440-33N, Germany, serijski broj WCO 3175321, opsega 0 – 200 g sa podelom 0,01 g,
- sušara za sušenje uzoraka, proizvođač Sutjeska Beograd, serijski broj 85.113,
- Hardgrove mlin sa osam čeličnih kugli svaka prečnika 25,4 mm, proizvođača EKO-LAB, serijski broj 02.H/04.

Pored toga, izvršena su i određivanja vrednosti HGI pojedinih litotipova izabranih uzoraka uglja (11 uzoraka kolubarskog i 13 uzoraka kostolačkog basena) i to:

- kolubarskih uzoraka – zbirni uzorak barskog litotipa, strukturnog i trakastog ksilita,
- kostolačkih uzoraka – zbirni uzorak barskog litotipa, strukturnog i trakastog ksilita.

10.3. Pregled metoda tehničke analize ugljeva

Na svim uzorcima ugljeva obuhvaćenim ovom doktorskom disertacijom izvršena je tehnička analiza u skladu sa međunarodnim standardima i to:

- određivanje sadržaja isparljivih materija prema ISO 5071-1 – Brown coals and lignites – Determination of the volatile matter in the analysis sample;
- 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.

Tehnička analiza uzoraka ugljeva izvršena je u Laboratoriji za procesnu tehniku Mašinskog fakulteta u Beogradu.

10.4. Petrografske analize uzoraka ugljeva

Analiza litotipova uglja, urađena je na uzorcima koji su samleveni na maksimalnu veličinu čestica od 3 mm i osušeni na vazduhu. Nakon sušenja, izdvojeni su uzorci mase 100 g, a zatim je izvršeno izdvajanje litotipova i mineralnih materija pod binokularnom lupom. Nakon toga na analitičkoj vagi odmerena je masa svake izdvojene frakcije i izračunat je maseni udeo (izražen u procentima) različitih litotipova i tipova ksilita. Analiza litotipova uglja urađena je prema standardima Međunarodnog komiteta za petrologiju ugljeva i organsku petrologiju (International Committee for Coal and Organic Petrology – ICCP) [72]. Izdvajanje ksilitnog litotipa rađeno je prema podeli koju je razvio Jacob [19], a modifikovao Ercegovac [18].

Mikropetrografska ispitivanja uzoraka uglja izvršena su na preparatima koji su napravljeni od uglja granulacije zrna do 1 mm bez odsejavanja. Kvalitativno-kvantitativna analiza macerala urađena je na mikroskopu Lajc DMLP (LAITS DMLP) u normalnoj i ultraljubičastoj odbijenoj svetlosti sa objektivom uvećanja 40× i okularom uvećanja 10× uz upotrebu uljne imerzije na 500 mernih tačaka u uglju [72, 73]. Determinacija macerala i minerala, rađena je u skladu sa terminologijom razvijenom od strane Međunarodnog komiteta za petrologiju uglja i organsku petrologiju (ICCP) za huminite [13], liptinite [15, 72] i inertinite [16].

Petrografske analize izvršene su na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu na departmanu za Ekonomsku geologiju.

10.5. Organsko-geohemijska ispitivanja

Određivanje ukupne organske supstance

Postupak određivanja ukupne organske supstance je sledeći: odmerenim količinama uzoraka (oko 3 g, sa tačnošću ±0,1 mg) dodavana je hlorovodonična kiselina (u odnosu 1:1) u malim količinama, na sobnoj temperaturi, do prestanka razvijanja CO_2. Probe su uz povremeno mešanje ostavljane na vodenom kupatilu još 4 časa. HCl-koncentrati su

dekantovanjem preneti u gučeve, isprani toplom destilovanom vodom do negativne reakcije na hloridni jon i sušeni na temperature od 105 °C do konstantne mase.
Navedenim postupkom su iz uzoraka ugljeva uklonjeni karbonati, kao i neki lakše rastvorljivi sulfati, hloridi i druge soli slične rastvorljivosti.

Elementarna analiza organske supstance

Određivanje sadržaja organskog ugljenika izvršeno je nakon izdvajanja karbonata razblaženom hlorovodoničnom kiselinom (u odnosu 1:3 v/v) korišćenjem anlizatora Vario EL III CHNS/O. Sadržaji ugljenika C, vodonika H, azota N i sumpora S određivani su direktno, dok je sadržaj kiseonika O određen iz razlike do sadržaja sagorljivih materija.

Određivanje organsko-geohemijskih karakteristika

Za određivanje molekularnog sastava organske materije (OM) uzimano je oko 5 g sprašenog uzorka (frakcija ispod 150 μm) koji je pomešan sa standradnim inertnim materijama i homogenizovan. Ekstrakcija bitumena je izvršena korišćenjem Dionex ASR 200 aparature sa dihlormetanom u trajanju od 1 h, pri temperaturi od 75 °C i pod pritiskom od 50 bar. Posle ekstrakcije najveći deo rastvarača izdvojen je u vakumskom isparivaču Zymark Turbo Vap 500. Ekstrakt je rastvoren u mešavini *n*-heksana i dihlormetana (u odnosu 80:1 v/v) a asfalteni su izdvojeni centrifugiranjem. Izolovanje rastvorljive frakcija organske materije (maltena) na zasićene ugljovodonike, aromatične ugljovodonike i NSO frakciju urađeno je na Kohnen-Willsch MPLC (medium pressure liquid chromatography – tečna hromatografija srednjeg pritiska) hromatografu prema standardnoj proceduri [74].
Zasićena i aromatična frakcija ugljovodonika analizirane su uz primenu gasnohromatografsko-masenospektrometrijske (GC-MS) tehnike i SIM (SIM – Single Ion Monitoring) metode. SIM metod zasniva se na identifikaciji i praćenju odabranog jona karakterističnog za neko jedinjenje ili klasu jedinjenja, tako da se ne mogu dobiti čitavi maseni spektri pojedinih jedinjenja. Sa druge strane ona je znatno osetljivija prema zadatim jonima. Kombinacija masenopektrometrijske i SIM metode, koja je ovom prilikom korišćena, daje najbolje rezultate u pogledu osetljivosti i precizne identifikacije. Korišćeni GC-MS sistem sastojao se od gasnog hromatografa Finnigan

MAT GCK sa silika kapilarnom kolonom. Kao noseći gas korišćen je helijum brzine protoka 1,5 cm^3/min. Kolona je od početne temperature od 70 °C zagrevana brzinom od 4 °C/min do 300 °C. Temperatura od 300 °C održavana je još 15 minuta. FID detektor, kuplovan sa kvadripolarnim masenim detektorom sa režimom očitavanja od 50 – 650 Daltona (0,7 eV/scan). Rezultati snimanja obrađeni su u softverskom paketu Finnigan GCK V.2.2. Identifikacija biomarkera izvršena je na osnovu vremena i poređenjem masenih spektara sa publikovanim podacima. Određivanje apsolutnih koncentracija biomarkera urađeno je poređenjem u odnosu na interne standarde (*n*-tetrakosane za alifatičnu frakciju i 1'1-binaptil za aromatičnu frakciju) i preračunate na sadržaj ukupnog organskog ugljenika radi poređenja sa literaturnim podacima. Relativni procenti i apsolutne koncentracije jedinjenja u frakcijama zasićenih i aromatičnih ugljovodonika određeni su poređenjem površine pikova pojedinačnih jedinjenja i površine standarda.
Gasnohromatografska-mesenospektrometrijska analiza zasićenih ugljovodonika izabranih uzoraka ugljeva (11 uzoraka kolubarskog basena i 13 uzoraka kostolačkog basena) rađena je na Univerzitetu u Leobenu, Departmanu za primenjenu geologiju i geofiziku (University of Leoben – Montanuniversität, Department for Applied Geosciences and Geophysics), Republika Austrija.

10.6. Analitičke metode

U cilju uspostavljanja korelacionih zavisnosti i izraza između vrednosti HGI i elemenata tehničke i petrografske analize, kao i za dobijanje izraza za kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje korišćen je softverski paket IBM SPSS Statistics i Microsoft Office Excel.

11. Geohemijske karakteristike ispitivanih uzoraka ugljeva (zbirni uzorak)

Organska supstanca od koje je nastao ugalj najvećim delom vodi poreklo od viših i nižih kopnenih biljaka, znatno manje od bakterija i gljiva i jako malo od fitoplanktona i zooplanktona. Zbog različitog porekla organske materije razlikuje se i raspodela i obilnost pojedinih biomarkera, kao i pojedinih klasa jedinjenja.

11.1. Sadržaj vlage i rezultati elementarne analize organske supstance

Ukupna vlaga predstavlja zbir grube i higroskopne vlage, tj, predstavlja svu vodu koja se nalazi u uzorku i čije uklanjanje ne menja hemijski sastav uglja. Gruba vlaga zavisi od stepena karbonifikacije uglja, petrografskog sastava, teksture i hidrogeoloških uslova ležišta. Higroskopna vlaga obuhvata higroskopnu vodu, veći deo kapilarne i jedan mali deo kristalne vode. Vezana je za poroznu strukturu uglja. Sadržaj vlage u analitičkom uzorku (higroskopne vlage) u ispitivanim uzorcima kreće se od 5,79 % u mumificiranom ksilitu kolubarskog basena do 10,29 % u dopleritskom ksilitu kostolačkog basena (tabela 11.1).

Hemijski sastav sagorljivog dela uglja, kao i stepen hemijske zrelosti ugljene supstance određuje se preko elementarne analize, odnosno sadržaja C, H, N, S i O. Litotipovi lignita kolubarskog i kostolačkog basena imaju relativno nizak sadržaj organskog ugljenika bez vlage (39,07 – 60,85 %; tabela 11.1) i relativno visok sadržaj vodonika (3,44 – 5,54 %), azota (0,20 – 0,96 %) i sumpora (0,39 – 2,30 %) bez vlage. Najniža vrednost ugljenika bez vlage (C^d_{org}) konstatovana je u barskom litotipu kolubarskog basena, a najviša u mumificiranom ksilitu kostolačkog basena. Najviša vrednost sadržaja vodonika (H^d_{org}) konstatovana je u mumificiranom ksilitu kostolačkog basena, a najniža u barskom litotipu kolubarskog basena. Svi litotipovi kolubarskog basena imaju nizak sadržaj organskog sumpora (S^d_{org}), dok su više vrednosti konstatovane u svim litotipovima kostolačkog basena, što može da ukazuje na blago redukcionu sredinu ili neutralnu do slabo alkalnu sredinu u kojoj je ugalj nastajao.

Tabela 11.1. Sadržaj vlage, organskog ugljenika, vodonika, azota, sumpora i atomski odnos ugljenik/azot u ispitivanim uzorcima

Oznaka uzorka	Sadržaj vlage u analitičkom uzorku, (%)	C^d_{org} (%)	H^d_{org} (%)	N^d_{org} (%)	S^d_{org} (%)	C/N
Kolubara						
Barski litotip	9,50	39,07	3,44	0,56	0,52	81,40
Mumificirani ksilit	5,79	48,08	4,52	0,20	0,46	280,47
Trakasti ksilit	7,82	57,72	5,31	0,39	0,39	172,67
Strukturni ksilit	8,20	56,88	4,90	0,52	0,53	127,62
Dopleritski ksilit	9,10	56,03	4,64	0,68	0,89	96,13
Kostolac						
Barski litotip	9,70	46,73	4,05	0,89	1,68	61,26
Mumificirani ksilit	7,66	60,85	5,54	0,57	2,30	124,55
Trakasti ksilit	8,35	59,78	5,32	0,52	1,09	134,12
Strukturni ksilit	9,22	55,14	4,75	0,78	1,36	82,47
Dopleritski ksilit	10,29	59,82	4,92	0,96	1,65	72,70

C^d_{org} – sadržaj organskog ugljenika bez vlage
H^d_{org} – sadržaj organskog vodonika bez vlage
N^d_{org} – sadržaj organskog azota bez vlage
S^d_{org} – sadržaj organskog sumpora bez vlage

Podaci iz elementarne analize, posebno atomski odnosi H/C i O/C koriste se za utvrđivanje tipova ugljene materije i određivanje mogućnosti njene konverzije. Različito poreklo organske materije ima uticaj na vrednosti atomskog odnosa C/N. Vrednosti ovog parametara preko 20 ukazuju na kopnenu floru [75, 76] kao prekursora organske materije, odnosno, vrednosti preko 40 ukazuju na više kopnene biljke [77]. Evidentno je da svi ispitivani uzorci vode poreklo od viših kopnenih biljaka. Izrazito visoke vrednosti (>100) ovog parametra konstatovane su u mumificiranom i trakastom ksilitu oba basena, kao i u strukturnom ksilitu kolubarskog basena, što može da ukazuje na više kopnene biljke u čijoj je građi ligninsko tkivo imalo dominantnu ulogu [78].

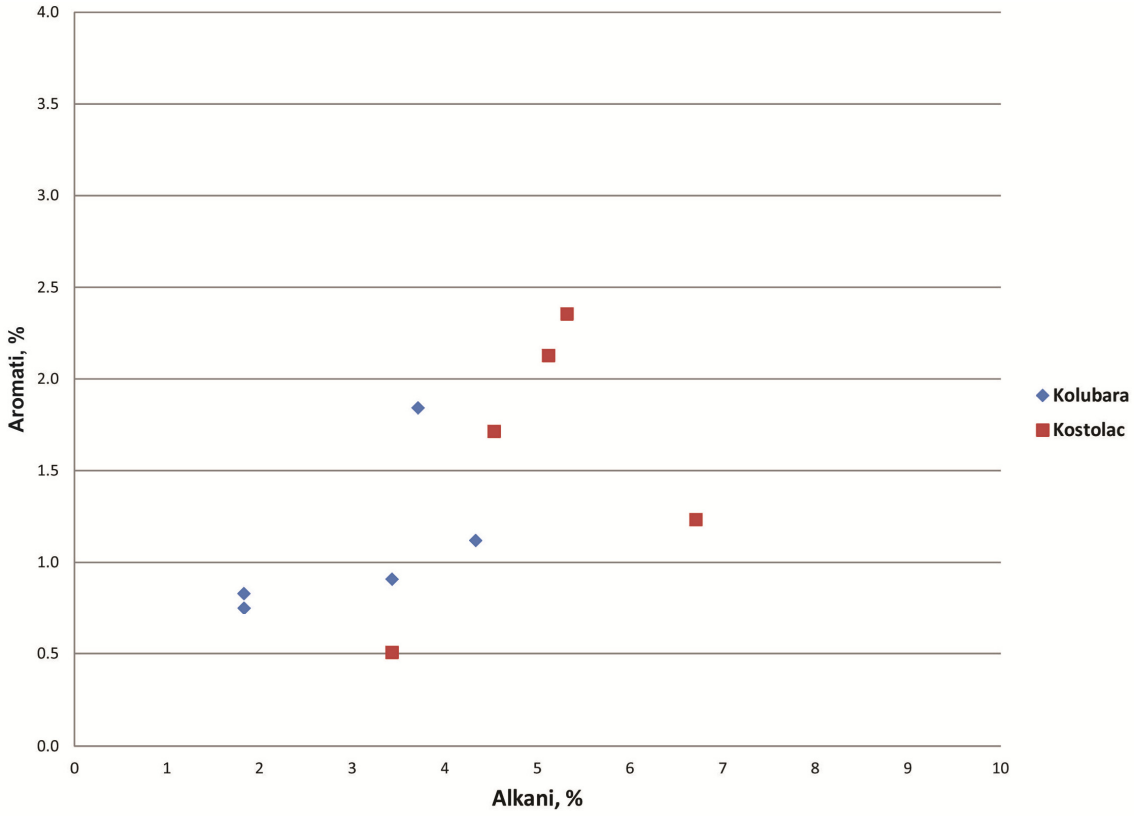
11.2. Grupni sastav bitumena

Grupni sastav bitumena (rastvorena organska supstanca) podrazumeva kvantitativno određivanje sadržaja alkanske, aromatične i NSO-frakcije i asfaltena. Sadržaj slobodnog bitumena u ispitivanim uzorcima kolubarskog i kostolačkog basena varira od 15,31 do 273,24 mg/g C_{org} (tabela 11.2), što je u granicama za mrke ugljeve Evrope [79, 80, 81, 82]. Najveći deo slobodnog bitumena u svim ispitivanim uzorcima izgrađuju

heterokomponente (NSO jedinjenja + asfalteni). Sadržaj alkana u ispitivanim uzorcima je nizak i kreće se od 1,83 % do 6,71 % (slika 11.1) i u granicama je za ugljeve sličnog ranga [79, 80, 81, 82]. Varijacije sadržaja alkana mogu da zavise od vrste organskog materijala, kao i intenziteta njihove biohemijske degradacije [83]. Ispitivani litotipovi i podtipovi ksilita imaju niske vrednosti sadržaja aromata (0,50 – 2,35 %) što je u granicama za ugljeve niskog ranga (lignite).

Tabela 11.2. Grupni sastav bitumena ispitivanih litotipova i podtipova lignita kolubarskog i kostolačkog basena

Oznaka uzorka	C^d_{org} (%)	Sadržaj slobodnog bitumena (mg/gC_{org})	Sadržaj ALKANA (%)	Sadržaj AROMATA (%)	Sadržaj NSO jed.+ gubitak (%)	Sadržaj ASFALTENA (%)
Kolubara						
Barski litotip	39,07	94,33	1,83	0,83	69,50	27,84
Mumificiran i ksilit	48,08	110,81	4,34	1,12	33,12	61,43
Trakasti ksilit	57,72	62,49	3,43	0,91	49,00	46,66
Strukturni ksilit	56,88	49,88	1,83	0,75	71,20	26,21
Dopleritski ksilit	56,03	22,12	3,71	1,84	48,17	46,27
Kostolac						
Barski litotip	46,73	27,60	5,32	2,35	56,84	35,48
Mumificiran i ksilit	60,85	273,24	3,43	0,50	73,84	22,22
Trakasti ksilit	59,78	46,57	6,71	1,23	45,63	46,42
Strukturni ksilit	55,14	30,26	4,53	1,71	55,95	37,80
Dopleritski ksilit	59,82	15,31	5,12	2,13	50,00	42,75



Slika 11.1. Dijagram sadržaja alkana i aromata litotipova i podtipova lignita kolubarskog i kostolačkog basena

11.3. Alkani

Alkanska frakcija bitumena barskog i različitih tipova ksilitnih litotipova odlikuje se visokim učešćem diterpana (tabela 11.3), naročito u ksilitnim litotipovima, niskim sadržajem *n*-alkana, seskviterpana i niskim sadržajem steroida i hopanoida, sem u barskom litotipu kolubarskog basena.

Tabela 11.3. Sadržaj *n*-alkana, seskviterpana, diterpana, triterpana, steroida i hopanoida u alkanskoj frakciji

Oznaka uzorka	Sadržaj *n*-alkana (μg/gC_{org})	Sadržaj seskvi-terpana (μg/gC_{org})	Sadržaj diterpana (μg/gC_{org})	Sadržaj triterpana (μg/gC_{org})	Sadržaj steroida (μg/gC_{org})	Sadržaj hopanoida (μg/gC_{org})
Kolubara						
Barski litotip	254,93	55,77	613,77	41,72	22,34	151,33
Mumificirani ksilit	75,72	37,91	3153,69	11,23	1,11	3,39
Trakasti ksilit	84,28	17,27	2237,88	21,67	1,14	61,25
Strukturni ksilit	77,37	22,26	322,09	11,78	2,84	45,49
Doplerits ki ksilit	53,37	21,65	367,28	27,59	7,20	76,69
Kostolac						
Barski litotip	125,68	80,50	652,46	45,73	8,03	21,72
Mumificirani ksilit	41,64	46,33	8488,70	12,12	2,84	9,29
Trakasti ksilit	19,27	20,96	1733,80	10,33	0,62	5,15
Strukturni ksilit	74,48	59,18	866,87	30,74	7,40	14,13
Doplerits ki ksilit	50,97	20,68	350,73	25,37	6,88	9,56

11.3.1. *n*-alkani

n-alkani organske supstance su klasa jedinjenja koja je do sada najviše ispitivana tokom razvoja organske geohemije [84, 85]. U naftama oni predstavljaju najobilniju klasu organskih jedinjenja, dok je kod ugljeva njihova obilnost znatno manja i zavisi od uslova sedimentacije, porekla organske materije i stepena zrelosti. Gasnohromagofrafskim (GC) i gasnohromatografsko-masenospektrometrijskim (GC-MS) metodama u ugljevima su identifikovani *n*-alkani do 40 ugljenikovih atoma C_{40} [86], a u naftama sa 120 C-atoma [87, 88]. *n*-alkani se najčešće identifikuju GC- ili GC-MS-analizom fragmentograma jona *m/z* 71 [89].

Alkani normalnog niza u ugljevima obuhvataju članove nižih homologa, do 20 ugljenikovih atoma (<*n*-C_{20}), srednjih homologa, sa 21 do 25 ugljenikovih atoma (*n*-C_{21} do *n*-C_{25}) i viših homologa sa 27 do obično 33 ugljenikovih atoma (*n*-C_{27} – *n*-C_{33}). Niži

n-alkani (<*n*-C_{20}) vode poreklo od zelenih i modrozelenih algi i mikroorganizama [90] sa maksimumom na nižim članovima (*n*-C_{15}, *n*-C_{17}) i sa ujednačenom raspodelom neparnih i parnih homologa [91]. Srednjelančani *n*-alkani u ugljevima (*n*-C_{21-25}) vode poreklo od zeljastih biljaka [92], *Sphagnum*-a i/ili sumerznih i flotantnih biljaka [93, 94], mikroalgi i cijanobakterija [95, 96]. Novija istraživanja [97] ukazala su na visok sadržaj srednjelančanih homologa *n*-alkana u semenju i mladarima miocenskih četinara tipa *Taxodium balticum*, *Athrotaxis couttsiae,* i *Pinus paleostrobus* sa maksimumom na parnim ugljenikovim atomima (*n*-C_{24} kod *Athrotaxis* i *Pinus*). Preovlađivanje neparnih nad parnim homolozima *n*-alkanske frakcije može da ukazuje na degradaciju *n*-alkana niže molekulske mase od strane mikroorganizama [98, 99, 100].

Biljni voskovi, koji ulaze u sastav spora, polena, kutikula, ploda i semena biljaka, najčešće sadrže *n*-alkane u opsegu od *n*-C_{10} do *n*-C_{40}, sa *n*-C_{27}, *n*-C_{29} i *n*-C_{31} kao najzastupljenijim, dok su članovi do devetnaest (*n*-C_{19}) i preko trideset tri (*n*-C_{33}) ugljenikova atoma znatno manje zastupljeni [101]. Osim *n*-alkana voskovi sadrže i alifatične alkohole u opsegu od *n*-C_{24} do *n*-C_{36} sa dominacijom parnih članova, masne kiseline u opsegu od *n*-C_8 do *n*-C_{26} sa dominacijom *n*-C_{16} i *n*-C_{18} i oksikiseline sa 12 do 26 ugljenikovih atoma [102]. Biljni voskovi viših homologa su poznati kao biomarkeri viših kopnenih biljaka [101]. Tokom rane dijageneze pod dejstvom mikroorganizama oni obično bivaju degradovani u aldehide, ketone i alkane [99, 103]. Daljom degradacijom aldehida uglavnom nastaju *n*-alkani sa dominacijom neparnih članova. Sa porastom maturisanosti dolazi do ujednačavanja sadržaja neparnih i parnih homologa, tako da se *n*-alkanski maksimum pomera ka alkanima manje molekulske mase. Ove promene se ogledaju u vrednostima CPI (Carbon Preference Index) i OEP (Odd-Even Preference) koje se približavaju jedinici ili su čak i manje od jedinice.

Odnosi *n*-alkana sa neparnim i parnim brojem C-atoma, označeni kao CPI (Carbon Preference Index) ili OEP (Odd-Even Preference), raspodela *n*-alkana, *n*-alkanski maksimum i izotopski profil pojedinačnih *n*-alkana su parametri koji se najviše koriste u organsko-geohemijskim istraživanjima. U literaturi je poznato nekoliko formula za izračunavanje CPI-a, odnosno OEP-a. Za izračunavanje vrednosti CPI kod ugljeva najčešće se koristi formula koju su predložili Brej i Evans, 1961. godine [104]:

$$CPI = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(n-C_{25}+n-C_{27}+n-C_{29}+n-C_{31}+n-C_{33}\right)}{\left(n-C_{24}+n-C_{26}+n-C_{28}+n-C_{30}+n-C_{32}\right)} + \\ + \frac{\left(n-C_{25}+n-C_{27}+n-C_{29}+n-C_{31}+n-C_{33}\right)}{\left(n-C_{26}+n-C_{28}+n-C_{30}+n-C_{32}+n-C_{34}\right)}. \tag{11.1}$$

Raspodela *n*-alkana zavisi od oksido-redukcionih uslova, kao i pH vrednosti u kojima je deponovana organska materija [105]. Pri redukcionim uslovima usled redukcije kiselina i alkohola sa parnim brojem ugljenikovih atoma stvaraju se *n*-alkani sa parnim brojem C-atoma. U oksidacionim uslovima najpre se vrši oksidacija alkohola do kiselina, a zatim se dekarboksilacijom stvorenih kiselina povećava sadržaj *n*-alkana sa neparnim brojem C-atoma. Treba naglasiti da dekarboksilaciju ubrzava prisustvo monmorijonita, tako da od *n*-kiselina sa parnim brojem C-atoma postaju *n*-alkani sa neparnim brojem C-atoma. U karbonatnim sedimentima dekarboksilacijom *n*-kiselina sa parnim brojem C-atoma postaju *n*-alkani sa parnim brojem C-atoma.

U alkanskoj frakciji bitumena ispitivanih uzoraka kolubarskog i kostolačkog basena, sadržaj *n*-alkana je viši kod barskog litotipa i nizak kod različitih tipova ksilita (tabela 11.3). Generalno posmatrano svi litotipovi kostolačkog basena imaju niži sadržaj *n*-alkana u odnosu na iste litotipove kolubarskog basena. Sadržaj *n*-alkana izračunat je iz gasnog hromatograma ukupne alkanske frakcije bitumena uglja (TIC – Total Ion Current).

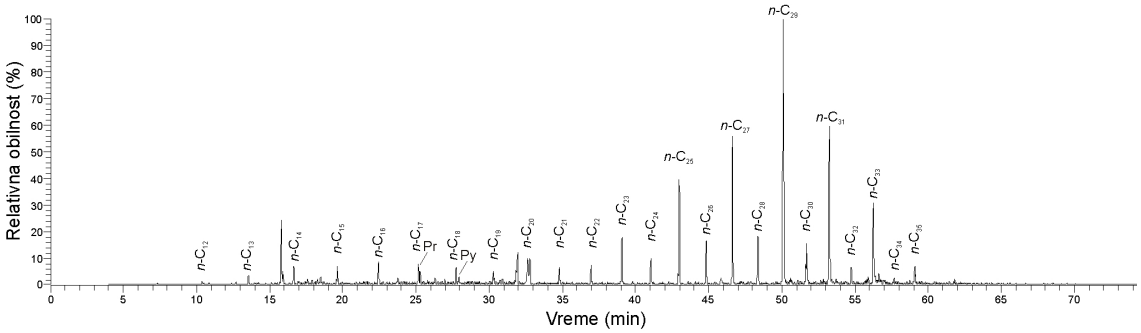
Sadržaj *n*-alkana u barskom litotipu iz oba basena je znatno viši (tabela 11.3) u odnosu na različite podtipove ispitivanih ksilita. Deponovanje heterogene, alohtone organske materije koja je bila bogatija humusnim detritusom različitog porekla i kopnenih liptinita (spore, polen, kutikule, suberin, smole, voskovi itd), koje je dovelo do stvaranja barskog litotipa, uticalo je na viši sadržaj *n*-alkana.

Raspodela *n*-alkana bitumena svih ispitivanih uzoraka kolubarskog i kostolačkog basena (slika 11.2) odlikuje se višim vrednostima odnosa viših homologa u ukupnoj *n*-alkanskoj frakciji (n-$C_{27\text{-}33}/\Sigma n$-$C_{12\text{-}33}$) sa maksimumima na n-C_{29}. Vrednosti CPI su visoke i kreću se od 1,23 do 5,36 (tabela 11.4) i zajedno sa *n*-alkanskim maksimumom ukazuju na više kopnene biljke kao prekursore. Nešto viši sadržaj srednjih homologa konstatovan je u mumificiranom ksilitu oba basena. Neparni homolozi preovlađuju nad parnim, što može da se javi kao posledica degradacije *n*-alkana niže molekulske mase

od strane mikroorganizama [98, 99, 100]. Nešto više obilnosti nižih homologa konstatovane su samo u mumificiranom ksilitu iz oba basena, a možda su mogle da nastanu kao rezultat razgradnje *n*-masnih kiselina u jako redukcionim uslovima [106]. Obzirom na izrazito nizak sadržaj *n*-alkana u ksilitnim litotipovima i izrazitu dominaciju diterpana (tabela 11.3), evidentno je da su više kopnene biljke, i to četinari, dali najveću masu za stvaranje barskog i ksilitnih litotipova kod lignita kolubarskog i kostolačkog basena.

Tabela 11.4. *n*-alkanski maksimum, odnosi nižih, srednjih i viših homologa i ukupnih *n*-alkana i CPI, u alkanskoj frakciji bitumena uzoraka lignita iz kolubarskog i kostolačkog basena

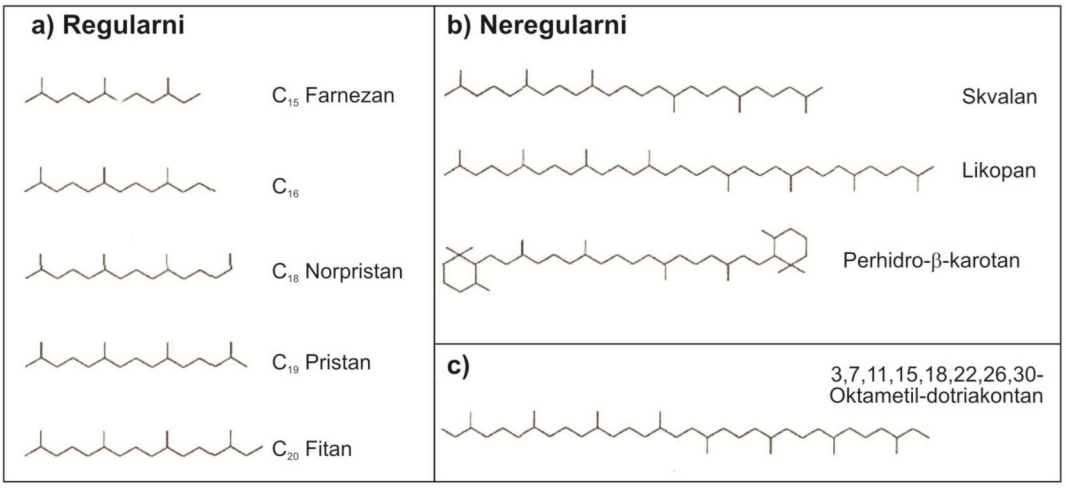
Oznaka uzorka	*n*-alkanski maksimum (n-C_{max})	n-C_{13-19}/ Σn-C_{12-33}	n-C_{21-25}/ Σn-C_{12-33}	n-C_{27-33}/ Σn-C_{12-33}	CPI
Kolubara					
Barski litotip	n-C_{29}	0,08	0,14	0,55	2,24
Mumificirani ksilit	n-C_{29}	0,27	0,20	0,34	1,23
Trakasti ksilit	n-C_{29}	0,21	0,18	0,55	5,36
Strukturni ksilit	n-C_{29}	0,11	0,15	0,57	2,73
Dopleritski ksilit	n-C_{29}	0,05	0,13	0,67	2,94
Kostolac					
Barski litotip	n-C_{29}	0,17	0,12	0,49	2,98
Mumificirani ksilit	n-C_{29}	0,22	0,24	0,44	2,21
Trakasti ksilit	n-C_{29}	0,16	0,14	0,56	2,30
Strukturni ksilit	n-C_{29}	0,09	0,15	0,54	3,97
Dopleritski ksilit	n-C_{29}	0,05	0,13	0,67	2,94



Slika 11.2. Raspodela n-alkana u alkanskoj frakciji bitumena barskog litotipa kolubarskog basena (Pr – Pristan, Py – Fitan)

11.3.2. Izoprenoidni alkani

Veći broj izoprenoidnih alkana identifikovan je u bitumenima starih i recentnih sedimenata. Na osnovu vrste izoprenskog vezivanja podeljeni su na tri glavna tipa [107]. Regularni izoprenoidi (tip I, slika 11.3a), karakterišu se „glava-rep“ izoprenskim vezivanjem i tu spadaju farnezan (C_{15}), izoprenoid sa 16 ugljenikovih atoma, norpristan (C_{18}), pristan (C_{19}), fitan (C_{20}), i drugi homolozi do C_{45} [102]. U neregularne izoprenoide (tip II, slika 11.3b) koji imaju jednu „rep-rep“ vezu u seriji vezivanja „glava-rep“ spadaju skvalan, perhidro-β-karotan i likopan i verovatno imaju algalno poreklo. Neregularni izoprenoidi koji u seriji „glava-rep“ izoprenskog vezivanja imaju jednu „glava-glava“ vezu pripadaju tipu III i identifikovani su u različitim vrstama bakterija. Izoprenoid ovog tipa je 3,7,11,15,18,22,26,30-oktametildotriakontan (slika 11.3c). Osim izoprenoida nasleđenih iz živih organizama, određeni broj izoprenoida se strukturno transformiše u ugljovodonične oblike tokom procesa dijageneze, a tokom katageneze usled termičke degradacije kerogena, bitumen biva obogaćen novim izoprenoidnim molekulima [107]. Izoprenoidni alkani se najčešće identifikuju GC ili GC-MS-analizom preko fragmentograma jona *m/z* 183 [89].



Slika 11.3. Najznačajniji regularni i neregularni izoprenoidni alkani [107]

Pristan (Pr) i fitan (Py) predstavljaju najvažnije regularne izoprenoide u naftama, bitumenima sedimenata, ugljeva i uljnih šejlova. Nastaju od fitola, izoprenoidnog alkohola hlorofila. U oksidacionoj sredini od fitola nastaje fitenska kiselina, čijom

dekarboksilacijom nastaje pristen, a hidrogenizacijom pristena stvara se pristan. U redukcionoj sredini od fitola nastaje dihidro-fitol, koji tokom procesa dehidratacije i hidrogenizacije prelazi u fitan. Tokom krakovanja fitana mogu nastati i neki niži izoprenoidi. Osim fitola prekursori pristana i fitana mogu biti hlorofil *b*, α- i β-tokoferol, karotenoidni pigmenti i komponente membrane *archaebacteria* [108, 109, 110, 111, 112].

Relativni odnos sadržaja pristana i fitana (Pr/Py) je najpoznatiji i najčešće primenjivani izoprenoidni parametar za procenu redoks uslova sredine taloženja [113]. Ređe se koristi kao indikator maturisanosti. Vrednosti ovog odnosa preko 1 ukazuju na oksidacione, a vrednosti ispod 1 na redukcione uslove tokom deponovanja organske materije [91, 114]. Utvrđeno je da kod nematurisanih uzoraka odnos pristan/fitan > 3,0 ukazuje na kopneno poreklo organske materije koja je deponovana u oksidacionoj sredini, dok odnos pristan/fitan manji od 0,6 ukazuje na marinske uslove i jako redukcionu sredinu [115].

Odnosi pristana i fitana sa *n*-alkanima C_{17} i C_{18} (Pr/*n*-C_{17} i Py/*n*-C_{18} [116]) povezan je sa početkom istraživanja nafte. Pomenuti parametri su obrnuto proporcionalni maturisanosti nafti srodnog porekla, koje su nastale u sličnim oksido-redukcionim uslovima [117]. Kod ugljeva ova dva parametra nisu našla značajniju primenu.

Odnos pristana i fitana (slika 11.2) u ispitivanim uzorcima iz kolubarskog i kostolačkog basena kreće se od 1,03 do 1,39 (tabela 11.5) i mogao bi da ukaže na oksidacione uslove sedimentacije. Odnos fitan/*n*-C_{18} (0,25-0,84;) i pristan/*n*-C_{17} (0,28-0,98; tabela 11.5) u ispitivanim uzorcima su niski u poređenju sa vrednostima koje su izmerene u naftama i kerogenima nematurisanih sedimenata [112]. Obzirom na nizak stepen maturisanosti ispitivanih uzoraka ($\overline{R}_r = 0,30$ % [12]), kao i visok relativan sadržaj terpana (naročito diterpana), pre se može reći da odnosi acikličnih izoprenoidnih alkana ukazuju na razlike u njihovom poreklu. Izvori izoprenoidnih alkana ispitivanih litotipova iz kolubarskog i kostolačkog basena mogu biti bakterije [112] i/ili tokoferol (vitamin E) [109, 118].

Tabela 11.5. Odnosi pojedinih izoprenoidnih alifatičnih alkana

Oznaka uzorka	Pristan/*n*-C_{17} (Pr/*n*-C_{17})	Fitan/*n*-C_{18} (Py/*n*-C_{18})	Pristan/Fitan (Pr/Py)
Kolubara			
Barski litotip	0,48	0,46	1,12
Mumificirani ksilit	0,98	0,84	1,13
Trakasti ksilit	0,92	0,66	1,10
Strukturni ksilit	0,64	0,45	1,17
Dopleritski ksilit	0,89	0,74	1,39
Kostolac			
Barski litotip	0,28	0,25	1,19
Mumificirani ksilit	0,48	0,53	1,03
Trakasti ksilit	0,72	0,62	1,31
Strukturni ksilit	0,64	0,76	1,04
Dopleritski ksilit	0,89	0,74	1,39

11.3.3. Seskviterpani, diterpani i triterpani

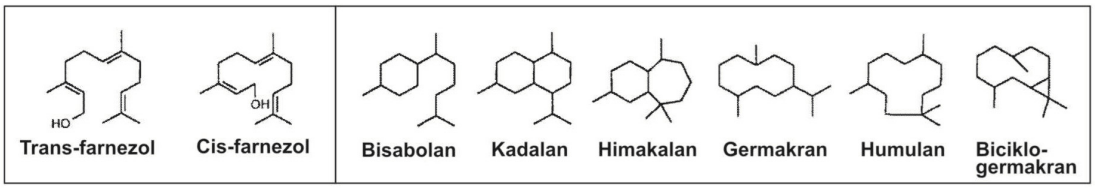
Terpani su široko rasprostranjeni biomarkeri u sedimentima, ugljevima, uljnim šejlovima i nafti. Vode poreklo od terpenoida velikog broja biljnih vrsta i rodova. Prema velikom broju literaturnih podataka, terpenoidi konifera (četinara), naročito tercijarne starosti, mogu da pruže informacije o poreklu organske materije, odnosno o određenoj familiji, čitavoj grupi, a ponegde i određenom rodu. Tokom dijageneze kod terpenoida dolazi do određenih transfomacija, tako da gube svoje funkcionalne grupe [113] i formiraju aromatične ili zasićene derivate, pri čemu zadržavaju svoju osnovnu strukturu [119]. Terpani se prema broju ugljenikovih atoma dele na:

- monoterpane (C_{10}),
- seskviterpane (C_{15}),
- diterpane (C_{20}),
- triterpane (C_{30}).

Monoterpani (C_{10}) su glavni sastojci današnjih četinara. Volatilni su i retko mogu da se očuvaju u fosilnom materijalu [120].

U okviru seskviterpana (C_{15}) do sada je otkriveno preko 2500 jedinjenja koji su svrstani u 120 strukturnih klasa [121]. Dele se na aciklične seskviterpane tipa farnezana i ciklične koji su podeljeni u nekoliko grupa (Bisabolan, Kadalan, Himakalan, Germakran, Humulan i Biciklogermakran, [120], slika 11.4) koje su dalje podeljene u

nekoliko strukturnih klasa. Farnezan je poznat kao biomarker familija Pinaceae, Cupressaceae, Taxodiaceae, Taxaceae, dok ciklični seskviterpani predstavljaju uobičajene biomarkere familija Cupressaceae, Taxodiaceae, Pinaceae, kao i rodova *Abies* i *Pinus*.

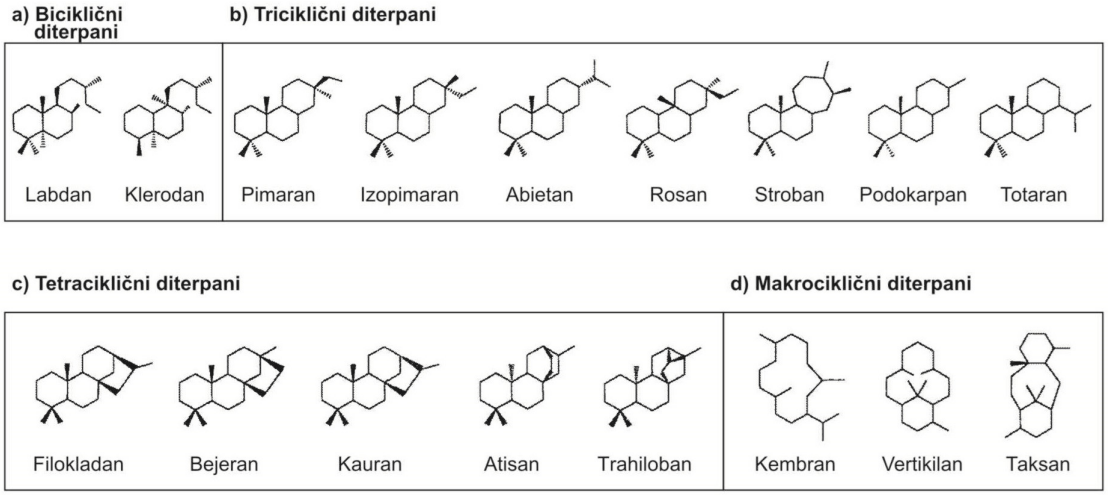


Slika 11.4. Strukturne formule najznačajnijih grupa seskviterpana četinara [120]

Diterpani (C_{20}) su druga velika klasa terpana sa preko 2200 jedinjenja koji su svrstani u oko 130 grupa i 17 strukturnih klasa četinara. U mnogim svetskim tercijarnim ugljevima, diterpani predstavljaju glavne sastojke. Dele se na [120]:

- biciklične,
- triciklične,
- tetraciklične i
- makrociklične.

Biciklični diterpani svrstani su u dve strukturne klase: labdana i klerodana (tabela 11.6, slika 11.5a). Do sada je u četinarima utvrđeno preko 100 različitih jedinjenja strukturne klase labdana [120, 121]. Najveći broj jedinjenja ove klase čine kiseline (komunijska, imbrikatolijska, kupresijska), alkoholi (manool, torulosol) i druga jedinjenja. Jedinjenja labdana široko su rasprostranjena u svim familijama četinara izuzev Cephalotaxaceae. Jedinjenja strukturne klase klerodana (ent-klerodadienol) se retko javljaju u četinarima i do sada ih je konstatovano samo nekoliko i to u rodu *Araucaria*.



Slika 11.5. Strukturne formule najznačajnijih grupa i klasa diterpana četinara [120]

Triciklični terpani su svrstani u nekoliko strukturnih klasa: pimaran, izopimaran, abijetan, rosan, rimuen, stroban, podokarpan i totaran ([120], slika 11.5b), a svaka od klasa obuhvata veliki broj jedinjenja koja su široko rasprostranjena u četinarima. U okviru strukturne klase pimarana i izopimarana registrovano je preko 100 različitih jedinjenja, od kojih su najčešće kiseline (pimaranska, izopimaranska, sandarakopimaranska), alkoholi (izopimarinol, pimarinol) i neki ugljovodonici (rimuen, pimaradieni, izopimaradieni). Jedinjenja strukturne klase pimarana poznati su kao biomarkeri svih rodova familija Pinaceae, Cupressaceae, Taxodiaceae, i nekih rodova familija Podocarpaceae (*Halocarpus, Prumnopitys*) i Araucariaceae (*Agathis*), dok su jedinjenja strukturne klase izopimarana, kao i kod labdana rasprostranjena u svim familijama četinara izuzev Cephalotaxaceae.

Abijetani predstavljaju najveću strukturnu klasu tricikličnih diterpana sa preko 120 jedinjenja, pri čemu oko 50 % jedinjenja ove klase ima jedan aromatični prsten [120, 121]. Najveći broj jedinjenja predstavljaju kiseline (abijetanska, dehidroabijetanska, palustrijska, levopimaranska) i alkoholi (abijetinol, dehidroabijetinol), dok se fenolni derivati (feruginol, sugiol) i neki ugljovodonici (dehidroabijetan, abijetadieni) podređeno javljaju. Strukturna klasa abijetana podeljena je na dve grupe [120]: „regularni“ ili „normalni“ abijetani (gore pomenute kiseline, alkoholi i neki ugljovodonici) i fenolni abijetani (feruginol, sugiol, hinokiol). „Normalni“ abijetani široko su rasprostranjeni u svim familijama četinara izuzev Phyllocladaceae, dok su

fenolni abijetani rasprostranjeni u Cupressaceae, Taxodiaceae, Podocarpaceae i po nekim rodovima familija Pinaceae (*Cedrus atlantica, Pinus sylvestris, Araucaria, Torreya*). Monoaromatična jedinjenja (dehidroabijetanska kiselina i dr) široko su rasprostranjena u četinarima i vode poreklo od lignina.

Jedinjenja ostalih stukturnih klasa tricikličnih terpana su znatno manje zastupljena i konstatovana su u manjem broju familija i rodova četinara. Jedinjenja stukturne klase strobana (strobol, strobinska kiselina) konstatovana su samo u rodu *Pinus* (Pinaceae), dok su jedinjenja strukturne klase rosana (rosadieni) identifikovana samo u pojedinim rodovima familija Podocarpaceae (*Lepidothamnus, Prumnopitys*) i Cupressaceae (*Thujopsis*). Za razliku od prethodne dve klase, rimuenski skelet je konstatovan u mnogim jedinjenjima familija Cupressaceae, Taxodiaceae, Podocarpaceae i Phyllocladaceae. Strukturna klasa podokarpana sa podokarpanskom kiselinom kao najčešćim jedinjenjem, konstatovana je samo u familiji Podocarpaceae i rodu *Pinus massoniana* (Pinaceae, [66]). Jedinjenja strukturne klase totarana (totarol, hidroksitotarol, norditerpenelakton) konstatovani su u familijama Cupressaceae, Podocarpaceae, kao i *Cryptomeria* (Taxodiaceae) i *Cedrus atlantica* (Pinaceae).

Tetraciklični terpani svrstani u sledeće strukturne klase: filokladan, bejeran, kauran, trahiloban i atisan ([120], slika 11.5c). Jedinjenja strukturne klase filokladana (filokladen, filokladenol) poznati su kao biomarkeri familija Cupressaceae, Podocarpaceae, Araucariaceae, Taxodiaceae, i rodovima *Phyllocladus*, *Picea*, dok su jedinjenja strukturne klase bejerana (hibaen, bejeren) konstatovana u rodovima Cupressaceae, Podocarpaceae i familiji *Araucaria*. Kaurani su detektovani u skoro svim familijama četinara sem Taxaceae, i retko u Pinaceae (*Pseudolarix*), dok su trahiloban i atisan konstatovani samo u rodu *Araucaria*.

Ugljovodonici i alkoholi struktukturne klase kembrana, makrocikličnog diterpana, konstatovani su u četinarima familije Pinaceae, kao i u *Chamaecyparis*. Jedinjenja strukturne klase vertikilana (vertikiloli) pronađeni su u rodu *Sciadopitys*, a jedinjenja taksana u familiji Taxaceae i to u rodovima *Austrotaxus* i *Taxus*.

Triterpani, za razliku od diterpana i seskviterpana nisu široko rasprostranjeni u četinarima. Do sada je izdvojeno sedam klasa (tabela 11.7, slika 11.6a), pri čemu su jedinjenja strukturnih klasa seratana, lanostana, cikloartana i gamacerana konstatovana samo u familiji Pinaceae i to u rodovima (*Abies, Larix, Picea, Pinus, Pseudotsuga*).

Hopandiol je pronađen samo u *Abies veitchii*, dok je čamecidin konstatovan u *Chamaecyparis*, (Cupressaceae) i u *Cryptomeria* (Taxodiaceae).

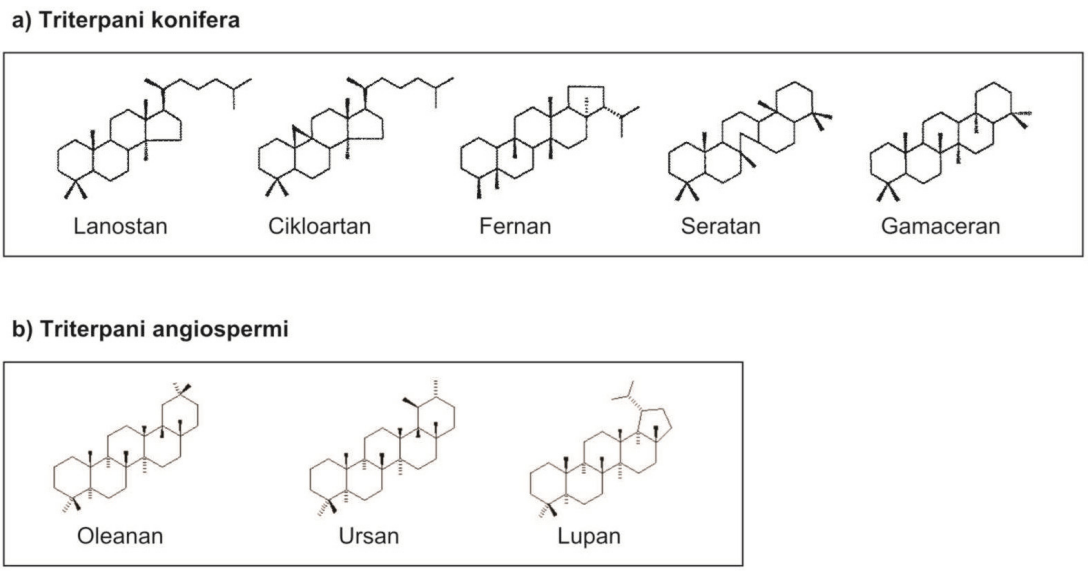
Tabela 11.6. Prikaz strukturnih klasa diterpana i njihova zastupljenost u četinarima [120]

Strukturna klasa	Jedinjenje	Zastupljenost
Biciklični diterpani		
Labdana	Komunijska kiselina, imbrikatolijska kiselina, kupresijska kiselina, manool, torulosol	Sve familije četinara sem Cephalotaxacea*e*
Klerodana	Ent-klerodadienol	*Araucaria*
Triciklični diterpani		
Pimarana	Pimaranska kiselina, pimarinol	Sve familije četinara
Izopimarana	Izopimaranska kiselina, sandarakopimaranska kiselina	Sve familije četinara sem Phyllocladaceae i Taxaceae
„Normalnih“ abijetana	Abijetanska kiselina, dehidroabijetanska kiselina, abijetinol, dehidroabijetan	Sve familije četinara sem Phyllocladaceae
„Fenolnih“ abijetana	Feruginol, sugiol, hinokiol	Cupressaceae, Taxodiaceae, Podocarpaceae*, Cedrus, Pinus, Araucaria, Torreya*
Rosana	Rosadieni	*Lepidothamnus, Prumnopitys* (Podocarpaceae) i *Thujopsis* (Cupressaceae)
Rimuena	Rimuen	Cupressaceae, Taxodiaceae, Podocarpaceae, Phyllocladaceae
Strobana	Strobol, strobinska kiselina	*Pinus*
Podokarpana	Podokarpanska kiselina	Podocarpaceae i *Pinus*
Totarana	Totarol, hidroksitotarol, norditerpenelakton	Cupressaceae, Podocarpaceae*, Cryptomeria* (Taxodiaceae), i *Cedrus* (Pinaceae).
Tetraciklični diterpani		
Filokladana	Filokladen, filokladenol	Cupressaceae, Podocarpaceae, Araucariaceae, Taxodiaceae, *Phyllocladus*, *Picea*
Bejerana	Hibaen, bejeren	Cupressaceae, Podocarpaceae, *Araucaria*
Kaurana	Kauren	Sve familije četinara sem Taxaceae, retko u Pinaceae (*Pseudolarix*)
Trahilobana	Trahiloban	*Araucaria*
Atisana	Atisan	*Araucaria*
Makrociklični diterpani		
Kembrana	Kembron, kembrol	Pinaceae, *Chamaecyparis*
Vertikilana	Vertikilol	*Sciadopitys*
Taksana	Bakatin	Taxaceae (*Austrotaxus*, *Taxus*)

Tabela 11.7. Prikaz strukturnih klasa triterpana i njihova zastupljenost u četinarima [120]

Strukturna klasa	Jedinjenje	Zastupljenost
Lanostana	Lanostanolidi	*Abies, Pinus*
Cikloartana	Ciklartenon	*Larix, Pinus, Pseudotsuga*
Fernana	Fernen, izofernen	*Podocarpus*
Seratana	Hidroksiseraten	*Picea, Pinus*
Gamacerana	Gamaceranediol	*Abies*
Hopana	Hopandiol	*Abies veitchii*
Čamecidina	Čamecidin	*Chamaecyparis, Cryptomeria*

Poznati pentaciklični triterpani u ugljevima, uljnim šejlovima, sedimentima i naftama pripadaju strukturnim klasama oleanana, ursana, lupana (slika 11.6b), fridelana i arborana. Konstatovani su u angiospermama [113, 122]. Bliža taksonomska odredba familija i rodova na osnovu biomarkera pomenutih klasa nije moguća zato što su oni široko rasprostranjeni u svim familijama angiospermi [121]. Novijim istraživanja konstatovan je visok sadržaj triterpana pomenutih klasa u rodovima angiospermi *Betula*, *Lithocarpus*, *Queecus* [122].



Slika 11.6. Strukturne formule najznačajniji klasa triterpana [120]

Seskviterpani se u ispitivanim litotipovima iz kolubarskog i kostolačkog basena podređeno javljaju (slike 11.7. i 11.8). Konstatovano je prisustvo longifolana, eudesmana, kadinana, kedrana, dihidrovalencena, kubebana, drimana i bicikličnih

seskviterpana koji se nalaze u smolama četinara familija Pinaceae, Taxodiaceae, Podocarpaceae, Cupressaceae i Araucariaceae [123, 124, 125].

Sadržaj diterpana u svim ispitivanim uzorcima je visok (tabela 11.3). Izrazito visoke vrednosti konstatovane su u mumificiranom i strukturnom ksilitu iz oba basena. Najviši sadržaj konstatovan je u mumificiranom ksilitu kostolačkog basena. Tetraciklični diterpan strukturne klase filokladana, 16α(H)-filokladan (Prilog 3 i 4), predstavlja dominantni diterpan u svim ispitivanim uzorcima alkanske frakcije bitumena lignita (tabela 11.8). U svim ispitivanim uzorcima konstatovan je visok sadržaj tricikličnog diterpana, pimarana. Osim pimarana relativno visok sadržaj u većem broju ispitivanih uzoraka imaju norpimaran i dihidrorimuen. U niskim koncentracijama konstatovano je i prisustvo norabijetana, izonorpimarana, izofilokladana, podređeno i kaurana. Jedinjenja klase „normalnih“ i „fenolnih“ abietana nisu konstatovana u ispitivanim uzorcima (slike 11.7. i 11.8).

Tetraciklični triterpan strukturne klase lupana, de-A-lupan (Prilog 3 i 4) konstatovan je u svim ispitivanim uzorcima. Osim de-A-lupana, koji nastaje fotohemijskom ili fotomimetičkom degradacijom lupanona viših biljka [126, 127], u uzorcima nije konstatovano prisustvo lup-20(29)-ena, nezasićenog triterpana strukturne klase lupana (slike 11.7. i 11.8).

Oleaneni, pentaciklični triterpani u ispitivanim uzorcima uglja javljaju se u tri izomera olean-13(18)-en, olean-18-en i olean-12-en (Prilog 3 i 4). Sadržaj navedenih triterpana je nizak. Najviši sadržaji izomera oleanena, nezasićenih pentacikličnih triterpana strukturne klase olenana, konstatovani su barskom litotipu oba basena. Izomerizacijom tarakser-14-ena, prekursora oleanena, stvara se mešavina izomera olean-13(18)-ena, olean-18-ena i olean-12-ena [128], pri čemu su $\Delta^{13(18)}$ i Δ^{18} izomeri termodinamički stabilniji od Δ^{12} izomera. Naknadnom hidrogenizacijom verovatno, olean-12-ena, a možda i olean-13(18)-ena, stvaraju se 18α(H)- i 18β(H)-oleanani kao krajnji podukti. Obzirom da je u svim ispitivanim uzorcima prisutna mešavina sva tri izomera oleanena, a da zasićeni 18β(H)-oleanan, odnosno termodinamički stabilniji 18α(H)-oleanan, nisu konstatovani (slike 11.7. i 11.8) može se reći da ugljovodonici alifatične frakcije nisu maturisani, odnosno da se ugalj ispitivanih uzoraka nalazi na stadijumu dijageneze. Degradovani produkti oleanena i ursena (De-A-olean-13(18)-en, De-A-olean-12-en, De-A-olean-18-en i De-A-urs 13(18)-en) konstatovani su u svim ispitivanim uzorcima u

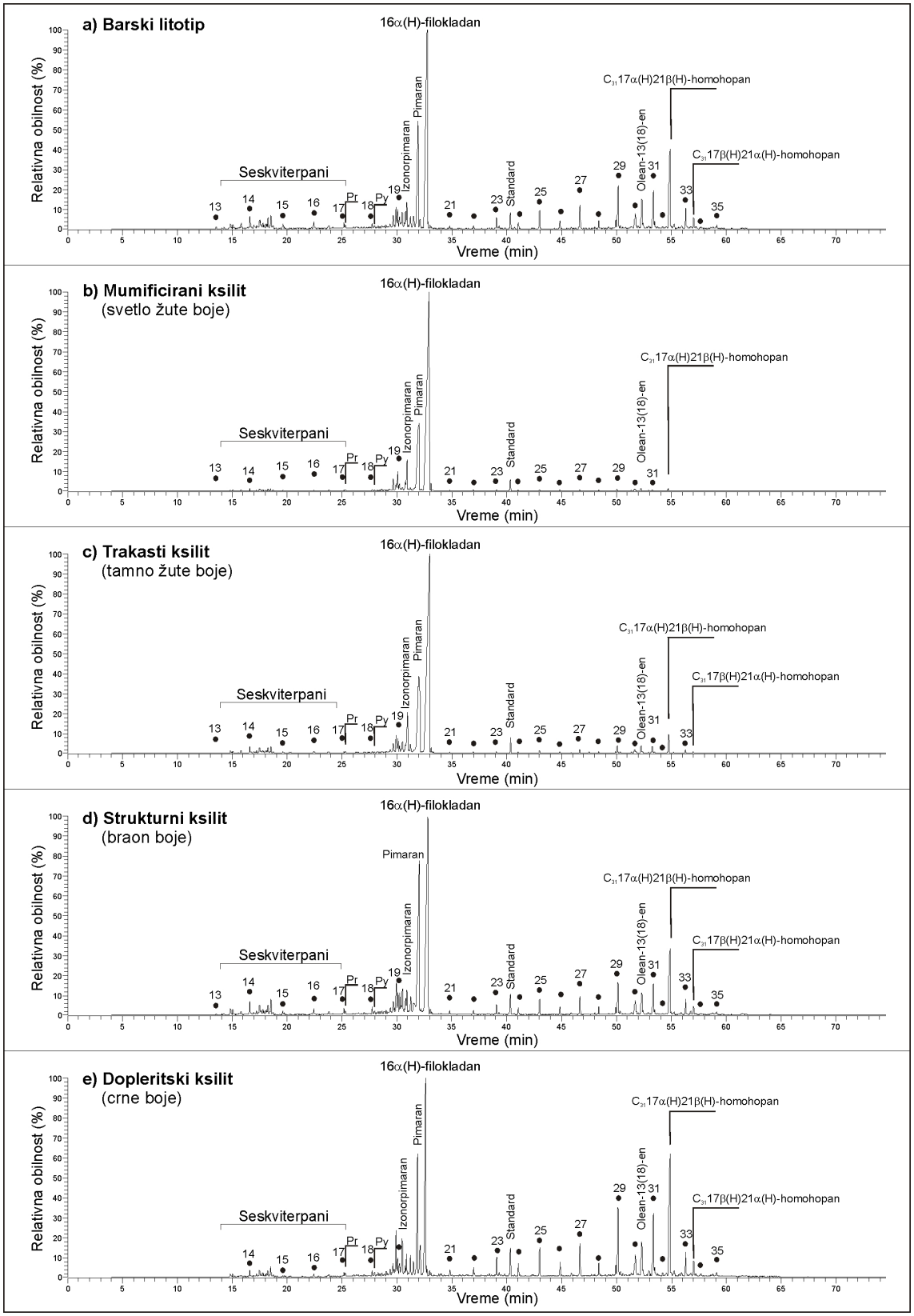
niskim koncentracijama. Nezasićeni pentaciklični triterpani strukturne klase ursana nisu konstatovani u ispitivanim uzorcima iz kolubarskog i kostolačkog basena.

Relativni odnos diterpana i 36 „ne-hopanskih“ triterpana (tabela 11.8, DT/(DT+TT), [129]), koji se kreće od 0,930 do 0,999, je veoma ilustrativan i ukazuje na izrazito visoko učešće diterpana, tj. četinara u građi ispitivanih litotipova.

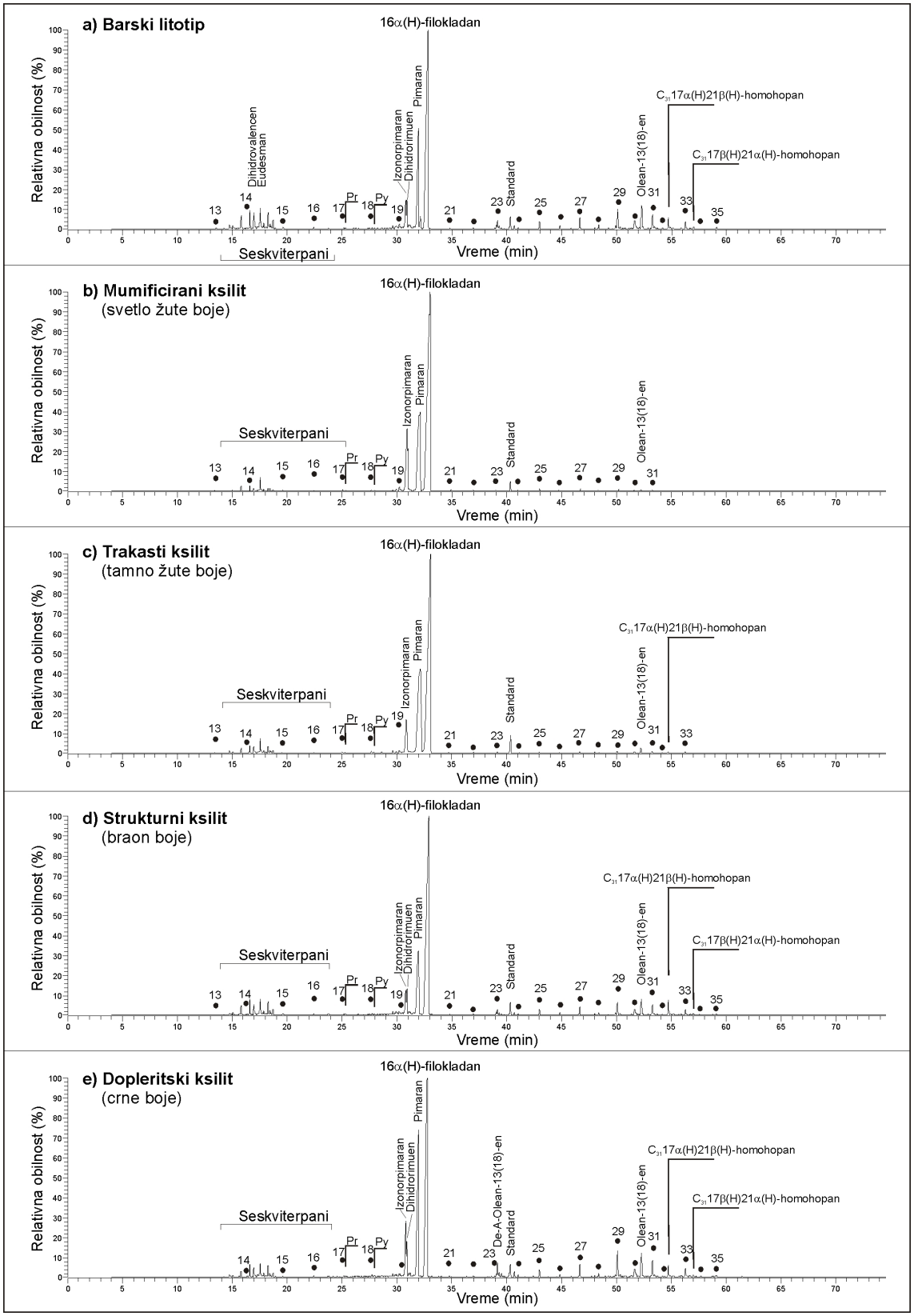
Tabela 11.8. Dominantni pik u alkanskoj frakciji i odnos sadržaja diterpana i triterpana u alkanskoj frakciji ispitivanih uzoraka

Oznaka uzorka	**Dominantni pik u alkanskoj frakciji (TIC – Total Ion Current)**	**DT/(DT+TT)**
Kolubara		
Barski litotip	16α(H)-filokladan	0,936
Mumificirani ksilit	16α(H)-filokladan	0,996
Trakasti ksilit	16α(H)-filokladan	0,990
Struksturni ksilit	16α(H)-filokladan	0,965
Dopleritski ksilit	16α(H)-filokladan	0,930
Kostolac		
Barski litotip	16α(H)-filokladan	0,934
Mumificirani ksilit	16α(H)-filokladan	0,999
Trakasti ksilit	16α(H)-filokladan	0,994
Struksturni ksilit	16α(H)-filokladan	0,966
Dopleritski ksilit	16α(H)-filokladan	0,933

DT/(DT+TT) – Diterpani/(Diterpani+Triterpani) iz alkanske frakcije [129]
DT = Dihidrorimuen + Norabijetan + Norpimaran + Izofilokladen +Izonorpimaran + Pimaran + Fihtelit + Filokladan + Kauran
TT = De-A-lupan + De-A-olean-13(18)-en + De-A-olean-12-en + De-A-olean-18-en + De-A-urs 13(18)-en + Olean-13(18)-en + Olean-12-en + Olean-18-en



Slika 11.7. Gasni hromatogram ukupne alkanske frakcije bitumena (TIC – Total Ion Current) uzoraka kolubarskog basena (punim kružićima su označeni n-alkani, Pr – Pristan, Py – Fitan)



Slika 11.8. Gasni hromatogram ukupne alkanske frakcije bitumena (TIC – Total Ion Current) uzoraka kostolačkog basena (punim kružićima su označeni n-alkani, Pr – Pristan, Py – Fitan)

Mogući biološki prekursori uobičajenih diterpana (abijetana, pimarana, filokladana) u ugljevima i sedimentima mogu se naći u skoro svim familijama četinara. Neki od funkcionalnih molekula karakteristični su za pojedine familije, kao što su abijetanska kiselina za Pinaceae, ili taksodon za Taxodiaceae. Tokom dijageneze funkcionalne grupe se gube pod dejstvom mikroorganizama i/ili drugih abiogenih degradacionih procesa, tako da terpenoidi predstavljaju biomarkere čitave grupe četinara. Zbog toga je vrlo teško tačno odrediti prekursore samo na osnovu nekoliko stukturnih klasa terpana.
Biološki prekursori filokladana su smole četinara familija Cupressaceae, Podocarpaceae, Araucariaceae, Taxodiaceae i rodova *Phyllocladus* i *Picea* [120, 123], dok su jedinjenja strukturne klase pimarana prisutna kod svih familija četinara, a izopimarana u svim familijama četinara sem kod familija Phyllocladaceae i Taxaceae.
Biloški prekursori „normalnih“ abijetana izgrađuju smole četinara svih familija sem Phyllocladaceae, dok su „fenolni“ abijetani konstatovani u familijama Cupressaceae, Taxodiaceae, Podocarpaceae, kao i rodovima *Cedrus, Pinus, Araucaria, Torreya*. Visoki sadržaji jedinjenja strukturne klase „normalnih“ abijetana konstatovani su u semenu *Pinus paleostrubus* iz familije Pinaceae [97] i Cupressaceae [123], dok su visoki sadržaji „fenolnih“ abijetana (naročito feruginol) konstatovani u lišću *Athrotaxis couttsiae*, kao i u iglicama, šišarkama i semenkama *Taxodium balticum* [97, 123], *Taxodium dubium* i *Glyptosrtobus oregonensis* [130].

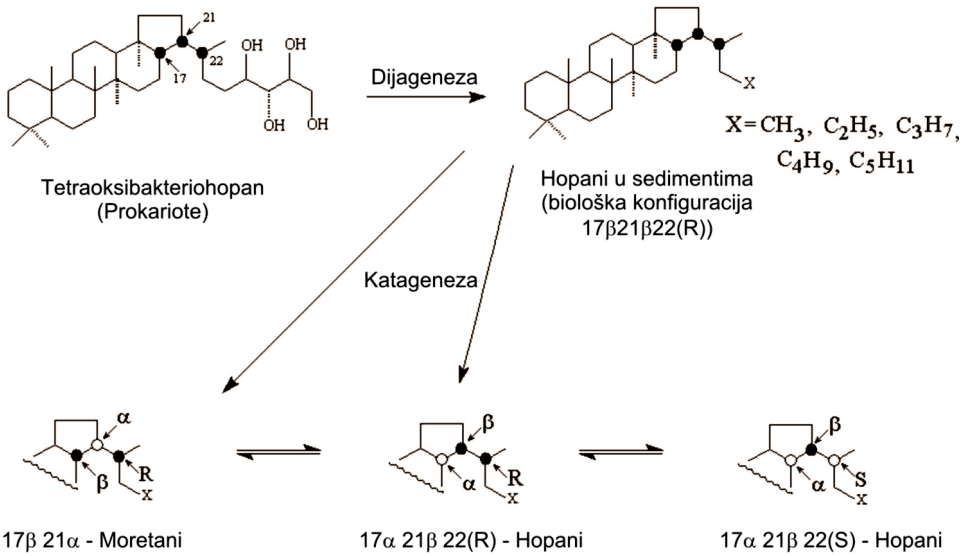
11.3.4. Hopanoidi

Pentaciklični triterpani sa hopanoidnim skeletom su najzastupljeniji terpani u sedimentima, uglju, nafti i uljnim šejlovima. Najčešće se identifikuju GC- ili GC-MS-analizom preko fragmentograma jona *m/z* 191 [89]. Izdvojeno je nekoliko strukturnih klasa. Ispitivanja policikličnih alkana tipa triterpana u sedimentima pokazala su da najveći broj do sada identifikovanih triterpana pripadaju hopanovoj seriji C_{27}-C_{40}. [131]. Glavni prekursori terpana su biolipidi prokariotskih organizama, bakterija i algi, odnosno tetraoksibakteriohopan, koji se nalazi u ćelijskim membranama različitih vrsta mikroorganizama, koji u dijagenetskoj fazi učestvuju u razgradnji organske supstance (slika 11.9) [89, 132]. Pored toga, mogući prekursori pentacikličnih terpana su

hopanoidne kiseline, gradivne komponente viših biljaka [133], kao i 3-dezoksihopani [134] koji su pronađeni u aerobnim bakterijama i gljivama.

Hopanoidi biolipidnih frakcija i hopani nematurisanih sedimenata, ugljeva niskog ranga i uljnih šejlova predstavljeni su uglavnom 17β(H)21β(H) stereoizomerima, odnosno vodonikovi atomi na 17-om i 21-om ugljenikovom atomu se nalaze u β-položajima (slika 11.9). Blage promene temperature tokom procesa dijageneze omogućavaju ireverzibilnu izomerizaciju ββ hopanoida u termodinamički stabilnije 17β(H)21α(H)-moretane (M) i 17α(H)21β(H)-hopane [113]. Biološke prekursore karakteriše isključivo 22(R)-konfiguracija. Tokom termalne evolucije dolazi do izomerizacije 22(R)- hopana i moretana u termodinamički stabilnije izomere sa 22(S)-konfiguracijom [102, 135].

U ispitivanim uzorcima kolubarskog i kostolačkog basena identifikovani su hopani ββ- i αβ konfiguracije u seriji od C_{27} to C_{32}, uz odsustvo C_{28} izomera. Kod barskog i ksilitnih litotipova iz kolubarskog basena najzastupljeniju je C_{31}17α(H)21β(H)22(R)-homohopan (tabela 11.9), dok je kod litotipova lignita iz kostolačkog basena osim pomenutog u visokom procentu prisutan i C_{27}17β(H)-22, 29, 30-trisnorhopan.



Slika 11.9. Šema postanka pentacikličnih terpana iz tetraoksibakteriohopana [89]

Prisustvo C_{27}17β(H)-22, 29, 30-trisnorhopana u hopanskoj frakciji ukazuje na jak uticaj mikroorganizama na razgradnju organske materije, kao i nematurisanu organsku materiju [134]. Predominacija C_{31}17α(H)21β(H)-homohopana u ugljevima niskog

ranga, verovato je posledica oksidacije i naknadne dekarboksilacije bakteriohopantetrola sa izomerizacijom na 17 C-atomu koja je vezana za kiselu sredinu tresetne močvare [136]. C_{30}hop-17(21)-en koji je konstatovan u svim uzorcima u niskim relativnim sadržajima, predstavlja dijagenetski produkt diploptena (hop-22(29)-en [137], koji vodi poreklo od diplopterola. Diplopterol je pronađen u nekoliko eukariota, kao što su paprati, mahovine, lišajevi i gljive, ali se takođe javlja i kao produkt bakterijskog razlaganja [134]. Neka istraživanja ukazuju na direktan bakterijski uticaj pri nastanku ovih jedinjenja [134, 138, 139]. Nedavno je pronađeno i da se diplopterol javlja kao učvršćivač membrana isključivo kod anaerobnih bakterija koje su sposobne da oksiduju amonijak [140].

Sadržaj C_{30}17α(H)21β(H)-hopana obično se razamtra kao stepen degradacije organske materije usled dejstva aerobnih bakterija, dok se za C_{30}hop-17(12)-en smatra da nastaje degradacijom Fe-mikroorganizama u anaerobnoj sredini [141]. Relativan odnos C_{30}17α(H)21β(H)-hopana i C_{30}hop-17(12)-ena u ispitivanim uzorcima Srbije (tabela 11.9) razmatran je kao stepen mikrobiološke degradacije u oksidacionoj, odnosno redukcionoj sredini. Izrazito visoke vrednosti ovog odnosa ukazuje na bakterijsku aktivnost u oksidacionoj sredini. Kod ostalih uzoraka verovatno je bila prisutna mikrobiološka aktivnost najpre u oksidacionoj, a zatim u redukcionim uslovima.

Odnos C_{30}17β(H)21β(H)–hopan/(C_{30}17α(H)21β(H)–hopan + C_{30}17β(H)21β(H)–hopan) prikazan kao ββ/(αβ+ββ) razmatra se kao parametar maturisanosti ugljeva i kod mekih mrkih i mat tvrdih mrkih ugljeva (lignita) generalno se kreće od 0,4 do 0,6 [142]. U recentnim sedimentima i mrkim ugljevima C_{30} ββ izomer hopana zastupljen je u visokim koncentaracijama. Generalno posmatrano sa porastom stepena maturisanosti koncentacija ββ izomera se polako smanjuje, dok se koncentracija αβ izomera povećava [113]. Ovaj porast bi trebalo da prati i porast stepena refleksije huminita, kod mrkih ugljeva, što nije uvek slučaj, tako da ovaj parametar kod ugljeva ima samo orijentacioni karakter. Relativan odnos ββ/(αβ+ββ) hopana u ispitivanim litotipovima varira od 0,09 do 0,80 (tabela 11.9) i generalno se nalazi u granicama za mrke ugljeve.

Relativan sadržaj i raspodela hopana u litotipovima lignita kolubarskog i kostolačkog basena ukazali su na visok stepen mikrobiološke aktivnosti pri akumulaciji i transfomaciji organske materije.

Tabela 11.9. Najobilniji hopan, relativan odnos hop-17(21)-ena i hopana, ββ/(αβ+ββ) hopana i steroida i hopanoida u alkanskoj frakciji

Oznaka uzorka	Najobilniji hopan (*m/z* 191)	ββ/(αβ+ββ) Hopani	Hop-en/ Hopan	Steroidi/ Hopanoidi
Kolubara				
Barski litotip	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,30	0,40	0,15
Mumificirani ksilit	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,45	1,77	0,33
Trakasti ksilit	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,80	3,29	0,02
Strukturni ksilit	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,43	3,44	0,06
Dopleritski ksilit	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,36	1,47	0,09
Kostolac				
Barski litotip	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,24	6,38	0,37
Mumificirani ksilit	C_{27}17β(H)-22, 29, 30-trisnorhopan	0,09	0,81	0,31
Trakasti ksilit	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,34	1,18	0,12
Strukturni ksilit	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,48	3,19	0,52
Dopleritski ksilit	C_{31} 17α(H),21β(H)-30-homohopan	0,14	5,64	0,72

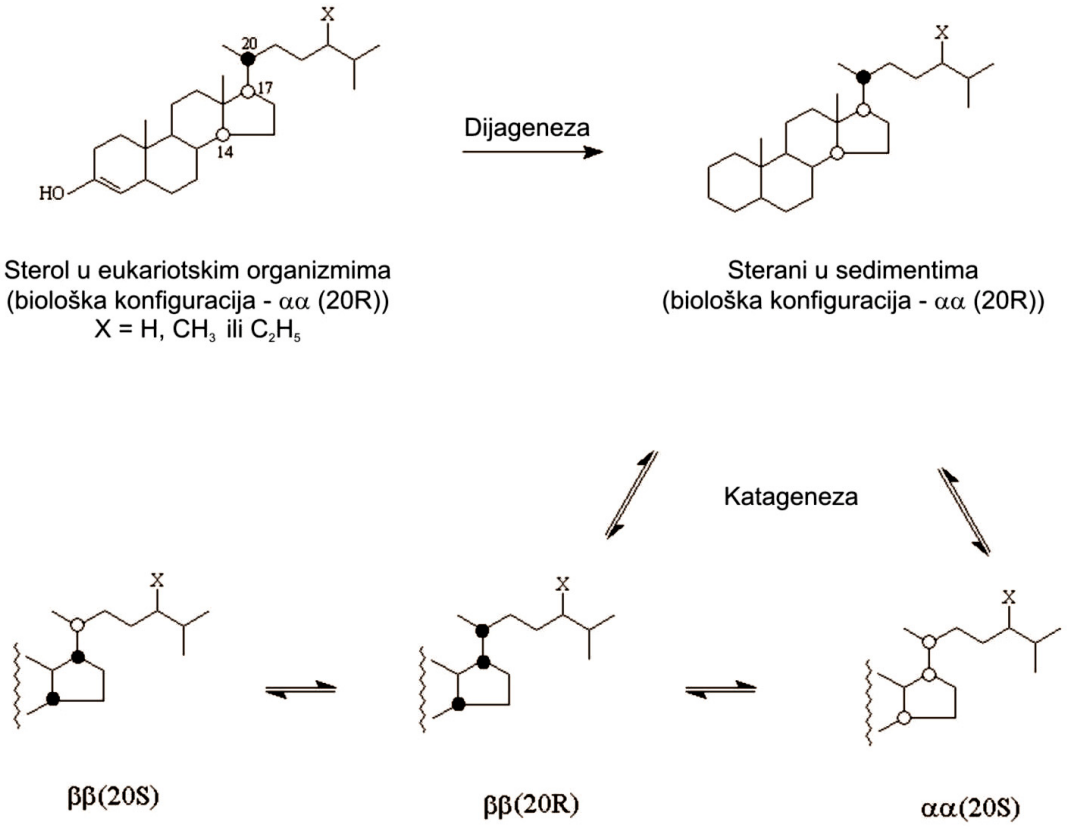
ββ/(αβ+ββ) = C_{30}17β(H)21β(H)-hopan / (C_{30}17α(H)21β(H)-hopan + C_{30}17β(H),1β(H)-hopan) [113]
Hop-en/Hopan = C_{30}Hop 17(21)-en / C_{30}17α (H)21β(H)-hopan [113]

11.3.5. Steroidi

Sterani predstavljaju vrlo važne i složene biomarkere sedimenata, ugljeva, nafte i uljnih šejlova. Njihovi biološki prekursori skoro u potpunosti su određeni i rasvetljeni su putevi njihovih strukturnih i stereohemijskih transformacija tokom dijageneze i katageneze. Najčešće se identifikuju GC- ili GC-MS-analizom preko fragmentograma jona *m/z* 217, odnosno preko fragmentograma jona *m/z* 218, 232 i 259 za diasterane [89, 113].

Biološki prekurskori sterana su steroli, stanoli, stenoni i stanoni živog sveta. Steroli ulaze u sastav lipidnih mebrana eukariota (slika 11.10), ali i nekih prokariota, kao što su bakterije i modro-zelene alge [102, 143, 144]. Najzastupljeniji sterol životinjskog sveta je C_{27}-holesterol, dok se ergosterol (C_{28}) najčešće javlja u kvascima i gljama. Velike

količine fukosterola (C_{29}) otkrivene su u dijatomejama i drugim algama, dok su C_{29}-steroli, kampasterol, sitosterol i stigmasterol, identifikovani u višim biljkama. Značajne količine C_{30}-sterola konstatovane su u fotosintetičkim algama [145, 146].



Slika 11.10. Šema postanka sterana iz sterola živog sveta [145, 146, 147, 148]

Tokom dijageneze biolipidni steroli procesima defunkcionalizacije pretvaraju se u sterene, koji procesima hidrogenizacije i izomerizacije prelaze u sterane i diasterene. Takođe može doći i do stvaranja monoaromatičnih sterana. Tokom katageneze od diasterena postaju diasterani, a od monoaromatičnih steroida triaromatični steroidi, čime se završava proces aromatizacije. Tokom procesa pretvaranja sterena u sterane, hidrogenizacijom dvogube veze između C-5 i C-6 atoma mogu da nastanu dva izomera sterana:

- 5α(H), 14α(H), 17α(H) 20R, odnosno ααα(R) i
- 5β(H), 14α(H), 17α(H) 20R, odnosno βαα(R).

Kako je 5β(H)-izomer nestabilan, lako prelazi u 5α(H). Tokom katageneze sterani ααα20R usled izomerizacije koja se dešava na C-14, C-17 i C-20 atomima, prelaze u termodinamički stabilnije ααα20S i αββ20R ili αββ20S [91]. Proces transformacije sterana u diasterane može biti katalizovan mineralima glina [149, 150]. Visoke koncentracije diasterana konstatovane su i u sedimentnim stenama koje su nastale u kiselim sredinama uz visoko prisustvo kiseonika [151]. Takođe, visoke koncentracije 24- etildiaholesterola konstatovane su u mikroalgama [152].

U svim ispitivanim uzorcima litotipova kolubarskog i kostolačkog basena stereni su su prisutni u izrazito niskim koncentracijama (tabela 11.3) i karakterišu se izrazitom dominacijom C_{29} homologa i to C_{29} Δ^4-, Δ^2- i Δ^5-sterena, što je u saglasnosti sa suvozemnim poreklom organske supstance. Niske vrednosit odnosa steroida i hopanoida u skoro svim ispitivanim uzorcima (tabela 11.9), ukazuje na jak uticaj bakterija tokom razlaganja organske materije.

11.4. Aromatična jedinjenja

Aromatična frakcija bitumena barskog i različitih tipova ksilitnog litotipa odlikuje se visokim učešćem diterpana (tabela 11.10), naročito u ksilitnim litotipovima kolubarskog basena i triterpana u barskom litotipu kolubarskog basena, kao i niskim sadržajem seskviterpana.

Aromatični seskviterpani se u ispitivanim litotipovima iz kolubarskog i kostolačkog basena podređeno javljaju. Konstatovano je prisustvo dihidrokadalena, dihidro-ar-kurkumena, kuparena, kurkumena, kalamenena, 5,6,7,8-tetrahidrokadalena, kadalena, izokadalena i kadina-1(10)6,8-triena (slike 11.11. i 11.12).

Diaromatični seskviterpan – kadalen je najzastupljeniji biomarker u svim ispitivanim uzorcima. U nešto nižim koncentracijama javljaju se kalamenen i kuparen. Biološki prekursori kadalena su verovatno kadinen i kadinol koji se nalaze u smolama četinara familija Pinaceae, Taxodiaceae, Podocarpaceae, Cupressaceae i Araucariaceae [123, 124]. Aromatični seskviterpan-kadalen takođe je poznat i kao degradacioni produkt polikadinana koji se nalazi u smolama nekih angiospermi (*Diterocarpaceae*, *Cornaceae* uključujući *Mastixiaceae*) [153]. Prisustvo kuparena jasno ukazuje da u građi ralzlčitih

litotipova kolubarskog i kostolačkog basena učestvuju i četinari familja Cupressaceae, kao i rodova *Cupressus*, *Thuja* i *Juniperus* [120, 154].

Aromatični diterpani se javljaju u visokim koncentracijama kod mumificiranog i trakastog ksilita iz oba basena, kao i kod barskog litotipa kostolačkog basena. Konstatovano je prisustvo norabijeta-6,8,11,13-tetraena, norabijeta-8,11,13-triena, 2-metil-1-(4'-metilpentil), 6-izopropilnaftalena, dehidroabijetana, simonelita, retena, sempervirana, totarana, hibaena, 1,2,3,4-tetrahidroretena i 2-metilretena, dok se pimaradien i izopimaradien podređeno javljaju (slike 11.11. i 11.12).

Od monoaromatičnih abijetana klase „normalnih" abijetana, najzastupljeniji je dehidroabijetan, dok se norabijetatrien javlja u niskim koncentracijama. Dijagenetski produkt abijetana, diaromatični simonelit, konstatovan je u svim ispitivanim uzorcima. Generalno, viši sadržaji simionelita i dehidroabijetana konstatovani su u uzorcima iz kostolačkog basena u kojima simonelit preovlađuje ili dominira. U skoro svim uzorcima kolubarskog basena monoaromatični diterpan-dehidroabijetan i diaromatični diterpan-simonelit se javljaju u približim koncentracijama sa preovlađivanjem jednog ili drugog biomarkera (slike 11.11. i 11.12).

Stvaranje di- i triaromatičnih diterpana je dosta proučavano u literaturi. Degradacijom abijetanske kiseline u anaerobnim ili kombinaciji aerobnih i anaerobnih uslova [124] stvaraju se prvo dehidroabijetan, a zatim diaromatični, simonelit i na kraju triaromatični, reten [155] (slika 11.13). Mogući prekursori aromatičnih diterpana strukturne klase abijetana mogu biti i derivati pimarana i filokladana [155, 156]. Izomerizacija pimarana i filokladana u kiseloj sredini može da bude ubrzana prisustvom minerala glina, tako da dovodi do stvaranja abijetana i nakanadno dehidroabijetana. Novija istraživanja pokazala su da simonelit i reten sem abijetanske kiseline mogu da imaju i duge prekursore kao što su fenolni abijetani, taksodon i feruginol [123], ali i dehidroabijetan [97], koji je pronađen u smolama recentnih četinara. Demetilovanjem i aromatizacijom B prstena dehidroabijetana nastaje simonelit. Što se tiče fihtelita, on se verovatno javlja kao dijagenetski produkt abijetanske kiseline, dok norabijetatrien verovatno vodi poreklo od dehidroabijetanske kiseline. Triaromatični diterpan – reten konstatovan je u svim ispitivanim uzorcima u niskim koncentracijama.

Bakterijska degradacija i abiogena alteracija predstavljaju glavne procese očuvanja diterpenoida četinara. Aromatični abijetani stvaraju se u aerobnim uslovima, a zasićeni

derivati u anaerobnim [124, 155]. Kombinacija oba procesa takođe, može da utiče na stvaranje aromatičnih diterpana. Termalna alteracija takođe može biti jedan od načina generisanja aromatičnih diterpana strukturne klase abijetana, obzirom da su isti konstatovani u ostacima sagorelog drveća koje sadrži diterpenoidne smole [157]. Prisustvo „nor-diterpana“ (norabijetan, norpimaran, norizopimarana) može da ukazuje na oksidacione uslove u tresetnoj močvari [158] kod većine ispitivanih uzoraka, mada je moguć i uticaj anaerobnih bakterija.

Tabela 11.10. Sadržaj seskviterpana, diterpana, triterpana, u aromatičnoj frakciji i vrednosti parametara zasnovanih na ovim biomarkerima

Oznaka uzorka	Sadržaj seskvi-terpana ($\mu g/gC_{org}$)	Sadržaj diterpana ($\mu g/gC_{org}$)	Sadržaj triterpana ($\mu g/gC_{org}$)	Sadržaj Dehidro-abijetana ($\mu g/gC_{org}$)	Sadržaj Simonelita ($\mu g/gC_{org}$)	Sadržaj Retena ($\mu g/gC_{org}$)	DT/ (DT+TT)	1-Ar prsten/ (1+2+3-Ar prstena) diterpani	1-Ar prsten/ (1+3+4-Ar prstena) triterpani
Kolubara									
Barski litotip	16,88	90,26	281,39	24,12	33,61	4,74	0,24	0,47	0,69
Mumificirani ksilit	12,42	135,93	136,56	27,47	27,65	2,93	0,50	0,69	0,77
Trakasti ksilit	15,45	94,97	134,51	23,59	23,52	2,91	0,41	0,59	0,75
Strukturni ksilit	5,14	22,79	45,98	8,33	7,68	0,12	0,33	0,58	0,70
Dopleritski ksilit	2,77	18,77	53,17	5,65	5,03	4,32	0,26	0,43	0,71
Kostolac									
Barski litotip	19,62	229,55	91,83	38,52	142,92	10,34	0,71	0,31	0,69
Mumificirani ksilit	7,17	213,42	56,13	36,76	125,47	7,11	0,79	0,33	0,83
Trakasti ksilit	15,59	181,29	47,21	31,99	90,29	12,08	0,79	0,40	0,71
Strukturni ksilit	7,10	71,25	55,37	12,97	45,32	3,22	0,56	0,27	0,73
Dopleritski ksilit	8,02	74,94	64,18	11,48	43,35	5,63	0,54	0,32	0,81

DT/(DT+TT) – Aromatični Diterpani/(Aromatični Diterpani+Aromatični Triterpani) iz aromatične frakcije [154, 159]

DT = 18-Norabijeta-6,8,11,13-tetraen + 19-Norabijeta-8,11,13-trien + 18-Norabijeta-8,11,13-trien + 2-Metil, 1-(4'-metilpentil), 6-izopropilnaftalen + Dehidroabijetan + Simonelit + Reten + Semperviran + Totaran + Hibaen + Feruginol + 6,7-Dehidroferuginol + 2-Metilreten + 1,2,3,4-Tetrahidroreten

TT = (24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12-tetraen + 24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12,14-pentaen + 24,25-Dinorursa-1,3,5(10),12-tetraen + 24,25-Dinorlupa-1,3,5(10)-trien + Pentametildekahidrohrizen + 3,4,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-oktahidrohrizen + 3,3,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-oktahidrohrizen + 3,4,7-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidrohrizen + 3,3,7-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidrohrizen + 1,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen + 2,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen + 1,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen + 2,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen + 1,2,9-Trimetil-1,2- dihidropicen + Triaromatični de-A-lupan

1-Ar prsten diterpani = 18-Norabijeta-6,8,11,13-tetraen + 19-Norabijeta-8,11,13-trien + 18-Norabijeta-8,11,13-trien + Dehidroabijetan

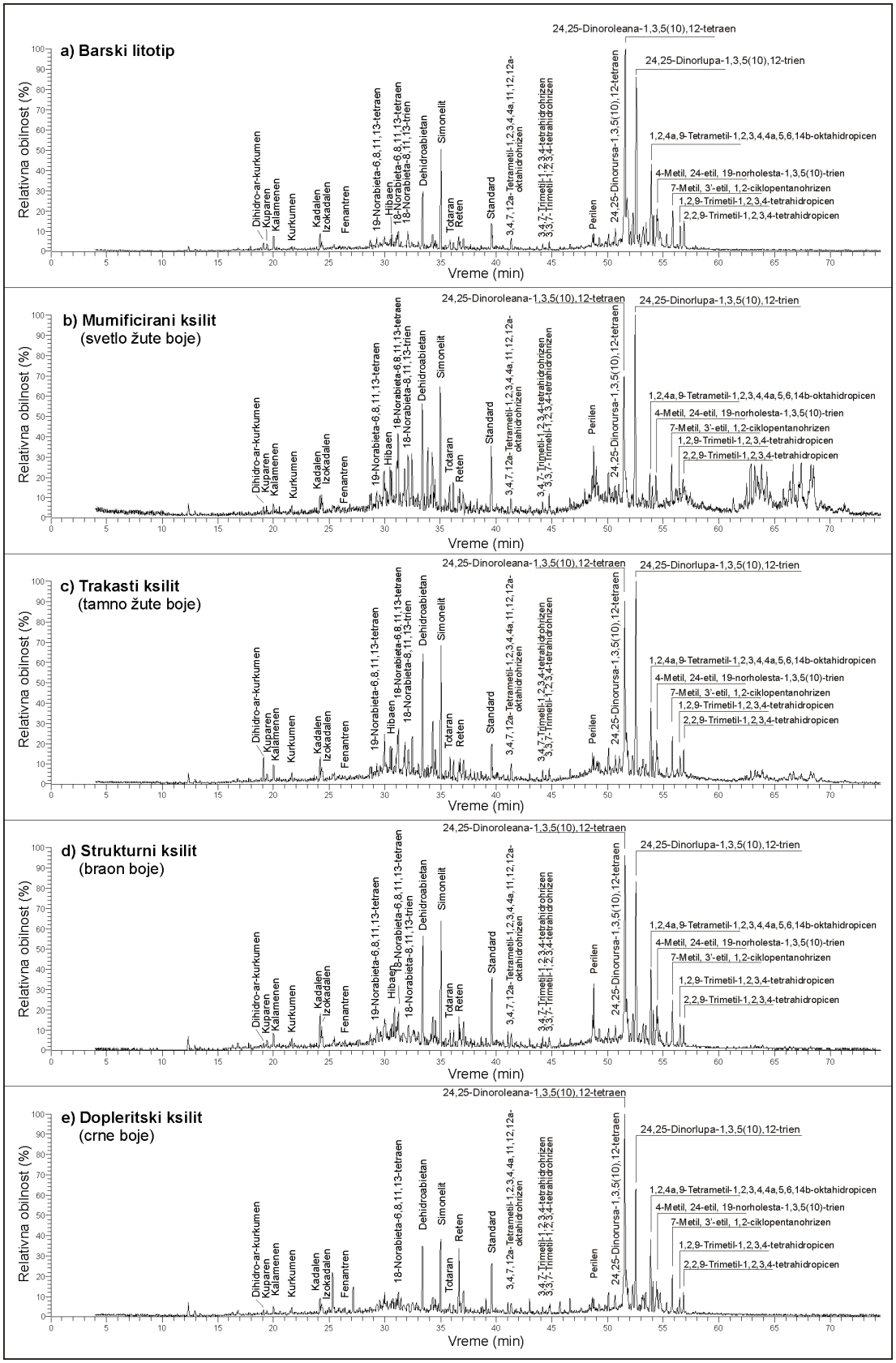
2-Ar prstena diterpani = 2-Metil, 1-(4'-metilpentil), 6-izopropilnaftalen + Simonelit + Tetrahidroreten

3-Ar prstena diterpani = (Reten + 2-Metilreten) [154]

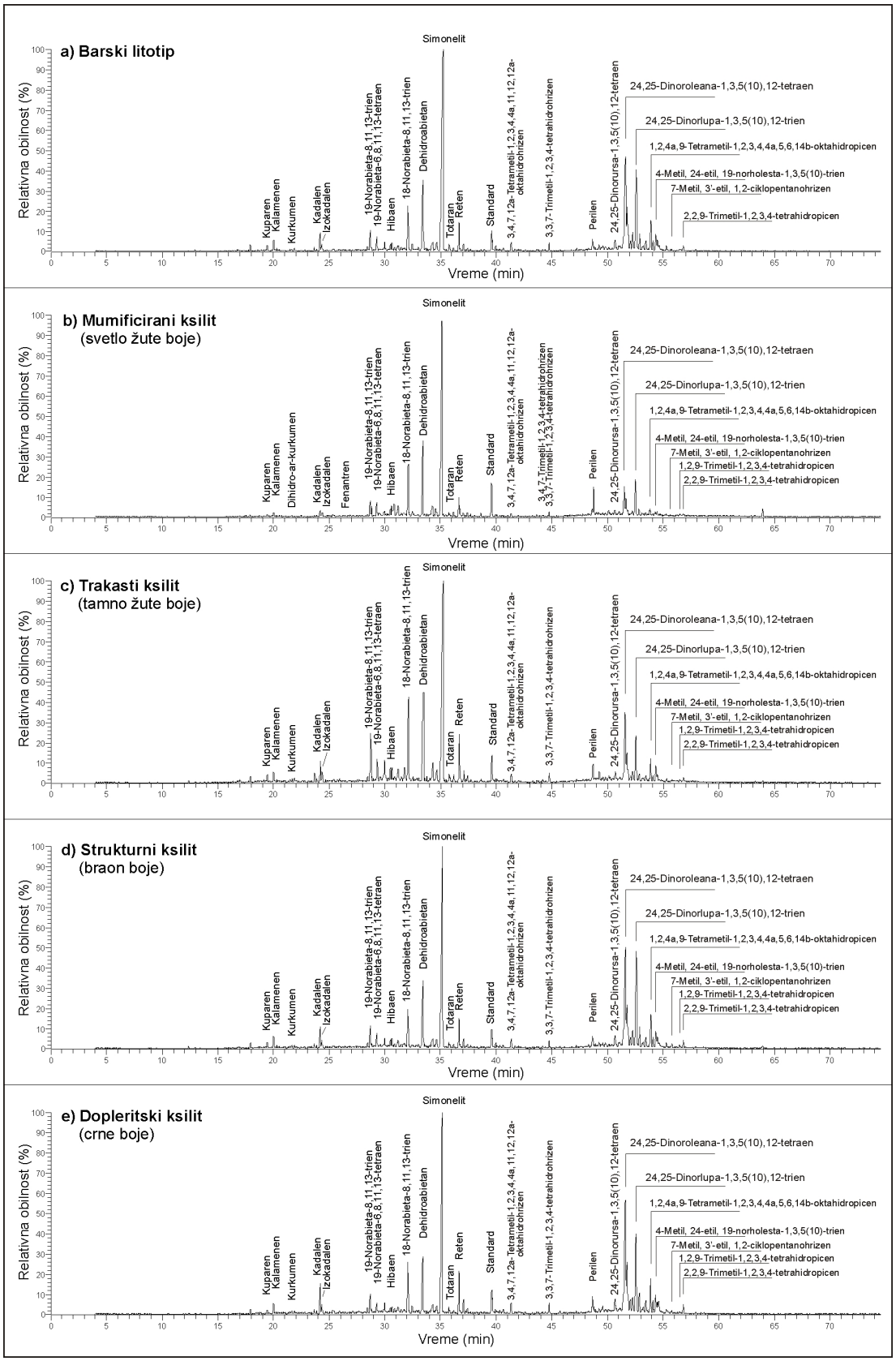
1-Ar prsten triterpani=24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12-tetraen + 24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12,14-pentaen + 24,25-Dinorursa-1,3,5(10),12-tetraen + 24,25-Dinorlupa-1,3,5(10)-trien

3-Ar prstena triterpani = 1,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen + 2,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen

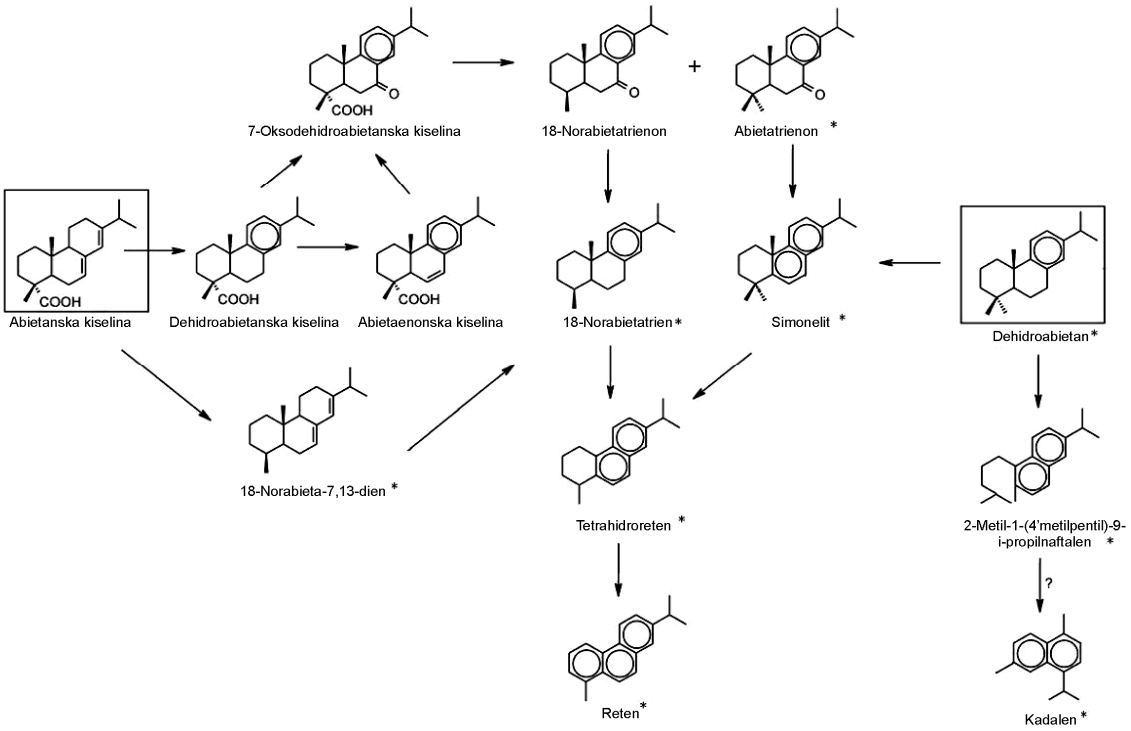
4-Ar prstena triterpani = 1,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen + 2,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen + 1,2,9-Trimetil-1,2-dihidropicen.



Slika 11.11. Gasni hromatogram ukupne aromatične frakcije bitumena (TIC – Total Ion Current) uzorka kolubarskog basena



Slika 11.12. Gasni hromatogram ukupne aromatične frakcije bitumena (TIC – Total Ion Current) uzoraka kostolačkog basena



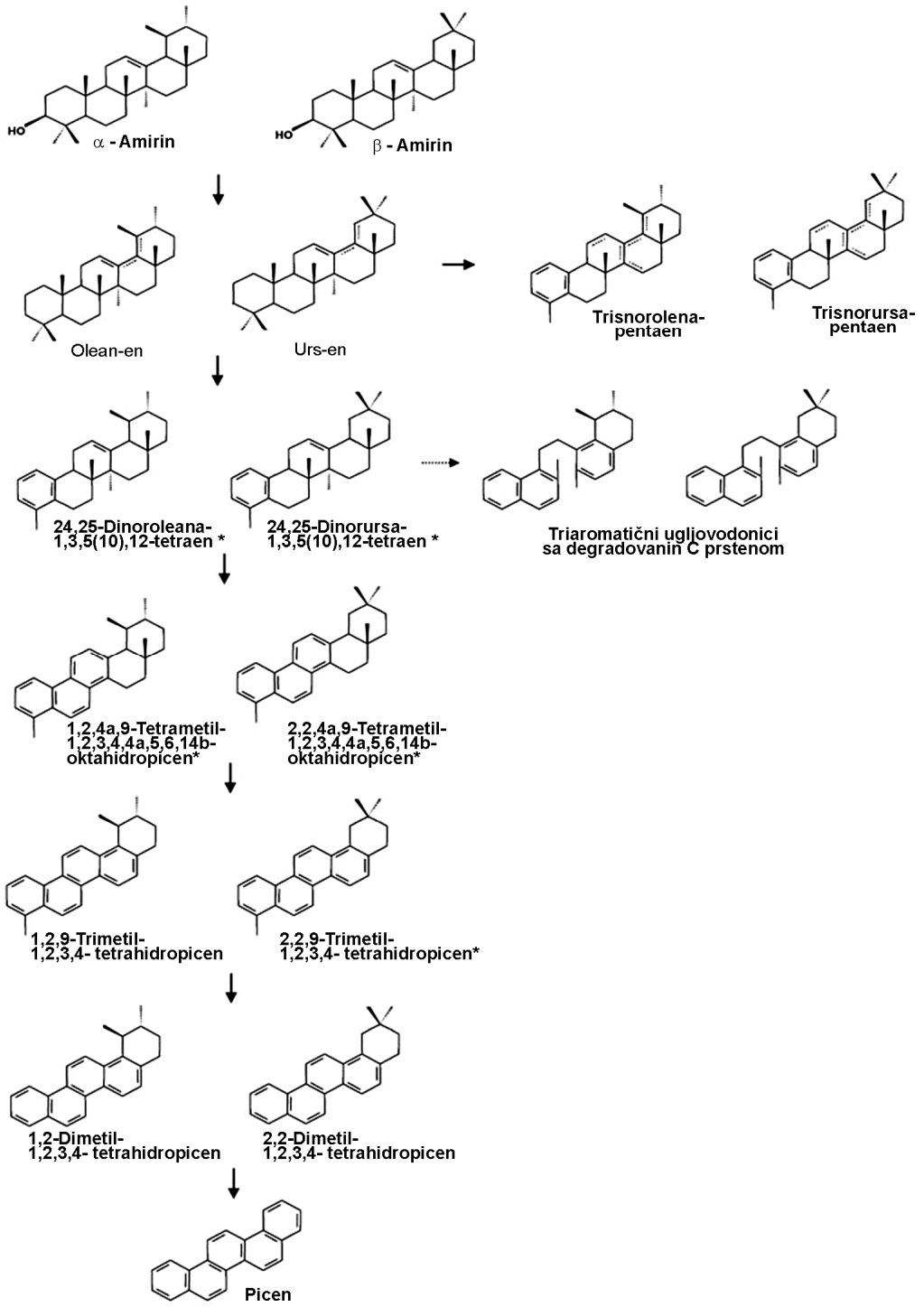
Slika 11.13. Moguća dijagenetska putanja stvaranja simonelita, retena i kadalena, zvezdicom su označeni biomarkeri koji su konstatovani u ispitivanim uzorcima [97, 155, 160]

Aromatični tetra- i pentaciklični triterpani u visokim koncentracijama izgrađuju barski litotip, kao i mumificirani i strukturni ksilit kolubarskog basena. Monoaromatični triterpani (24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12-tetraen, 24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12,14-pentaen, 24,25-Dinorursa-1,3,5(10),12-tetraen, 24,25-Dinorlupa-1,3,5(10)-trien) dominiraju ili preovađuju nad diaromatičnim (3,4,7,12a-Tetrametil-oktahidrohrizen, 3,3,7,12a-Tetrametil-oktahidrohrizen, 3,4,7-Trimetil-tetrahidrohrizen, 3,3,7-Trimetil-tetrahidrohrizen), triaromatičnim (1,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen, 2,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen) i tertaaromatičnim (1,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen, 2,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen, 1,2,9-Trimetil-1,2-dihidropicen; slike 11.11. i 11.12) triterpanima. Ovakva raspodela aromatičnih pentacikličnih triterpana, kao i nizak sadržaj pentacikličnih triterpenoida u zasićenoj frakciji ukazuje na progresivnu aromatizaciju [161]. Visoko učešće monoaromatičnih triterpana potvrđuje njegovu relativno visoku stabilnost, što je konstatovano ranijim istraživanjima [125, 161].

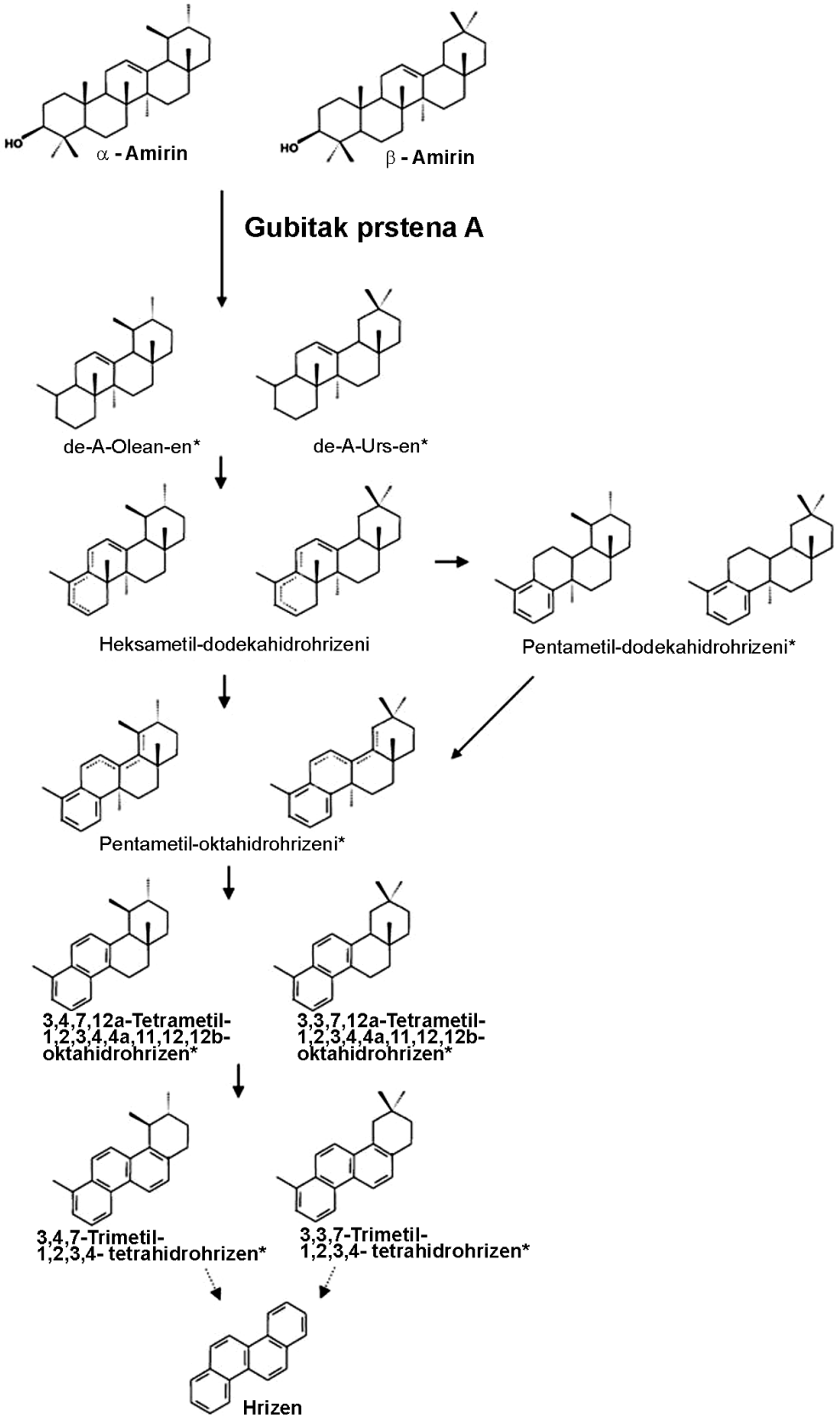
U cilju procene učešća gimnospermi i angiospermi u tresetnoj močvari tokom deponovanja organske materije koristi se odnos diterpenoida i triterpenoida (derivata

angiospermi u aromatičnoj frakciji ($DT/(DT+TT)_{arom}$) [154, 159] (tabela 11.10). Niže vrednosti ovog odnosa u ispitivanim uzorcima iz kolubaskog basena ukazuju na visoko učešće angiospermi u formiranju barskog i ksilitnih litotipova, odnosno na česta kolebanja nivoa vode u tresetnoj močvari. Ovakva kolebanja uslovila su relativno brze promene paleovegetacije, pri čemu su u nešto višim nivoima vodenog stuba dominirali četinari (zona šumske močvare), a u znatno plićoj i oksičnijoj sredini (zoni prosušene močvare) angiosperme sa različitim predstavnicima listopadnog drveća i žbunovima. U ispitivanim uzorcima iz kostolačkog basena relativno visok odnos odnos diterpenoida i triterpenoida u aromatičnoj frakciji jasno ukazuje na visoko učešće četinara u građi svih litotipova.

Procena stepena aromatizacije diterpenoida izražava se preko odnosa monoaromatičnih diterpana (1-Ar prsten) i zbira mono-, di- i triaromatičnih (1-Ar prsten/(1+2+3-Ar prstena) diterpana [154] (tabela 11.10). Generalno posmatrano ovaj parametar opada sa promenom boje ksilita tj. sa porastom zrelosti ksilita. Kod različitih tipova ksilita kostolačkog basena nisu uočene veće varijacije ovog parametra. Odgovarajući odnos monoaromatičnih triterpana i zbira mono-, tri- i tertaaromatičnih triterpana (1-Ar prsten/ /(1+3+4-Ar prstena), tabela 11.10), prema istim autorima, pokazuju relativo visoke i ujednačene vrednosti koje su posledica niskog stepena aromatizacije. Nešto niža vrednost ovog parametra kod barskog litotipa iz oba basena je posledica nešto višeg sadržaja tri- i tetraaromatičnih triterpana. Progresivna aromatizacija kod ovog litotipa favorozovana je radom bakterija u suboksičnoj do oksičnoj sredini (slike 11.14. i 11.15), što je utvrđeno i ranijim istraživanjima [21].



Slika 11.14. Mogući dijagenetski put stvaranja aromatičnih pentacikličnih triterpana, zvezdicom su označeni biomarkeri koji su identifikovani u ispitivanim uzorcima [155, 161]



Slika 11.15. Mogući dijagenetski put stvaranja aromatičnih tetracikličnih triterpana, zvezdicom su označeni biomarkeri koji su identifikovani u ispitivanim uzorcima [154, 161]

12. Uticaj elemenata tehničke analize uzoraka ugljeva na njihovu meljivost

Na osnovu tabele 12.1, srednje vrednosti sadržaja vlage, pepela i isparljivih materija u kolubarskim uzorcima iznose:

- 49,60 % vlage (44,30 – 59,66 %),
- 21,30 % isparljivih materija (15,00 – 29,06 %),
- 15,98 % pepela (7,75 – 30,64 %).

Što se tiče uzoraka kostolačkih ugljeva, na osnovu tehničke analize (tabela 12.2), srednje vrednosti dobijene eksperimentom iznose:

- 40,56 % vlage (38,14 – 42,09 %),
- 22,57 % isparljivih materija (19,95 – 24,59 %),
- 28,77 % pepela (20,99 – 33,18 %).

Hardgrove indeks meljivosti uzoraka ugljeva kolubarskog basena je imao vrednosti 30,7 – 56,9 (srednja vrednost 41,8) a kostolačkog 40,8 – 47,0 (srednja vrednost 43,5) i imaju ujednačenije vrednosti (tabela 12.1. i 12.2).

Korelacionom analizom (tabela 12.1. i 12.2) je dobijeno da sadržaj isparljivih materija (izražen na svim osnovama) ima negativan uticaj na vrednosti HGI, pri čemu veći negativni uticaj ima na uzorke uglja kostolačkog basena ($r = -0,640$ u odnosu na $r = -0,373$, pri čemu je korelacija vršena u odnosu na sadržaj isparljivih materija u analitičkom uzorku).

Sadržaj pepela u uzorcima ima pozitivan uticaj na indeks meljivosti za sve uzorke (tabela 12.1. i 12.2), pri čemu je uticaj sličan na sve uzorke, odnosno koeficijenti korelacije imaju bliske vrednosti ($r_{kolubara} = 0,356$, $r_{kostolac} = 0,318$ izraženo u odnosu na A_a; $r_{kolubara} = 0,291$, $r_{kostolac} = 0,362$ izraženo u odnosu na A).

Sadržaj higroskopne vlage u analitičkom uzorku ima negativan uticaj na vrednosti HGI (tabela 12.1 i 12.2) kako za uzorke kolubarskih lignita tako i kostolačkih ($r = -0,509$ i $r = -0,250$, respektivno), pri čemu veći uticaj ima na uzorke kolubarskih lignita. Na isti način utiče i sadržaj higroskopne vlage ($r_{kolubara} = -0,482$, $r_{kostolac} = -0,161$).

Sadržaj grube vlage ima pozitivan uticaj na vrednosti HGI uzoraka iz kolubarskog basena ($r = 0,228$) a negativan uzoraka kostolačkog basena ($r = -0,395$) (tabela 12.1. i 12.2).

Sadržaj ukupne vlage nema uticaja na vrednosti HGI kod kolubarskih lignita ($r = 0,073$), dok kod kostolačkih lignita ima negativan uticaj na HGI ($r = -0,418$) (tabela 12.1. i 12.2).

Na slikama 12.1 – 12.8 dat je grafički prikaz zavisnosti vrednosti HGI od elemenata tehničke analize za uzorke ugljeva iz kolubarskog basena, a na slikama 12.9 – 12.16 za uzorke ugljeva iz kostolačkog basena.

Iz gore navedenih rezultata jasno se vidi da na meljivost ispitivanih uzoraka pozitivan uticaj ima sadržaj pepela, dok negativan uticaj ima sadržaj isparljivih materija i sadržaj higroskopne vlage.

Ono što treba napomenuti jeste različit uticaj grube vlage i higroskopne vlage na meljivost. Jasno je da higroskopna (vezana) vlaga ima jasan negativan uticaj na meljivost, dok je gruba vlaga prouzrokuje variranje uticaja. Gruba vlaga prouzrokuje lepljenje i aglomeraciju ugljene mase.

Tabela 12.1. Rezultati tehničke analize uzoraka uglja Kolubarskog basena

Redni broj	Broj uzorka	Datum	Lokacija	Postrojenje	HGI	V_a, %	$W_{h,a}$, %	A_a, %	WG, %	W_h, %	W, %	V, %	A, %
1	1	04.05.2009.	TENT B	B1, M12	44,2	37,37	10,03	29,43	44,81	5,54	50,35	20,62	16,24
2	2	04.05.2009.	TENT B	B1, M14	44,4	33,70	7,98	52,48	41,62	4,66	46,28	19,68	30,64
3	3	05.05.2009.	TENT B	B1, M16	44,0	33,98	8,62	32,34	45,20	4,72	49,92	18,62	17,72
4	4	06.05.2009.	TENT B	B1, M17	40,7	37,58	9,15	33,87	43,69	5,15	48,84	21,16	19,07
5	5	06.05.2009.	TENT B	B1, M18	37,9	36,25	9,63	29,30	44,11	5,38	49,49	20,26	16,38
6	6	07.05.2009.	TENT B	B1, M15	40,9	33,94	9,02	33,69	42,78	5,16	47,94	19,42	19,28
7	7	23.04.2009.	TENT B	B1, KOTAO	56,9	31,93	7,99	42,49	41,37	4,68	46,05	18,72	24,91
8	8	29.04.2009.	TENT B	B1, KOTAO	44,9	37,11	8,79	33,26	45,20	4,82	50,02	20,34	18,23
9	9	29.04.2009.	TENT B	B1, KOTAO	40,3	36,88	8,92	29,82	44,92	4,91	49,83	20,32	16,42
10	10	30.04.2009.	TENT B	B1, KOTAO	46,3	36,10	10,92	34,27	44,45	6,06	50,51	20,05	19,04
11	11	07.09.2009.	TENT B	B1, M12	38,7	34,28	9,22	28,87	42,37	5,31	47,68	19,76	16,64
12	12	08.09.2009.	TENT B	B1, M12	42,9	34,41	8,87	27,12	42,76	5,08	47,84	19,70	15,52
13	13	09.09.2009.	TENT B	B1, M12	39,6	37,84	9,70	27,17	43,20	5,51	48,71	21,50	15,43
14	14	23.03.2010.	TENT B	B1, M12	40,6	44,80	10,64	17,76	47,48	5,59	53,07	23,53	9,33
15	15	09.04.2010.	TENT B	A6, M61	44,7	29,03	9,18	22,35	48,32	4,74	53,06	15,00	11,55
16	16	09.04.2010.	TENT B	A6, M66	41,3	32,20	15,05	20,25	34,44	9,86	44,30	21,11	13,28
17	17	10.04.2010.	TENT B	A6, M65	42,2	34,87	9,55	32,63	43,60	5,38	48,98	19,67	18,41
18	18	10.04.2010.	TENT B	A6, M65	44,9	31,99	8,70	41,84	39,53	5,26	44,79	19,35	25,30
19	19	12.04.2010.	TENT B	A6, M62	39,5	34,35	10,04	31,46	45,86	5,43	51,29	18,60	17,03
20	20	12.04.2010.	TENT B	A6, M62	37,4	31,08	8,06	28,09	44,43	4,48	48,91	17,27	15,61
21	21	07.06.2010.	TENT B	B1, M12	40,9	33,82	11,55	31,04	39,22	7,02	46,24	20,56	18,87
22	22	07.06.2010.	TENT B	B1, M12	37,5	37,61	11,84	28,46	39,39	7,18	46,57	22,80	17,25
23	23	08.06.2010.	TENT B	B1, M12	30,7	39,54	12,51	19,20	41,93	7,27	49,20	22,96	11,15
24	24	08.06.2010.	TENT B	B1, M12	30,7	39,91	13,92	17,61	42,24	8,04	50,28	23,05	10,17
25	25	09.06.2010.	TENT B	B1, M12	36,6	38,46	10,72	28,64	41,08	6,32	47,40	22,66	16,87
26	26	10.06.2010.	TENT B	B1, M12	40,8	36,42	10,37	30,71	41,19	6,10	47,29	21,42	18,06

Tabela 12.1. Rezultati tehničke analize uzoraka uglja Kolubarskog basena – nastavak

Redni broj	Broj uzorka	Datum	Lokacija	Postrojenje	HGI	V_a, %	$W_{h,a}$, %	A_a, %	WG, %	W_h, %	W, %	V, %	A, %
27	27	10.06.2010.	TENT B	B1, M12	46,8	34,61	10,10	28,95	40,94	5,96	46,90	20,44	17,10
28	28	14.06.2010.	TENT B	B1, M12	38,1	38,22	12,33	25,05	40,30	7,36	47,66	22,82	14,95
29	29	07.05.2010	TENT B	B2, M8	35,8	39,30	12,10	20,42	44,78	6,68	51,46	21,70	11,28
30	30	14.06.2010.	TENT B	B1, M12	41,0	30,65	16,45	30,53	41,21	9,67	50,88	18,02	17,95
31	31	15.06.2010.	TENT B	B1, M12	43,7	38,31	9,43	28,60	42,81	5,39	48,20	21,91	16,36
32	32	17.06.2010.	TENT B	B1, M12	42,8	39,35	8,73	25,65	44,65	4,83	49,48	21,78	14,19
33	33	22.06.2010.	TENT B	B1, M12	42,4	39,04	11,81	21,27	42,93	6,74	49,67	22,28	12,14
34	34	22.06.2010.	TENT B	B1, M17	42,0	38,62	11,24	22,96	43,48	6,35	49,83	21,83	12,98
35	35	01.07.2010.	TENT B	B1, M12	36,1	39,84	9,98	21,18	46,35	5,35	51,70	21,37	11,36
36	36	22.07.2010.	TENT B	B1, M12	48,5	33,61	9,14	36,48	42,54	5,25	47,79	19,31	20,96
37	37	09.07.2010.	TE KOLUBARA	B5, M2	42,5	33,45	8,54	32,24	44,78	4,72	49,50	18,47	17,80
38	38	09.07.2010.	TE KOLUBARA	B5, M3	44,7	37,82	8,92	28,18	46,51	4,77	51,28	20,23	15,08
39	39	10.07.2010.	TE KOLUBARA	B5, KOTAO	43,5	32,62	8,16	35,96	44,13	4,56	48,69	18,23	20,09
40	40	14.09.2010.	TENT B	MLIN A42	40,4	38,96	9,73	25,91	43,58	5,49	49,07	21,98	14,62
41	41	20.09.2010.	TENT B	B1, M12	36,6	38,87	10,44	20,51	44,67	5,78	50,45	21,51	11,35
42	42	16.11.2010.	TENT A	A3, M34	47,5	31,64	10,18	32,25	40,90	6,02	46,92	18,70	19,06
43	43	16.11.2010.	TENT A	A3, M33	55,5	29,19	8,49	35,59	41,76	4,94	46,70	17,00	20,73
44	44	13.01.2011.	TENT B	B1, M12	51,6	37,38	7,94	29,09	45,97	4,29	50,26	20,20	15,72
45	45	19.01.2011.	TENT B	B1, M12	41,4	38,00	8,95	25,46	45,66	4,86	50,52	20,65	13,84
46	46	01.02.2011.	TENT B	B1, M12	47,2	36,68	9,70	30,10	45,30	5,30	50,60	20,06	16,47
47	47	01.02.2011.	TENT B	B1, M12	40,6	40,19	9,23	29,03	46,61	4,93	51,54	21,46	15,50
48	48	01.02.2011.	TENT B	B1, M12	47,0	36,31	8,19	25,85	46,64	4,37	51,01	19,38	13,79
49	49	04.04.2011.	TENT A	A6, KOTAO	38,3	38,98	10,77	25,48	44,80	5,95	50,75	21,52	14,06

Tabela 12.1. Rezultati tehničke analize uzoraka uglja Kolubarskog basena – nastavak

Redni broj	Broj uzorka	Datum	Lokacija	Postrojenje	HGI	V_a, %	$W_{h,a}$, %	A_a, %	WG, %	W_h, %	W, %	V, %	A, %
50	50	06.04.2011.	TENT A	A6, M65	40,5	35,76	10,14	30,00	44,17	5,66	49,83	19,96	16,75
51	51	06.04.2011.	TENT A	A6, M65	46,3	35,19	8,86	34,31	45,39	4,84	50,23	19,22	18,74
52	52	12.04.2011.	TENT A	A6, M62	34,8	40,55	11,58	21,48	45,60	6,30	51,90	22,06	11,69
53	53	12.04.2011.	TENT A	A6, M62	32,3	40,80	10,80	24,26	45,10	5,93	51,03	22,40	13,32
54	54	14.04.2011.	TENT A	A6, M64	38,6	49,27	10,73	24,44	43,99	6,01	50,00	27,60	13,69
55	55	14.04.2011.	TENT A	A6, M64	38,7	47,22	10,51	29,57	43,14	5,98	49,12	26,85	16,81
56	56	04.05.2011.	TENT A	A6, M66	39,6	47,18	10,43	30,74	42,92	5,95	48,87	26,93	17,55
57	57	04.05.2011.	TENT A	A6, M66	38,6	48,39	10,88	28,47	42,28	6,28	48,56	27,93	16,43
58	58	04.05.2011.	TENT A	A6, M66	39,5	50,12	10,83	28,44	42,02	6,28	48,30	29,06	16,49
59	59	04.05.2011.	TENT A	A6, M61	37,5	48,44	11,13	29,69	41,75	6,48	48,23	28,22	17,29
60	60	04.05.2011.	TENT A	A6, M61	38,2	46,87	10,84	31,77	41,18	6,38	47,56	27,57	18,69
61	61	04.05.2011.	TENT A	A6, M61	37,3	47,09	10,81	31,17	41,59	6,31	47,90	27,51	18,21
62	70	16.03.2012.	Polje C	Buš, PR-1/12	54,6	41,01	9,20	21,58	47,90	4,79	52,69	21,37	11,24
63	71	16.03.2012.	Polje C	Buš, PR-2	45,6	39,82	9,49	21,96	53,38	4,42	57,80	18,56	10,24
64	72	16.03.2012.	Polje C	Buš, PR-3	52,5	42,66	9,29	17,42	55,53	4,13	59,66	18,97	7,75
65	73	16.03.2012.	Polje C	Buš, PR-4	41,8	45,10	9,39	16,35	52,28	4,48	56,76	21,52	7,80
				Minimum	30,7	29,03	7,94	16,35	34,44	4,13	44,30	15,00	7,75
				Maksimum	56,9	50,12	16,45	52,48	55,53	9,86	59,66	29,06	30,64
				Srednja vrednost	41,8	38,04	10,10	28,35	43,92	5,68	49,60	21,30	15,98
				Korelacioni koeficijent sa HGI		–0,373	–0,509	0,356	0,228	–0,482	0,073	–0,476	0,291

V_a – sadržaj isparljivih materija u analitičkom uzorku (maseni udeo u %)
$W_{h,a}$ – sadržaj higroskopne vlage u analitičkom uzorku (maseni udeo u %)
A_a – sadržaj pepela u analitičkom uzorku (maseni udeo u %)
WG – sadržaj grube vlage (maseni udeo u %)
W_h – sadržaj higroskopne vlage u radnom uzorku (maseni udeo u %)
W – sadržaj ukupne vlage (maseni udeo u %)
V – sadržaj isparljivih materija u radnom uzorku (maseni udeo u %)
A – sadržaj pepela u radnom uzorku (maseni udeo u %)

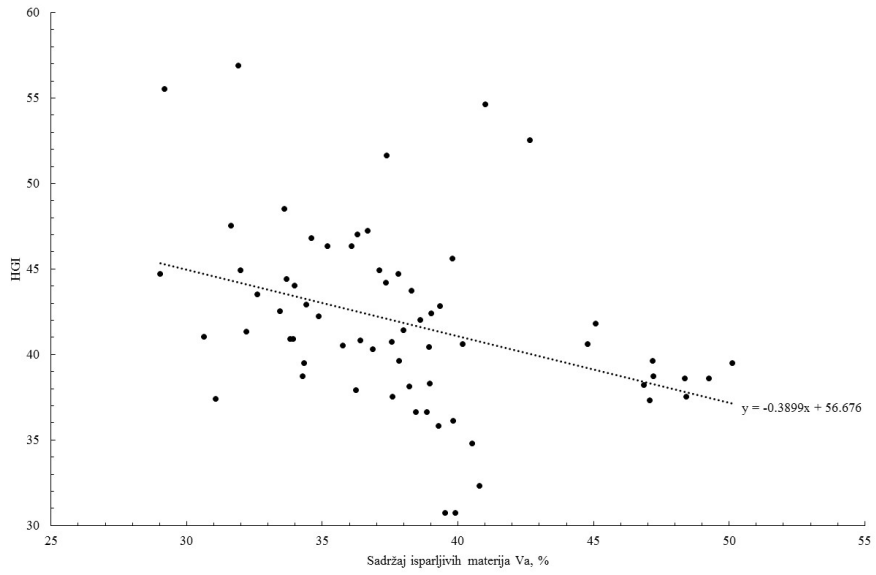
Tabela 12.2. Rezultati tehičke analize uzoraka uglja Kostolačkog basena

Redni broj	Broj uzorka	Datum	Lokacija	Postrojenje	HGI	V_a, %	$W_{h,a}$, %	A_a, %	WG, %	W_h, %	W, %	V, %	A, %	Hg, kJ/kg
1	1	19.01.2010.	Kostolac	B1	45,6	35,42	9,39	38,49	33,85	6,21	40,06	23,43	25,46	8066
2	2	20.01.2010.	Kostolac	B1	41,3	37,35	10,56	31,88	34,17	6,95	41,12	24,59	20,99	8994
3	3	21.01.2010.	Kostolac	B1	44,2	34,65	8,89	39,85	34,33	5,84	40,17	22,75	26,17	7817
4	4	21.01.2010.	Kostolac	B1	40,8	35,15	9,10	36,78	34,88	5,93	40,81	22,89	23,95	9074
5	5	25.01.2010.	Kostolac	B1	42,0	35,43	8,11	49,29	32,68	5,46	38,14	23,85	33,18	6537
6	6	26.01.2010.	Kostolac	B1	44,2	31,69	8,36	46,73	33,95	5,52	39,47	20,93	30,87	6828
7	7	27.01.2010.	Kostolac	B1	47,0	31,07	8,46	44,85	32,43	5,72	38,15	21,00	30,30	6953
8	8	28.01.2010.	Kostolac	B1	44,2	30,33	8,85	47,26	34,24	5,82	40,06	19,95	31,08	7020
9	9	29.01.2010.	Kostolac	B1	44,1	32,99	9,03	43,78	34,40	5,92	40,32	21,64	28,72	7406
10	10	01.02.2010.	Kostolac	B1	42,0	35,42	8,79	46,37	34,63	5,74	40,37	23,16	30,31	6372
11	11	02.02.2010.	Kostolac	B1	44,8	33,36	8,72	48,09	33,86	5,77	39,63	22,07	31,80	6521
12	12	08.02.2010.	Kostolac	B1	44,3	32,26	8,64	41,22	35,26	5,59	40,85	20,88	26,69	8200
13	13	09.02.2010.	Kostolac	B1	41,7	36,71	9,15	39,46	35,71	5,88	41,59	23,60	25,37	8272
14	14	10.02.2010.	Kostolac	B1	44,1	33,95	9,06	48,55	34,19	5,96	40,15	22,34	31,95	6557
15	15	11.02.2010.	Kostolac	B1	43,4	36,35	9,25	45,00	35,16	6,00	41,16	23,57	29,18	7063
16	16	12.02.2010.	Kostolac	B1	43,6	35,42	9,04	50,15	34,68	5,90	40,58	23,14	32,76	6350
17	17	n.p.	Kostolac	B1	44,6	34,93	9,18	47,55	35,06	5,96	41,02	22,68	30,88	5928
18	18	17.02.2010.	Kostolac	B1	42,0	36,10	9,29	44,74	34,74	6,06	40,80	23,56	29,20	7059
19	19	18.02.2010.	Kostolac	B1	44,6	32,78	8,97	44,11	34,87	5,84	40,71	21,35	28,73	6914
20	20	19.02.2010.	Kostolac	B1	44,2	35,72	10,17	45,00	34,53	6,66	41,19	23,39	29,46	6730
21	21	22.02.2010.	Kostolac	B1	41,7	36,23	9,23	43,31	36,04	5,91	41,95	23,17	27,70	7562
22	22	23.02.2010.	Kostolac	B1	43,1	33,36	9,66	43,01	35,90	6,19	42,09	21,38	27,57	7293
23	23	24.02.2010.	Kostolac	B1	42,7	37,14	8,65	45,08	35,31	5,60	40,91	24,03	29,16	7053
24	24	25.02.2010.	Kostolac	B1	43,7	34,97	8,90	45,61	36,40	5,66	42,06	22,24	29,01	6908

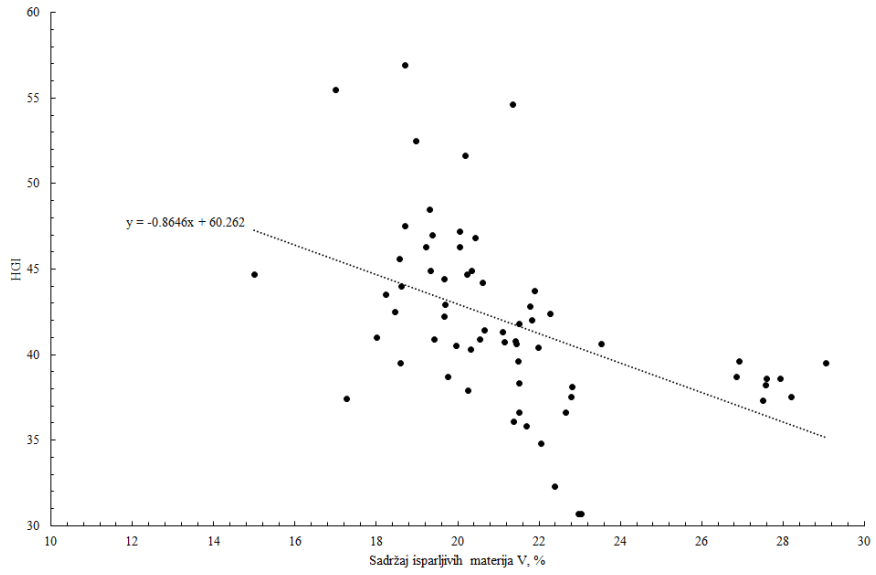
Tabela 12.2. Rezultati tehičke analize uzoraka uglja Kostolačkog basena – nastavak

Redni broj	Broj uzorka	Datum	Lokacija	Postrojenje	HGI	V_a, %	$W_{h,a}$, %	A_a, %	WG, %	W_h, %	W, %	V, %	A, %	Hg, kJ/kg
				Minimum	40,8	30,33	8,11	31,88	32,43	5,46	38,14	19,95	20,99	40,8
				Maksimum	47,0	37,35	10,56	50,15	36,40	6,95	42,09	24,59	33,18	47,0
				Srednja vrednost	43,5	34,53	9,06	44,01	34,64	5,92	40,56	22,57	28,77	43,5
				Korelacioni koficijent sa HGI		-0,640	-0,250	0,318	-0,395	-0,161	-0,418	-0,574	0,362	-0,382

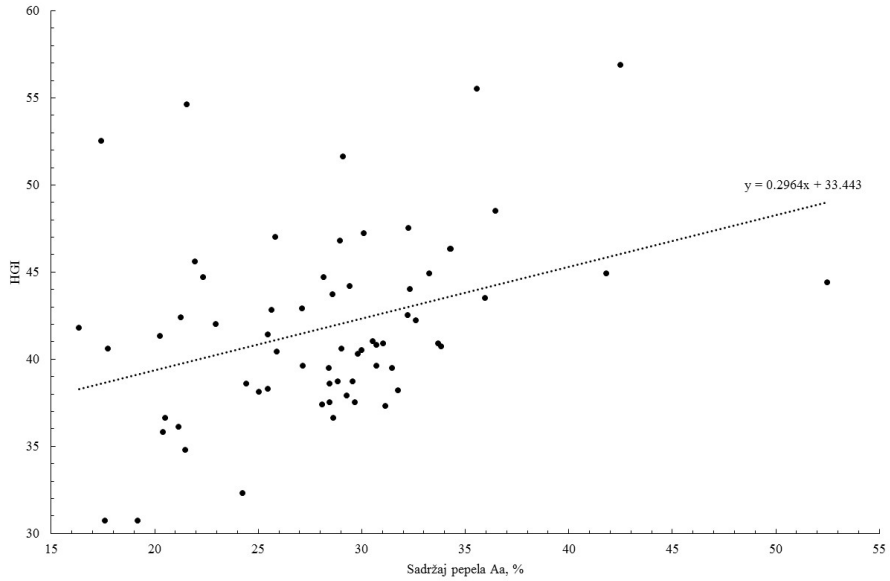
Hg – gornja toplotna moć radnog uzorka



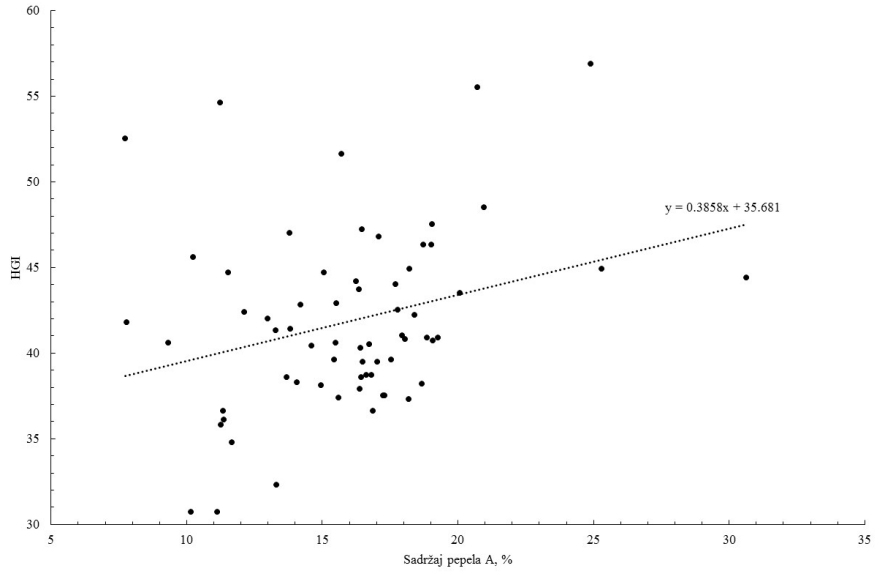
Slika 12.1. Zavisnost vrednosti HGI od V_a (kolubarski uzorci)



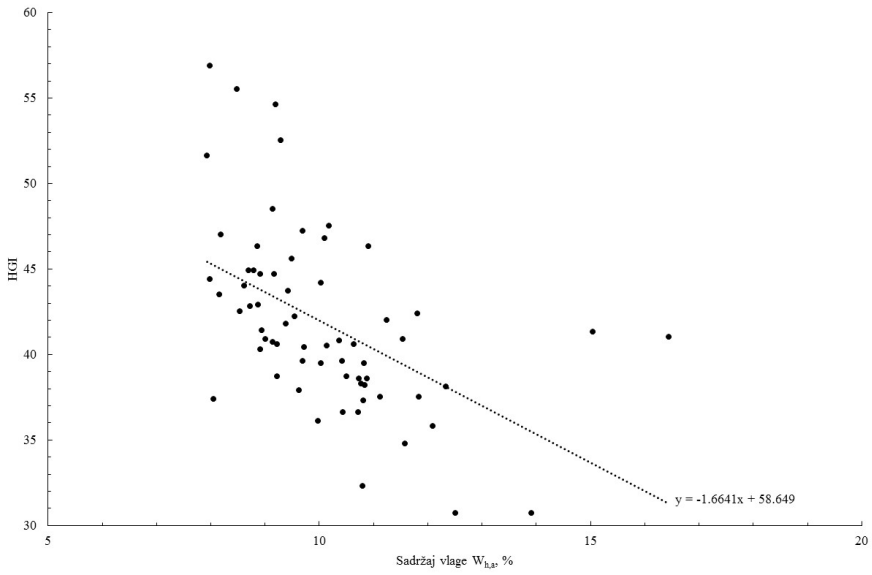
Slika 12.2. Zavisnost vrednosti HGI od V (kolubarski uzorci)



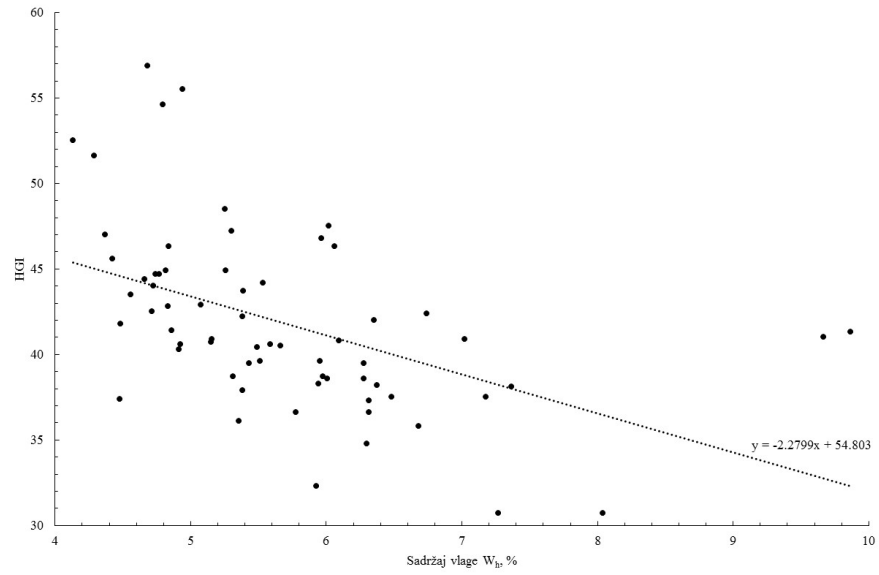
Slika 12.3. Zavisnost vrednosti HGI od A_a (kolubarski uzorci)



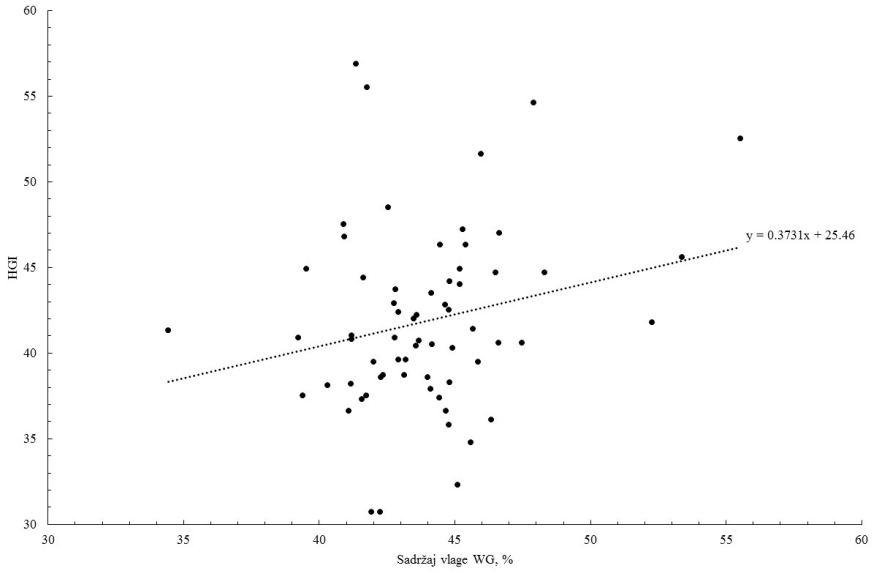
Slika 12.4. Zavisnost vrednosti HGI od A (kolubarski uzorci)



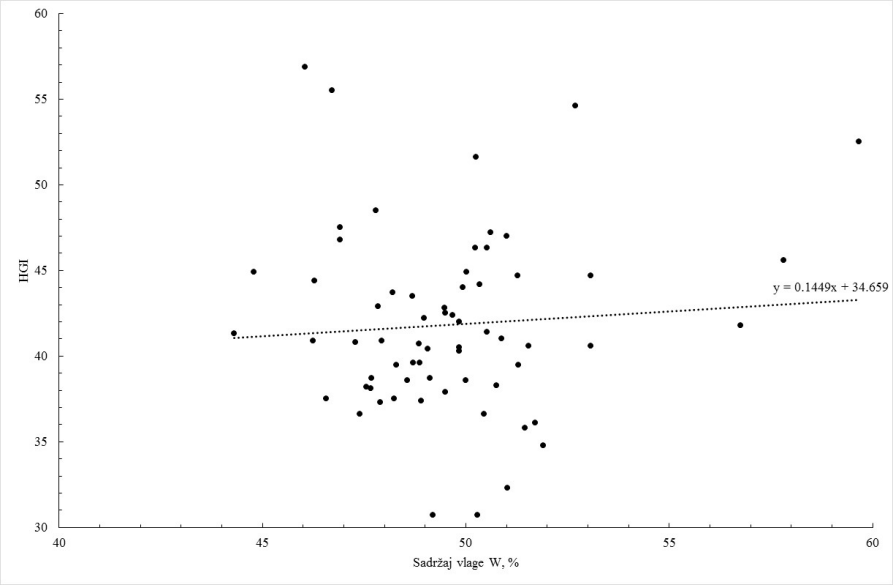
Slika 12.5. Zavisnost vrednosti HGI od $W_{h,a}$ (kolubarski uzorci)



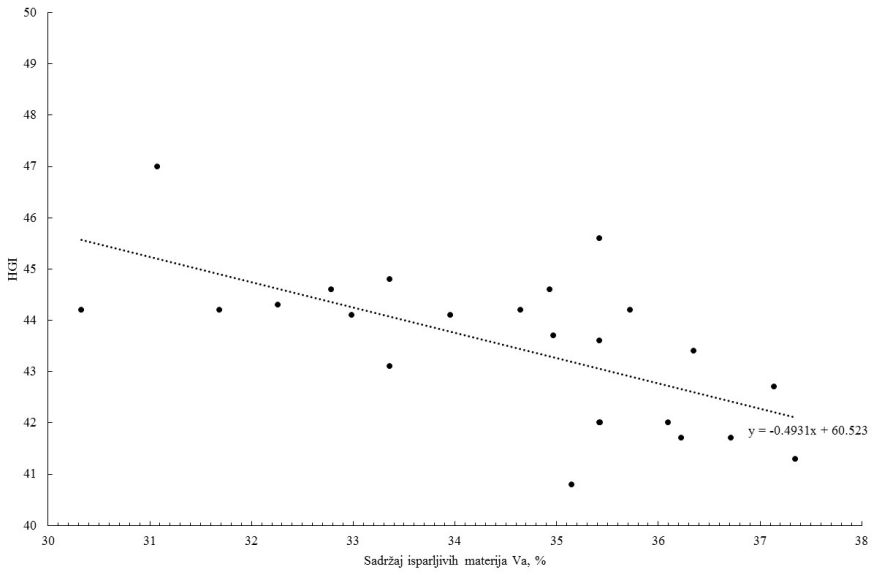
Slika 12.6. Zavisnost vrednosti HGI od W_h (kolubarski uzorci)



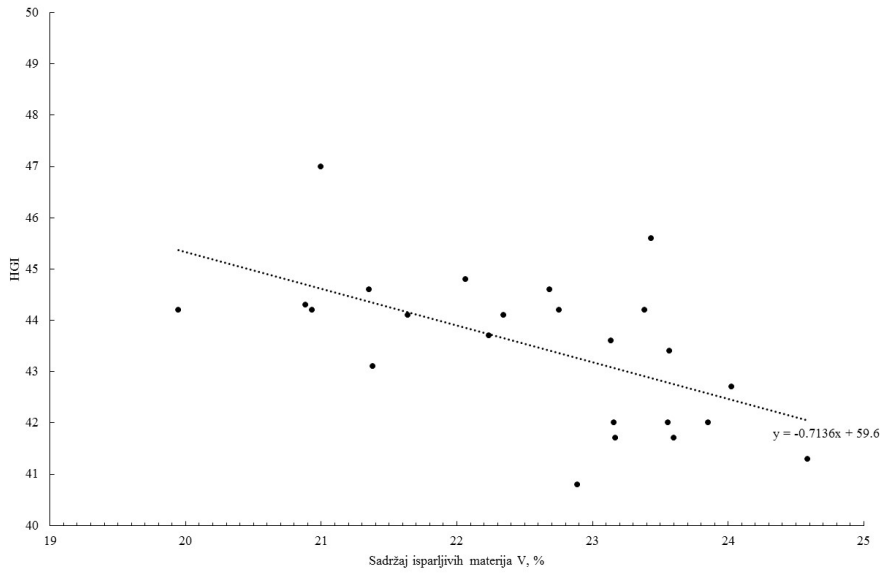
Slika 12.7. Zavisnost vrednosti HGI od WG (kolubarski uzorci)



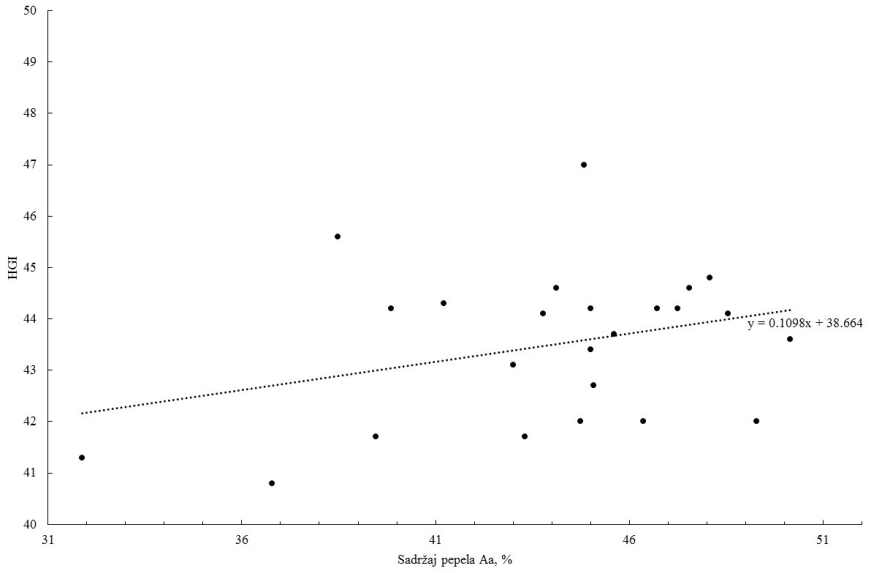
Slika 12.8. Zavisnost vrednosti HGI od W (kolubarski uzorci)



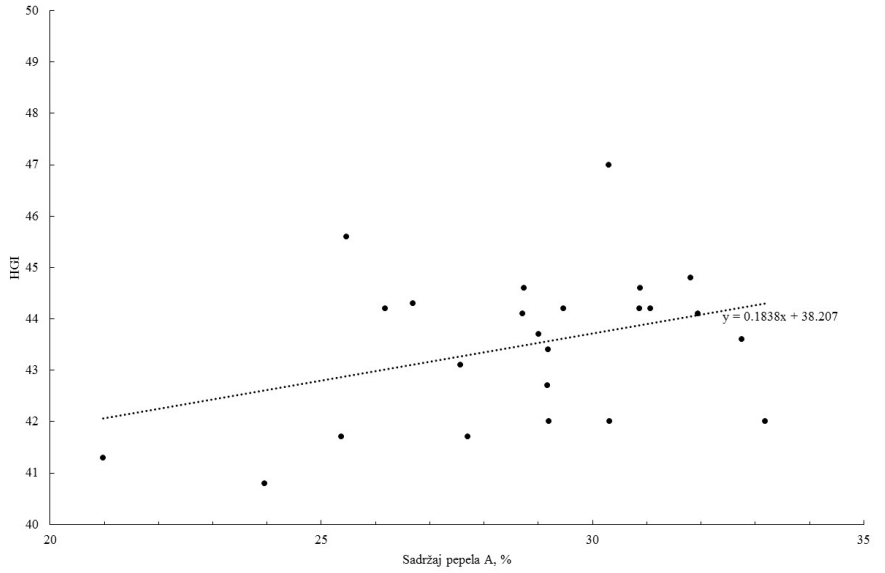
Slika 12.9. Zavisnost vrednosti HGI od V_a (kostolački uzorci)



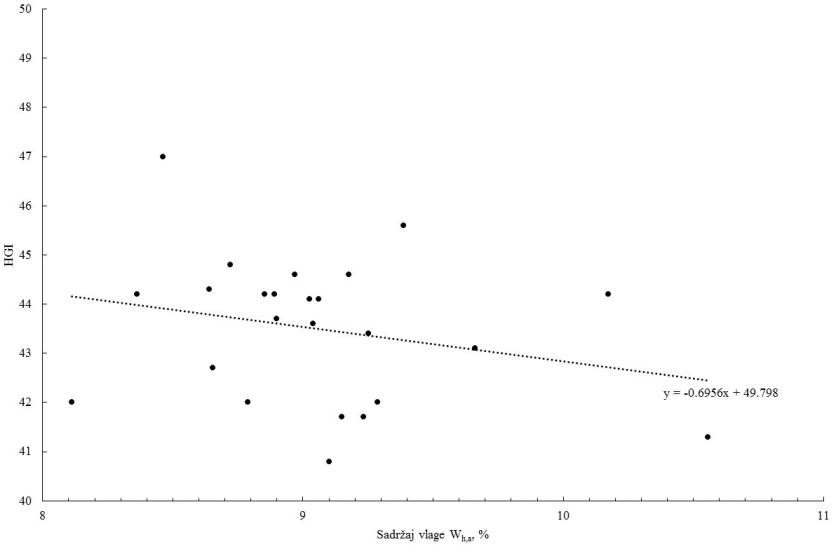
Slika 12.10. Zavisnost vrednosti HGI od V (kostolački uzorci)



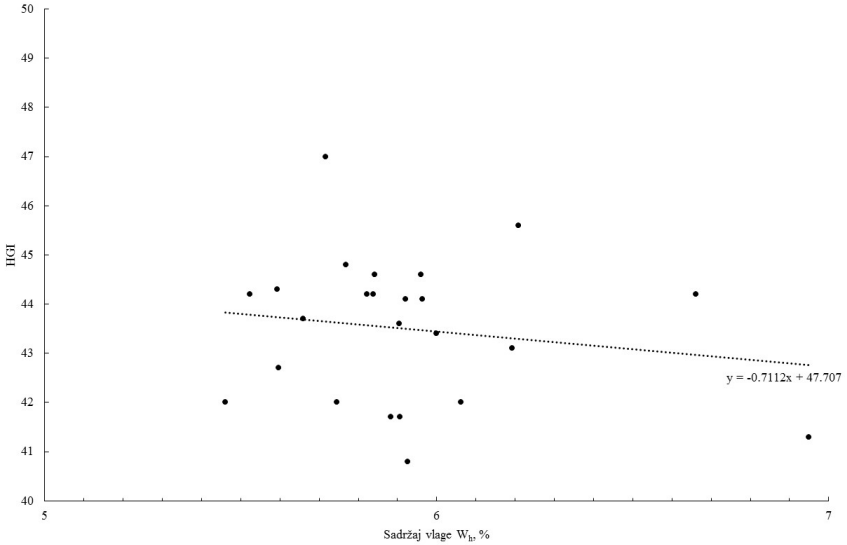
Slika 12.11. Zavisnost vrednosti HGI od A_a (kostolački uzorci)



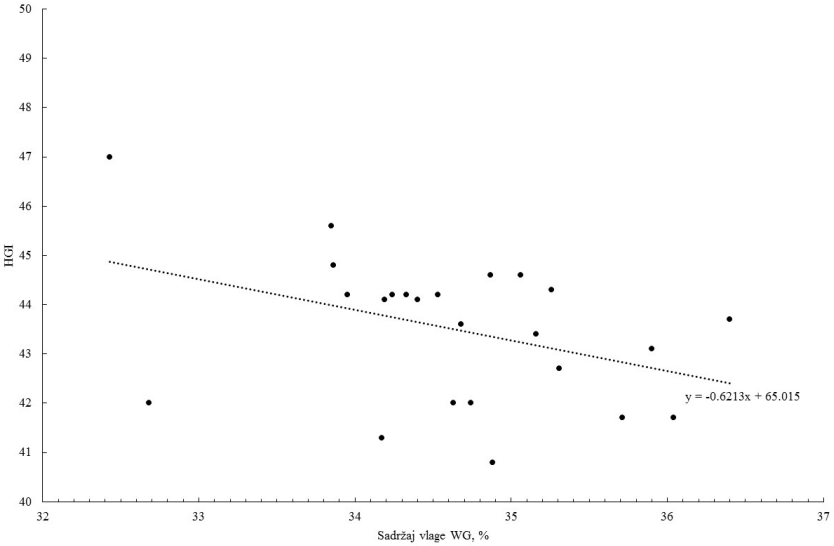
Slika 12.12. Zavisnost vrednosti HGI od A (kostolački uzorci)



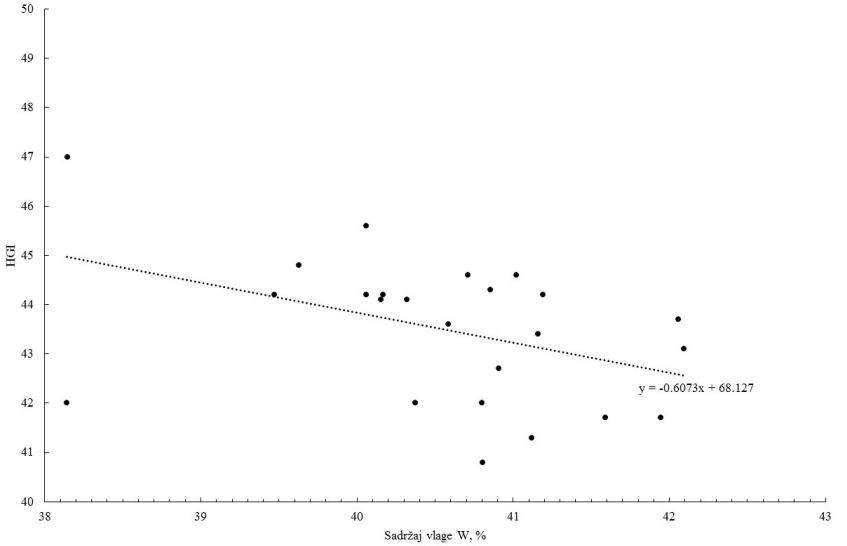
Slika 12.13. Zavisnost vrednosti HGI od $W_{h,a}$ (kostolački uzorci)



Slika 12.14. Zavisnost vrednosti HGI od W_h (kostolački uzorci)



Slika 12.15. Zavisnost vrednosti HGI od WG (kostolački uzorci)



Slika 12.16. Zavisnost vrednosti HGI od W (kostolački uzorci)

13. Uticaj sadržaja vlage na vrednosti HGI

U cilju dobijanja podataka kako sadržaj vlage utiče na meljivost ugljeva izvršena su eksperimentalna istraživanja. Eksperiment je obuhvatio šest uzoraka ugljeva kolubarskog basena i to: uzorak 23, uzorak 29, uzorak 34, uzorak 8, uzorak 36 i uzorak 7. Izbor uzoraka je izvršen u zavisnosti od eksperimentom dobijenih vrednosti o njihovoj meljivosti (vrednosti HGI) sa ciljem da se pokrije celokupna oblast eksperimentalnih vrednosti HGI (od najmanje do najveće). Takođe, nad gore navedenim uzorcima je izvršena ne samo tehnička analiza već i organsko-geohemijska i petrografska. Pregled uzoraka izabranih za ovaj deo eksperimentalnih istraživanja je dat u tabeli 13.1.

Tabela 13.1. Pregled izabranih uzoraka za analizu

R. br.	Oznaka uzorka	HGI*	Početni maseni udeo ukupne vlage, W %
1	Uzorak 23	30,7	53,65
2	Uzorak 29	35,8	53,27
3	Uzorak 34	42,0	52,17
4	Uzorak 8	44,9	51,77
5	Uzorak 36	48,5	47,86
6	Uzorak 7	56,9	43,94
* Određivanje vrednosti HGI je izvršeno prema standardu ISO 5074 (ovaj podatak predstavlja vrednost HGI za uzorak osušen na ravnotežni udeo vlage)			

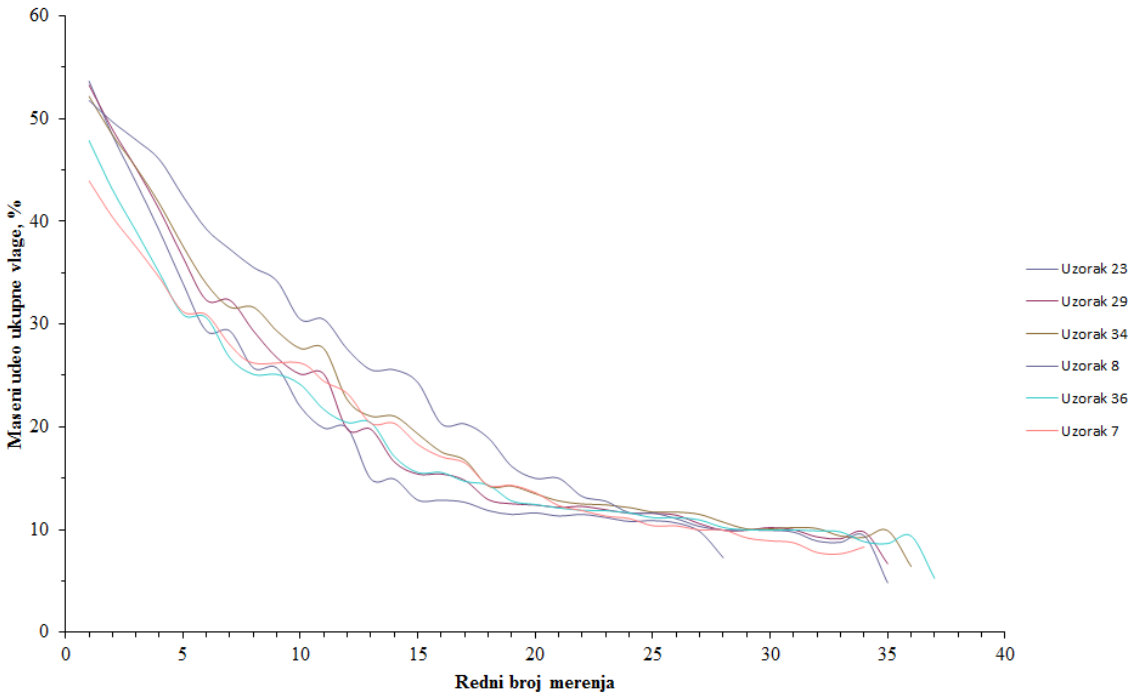
Određivanje masenog udela ukupne vlage izvršeno je prema standardu ISO 5068-1: Brown coals and lignites – Determination of moisture content – Part 1: Indirect gravimetric method for total moisture.

Na početku ispitivanja, izvršeno je određivanje udela ukupne vlage i mase apsolutno suvog uzoraka u cilju praćenja promene ukupne mase po danima. Merenje mase uzoraka je vršeno svakodnevno, pri čemu se izračunavalo maseni udeo ukupne vlage u uzorku.

Prvo određivanje vrednosti HGI uzoraka vršeno je po dostizanju ukupne vlage u uzorku od oko 30 %, a zatim na svakih 5 % pada udela vlage, tj. 25, 20, 15, 10 i 5 %.

Zavisnost promena vlage u uzorcima tokom vremena data je na slici 13.1. Sušenje uzoraka je vršeno na vazduhu čime se objašnjava da je usled atmosferskih uslova, za

neke od uzoraka bilo potrebno duže vremena da dostignu zahtevane masene udele vlage.



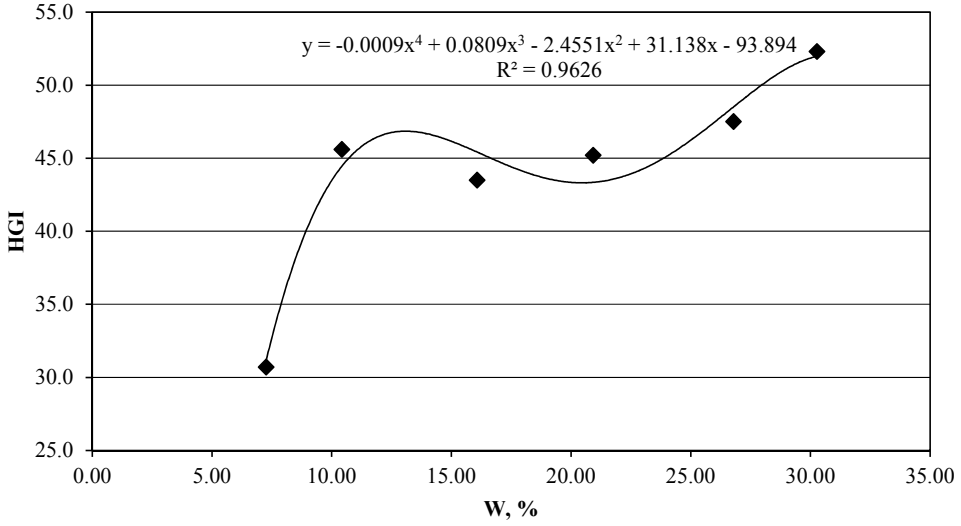
Slika 13.1. Zavisnost promene masenog udela ukupne vlage u uzorcima

Prilikom dostizanja zahtevanog udela vlage, iz ukupnog uzorka je, korišćenjem razdelinika u cilju dobijanja reprezentativnog uzorka za određivanje vrednosti HGI, uzimana odgovarajuća masa uglja (oko 125 grama) kako bi se odredila vrednost HGI posmatranog uzorka. U tabeli 13.2. date su eksperimentalno određene vrednosti HGI ovako uzetih uzoraka uglja.

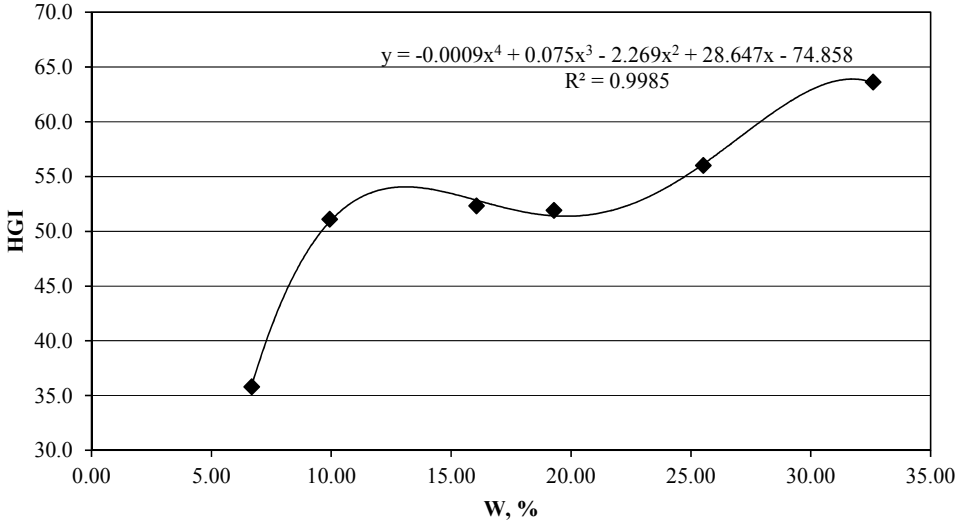
Kako bi se pokazao trend da meljivost uzorka 36 opada posle maksimuma, vršeno je sušenje uzorka u sušari na 40 °C, kako bi se maseni udeo vlage smanjio ispod 5,25 %. Sušenje uzorka je izvršeno u sušari jer usled atmosferskih uslova i niskog udela vlage nije bilo moguće "prirodnim" putem dodatno izdvojiti vlagu iz uzorka. Posle sušenja na 40 °C, izvršeno je određivanje ukupne vlage u uzorku prema standardu ISO 5068-1. Eksperimentalno dobijeni rezultati prikazani su na slikama 13.2. do 13.7.

Tabela 13.2. Zavisnost vrednosti HGI od masenog udela ukupne vlage uzoraka uglja obuhvaćenih eksperimentom

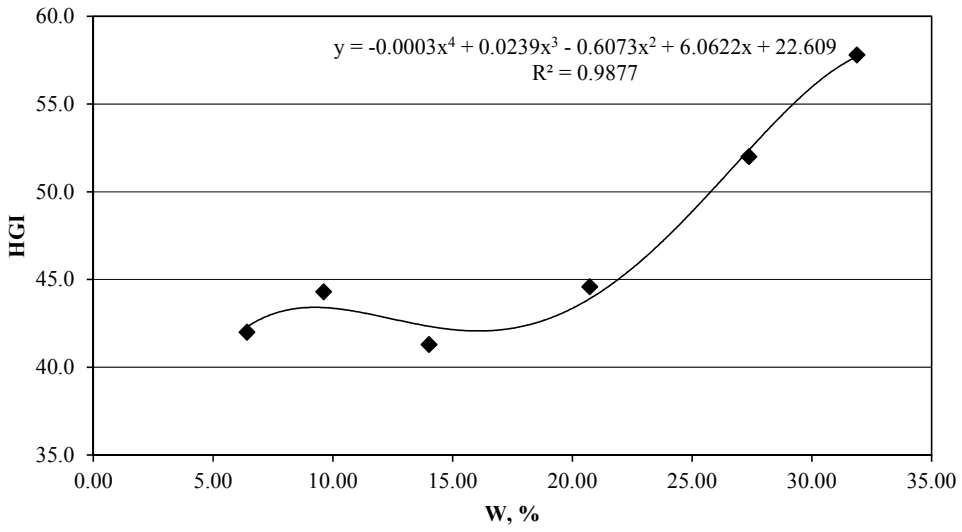
Uzorak 23		Uzorak 29		Uzorak 34		Uzorak 8		Uzorak 7		Uzorak 36	
W, %	HGI	W, %	HGI	W, %	HGI	W, %	HGI	W, %	HGI	W, %	HGI
30,27	52,3	32,60	63,6	31,88	57,8	31,17	66,1	30,76	70,4	29,88	60,1
26,79	47,5	25,51	56,0	27,37	52,0	25,81	60,7	26,33	54,6	24,71	44,5
20,92	45,2	19,29	51,9	20,72	44,6	20,79	57,3	20,39	52,7	19,81	40,1
16,07	43,5	16,06	52,3	14,01	41,3	15,05	61,0	14,24	53,7	15,32	41,1
10,42	45,6	9,93	51,1	9,61	44,3	9,91	57,6	10,12	58,3	9,42	44,8
7,26	30,7	6,68	35,8	6,41	42,0	4,82	44,9	4,68	56,9	5,25	48,5
										1,90	44,5



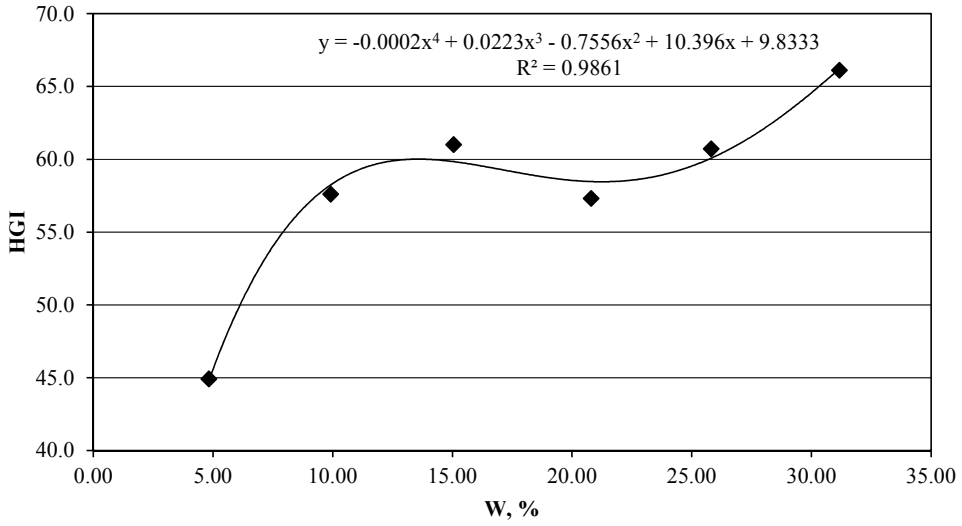
Slika 13.2. Zavisnost vrednosti HGI od ukupnog masenog udela vlage za uzorak 23



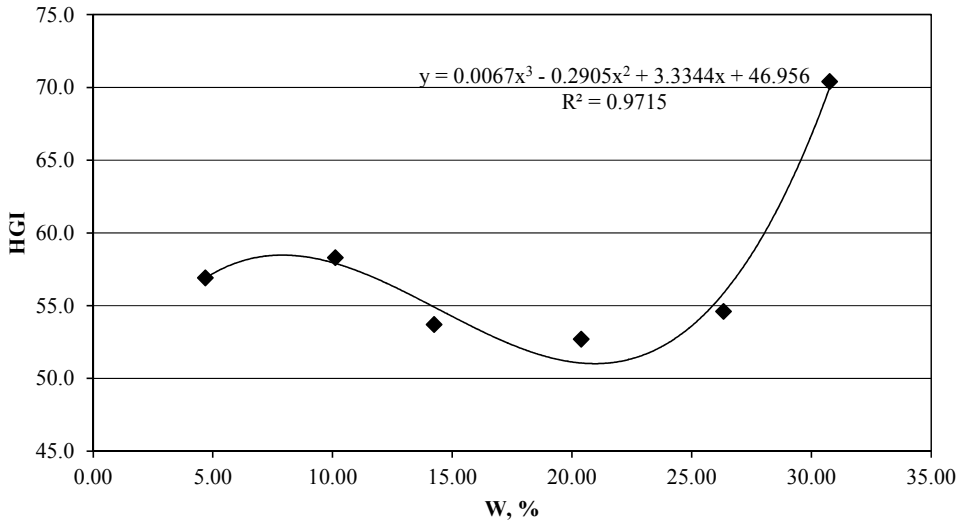
Slika 13.3. Zavisnost vrednosti HGI od ukupnog masenog udela vlage za uzorak 29



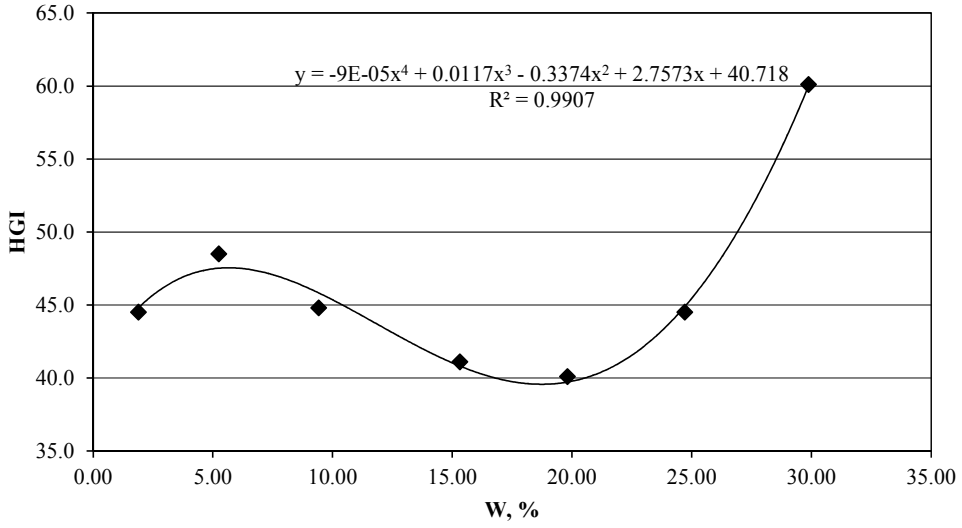
Slika 13.4. Zavisnost vrednosti HGI od ukupnog masenog udela vlage za uzorak 34



Slika 13.5. Zavisnost vrednosti HGI od ukupnog masenog udela vlage za uzorak 8



Slika 13.6. Zavisnost vrednosti HGI od ukupnog masenog udela vlage za uzorak 7



Slika 13.7. Zavisnost vrednosti HGI od ukupnog masenog udela vlage za uzorak 36

Kao što se vidi na slikama 13.2. do 13.7, indeks meljivosti ugljeva (HGI) ima nelinearnu zavisnost od masenog udela ukupne vlage u uglju. Sve krive imaju dve prevojne tačke, jedan minimum i jedan maksimum vrednosti HGI u ispitivanoj oblasti. Minimalne vrednosti HGI odgovaraju intervalu 15 – 22 % masenog udela ukupne vlage u uglju, dok maksimalne vrednosti HGI ima za udele ukupne vlage 5 – 13 %.

Dobijene visoke vrednosti HGI uzoraka sa visokim udelom ukupne vlage treba uzeti sa rezervom. Posmatrajući dobijene krive, može se pogrešno zaključiti da je lakše mleti ugalj sa visokim udelom vlage nego sa udelom ravnotežne vlage. Ova teza je u direktnoj

suprotnosti sa praktičnim iskustvima koja nalažu da se kvalitetno mlevenje uglja ne može izvršiti bez njegovog sušenja u mlinovima. Takođe, iz ovoga se može zaključiti da Hardgrove-ov postupak za određivanje vrednosti HGI ugljeva sa visokim udelom vlage nije primenljiv, odnosno ne daje realne praktične rezultate.

Jedno od mogućih objašnjenja dobijenih visokih vrednosti HGI pri visokim udelima vlage u uglju leži u sledećem: prilikom određivanja vrednosti HGI uzoraka sa visokim udelom vlage primećeno je stvaranje nalepa uglja kako na kuglama tako i na radnom kolu aparature. Usled stvaranja nalepa uglja, dolazi do otežanog dotoka uglja koji nije ušao u proces mlevenja u Hardgrove mlinu. Drugim rečima, neodređena količina uglja se duže (iznova) melje (zbog čega sav uzorak ne dospe u proces mlevenja) pri čemu se stvara frakcija koja propada kroz sito dimenzije otvora 75 μm, što dovodi do nerealno visokih vrednosti HGI. Prema tome, visoke vrednosti HGI u uzorcima uglja sa visokim udelom vlage su posledica nesavršenosti metode (konstrukcije mlina), a ne karakteristika uglja.

Povećanje vrednosti HGI posle minimuma se objašnjava slabljenjem strukture uglja usled smanjenja udela vlage, odnosno pojave pukotina u strukturi uglja pri njegovom sušenju.

Ponovni pad vrednosti HGI, kako se sadržaj vlage približava nuli se objašnjava karakteristikama pepela uglja u suvom stanju.

Isti rezultati uticaja vlage na vrednosti HGI zabeleženi su u literaturi i prikazani su na slici 7.5. u poglavlju 7.

14. Uticaj petroloških i organo-geohemijskih karakteristika izabranih uzoraka lignita kolubarskog i kostolačkog basena na njihovu meljivost

Uticaj različitih litotipova ugljeva na meljivost istražen je analizom uzoraka lignita iz dva najvažnija basena u Srbiji: kolubarskog i kostolačkog.

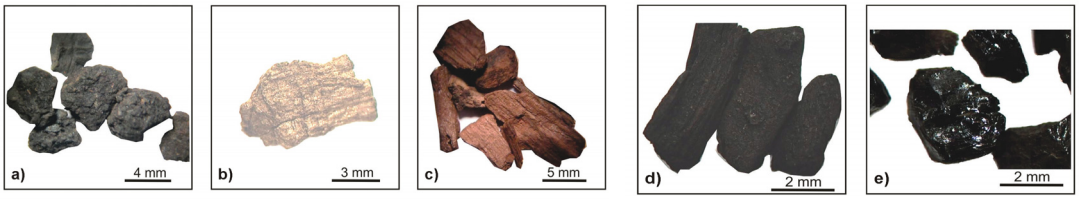
Za analizu je uzeto 11 uzoraka uglja iz termoelektrane Nikola Tesla B u Obrenovcu (period od aprila 2009. do jula 2010. godine) i 13 uzoraka uglja iz termoelektrane Kostolac (period od januara 2010. do februara 2010. godine). Izbor uzoraka je izvršen kako bi se obuhvatio ceo opseg vrednosti HGI (tabele 12.1. i 12.2).

Izvršeno je i određivanje vrednosti HGI zbirnih uzoraka litotipova i to: barskog uglja, strukturnog ksilita i trakastog ksilita uzoraka uglja iz oba basena. Zbirni uzorak litotipa predstavlja uzorak koji je nastao spajanjem odgovarajućeg litotipa svih ispitivanih uzoraka.

14.1. Rezultati analiza uzoraka

14.1.1. Litotipovi

Dominantan litotip u uzorcima ugljeva je barski (slika 14.1a), sem jednog uzorka iz kolubarskog basena (Kolubara 23, tabela 14.1) gde dominira ksilitni litotip. Strukturni ksilit (slika 14.1d) je dominantan tip ksilita u skoro svim ispitivanim uzorcima, sem u uzorku Kolubara 23 gde dominira trakasti ksilit (slika 14.1c). Uzorci kostolačkih ugljeva imaju više udela dopleritskog ksilita (slika 14.1e) nego kolubarski uzorci.



Slika 14.1. Izgled barskog i ksilitnog litotipa

a) barski ugalj, b) mumificirani ksilit, c) trakasti ksilit, d) strukturni ksilit, e) dopleritski ksilit

Određivanje vrednosti HGI na pojedinim litotipovima dalo je sledeće rezultate:

1. vrednost HGI barskog uglja (zbirni uzorak) kolubarskih lignita iznosio je 44, a kostolačkih (takođe zbirni uzorak) iznosio je 37,3;
2. vrednost HGI strukturnog ksilita (zbirni uzorak) kolubarskih lignita iznosio je 33,3, a kostolačkih (takođe zbirni uzorak) iznosio je 38,5;
3. vrednost HGI trakastog ksilita (zbirni uzorak) kolubarskih lignita iznosio je 41,3, a kostolačkih (takođe zbirni uzorak) iznosio je 58,3.

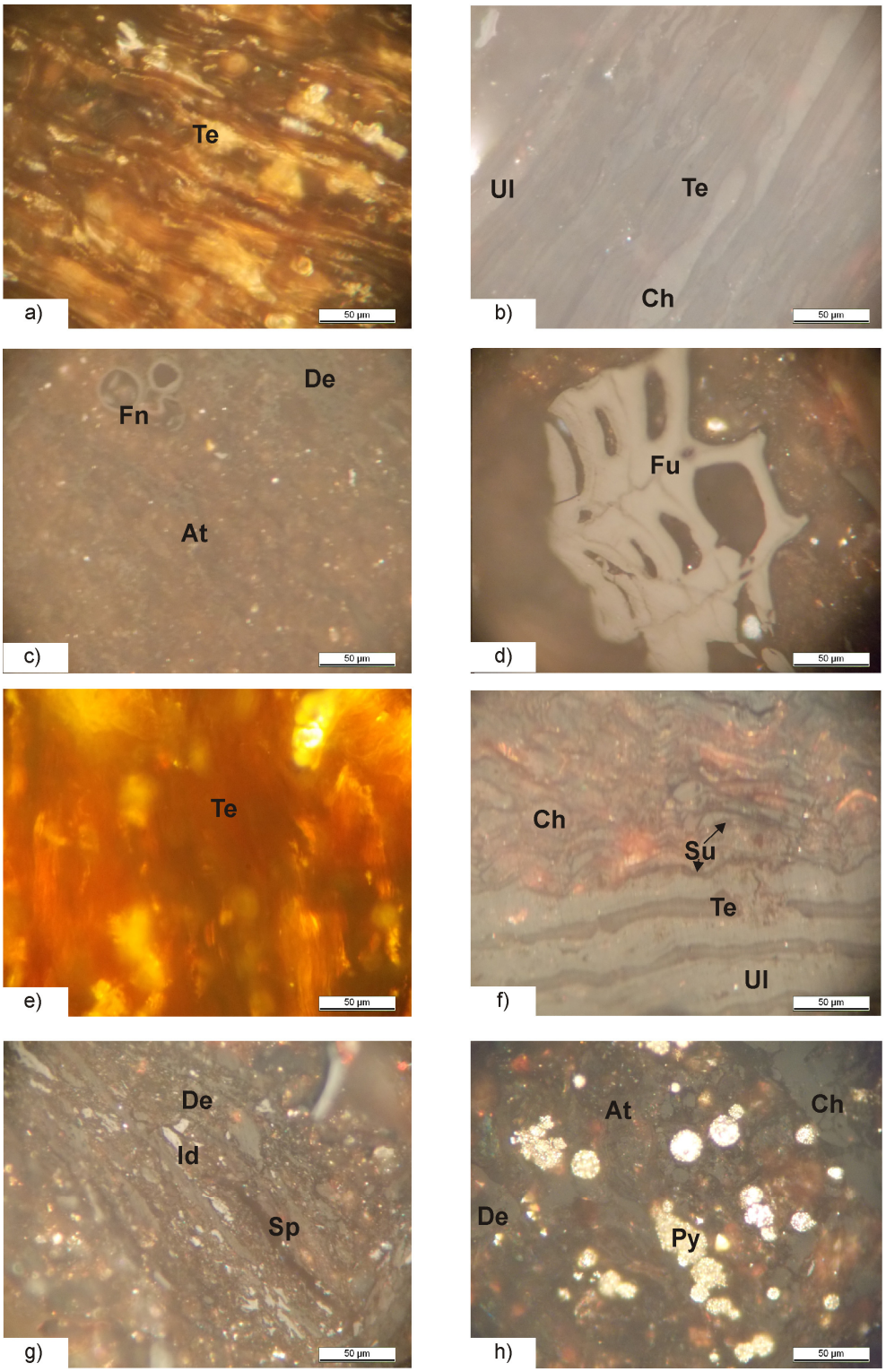
14.1.2. Maceralni sastav

Najzastupljenija grupa macerala u ispitivanim uzorcima je grupa huminita čiji se sadržaj kreće od 57,2 do 85,7 zap. % (slika 14.2, tabela 14.2). Najzastupljeniji macerali grupe huminita su tekstinit (13,3 – 53,6 zap. %), ulminit (3,8 – 38,3 zap. %) i densinit (9,2 – 25,5 zap. %) sa promenljivim sadržajem atrinita (0,9 – 10,1 zap. %) i korpohuminita (1,6 – 9,0 zap. %). Sadržaj gelinita je nizak (<5,0 zap. %). Rezinit se najčešće javlja u vidu uprskanja u telohuminitu, dok se unutar detrohuminita (detritusna organska materija) javljaju liptiniti i/ili inertiniti. U nekim slučajevima, macerali detrohuminitske podgrupe su srasli sa mineralima glina. Gelinit se javlja najčešće sa ulminitom ili densinitom, u nekim slučajevima gradi sopstvena zrna. Korpohuminit se najčešće javlja unutar tekstinita i ulminita, ponekad u densinitu, uglavnom kao flobafinit.

Sadržaj liptinita se kreće u opsegu 3,2 – 10,90 zap. % sa suberinitom (0,8 – 5,60 zap. %), sporinitom (0,5 – 3,20 zap. %) i liptodetrinitom (0,5 – 4,10 zap. %) kao najzastupljenijim maceralima. Suberinit se najčešće javlja zajedno sa flobafinitom, dok se liptodetrinit javlja unutar detrohuminita. Rezinit se javlja kao ćelijska ispuna ili kao izolovana globularna tela unutar telohuminita.

Sadržaj inertinita, pretežno inertodetrinita, funginita, fuzinita, semifuzinita i makrinita kreće se od 3,0 do 8,7 zap. %. Najviši sadržaj funginita konstatovan je u uzorku Kolubara 23 (2,7 zap. %), a javlja se u vidu pojedinačnih zrna ili u kolonijama. Pore su mu uglavnom ispunjene mineralnim materijama, retko rezinitom. Fuzinit se najčešće javlja kao varijetet sa debelim zidovima, pri čemu su pore uglavnom prazne, a ponekad ispunjene mineralnim materijama.

Sadržaj mineralnih materija varira od 6,3 do 30,6 zap. %.



Slika 14.2. Karakterističan izgled macerala u analiziranim uzorcima kolubarskih (a – d) i kostolačnih ugljeva (e – h)

Te – tekstinit, Ul – ulminit, Ch – korpohuminit, At – atrinit, De – densinit, Fn – funginit, Fu – fuzinit, Su – suberinit, Sp – sporinit, Id – inertodetrinit, Py – pirit

Tabela 14.1. Sadržaj litotipova (mas. %) i vrednosti HGI analiziranih uzoraka

Uzorak	Barski ugalj	Ugalj bogat ksilitom							Doplerit ski ugalj	Fuzeni-zirani ugalj	Zemljas ti ugalj	Mineralne materije	HGI
		Mumifici rani ksilit	Trakast i ksilit	Strukturn i ksilit	Doplerits ki ksilit	Vlaknasti ksilit[a]	Trakast i ksiliti[b]	Ukupno (ksiliniti)					
Kolubara 3	53,86	0,09	8,30	24,16	1,29	8,39	25,45	33,84	1,91	0,23	5,72	4,44	44,0
Kolubara 7	47,23	0,001	6,48	31,68	0,03	6,48	31,71	38,19	0,03	0,07	8,32	6,19	56,9
Kolubara 8	56,20	0,00	16,26	24,47	0,98	16,26	25,45	41,71	0,65	0,03	0,85	0,56	44,9
Kolubara 9	50,13	0,00	14,74	32,83	1,23	14,74	34,06	48,80	0,12	0,02	0,44	0,49	40,3
Kolubara 10	61,97	0,02	14,22	19,37	1,42	14,24	20,79	35,03	0,02	0,05	1,09	1,84	46,3
Kolubara 13	41,91	0,00	17,44	37,75	0,86	17,44	38,61	56,05	0,06	0,03	1,18	0,77	39,6
Kolubara 17	42,80	0,001	19,57	33,62	1,56	19,57	35,18	54,75	0,16	0,04	0,57	1,68	42,2
Kolubara 23	17,20	0,00	45,75	33,70	0,93	45,75	34,63	80,38	0,16	0,08	1,40	0,78	30,7
Kolubara 29	45,55	0,02	20,78	29,47	2,22	20,80	31,69	52,49	0,05	0,02	0,60	1,29	35,8
Kolubara 34	57,85	0,00	11,68	28,55	1,00	11,68	29,55	41,23	0,04	0,02	0,59	0,27	42,0
Kolubara 36	58,47	0,03	15,89	14,72	1,15	15,92	15,87	31,79	0,06	0,03	3,54	6,11	48,5
Kostolac 1	50,96	0,00	10,12	24,28	3,42	10,12	27,70	37,82	0,01	0,01	1,11	0,09	45,6
Kostolac 2	56,77	0,00	18,73	23,20	0,03	18,73	23,23	41,96	0,01	0,03	0,67	0,57	41,3
Kostolac 4	65,64	0,00	12,02	13,05	6,09	12,02	19,14	31,16	2,99	0,05	0,06	0,10	40,8
Kostolac 5	46,57	0,00	13,77	29,25	6,03	13,77	35,28	49,05	1,12	0,04	2,83	0,40	42,0
Kostolac 7	54,30	0,00	9,13	24,39	5,56	9,13	29,95	39,08	1,35	0,01	4,05	1,21	47,0
Kostolac 9	49,82	0,001	13,84	23,34	9,48	13,84	32,82	46,66	0,20	0,31	2,19	0,82	44,1
Kostolac 11	54,93	0,00	11,52	25,54	6,72	11,52	32,26	43,78	0,49	0,02	0,40	0,38	44,8
Kostolac 13	50,71	0,00	17,73	26,39	2,70	17,73	29,09	46,82	1,64	0,02	0,56	0,25	41,7
Kostolac 15	45,24	0,001	16,44	26,31	6,39	16,44	32,70	49,14	0,11	0,05	5,03	0,43	43,4
Kostolac 16	51,81	0,00	17,50	24,29	1,92	17,50	26,21	43,71	0,16	0,01	3,46	0,85	43,6
Kostolac 17	47,59	0,001	16,30	24,07	6,89	16,30	30,96	47,26	0,38	0,02	3,94	0,82	44,6
Kostolac 22	45,77	0,00	12,32	33,83	6,29	12,32	40,12	52,44	0,29	0,03	1,45	0,02	43,1
Kostolac 23	47,32	0,001	17,90	27,42	4,87	17,90	32,29	50,19	0,08	0,04	2,34	0,04	42,7
Korelacioni koeficijenti sa HGI													
Kolubara	**0,62**		**-0,77**	-0,41	-0,53	**-0,77**	-0,46	**-0,79**	0,04	0,09	**0,69**	**0,72**	
Kostolac	-0,22		**-0,57**	0,17	0,29	**-0,57**	0,28	-0,06	-0,34	-0,01	0,43	**0,51**	

[a]Vlaknasti ksiliti = mumificirani + trakasti ksilit

[b]Trakasti ksiliti = strukturni ksilit + dopleritski ksilit

Tabela 14.2. Maceralni sastav (zap. %) i vrednosti HGI analiziranih uzoraka

Uzorak	Te	Ul	At	De	Ge	Ch	HUM	Sp	Cu	Re	Su	Ld	LIP	Fu	Sf	Ma	Fn	Id	INER	MM	HGI
Kolubara 3	30,2	10,3	8,8	24,8	0,9	3,1	78,1	1,7	0,4	2,0	0,9	0,8	5,8	0,5	0,7	0,1	0,6	1,2	3,1	13,0	44,0
Kolubara 7	13,3	9,0	10,1	21,4	0,9	2,5	57,2	3,0	0,2	1,1	2,3	1,4	8,0	0,0	0,5	0,5	1,4	1,8	4,2	30,6	56,9
Kolubara 8	29,1	11,9	8,0	25,5	0,6	3,9	79,0	1,1	0,3	2,2	1,1	0,6	5,3	0,3	0,8	0,3	0,8	0,8	3,0	12,7	44,9
Kolubara 9	37,9	10,3	6,4	15,6	1,1	1,6	72,9	1,1	0,0	1,9	1,8	0,5	5,3	1,9	0,8	0,0	0,8	0,5	4,0	17,8	40,3
Kolubara 10	39,6	6,2	3,8	23,2	1,1	1,9	75,8	1,1	0,0	0,8	0,8	0,5	3,2	1,1	1,1	0,0	0,5	0,8	3,5	17,5	46,3
Kolubara 13	46,9	3,8	4,1	16,3	0,4	5,8	77,3	3,2	0,0	1,2	0,9	1,7	7,0	0,0	0,3	0,3	0,6	2,3	3,5	12,2	39,6
Kolubara 17	51,5	6,7	3,8	11,5	0,6	5,1	79,2	0,5	0,0	1,3	2,6	1,5	5,9	1,5	0,0	0,3	0,5	1,3	3,6	11,3	42,2
Kolubara 23	53,6	5,6	1,8	12,5	0,6	4,5	78,6	2,1	0,3	1,2	3,2	1,5	8,3	0,3	0,0	0,3	2,7	0,6	3,9	9,2	30,7
Kolubara 29	44,7	14,0	5,9	13,8	0,2	3,2	81,8	0,7	0,5	1,0	1,0	1,0	4,2	1,5	0,0	0,0	0,5	1,4	3,4	10,6	35,8
Kolubara 34	45,4	11,7	0,9	20,9	1,7	5,1	85,7	0,9	0,0	0,3	2,2	0,9	4,3	0,0	0,6	0,0	0,9	2,2	3,7	6,3	42,0
Kolubara 36	37,6	15,3	4,7	16,6	0,5	3,7	78,4	1,2	0,3	1,1	1,1	1,3	5,0	0,3	0,3	0,0	1,2	1,3	3,1	14,5	48,5
Kostolac 1	16,9	18,5	4,6	14,3	1,8	4,6	60,7	2,5	0,9	0,4	2,9	4,1	10,8	1,9	0,3	0,4	0,4	3,7	6,7	21,8	45,6
Kostolac 2	18,5	20,1	5,6	14,6	2,0	3,0	63,8	2,9	0,5	0,5	4,0	3,0	10,9	0,0	0,2	0,0	1,4	1,8	3,4	21,9	41,3
Kostolac 4	26,2	19,8	3,3	10,6	1,9	3,8	65,6	2,4	0,5	0,0	3,3	1,6	7,8	1,9	2,2	0,0	1,1	2,4	7,6	19,0	40,8
Kostolac 5	29,7	17,9	4,0	9,2	1,2	9,0	71,0	1,0	0,3	0,5	5,6	2,8	10,2	0,2	0,7	0,3	1,4	3,0	5,6	13,2	42,0
Kostolac 7	15,6	38,3	5,1	12,6	0,6	4,5	76,7	0,8	0,3	1,1	1,7	0,8	4,7	0,3	0,3	0,0	1,4	1,7	3,7	14,9	47,0
Kostolac 9	18,3	33,3	3,7	10,4	1,1	6,5	73,3	1,8	0,2	0,7	1,2	2,3	6,2	2,5	0,7	0,2	1,8	3,5	8,7	11,8	44,1
Kostolac 11	17,1	23,6	2,9	17,4	3,7	6,1	70,8	1,7	0,0	0,7	4,6	2,0	9,0	0,5	0,2	1,7	0,0	3,4	5,8	14,4	44,8
Kostolac 13	24,9	20,2	2,0	13,4	0,6	7,6	68,7	2,1	0,2	0,3	1,2	1,8	5,6	0,3	0,6	0,2	1,4	1,9	4,4	21,3	41,7
Kostolac 15	21,9	19,2	3,2	18,9	1,2	4,7	69,1	2,3	0,2	1,0	4,0	1,2	8,7	0,2	0,0	0,7	1,8	3,8	6,5	15,7	43,4
Kostolac 16	21,5	24,5	3,1	18,2	1,7	3,4	72,4	1,5	0,2	0,5	1,0	1,2	4,4	1,1	0,0	0,0	1,2	2,7	5,0	18,2	43,6
Kostolac 17	17,0	27,3	4,2	19,4	0,8	5,3	74,0	0,8	0,5	1,1	1,6	1,6	5,6	0,5	1,1	0,3	1,6	2,6	6,1	14,3	44,6
Kostolac 22	21,5	24,4	3,1	18,2	1,7	3,4	72,3	1,5	0,2	0,5	1,0	1,2	4,4	1,2	0,0	0,0	1,2	2,7	5,1	18,2	43,1
Kostolac 23	17,0	27,3	4,2	19,4	0,8	5,3	74,0	0,8	0,5	1,1	1,6	1,6	5,6	0,5	1,1	0,3	1,6	2,6	6,1	14,3	42,7
Korelacioni koeficijenti sa HGI																					
Kolubara	**-0,83**	0,21	**0,58**	**0,56**	0,25	-0,36	**-0,65**	0,20	**-0,59**	0,00	-0,22	-0,09	-0,04	-0,15	-0,11	0,48	-0,24	0,24	0,02	**0,76**	
Kostolac	**-0,70**	**0,62**	0,27	0,19	-0,02	-0,07	0,35	-0,38	0,15	0,43	-0,23	-0,07	-0,20	-0,02	-0,49	0,39	-0,14	0,24	-0,01	-0,31	

Te – tekstinit, Ul – ulminit, At – atrinit, De – densinit, Ge – gelinit, Ch – korpohuminit, HUM – huminiti, Sp – sporinit, Cu – kutinit, Re – rezinit, Ld – liptodetrinit, LIP – liptiniti, Fu – fuzinit, Sf – semifuzinit, Ma – makrinit, Fn – funginit, Id – inertodetrinit, INER – inertiniti, MM – mineralne materije

14.1.3. Organsko-geohemijske karakteristike uzoraka

Sadržaj organskog ugljenika (bez vlage i mineralnih materija) u uzorcima ugljeva iz kolubarskog i kostolačkog basena se kreće u opsegu 29,01 – 45,00 % i 36,06 – 51,02 % (tabela 14.3). Ugalj iz kolubarskog basena ima nizak sadržaj ukupnog sumpora (0,52 – 1,03 %, bez vlage), dok je njegov sadržaj viši u uzorcima iz kostolačkog basena (1,5 – 2,56 %).

Sadržaj rastvorljive organske materije (bitumena) je visok i kreće se u opsegu 30,4 – 124,7 mg/gC_{org} (tabela 14.3), pri čemu su više vrednosti zapažene u uzorcima iz kolubarskog basena.

Sadržaj zasićenih ugljovodonika (1,7 – 7,9 %) i aromatičnih ugljovodonika (0,6 – 3,0 %) je nizak, dok je udeo asfaltena (23 – 53 %) i NSO jedinjenja (43 – 75 %) visok, što je i očekivan rezultat za ugljeve niskog ranga. Ligniti iz kostolačkog basena imaju viši sadržaj ugljovodonika nego ligniti kolubarskog basena.

Tabela 14.3. Grupni sastav bitumena i korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima uglja

Uzorak	HGI	C_{org}^{db} (%)[a]	C_{org}^{dmmfb} (%)[b]	S^{db} (%)[c]	Slobodni bitumen (mg/gC_{org})	Zasićeni HC[d] (%)	Aromatični HC (%)	NSO[e] (%)	Asfalteni (%)
Kolubara 3	44,0	33,83	38,88	0,64	58,5	2,9	1,2	45	51
Kolubara 7	56,9	29,01	41,81	0,53	37,3	3,9	1,8	60	34
Kolubara 8	44,9	34,86	39,93	0,74	54,4	2,9	1,1	43	53
Kolubara 9	40,3	36,48	44,38	0,80	87,2	2,1	0,8	57	40
Kolubara 10	46,3	37,23	45,13	0,59	79,2	1,8	0,7	60	37
Kolubara 13	39,6	38,13	43,43	1,03	88,9	1,9	0,8	56	41
Kolubara 17	42,2	34,73	39,15	0,52	64,7	2,8	1,0	53	43
Kolubara 23	30,7	45,00	49,56	0,83	84,4	2,2	0,8	52	45
Kolubara 29	35,8	44,35	49,61	0,99	97,0	1,9	0,8	58	39
Kolubara 34	42,0	40,15	42,85	0,59	71,4	3,2	1,0	50	45
Kolubara 36	48,5	34,08	39,86	0,80	124,7	1,7	0,6	75	23
Kostolac 1	45,6	37,12	47,47	1,66	31,1	7,9	2,2	51	39
Kostolac 2	41,3	39,85	51,02	1,51	33,3	5,7	3,0	54	37
Kostolac 4	40,8	38,66	47,73	1,50	35,5	5,7	1,9	54	39
Kostolac 5	42,0	33,16	38,20	2,56	36,9	7,7	2,3	56	34
Kostolac 7	47,0	30,69	36,06	2,12	43,2	5,8	2,1	62	30
Kostolac 9	44,1	34,56	39,18	2,39	35,2	5,7	2,3	57	36
Kostolac 11	44,8	35,46	41,43	2,25	30,4	6,8	1,9	57	34
Kostolac 13	41,7	36,68	46,61	1,83	40,5	4,8	1,6	58	35
Kostolac 15	43,4	35,75	42,41	1,96	48,7	5,8	1,5	55	38

Tabela 14.3. Grupni sastav bitumena i korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima uglja – nastavak

Uzorak	HGI	C_{org}^{db} (%)[a]	C_{org}^{dmmfb} (%)[b]	S^{db} (%)[c]	Slobodni bitumen (mg/gC_{org})	Zasićeni HC[d] (%)	Aromatični HC (%)	NSO[e] (%)	Asfalteni (%)
Kostolac 16	43,6	35,28	43,13	2,05	37,4	5,7	1,5	65	28
Kostolac 17	44,6	34,29	40,01	1,91	33,1	5,5	1,9	60	32
Kostolac 22	43,1	38,37	46,91	1,76	40,6	6,0	1,7	60	32
Kostolac 23	42,7	37,73	44,03	1,91	42,9	5,3	1,8	56	36
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kolubarskog basena									
r sa HGI		**-0,90**	**-0,64**	**-0,58**	-0,39	0,50	**0,60**	0,30	-0,38
r sa barskim ugljem		-0,49	-0,53	-0,33	-0,02	0,06	0,02	0,15	-0,17
r sa vlaknastim ksilitima		**0,72**	**0,63**	0,39	0,33	-0,39	-0,44	-0,06	0,12
r sa strukturnim ksilitom		0,25	0,31	0,23	-0,30	0,22	0,24	-0,37	0,35
r sa dopleritskim ksilitom		0,53	0,29	0,30	0,47	**-0,58**	**-0,62**	0,00	0,07
r sa trakastim ksilitima		0,29	0,34	0,26	-0,27	0,17	0,19	-0,37	0,36
r sa ksilinitima		**0,67**	**0,63**	0,41	0,12	-0,21	-0,23	-0,22	0,26
r sa zemljastim ugljem		**-0,66**	-0,37	-0,36	-0,42	**0,55**	**0,74**	0,17	-0,24
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kostolačkog basena									
r sa HGI		**-0,65**	**-0,58**	0,32	-0,05	0,27	-0,08	0,29	-0,38
r sa barskim ugljem		0,26	0,33	-0,43	-0,40	-0,09	0,28	-0,18	0,23
r sa vlaknastim ksilitima		0,37	0,30	-0,15	0,21	**-0,56**	-0,07	0,10	0,00
r sa strukturnim ksilitom		-0,13	-0,17	0,36	0,32	0,16	-0,17	0,25	-0,37
r sa dopleritskim ksilitom		-0,42	**-0,62**	**0,53**	0,08	0,09	-0,21	0,02	0,04
r sa trakastim ksilitima		-0,31	-0,44	**0,56**	0,31	0,18	-0,25	0,23	-0,31
r sa ksilinitima		-0,08	-0,23	0,42	0,39	-0,14	-0,26	0,26	-0,28
r sa zemljastim ugljem		**-0,64**	**-0,65**	0,41	**0,56**	-0,09	-0,30	0,44	-0,42

[a] C_{org}^{db} – sadržaj organskog ugljenika (maseni udeo), bez vlage

[b] C_{org}^{dmmfb} – sadržaj organskog ugljenika (maseni udeo), bez vlage i mineralnih materija

[c] S^{db} – sadržaj ukupnog sumpora (maseni udeo), bez vlage

[d] HC – ugljovodonici

[e] NSO – polarna frakcija koja sadrži jedinjenja azota, sumpora i kiseonika

14.1.4. Molekularni sastav organske materije

n-alkani i izoprenoidi

n-alkani su relativno dosta zastupljeni u zasićenoj frakciji ispitivanih uzoraka (slika 14.3, tabela 14.4) i identifikovani su u opsegu C_{13} do C_{33}. Ligniti uzoraka kolubarskog basena imaju viši sadržaj *n*-alkana od uzoraka kostolačkog basena. U svim uzorcima dominiraju viši homolozi sa 27 do 31 ugljenikovih atoma sa maksimumom na *n*-C_{29}, pri čemu su dominantni *n*-alkani sa neparnim brojem ugljenikovih atoma, ukazujući na značajan doprinos epikutikularnih voskova viših biljaka.

Vrednosti CPI (Carbon Preference Index) [104] variraju u opsegu 2,09 – 3,37 što je u skladu sa vrednostima ugljeva nižeg ranga, a ukazuje na više kopnene biljke kao prekursore [129, 162, 163].

Preovlađivanje sadržaja pristana u odnosu na fitan (tabela 14.5), u skoro svim ispitivanim uzorcima ukazuje na oksidacione uslove sedimentacije i prisustvo slobodnog kiseonika.

Sterani i hopani

Analiza alifatične frakcije ukazala je na veoma nizak sadržaj sterana (tabela 14.4). Svi ispitivani uzorci imaju nizak odnos sterani/hopani (tabela 14.6), posebno ugalj iz kolubarskog basena.

Hopani su zastupljeniji u uzorcima kolubarskog nego kostolačkog uglja (tabela 14.4). U ispitivanim uzorcima identifikovani su hopani 17α(H)21β(H), 17β(H)21α(H) i 17β(H)21β(H) u seriji od C_{27} do C_{32}, uz odsusto C_{28} izomera. C_{31}17α(H)21β(H)22(R)-hopan je najzastupljeniji u zasićenoj frakciji ugljovodonika u ispitivanim uzorcima sa izuzetkom uzorka Kostolac 7 i Kostolac 9 gde je dominantan C_{30} hop-17(21)-en (tabela 14.6). Viši sadržaj C_{31}αβ(R) hopana u odnosu na ukupan sadržaj hopana ispitivanih uzoraka u kolubarskim uzorcima nego kostolačkim (slika 14.4, tabela 14.6) ukazuje da se tresetna faza kolubarskih lignita odigravala u kiseloj sredini sa dosta kiseonika. Ovakvi rezultati su u skladu sa niskim sadržajem sumpora (tabela 14.3).

Sadržaj hopana se smatra da odražava nivo degradacije organske materije aerobnim bakterijama, dok sadržaj C_{30} hop-17(21)-ena vodi poreklo od anaerobnih bakterija [141]. Odnos C_{30} hop-17(21)-en/C_{30} hopan u ispitivanim uzorcima je značajno iznad 1,

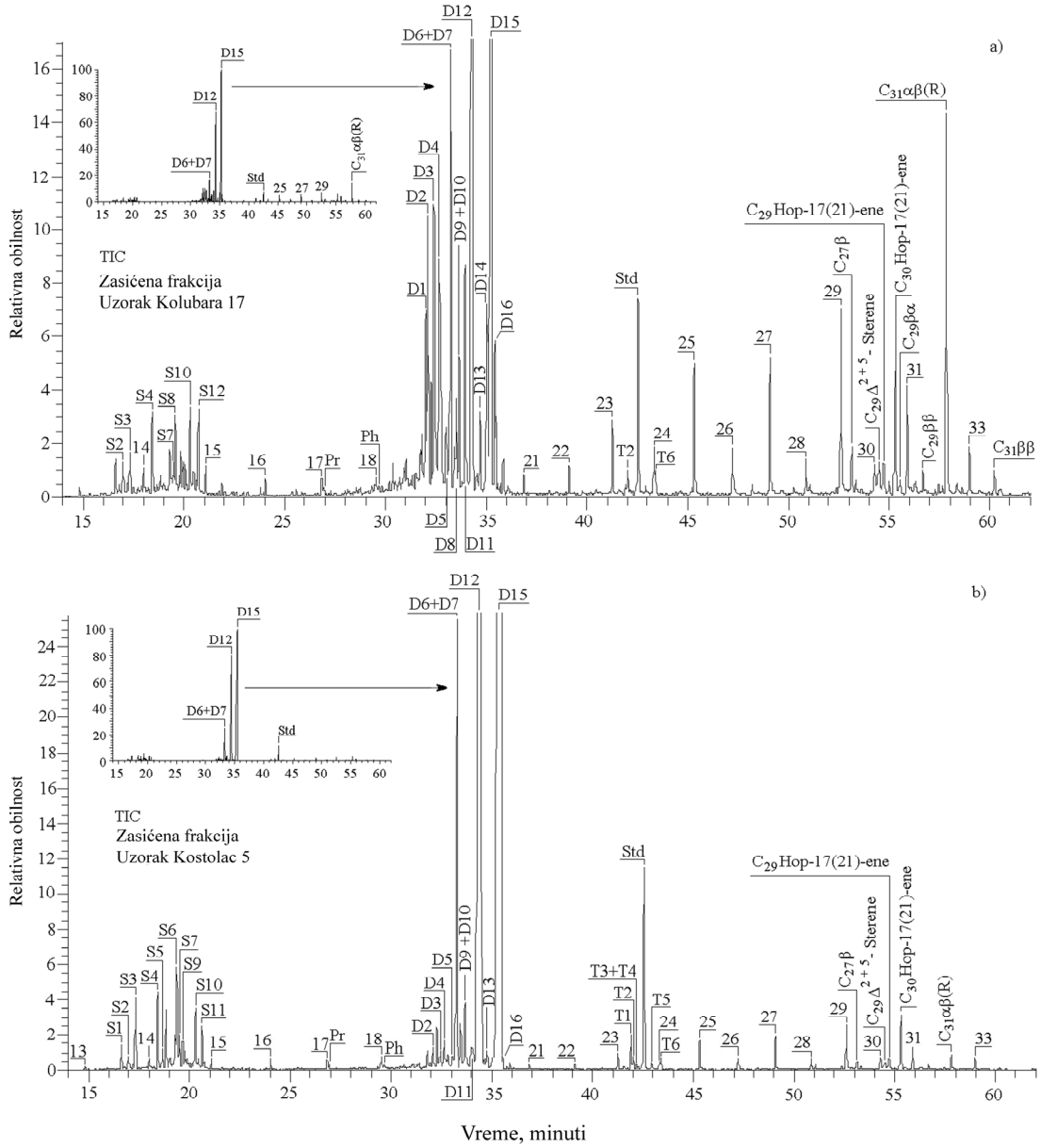
a praćen je dominacijom $C_{31}\alpha\beta$(R)-hopana u skoro svim uzorcima (tabela 14.6) i ukazuje da se faza tresetizacije odigrala prvo u suboksičnoj sredini, a posle nekog vremena mikrobiološkom degradacijom organske materije u anaerobnim uslovina. Više vrednosti odnosa C_{30} hop-17(21)-en/C_{30} hopan u uzorcima iz kostolačkog basena ukazuju da je kostolački lignit formiran uz manje prisustvo kiseonika, odnosno u nešto redukcionim uslovima u poređenju sa kolubarskim lignitom.

Tabela 14.4. Sadržaj glavnih grupa biomarkera u zasićenoj i aromatičnoj frakciji (μg/gC_{org}) i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima

Uzorak	HGI	Zasićena frakcija						Aromatična frakcija				
		n-alkani	Seskvi-terpani	Diterpani	Ne-hopanski triterpani	Sterani	Hopani	Seskvi-terpani	Diterpani	Ne-hopanski terpani	Sterani	Hopani
Kolubara 3	44,0	66,22	14,14	479,35	3,01	1,69	60,96	7,44	69,52	28,20	3,95	8,58
Kolubara 7	56,9	40,70	12,13	452,23	3,39	1,43	59,51	9,19	66,05	33,92	4,79	6,74
Kolubara 8	44,9	61,34	24,18	666,87	2,08	1,77	55,34	4,97	39,22	28,01	3,25	7,19
Kolubara 9	40,3	66,62	27,01	755,08	1,29	3,14	57,51	6,15	39,06	34,00	3,42	9,54
Kolubara 10	46,3	49,80	22,53	570,63	1,39	2,36	45,03	4,50	34,87	27,95	2,99	7,48
Kolubara 13	39,6	59,34	25,10	749,81	2,07	0,94	50,35	7,63	52,15	37,05	3,28	7,54
Kolubara 17	42,2	63,29	27,38	699,56	2,49	3,10	51,88	4,89	37,73	41,48	3,59	9,16
Kolubara 23	30,7	49,62	34,63	868,93	2,28	2,26	37,81	5,20	36,39	35,69	3,25	9,46
Kolubara 29	35,8	60,97	30,80	837,32	3,56	2,17	52,46	5,27	30,43	48,45	3,43	9,03
Kolubara 34	42,0	60,28	34,12	1321,68	3,12	1,24	73,64	5,18	34,55	29,74	2,41	5,97
Kolubara 36	48,5	82,64	32,46	1170,81	3,32	1,45	61,74	4,58	39,73	35,42	2,60	9,22
Kostolac 1	45,6	25,21	25,83	770,09	6,37	0,55	9,34	4,72	102,93	19,51	1,72	11,75
Kostolac 2	41,3	23,92	30,43	482,46	7,29	0,68	10,78	7,45	111,48	22,83	2,33	17,42
Kostolac 4	40,8	17,98	22,37	508,23	6,19	0,86	10,13	6,33	107,65	20,22	2,37	15,35
Kostolac 5	42,0	19,59	38,51	880,57	5,33	0,59	8,02	6,23	157,84	18,85	1,49	9,66
Kostolac 7	47,0	43,74	39,47	727,87	16,06	1,84	11,98	6,76	130,37	30,88	3,24	21,06
Kostolac 9	44,1	27,08	30,76	493,26	9,98	0,60	9,31	5,49	126,56	20,64	2,15	13,86
Kostolac 11	44,8	20,64	25,83	517,65	4,56	0,50	7,86	4,06	95,44	15,54	1,47	10,64
Kostolac 13	41,7	17,33	23,71	536,17	5,14	0,99	8,90	4,27	102,12	21,04	1,96	13,57
Kostolac 15	43,4	15,64	21,69	573,73	3,84	0,76	6,38	6,89	130,62	18,23	1,64	12,99
Kostolac 16	43,6	19,32	31,30	625,15	5,82	1,13	7,12	5,64	116,10	15,16	1,34	11,30
Kostolac 17	44,6	19,69	23,82	436,91	8,12	0,46	8,31	6,42	102,98	22,51	2,53	15,95
Kostolac 22	43,1	14,45	22,05	488,63	4,48	0,32	5,73	9,11	127,76	19,00	2,08	14,14
Kostolac 23	42,7	46,38	43,82	1640,89	18,71	2,01	21,24	8,47	141,68	18,08	1,62	13,01

Tabela 14.4. Sadržaj glavnih grupa biomarkera u zasićenoj i aromatičnoj frakciji (μg/gC_{org}) i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima – nastavak

	Zasićena frakcija						Aromatična frakcija				
	***n*-alkani**	**Seskvi-terpani**	**Diterpani**	**Ne-hopanski triterpani**	**Sterani**	**Hopani**	**Seskvi-terpani**	**Diterpani**	**Ne-hopanski terpani**	**Sterani**	**Hopani**
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kolubarskog basena											
r sa HGI	-0,09	**-0,66**	-0,30	0,23	-0,30	0,46	0,40	0,52	-0,39	0,38	-0,48
r sa barskim ugljem	0,35	-0,27	0,05	0,02	-0,18	**0,63**	-0,12	0,04	-0,44	-0,23	-0,43
r sa vlaknastim ksilitima	-0,13	**0,62**	0,21	-0,18	0,27	**-0,72**	-0,40	-0,47	0,33	-0,24	0,50
r sa strukturnim ksilitom	-0,43	0,02	-0,16	-0,15	0,14	-0,24	0,44	0,10	0,40	0,37	0,03
r sa dopleritskim ksilitom	0,43	0,41	0,16	-0,01	0,47	-0,17	**-0,65**	**-0,56**	0,49	-0,36	0,50
r sa trakastim ksilitima	-0,41	0,05	-0,15	-0,15	0,18	-0,25	0,40	0,05	0,45	0,35	0,06
r sa ksilinitima	-0,30	0,48	0,08	-0,21	0,28	**-0,65**	-0,10	-0,32	0,46	-0,01	0,40
r sa zemljastim ugljem	-0,24	**-0,74**	-0,43	0,50	-0,39	0,25	**0,73**	**0,85**	-0,23	**0,69**	-0,19
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kostolačkog basena											
r sa HGI	0,40	0,15	-0,01	0,31	0,15	-0,05	-0,21	-0,11	0,35	0,27	0,22
r sa barskim ugljem	0,01	-0,13	-0,27	-0,02	0,08	0,08	-0,25	-0,48	0,19	0,34	0,34
r sa vlaknastim ksilitima	-0,12	0,05	0,15	-0,02	0,11	0,19	0,18	0,05	-0,30	-0,31	-0,13
r sa strukturnim ksilitom	-0,02	0,17	0,22	-0,04	-0,09	-0,12	0,32	0,43	-0,16	-0,30	-0,28
r sa dopleritskim ksilitom	0,00	-0,08	-0,07	0,08	-0,19	-0,12	0,01	0,24	0,00	0,12	-0,08
r sa trakastim ksilitima	-0,01	0,11	0,16	0,00	-0,17	-0,16	0,28	0,49	-0,14	-0,21	-0,28
r sa ksilinitima	-0,08	0,13	0,22	-0,01	-0,10	-0,04	0,36	0,47	-0,29	-0,36	-0,33
r sa zemljastim ugljem	0,18	0,25	0,13	0,23	0,26	-0,07	0,25	0,48	0,20	0,09	0,14



Slika 14.3. TIC (Total Ion Current) zasićene frakcije tipične za analizirane uzorke iz (a) kolubarskog i (b) kostolačkog basena

Legenda: *n*-alkani su označeni u skladu sa brojem ugljenikovih atoma
Ph – Fitan; S1 – Nordriman; S2 – C_{14} Biciklični seskviterpani; S3 – Eleman; S4 – C_{15} Biciklični seskviterpani; S5 – Murolan; S6 – Eudesman; S7 – Kedran; S8 – Dihidrovalencen; S9 – Kuparan; S10 – Longifolan; S11 – Kadinan; S12 – Dihidroslinen; D1 – 4β(H)-19-Norizopimaran; D2 – Izopimaradien; D3 – Izopimaradien, isomer; D4 – 4α(H)-18-Norizopimaran; D5 – Norabietan; D6 – Bejeran; D7 – Norpimaran; D8 – Dihidrorimuen; D9 – Izofilokladen; D10 – Izopimaran; D11 – Fihtelit D12 – Pimaran; D13 – 16β(H)-Filokladan; D14 – Abietan; D15 – 16α(H)- Filokladan; D16 – 16α(H)-Kauran; T1 – De-A-olean-13(18)-en; T2 – De-A-olean-12-en; T3 – De-A-olean-18-en; T4 – De-A-urs-13(18)-en; T5 – De-A-urs-12-en; T6 – De-A-lupan; ββ, βα i αβ označene su konfiguracije na C_{17} i C_{21} atomu hopana, a sa (R) je označena izomeri na C_{22} atomu u hopanima; Std – Standard.

Tabela 14.5. Organsko-geohemijski parametri *n*-alakana i izoprenoida zasićene frakcije i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima

Uzorak	HGI	P_{aq}[a]	P_{wax}[b]	n-C_{23}/(n-C_{27}+n-C_{31})	Σn-C_{13}-n-C_{20}/ Σn-C_{13}-n-C_{33}	Σn-C_{21}-n-C_{25}/ Σn-C_{13}-n-C_{33}	Σn-C_{26}-n-C_{33}/ Σn-C_{13}-n-C_{33}	CPI[c]	Pr/Ph[d]
Kolubara 3	44,0	0,33	0,74	0,21	0,15	0,24	0,61	2,79	0,57
Kolubara 7	56,9	0,30	0,77	0,17	0,15	0,21	0,63	2,36	1,11
Kolubara 8	44,9	0,42	0,67	0,32	0,12	0,31	0,57	2,64	1,47
Kolubara 9	40,3	0,36	0,71	0,27	0,11	0,27	0,62	2,72	1,09
Kolubara 10	46,3	0,39	0,69	0,28	0,11	0,29	0,60	2,09	1,07
Kolubara 13	39,6	0,40	0,68	0,31	0,08	0,30	0,61	3,11	1,18
Kolubara 17	42,2	0,42	0,67	0,30	0,12	0,30	0,58	2,80	0,98
Kolubara 23	30,7	0,39	0,69	0,28	0,12	0,28	0,59	2,40	0,77
Kolubara 29	35,8	0,43	0,66	0,33	0,07	0,33	0,59	2,32	1,04
Kolubara 34	42,0	0,35	0,72	0,25	0,09	0,27	0,64	2,43	0,74
Kolubara 36	48,5	0,38	0,69	0,27	0,10	0,28	0,62	2,52	1,04
Kostolac 1	45,6	0,40	0,69	0,28	0,30	0,22	0,48	2,79	0,23
Kostolac 2	41,3	0,40	0,69	0,27	0,24	0,24	0,52	2,65	1,09
Kostolac 4	40,8	0,40	0,69	0,25	0,23	0,25	0,52	2,94	1,15
Kostolac 5	42,0	0,40	0,70	0,28	0,22	0,24	0,54	3,32	1,22
Kostolac 7	47,0	0,41	0,68	0,26	0,36	0,21	0,44	3,33	1,43
Kostolac 9	44,1	0,40	0,69	0,26	0,19	0,25	0,56	3,32	0,87
Kostolac 11	44,8	0,40	0,69	0,28	0,35	0,21	0,44	3,06	1,20
Kostolac 13	41,7	0,38	0,71	0,26	0,26	0,22	0,52	3,22	1,00
Kostolac 15	43,4	0,39	0,71	0,24	0,30	0,21	0,49	2,97	1,44
Kostolac 16	43,6	0,37	0,71	0,25	0,29	0,21	0,50	3,37	1,30
Kostolac 17	44,6	0,42	0,68	0,27	0,26	0,24	0,50	3,28	1,07
Kostolac 22	43,1	0,40	0,69	0,26	0,32	0,22	0,46	2,79	0,19
Kostolac 23	42,7	0,49	0,62	0,37	0,21	0,30	0,49	2,65	0,92
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kolubarskog basena									
r sa HGI		**-0,56**	**0,58**	**-0,62**	0,49	**-0,59**	0,39	-0,43	0,27
r sa barskim ugljem		-0,17	0,15	-0,13	-0,03	-0,06	0,29	0,03	0,21
r sa vlaknastim ksilitima		0,48	-0,48	0,45	-0,19	0,40	-0,47	0,30	-0,13
r sa strukturnim ksilitom		0,04	0,01	0,09	-0,09	0,01	-0,05	-0,04	0,00
r sa dopleritskim ksilitom		**0,66**	**-0,67**	**0,64**	-0,52	**0,72**	-0,44	0,21	-0,13
r sa trakastim ksilitima		0,09	-0,05	0,14	-0,13	0,07	-0,08	-0,02	-0,01
r sa ksilinitima		0,40	-0,38	0,40	-0,21	0,33	-0,39	0,21	-0,10
r sa zemlj. ugljem		**-0,78**	**0,81**	**-0,86**	**0,70**	**-0,84**	0,41	**-0,71**	-0,20

Tabela 14.5. Organsko-geohemijski parametri *n*-alakana i izoprenoida zasićene frakcije i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima – nastavak

	P_{aq}[a]	P_{wax}[b]	n-C_{23}/(n-C_{27}+n-C_{31})	Σn-C_{13}-n-C_{20}/ Σn-C_{13}-n-C_{33}	Σn-C_{21}-n-C_{25}/ Σn-C_{13}-n-C_{33}	Σn-C_{26}-n-C_{33}/ Σn-C_{13}-n-C_{33}	CPI[c]	Pr/Ph[d]
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kostolačkog basena								
r sa HGI	0,04	-0,09	-0,04	**0,63**	-0,40	**-0,60**	-0,03	-0,05
r sa barskim ugljem	-0,18	0,08	-0,22	0,00	-0,01	0,02	0,06	0,23
r sa vlaknastim ksilitima	0,11	-0,05	0,20	**-0,50**	0,34	0,47	-0,14	0,25
r sa strukturnim ksilitom	0,11	-0,06	0,23	0,25	-0,14	-0,27	-0,24	-0,34
r sa dopleritskim ksilitom	0,18	-0,12	-0,05	-0,07	0,12	0,02	0,43	-0,01
r sa trakastim ksilitima	0,18	-0,10	0,18	0,18	-0,06	-0,23	-0,01	-0,30
r sa ksilinitima	0,22	-0,12	0,27	-0,11	0,13	0,05	-0,08	-0,13
r sa zemljastim ugljem	0,06	0,02	-0,11	0,15	-0,15	-0,09	-0,33	0,43

[a] **P_{aq}** = (n-C_{23} + n-C_{25})/(n-C_{23} + n-C_{25} + n-C_{29} + n-C_{31})
[b] **P_{wax}** = (n-C_{27} + n-C_{29} + n-C_{31})/(n-C_{23} + n-C_{25}+ n-C_{27} + n-C_{29} + n-C_{31})
[c] **CPI** – Carbon Preference Index izračunat za čitav opseg n-alkana C_{15}-C_{33},
CPI = 1/2 [Σneparni(n-C_{15} - n-C_{33})/Σparni(n-C_{14} - n-C_{32}) + Σneprani(n-C_{15} - n-C_{33})/Σparni(n-C_{16} - n-C_{34})]
[d] **Pr/Ph** – Pristan/Fitan

Tabela 14.6. Organsko-geohemijski parametri hopana i sterana zasićene frakcije i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima

Uzorak	HGI	Hopani maksimum (*m/z* 191)	% C_{31}αβ[a]	C_{30}ββ/ C_{30} (ββ+αβ)[b]	C_{30}Hop-17(21)-en/ C_{30}17α(H)21β(H)-Hopan	Sterani/ Hopani[c]
Kolubara 3	44,0	C_{31} αβ(R) Hopan	71,98	0,63	10,90	0,03
Kolubara 7	56,9	C_{31} αβ(R) Hopan	72,99	0,66	11,48	0,02
Kolubara 8	44,9	C_{31} αβ(R) Hopan	69,39	0,65	11,17	0,03
Kolubara 9	40,3	C_{31} αβ(R) Hopan	68,90	0,68	10,62	0,05
Kolubara 10	46,3	C_{31} αβ(R) Hopan	69,35	0,67	11,74	0,05
Kolubara 13	39,6	C_{31} αβ(R) Hopan	68,41	0,74	16,64	0,02
Kolubara 17	42,2	C_{31} αβ(R) Hopan	68,86	0,74	13,45	0,06
Kolubara 23	30,7	C_{31} αβ(R) Hopan	65,63	0,64	13,52	0,06
Kolubara 29	35,8	C_{31} αβ(R) Hopan	68,41	0,75	14,10	0,04
Kolubara 34	42,0	C_{31} αβ(R) Hopan	73,03	0,69	11,70	0,02
Kolubara 36	48,5	C_{31} αβ(R) Hopan	69,15	0,78	17,18	0,02
Kostolac 1	45,6	C_{31} αβ(R) Hopan	36,89	0,64	16,59	0,06
Kostolac 2	41,3	C_{31} αβ(R) Hopan	33,53	0,57	14,72	0,06
Kostolac 4	40,8	C_{31} αβ(R) Hopan	34,84	0,68	23,21	0,09
Kostolac 5	42,0	C_{31} αβ(R) Hopan	26,95	0,57	21,51	0,07
Kostolac 7	47,0	C_{30}Hop-17(21)-en	19,94	0,60	18,66	0,15
Kostolac 9	44,1	C_{30}Hop-17(21)-en	18,34	0,73	27,56	0,06
Kostolac 11	44,8	C_{31} αβ(R) Hopan	35,09	0,67	22,93	0,06
Kostolac 13	41,7	C_{31} αβ(R) Hopan	39,29	0,65	24,30	0,11

Tabela 14.6. Organsko-geohemijski parametri hopana i sterana zasićene frakcije i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima – nastavak

Uzorak	HGI	Hopani maksimum (*m/z* 191)	% $C_{31}\alpha\beta$[a]	$C_{30}\beta\beta$/ C_{30} ($\beta\beta+\alpha\beta$)[b]	C_{30}Hop-17(21)-en/ C_{30}17α(H)21β(H)-Hopan	Sterani/ Hopani[c]
Kostolac 15	43,4	C_{31} αβ(R) Hopan	33,44	0,72	24,22	0,12
Kostolac 16	43,6	C_{31} αβ(R) Hopan	30,65	0,65	26,29	0,16
Kostolac 17	44,6	C_{31} αβ(R) Hopan	36,84	0,71	19,73	0,05
Kostolac 22	43,1	C_{31} αβ(R) Hopan	39,58	0,83	54,55	0,06
Kostolac 23	42,7	C_{31} αβ(R) Hopan	42,46	0,73	26,26	0,09
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kolubarskog basena						
r sa HGI			**0,71**	-0,06	-0,18	-0,45
r sa barskim ugljem			**0,62**	0,10	-0,22	-0,43
r sa vlaknastim ksilitima			**-0,84**	-0,01	0,29	**0,56**
r sa strukturnim ksilitom			-0,19	-0,04	-0,03	0,18
r sa dopleritskim ksilitom			-0,38	0,41	0,13	0,41
r sa trakastim ksilitima			-0,23	-0,01	-0,02	0,22
r sa ksilinitima			**-0,73**	-0,02	0,21	0,52
r sa zemljastim ugljem			**0,56**	-0,30	-0,13	-0,42
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kostolačkog basena						
r sa HGI			-0,37	0,03	-0,12	0,18
r sa barskim ugljem			-0,10	-0,36	-0,36	0,06
r sa vlaknastim ksilitima			0,35	-0,01	-0,08	0,11
r sa strukturnim ksilitom			0,17	0,28	**0,55**	-0,09
r sa dopleritskim ksilitom			-0,34	**0,52**	0,30	-0,27
r sa trakastim ksilitima			-0,01	0,48	0,61	-0,20
r sa ksilinitima			0,18	0,44	**0,51**	-0,12
r sa zemljastim ugljem			-0,35	0,06	-0,07	0,49

[a] **% $C_{31}\alpha\beta$** = C_{31}17α(H)21β(H)22(R)-Hopan/ΣHopani, izračunato iz masenog hromatografa, *m/z* 191
[b] **$C_{30}\beta\beta/C_{30}(\beta\beta+\alpha\beta)$** = C_{30}17β(H)21β(H)-Hopan/(C_{30}17β(H)21β(H)-Hopan + C_{30}17α(H)21β(H)-Hopan), izračunato iz masenog hromatografa, *m/z* 191
[c] **Sterani/Hopani** = ΣSterani/ΣHopani, izračunato iz TIC-a zasićene frakcije

Seskviterpani, diterpani i triterpani

U svim ispitivanim uzorcima seskviterpani se javljaju u relativno niskim koncentracijama (slika 14.3. i 14.4). Ovi biomarkeri su zastupljeniji u zasićenoj nego u aromatičnoj frakciji (tabela 14.4), pokazujući relativno nizak stepen aromatizacije. Kadalen preovlađuje u svim uzorcima aromatične frakcije seksviterpana. Prisustvo kuparena (slika 14.4) u svim uzorcima jasno ukazuje na četinare familije C*upressaceae* i familija *Cupressus, Thuja* i *Juniperus* kao prekursore organske materije [120, 154].

Diterpani su glavni sastojci kako zasićene tako i aromatične frakcije u svim uzorcima, sa izuzetkom uzorka Kolubara 17 i Kolubara 29 u kojima triterpani dominiraju u aromatičnoj frakciji (slika 14.3. i 14.4, tabela 14.4). Ukupan sadržaj diterpana (zbir svih

diterpana u zasićenoj i aromatičnoj frakciji) predstavljaju najzastupljeniji ugljovodonik u bitumenu, što ukazuje na značajan doprinos gimnospermi kao prekursora organske materije (tabela 14.7). Kao i u slučaju seskviterpana, diterpani su zastupljeniji u zasićenoj nego u aromatičnoj frakciji, ukazujući na relativno nizak stepen aromatizacije (tabela 14.4). U svim ispitivanim uzorcima raspodela pojedinačnih diterpana u zasićenoj frakciji je slična (slika 14.3). Najdominantniju su 16α(H)-filokladan i pimaran. Visok sadržaj 16α(H)-filokladana ukazuje da biljke od kojih je nastao ugalj vode poreklo od jedne ili više familija četinara *Taxodiaceae*, *Podocarpaceae*, *Cupressaceae*, *Araucariaceae*, *Sciadopityaceae* i *Phyllocladaceae*, dok visok udeo pimarana ukazuje na familije *Pinaceae*, *Taxodiaceae* i/ili *Cupressaceae* [120, 123, 164, 165].

Raspodela pojedinačnih diterpana u aromatičnoj frakciji je jako slična u svim uzorcima (slika 14.4). Dominantna jedinjenja u svim uzorcima iz kolubarskog basena su simonelit i dehidroabietan, dok je simonelit dominantan aromatični diterpan u svim uzorcima iz kostolačkog basena (slika 14.5). Prisustvo totarena i hibaena u aromatičnoj frakciji svih uzoraka (slika 14.4) ukazuje i na prisustvo familija *Cupressaceae*, *Taxodiaceae*, *Podocarpaceae*, i/ili *Araucariaceae* kao prekursora biomase [120].

Ne-hopanski triterpani su prisutni u zasićenoj frakciji uzoraka u relativno niskim koncentracijama (tabela 14.4). Sa druge strane, ova jedinjenja preovlađuju u aromatičnoj frakciji dva uzorka iz kolubarskog basena (Kolubara 17 i 29). Ovi rezultati pokazuju da su angiosperme takođe imale veliki udeo u stvaranju treseta. Značajno veća zastupljenost aromatičnih u poređenju sa nearomatičnim triterpanima nastalim od angiospermi (tabela 14.4) ukazuje na intenzivnu aromatizaciju triterpana tokom stadijuma dijageneze.

Sadržaj ne-hopanskih triterpana u zasićenoj frakciji je nizak u svim ispitivanim uzorcima. Raspodela ne-hopanskih triterpana u aromatičnoj frakciji je slična kod svih uzoraka. Pentaciklični triterpani su zastupljeniji od tetracikličnih derivata, hrizena u svim ispitivanim uzorcima, što ukazuje na značajnije prisustvo progresivne aromatizacije uglja.

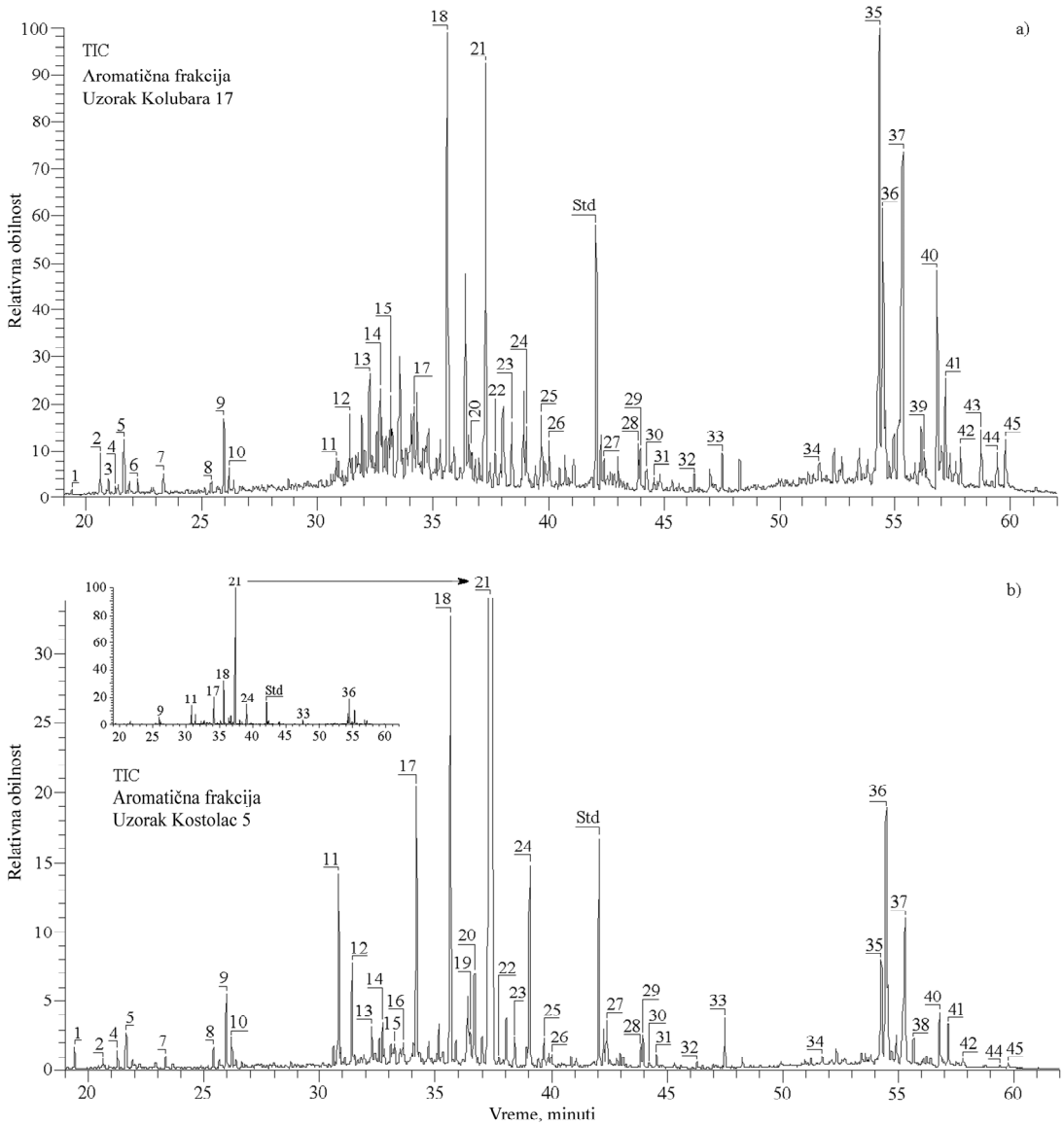
Usled povećene aromatizacije triterpana nastalih od angiospermi, odnos diterpana i suma di- i triterpana u zasićenoj frakciji, DT/(DT+TT), imaju visoke i ujednačene vrednosti (iznad 0,97, tabela 14.7). Ovaj rezultat ukazuje da su četinari skoro u potpunosti doprineli formiranju uglja. Kako bi se procenio doprinos gimnospermi i

angiospermi korišćeni su odnosi: $DT/(DT+TT)_{arom}$ [154, 159] i $DT/(DT+TT)_{sat+arom}$ [79, 129] (tabela 14.7). Niže vrednosti odnosa za ugalj kolubarskog basena ukazuju na veći udeo angiospermi u vegetaciji koja je obrazovala treset. Ovaj rezultat ukazuje da se deponovanje organske materije u kolubarskom basenu odvijalo u suvljoj i više oksičnoj sredini, koja je pogodovala razvoju angiospermi, što je u skladu i sa nižim sadržajem sumpora (tabela 14.3) i višim sadržajem C_{31} 17α(H)21β(H)22(R)-hopana.

Perilen

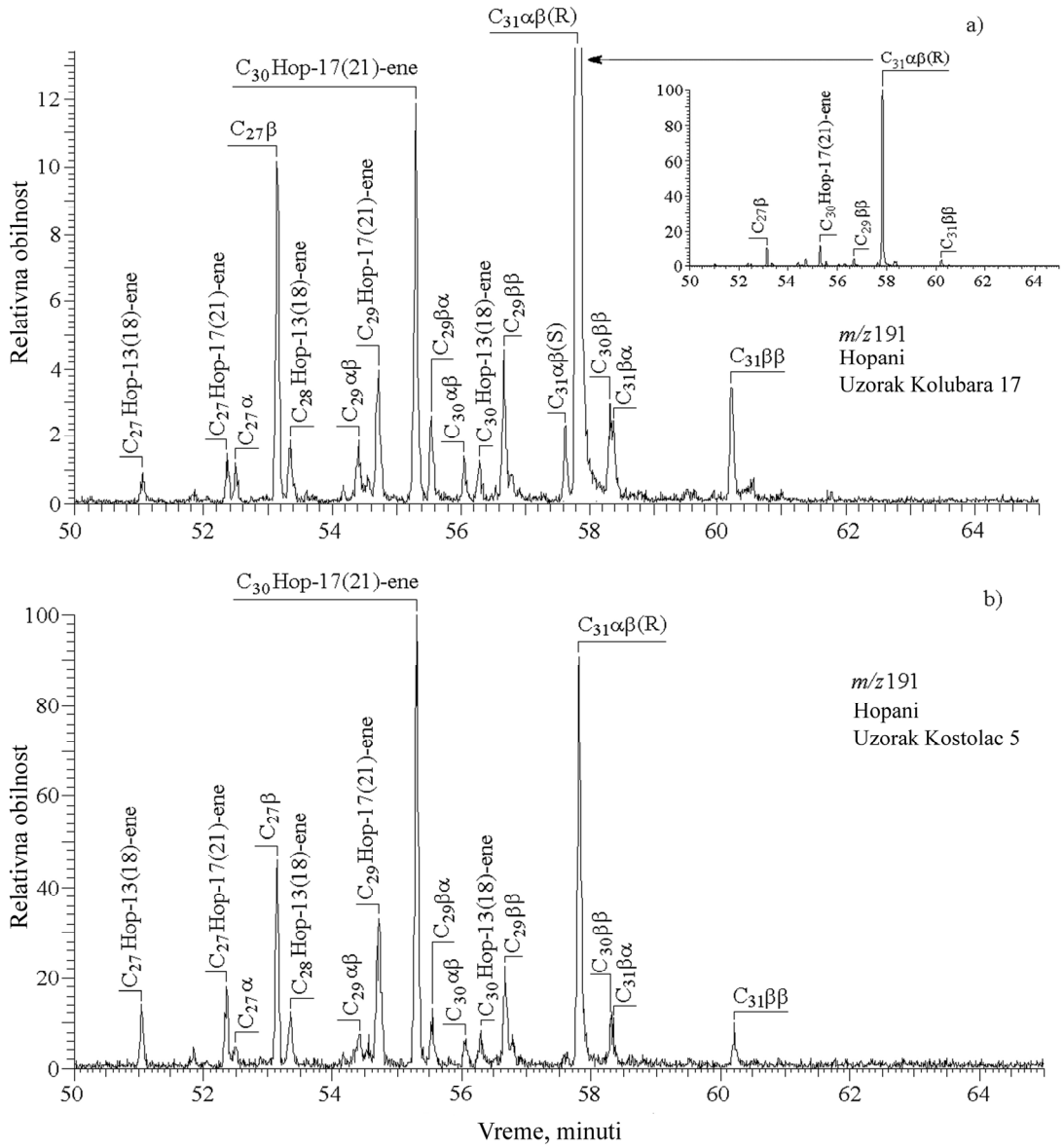
Perilen je uobičajen biomarker aromatičnih ugljovodonika u organskoj materiji kopnenog porekla niskog stepena karbonifikacije. Identifikovan je u niskim koncentracijama u svim ispitivanim uzorcima uglja. Najverovatniji prekursor perilena su gljive.

Kao parametar koji uzima u obzir degradaciju fosilnog drveta pod dejsvom gljiva tokom raspadanja, transporta i rane dijageneze predložen je indeks degradacije četinara CWDI [166]. Više vrednosti CWDI u uzorcima uglja kolubarskog basena (tabela 14.7) ukazuju na intenzivniju degradaciju četinara pod dejstvom gljiva, što je najverovatnije rezultat oksičnije sredine u kojima je stvaran ugalj. Vrednosti ovog parametra se dobro korelišu sa niskim sadržajem sumpora (tabela 14.3), višim doprinosom angiospermi (tabele 14.4. i 14.7) i sadržajem C_{31} 17α(H)21β(H)22(R)-hopana u uzorcima iz kolubarskog basena.



Slika 14.4. TIC (Total Ion Current) aromatične frakcije tipične za analizirane uzorke iz (a) kolubarskog i (b) kostolačkog basena

1 – Dihidro-ar-kurkumen; 2 – Gama-kadinen; 3 – Kadina-4,9-dien; 4 –Kuparen; 5 – Kalamenen; 6 – α-Kalakoren; 7 – Kadina-1(10),6,8-trien; 8 – 5,6,7,8-Tetrhidrokadalen; 9 – Kadalen; 10 – Izokadalen; 11 – 19-Norabieta-8,11,13-trien; 12 – 19-Norabieta-6,8,11,13-tetraen; 13 – 16,17-Bisnordehidroabietan; 14 – Hibaen ; 15 – Norabietatetraen; 16 – 16,17-Bisnorsimonelit; 17 – 18-Norabieta-8,11,13-trien; 18 – Dehidroabietan; 19 – 1,2,3,4-Tetrahidroreten; 20 – 2-Metil, 1-(4'-metilpentil), 6-*i*-propil-nafralen; 21 – Simonelit; 22 – Totaran; 23 – Semperviran; 24 – Reten; 25 – 4-Metil-4,5-Dihidropiren; 26 – 3-Oksosimonelit; 27 – 2-Metilreten; 28 – Pentametildekahidrohrizen; 29 – 3,4,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-oktahidrohrizen, izomer; 30 – 3,4,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-oktahidrohrizen; 31 – 3,3,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-oktahidrohrizen; 32 – Triaromatični de-A-lupan; 33 – 3,3,7- Trimetil-1,2,3,4-tetrahidrohrizen; 34 – Perilen; 35 – 24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12-tetraen; 36 – D- monoaromatični hopan; 37 – 24,25-Dinorlupa-1,3,5(10)-trien; 38 – Norlanosta(eufa)heksaen; 39 – 24,25-Dinorursa-1,3,5(10),12-tetraen; 40 –Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen; 41 – 4-Metil, 24-etil, 19-norholesta-1,3,5(10)-trien; 42 – 4-Metil, 24-etil, 19-norholesta-1,3,5(10)-trien, izomer; 43 – 7-Metil, 3'-etil, 1,2-ciklopentanohrizen; 44 – 1,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen; 45 – 2,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen; Std – Standard.



Slika 14.5. Gasni hromatogram hopanske frakcije bitumena, m/z 191, uzoraka iz (a) kolubarskog i (b) kostolačkog basena

Tabela 14.7. Ukupan sadržaj glavnih biomarkera u zasićenoj i aromatičnoj frakciji (μg/gC_{org}), parametri izračunati iz raspodele i zastupljenosti diterpana i ne-hopanskih triterpana, CWDI i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima

Uzorak	HGI	Seskvi-terpani	Diterpani	Ne-hopanski triterpani	Sterani	Hopani	$DT/(DT+TT)_{sat}$[a]	$DT/(DT+TT)_{arom}$[b]	$DT/(DT+TT)_{sat+arom}$	CWDI[c]
Kolubara 3	44,0	21,58	548,87	31,21	10,28	69,55	0,994	0,71	0,946	0,014
Kolubara 7	56,9	21,32	518,28	37,30	8,17	66,25	0,993	0,66	0,933	0,009
Kolubara 8	44,9	29,15	706,09	30,09	8,96	62,53	0,997	0,58	0,959	0,012
Kolubara 9	40,3	33,17	794,14	35,29	12,69	67,05	0,998	0,53	0,957	0,016
Kolubara 10	46,3	27,04	605,50	29,34	9,84	52,52	0,998	0,56	0,954	0,014
Kolubara 13	39,6	32,73	801,96	39,12	8,48	57,89	0,997	0,58	0,953	0,010
Kolubara 17	42,2	32,27	737,29	43,96	12,26	61,04	0,996	0,48	0,944	0,018
Kolubara 23	30,7	39,83	905,32	37,98	11,72	47,27	0,997	0,50	0,960	0,019
Kolubara 29	35,8	36,07	867,75	52,02	11,20	61,49	0,996	0,39	0,943	0,018
Kolubara 34	42,0	39,30	1356,23	32,86	7,21	79,61	0,998	0,54	0,976	0,011
Kolubara 36	48,5	37,05	1210,53	38,74	10,67	70,96	0,997	0,53	0,969	0,021
Kostolac 1	45,6	30,55	873,03	25,88	12,30	21,10	0,992	0,84	0,971	0,003
Kostolac 2	41,3	37,88	593,94	30,12	18,10	28,20	0,985	0,83	0,952	0,003
Kostolac 4	40,8	28,70	615,88	26,41	16,22	25,48	0,988	0,84	0,959	0,004
Kostolac 5	42,0	44,74	1038,41	24,18	10,25	17,68	0,994	0,89	0,977	0,002
Kostolac 7	47,0	46,23	858,24	46,94	22,91	33,04	0,978	0,81	0,948	0,006
Kostolac 9	44,1	36,25	619,82	30,62	14,47	23,18	0,980	0,86	0,953	0,004
Kostolac 11	44,8	29,89	613,09	20,10	11,14	18,50	0,991	0,86	0,968	0,003
Kostolac 13	41,7	27,98	638,29	26,19	14,57	22,48	0,990	0,83	0,961	0,002
Kostolac 15	43,4	28,58	704,35	22,07	13,75	19,37	0,993	0,88	0,970	0,002
Kostolac 16	43,6	36,95	741,25	20,98	12,43	18,42	0,991	0,88	0,972	0,002
Kostolac 17	44,6	30,24	539,89	30,63	16,40	24,25	0,982	0,82	0,946	0,003
Kostolac 22	43,1	31,16	616,39	23,49	14,46	19,86	0,991	0,87	0,963	0,002
Kostolac 23	42,7	52,29	1782,57	36,78	15,02	34,25	0,989	0,89	0,980	0,003

Tabela 14.7. Ukupan sadržaj glavnih biomarkera u zasićenoj i aromatičnoj frakciji (μg/gC_{org}), parametri izračunati iz raspodele i zastupljenosti diterpana i ne-hopanskih triterpana, CWDI i njihova korelacija sa vrednostima HGI i litotipovima – nastavak

	Seskvi-terpani	Diterpani	Ne-hopanski triterpani	Sterani	Hopani	$DT/(DT+TT)_{sat}$[a]	$DT/(DT+TT)_{arom}$[b]	$DT/(DT+TT)_{sat+arom}$	CWDI[c]
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kolubarskog basena									
r sa HGI	**-0,67**	-0,28	-0,34	-0,45	0,42	-0,53	**0,57**	-0,27	-0,42
r sa barskim ugljem	-0,35	0,06	-0,42	-0,37	**0,61**	-0,01	0,26	0,20	-0,22
r sa vlaknastim ksilitima	**0,62**	0,20	0,29	0,46	**-0,68**	0,41	-0,51	0,19	0,50
r sa strukturnim ksilitom	0,13	-0,16	0,37	0,07	-0,25	-0,02	-0,13	-0,33	-0,32
r sa dopleritskim ksilitom	0,33	0,13	0,47	0,54	-0,11	0,32	**-0,67**	0,03	**0,63**
r sa trakastim ksilitima	0,15	-0,15	0,41	0,12	-0,26	0,00	-0,18	-0,33	-0,27
r sa ksilinitima	0,53	0,07	0,41	0,40	**-0,63**	0,30	-0,46	-0,02	0,24
r sa zemljastim ugljem	**-0,68**	-0,40	-0,16	-0,29	0,24	**-0,87**	**0,71**	-0,49	-0,30
Koeficijenti korelacije (r) za uzorke iz kostolačkog basena									
r sa HGI	0,10	-0,02	0,38	0,23	0,09	-0,38	-0,29	-0,20	0,48
r sa barskim ugljem	-0,17	-0,29	0,09	0,25	0,33	-0,23	-0,44	-0,32	0,40
r sa vlaknastim ksilitima	0,08	0,14	-0,17	-0,11	0,06	0,13	0,24	0,11	**-0,53**
r sa strukturnim ksilitom	0,22	0,24	-0,11	-0,28	-0,24	0,32	0,40	0,34	-0,43
r sa dopleritskim ksilitom	-0,07	-0,06	0,05	-0,10	-0,13	-0,23	0,16	-0,12	0,37
r sa trakastim ksilitima	0,16	0,18	-0,07	-0,29	-0,27	0,17	0,42	0,24	-0,20
r sa ksilinitima	0,19	0,24	-0,16	-0,32	-0,21	0,22	0,51	0,28	-0,47
r sa zemljastim ugljem	0,28	0,15	0,25	0,17	0,03	-0,18	0,16	-0,01	0,11

[a]**$DT/(DT+TT)_{sat}$** = ΣDiterpani/(ΣDiterpani + ΣTriterpani), izračunati iz TIC-a zasićene frakcije, ΣDiterpani = (16α(H)-Filokladan + Pimaran + Izopimaradien + 4β(H)-19-Norizopimaran +4α(H)-18-Norizopimaran + Norpimaran + Norabietane + Bejeran + Dihidrorimuen + Izopimaran + Abietan + Izofilokladen + 16β(H)-Filokladan + 16α(H)-Kauran), ΣTriterpani = (De-A-olean-13(18)-ene + De-A-olean-12-en + De-A-urs-13(18)-en + De-A-olean-18-en + De-A-urs-12-en + De-A-lupan)
[b]**$DT/(DT+TT)_{arom}$** = ΣAromatični diterpani/(ΣAromatični diterpani + ΣAromatični triterpani), izračunati iz TIC-a aromatične frakcije [154, 159]
ΣAromatični diterpani = (19-Norabieta-6,8,11,13-tetraen + 18-Norabieta-6,8,11,13-tetraen + 19-Norabieta-8,11,13-trien + 18-Norabieta-8,11,13-trien + 16,17-Bisnordehidroabietan + 16,17-Bisnorsimonelit + Dehidroabietan + Simonelit + Reten + 1,2,3,4-Tetrahidroreten + Semperviran + Totaran + Hibaen + 2-Metilreten), ΣAromatični triterpani = (24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12-tetraen + 24,25-Dinorursa-1,3,5(10),12-tetraen + 24,25-Dinorlupa-1,3,5(10)-trien + 3,4,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-oktahidrohrizen + 3,3,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-oktahidrohrizen + 3,4,7-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidrohrizen + 3,3,7-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidrohrizen + 1,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen + 2,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-oktahidropicen + 1,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen + 2,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen + Triaromatični de-A-lupan + Pentametildekahidrohrizen)
[c]**CWDI** – Indeks degradacije tkiva konifera (Conifer Wood Degradation Index); **CWDI** = Perilen/(Perilen + Kadalen + Reten + Simonelit + Dehidroabietan)

14.2. Analiza rezultata

14.2.1. Litotipovi i vrednosti HGI

Vrednosti HGI imaju ujednačene vrednosti za uzorke uglja iz kostolačkog basena. HGI vrednosti uzoraka iz kolubarskog basena takođe pokazuju ujednačenost sem uzoraka Kolubara 23, Kolubara 29 koji imaju vrednosti HGI 30,7 i 35,8 respektivno i uzorka Kolubara 7 koji ima visoku vrednost HGI od 56,9 (tabela 14.1).

Posmatrajući tabelu 14.1 može se dati obrazloženje vrednostima datim u prethodnom pasusu. Vidi se da postoji jaka negativna korelacija između vrednosti HGI i sadržaja trakastog ksilita. Pri tome uzorak Kolubara 7 ima najniži sadržaj trakastog ksilita (6,48 %, maseni udeo) a najveću vrednost HGI (56,9). Sa druge strane, uzorak Kolubara 7 (a takođe i Kolubara 36) imaju veći sadržaj kako zemljastog uglja ($r = 0,69$) i mineralnih materija ($r = 0,72$) koje pozitivno utiču na meljivost (tabela 14.1). Uzorci Kolubara 23 i Kolubara 29 imaju najveći sadržaj trakastog ksilita koji izrazito negativno utiče na meljivost, stoga su njihove vrednosti HGI i najniže (30,7 i 35,8 respektivno). Sa druge strane uzorak Kolubara 23 ima i najmanje sadržaja barskog uglja koji pozitivno utiče na meljivost (17,2 %, maseni udeo) i znatno manje zemljastog uglja i mineralnih materija od Kolubare 7 (tabela 14.1).

Analizirajući sve uzorke, izrazito negativna linearna korelacija postoji između sadržaja trakastog ksilita i vrednosti HGI ($r = -0,77$) uzoraka iz kolubarskog basena (tabela 14.1). Za uzorke iz kostolačkog basena postoji srednja negativna linearna korelacija između sadržaja trakastog ksilita i vrednosti HGI, koja iznosi $r = -0,57$ (tabela 14.1). Svi tipovi ksilita, kao i sadržaj ukupnih ksilita uzoraka uglja kolubarskog basena imaju izrazito negativan uticaj na karakteristike meljivosti uglja ($r = -0,79$). Što se tiče uzoraka uglja kostolačkog basena, negativan uticaj na meljivost imaju vlaknasti ksiliti sa $r = -0,57$ (tabela 14.1, slika 14.6a i 14.6b). Stoga se može zaključiti da vlaknasti ksiliti imaju najveći negativan uticaj na meljivost pogotovo za uzorke kolubarskog basena.

Barski ugalj ima pozitivan uticaj na meljivost uglja kolubarskog basena ($r = 0,62$), dok je kod uzoraka kostolačkog basena primećen slabi negativan uticaj, pri čemu je

$r = -0,22$ (tabela 14.1, slika 14.6c). Variranje uticaja barskog uglja na vrednosti HGI se može objasniti velikom heterogenošću uglja. Ovaj podatak je primećen i u literaturnim podacima [167]. Naime, skenirajući uzorke grčkih lignita pod elektronskim mikroskopom, autori [167] su uočili da je barski ugalj heterogen po stukturi. Ova heterogenost potiče od različitih ostataka biljaka od koje je sačinjen ovaj litotip, pri čemu su praznine ispunjene mineralnim materijama. Sa druge strane čist drvenasti materijal (ksilitni litotip) predstavlja homogenu masu protkanu pukotinama koje su nastale pod uticajem pritiska tokom procesa nastajanja uglja.

Dopleritski ugalj, crn veoma sjajan i netrakast litotip, sačinjen uglavnom od gelinita nema značajan uticaj na vrednosti HGI kolubarskih lignita ($r = 0,04$), dok za kostolačke lignite ima slab negativan uticaj pri čemu je $r = -0,34$.

Zemljasti ugalj, pogotovo iz kolubarskih uzoraka, ima pozitivan uticaj na meljivost ($r = 0,69$, tabela 14.1).

Mineralne materije, naročito za kolubarske uzorke, imaju pozitivan uticaj na vrednosti HGI ($r = 0,72$, tabela 14.1). Vrednosti HGI zavise od količine i vrste mineralnih materija. Mineralne materije u uzorcima uglja iz kolubarskog basena su uglavnom sastavljene od kvarca, dok su glina i feldspat manje zastupljeni. Mineralne materije uzoraka iz kostolačkog basena se uglavnom sastoje od bentonitskih glina i kvarca [168]. Dobijeni rezultati analiza su u saglasnosti sa literaturnim podacima, koji pokazuju da kvarc ima pozitivan uticaj na meljivost uglja [45, 169]. Veće prisustvo bentonitske gline u mineralnim materijama ugljeva kostolačkog basena u odnosu na ugljeve kolubarskog basena su razlog manje izraženog pozitivnog uticaja mineralnih materija na HGI vrednosti u ovim ugljevima ($r = 0,51$ za ugljeve kostolačkog basena u odnosu na $r = 0,72$ za ugljeve kolubarskog basena).

14.2.2. Maceralni sastav uzoraka i vrednosti HGI

Značajna negativna linearna korelacija za uzorke uglja iz kolubarskog ($r = -0,83$) i kostolačkog ($r = -0,70$) je uočena između sadržaja tekstinita i vrednosti HGI (tabela 14.2, slika 14.7), što ukazuje na negativan uticaj ovog macerala na meljivost uglja. Za uzorak uglja u kome je najveći sadržaj tekstinita (Kolubara 23) vrednost HGI ima

najnižu vrednost (30,7), dok u uzorku uglja Kolubara 7, koji ima najniži sadržaj tekstinita javlja se maksimalna vrednost HGI (56,9). Ovaj podatak je u skladu sa visokim sadržajem vlaknastih ksilita (tabela 14.1).

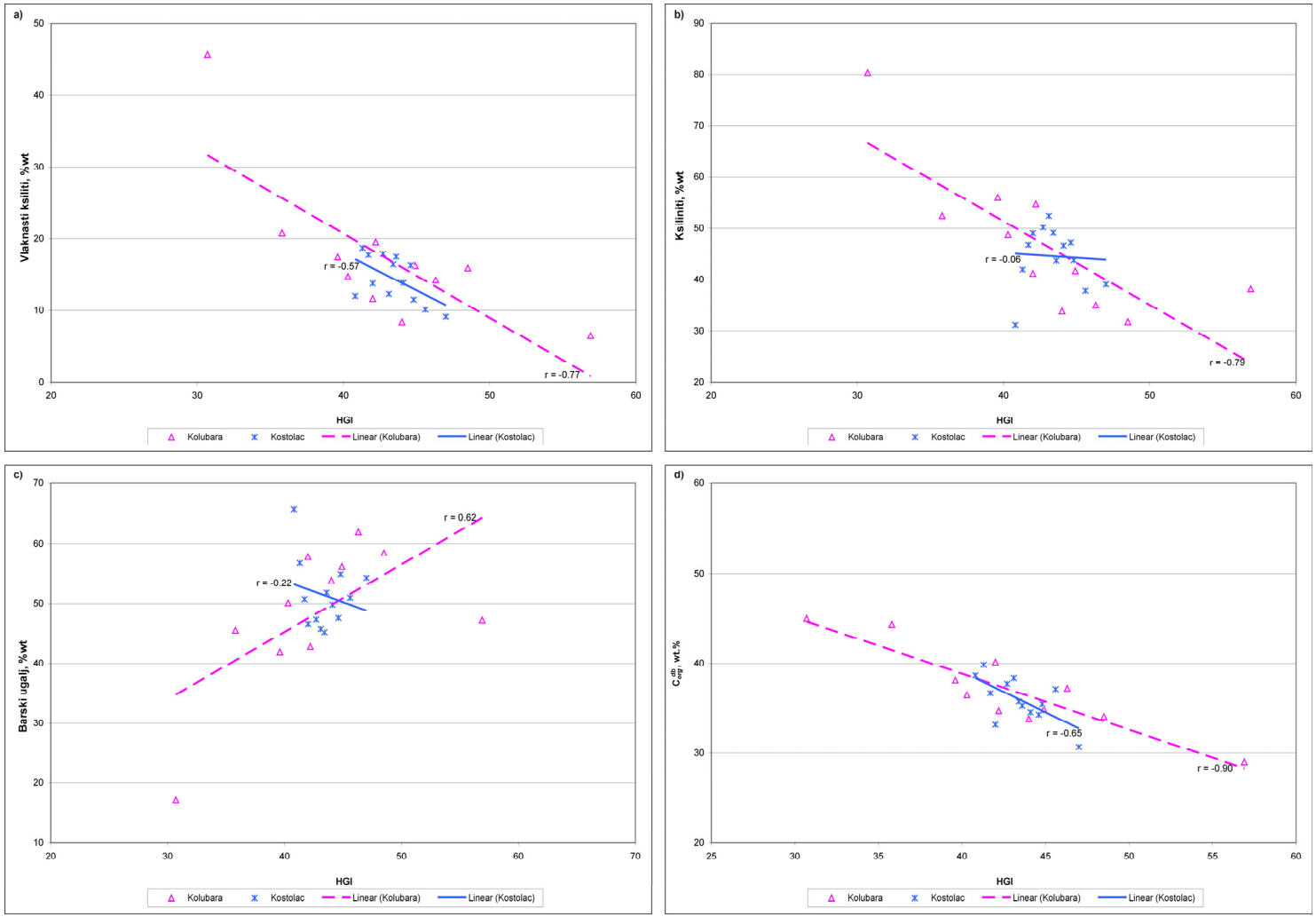
Pored tekstinita negativan uticaj na karakteristike meljivosti uzoraka iz kolubarskog basena ima i kutinit ($r = -0,59$), dok macerali atrinit ($r = 0,58$), densinit ($r = 0,56$) kao i mineralne materije ($r = 0,76$) utiču pozitivno na meljivost uzoraka uglja iz kolubarskog basena.

Što se tiče uzoraka iz kostolačkog basena, ulminit ima pozitivan uticaj na meljivost ($r = 0,62$), dok mineralne materije nemaju toliko uticaja kao kod kolubarskih lignita ($r = -0,31$).

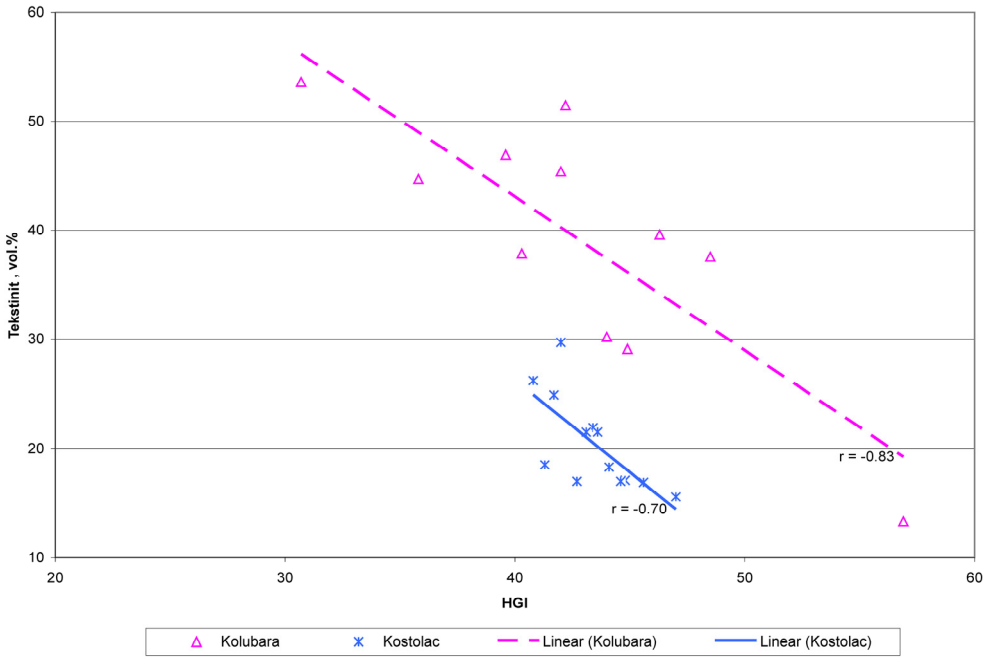
Interesantno je zapaziti (tabela 14.2) kod kostolačkih uzoraka da je sadržaj ulminita koji pozitivno utiče na meljivost viši od sadržaja tekstinita koji utiče negativno na meljivost uglja što se odražava na vrednosti HGI koje su ujednačenije kog kostolačkih uzoraka nego kod kolubarskih (u kojima je značajno niži sadržaj ulminita).

14.2.3. Organsko-geohemijske karakteristike uzoraka i vrednosti HGI

Negativna linearna korelacija za uzorke iz kolubarskog basena ($r = -0,90$ i $r = -0,64$) i uzorke iz kostolačkog basena ($r = -0,65$ i $r = -0,58$) između sadržaja organskog ugljenika (bez vlage i bez vlage i mineralnih materija) i vrednosti HGI ukazuje na negativan uticaj organskog ugljenika na meljivost uglja. Korelaciona analiza je pokazala pozitivnu korelaciju između sadržaja organskog ugljenika i sadržaja vlaknastog ksilita ($r = 0,72$ i $r = 0,63$), kao i sadržaja ukupnog ksilita ($r = 0,67$ i $r = 0,63$) za kolubarske uzorke, dok je za uzorke kostolačkog basena ova korelacija blago pozitivna (tabela 14.3). Kako je napred navedeno sadržaj vlaknastog ksilita i ukupan sadržaj ksilinita imaju negativan uticaj na meljivost. Ovaj negativan uticaj se može pripisati većem udelu organskog ugljenika u uzorcima.



Slika 14.6. Korelacioni dijagrami između vrednosti HGI i: (a) vlaknastih ksilita, (b) ksilinita, (c) barskog uglja i (d) saržaja organskog ugljenika (bez vlage) za ispitivane uzorke



Slika 14.7. Korelacija između vrednosti HGI i sadržaja tekstinita (zap. %) u ispitivanim uzorcima uglja

Kod uzoraka iz kolubarskog basena postoji blaga negativna korelacija ($r = -0,39$) između sadržaja rastvorljive organske materije (bitumena) i vrednosti HGI (tabela 14.3). Ovaj rezultat je očekivan, usled nepovoljnih mehaničkih karakteristika bitumena. Uzimajući u obzir, blago pozitivnu korelaciju između sadržala bitumena i sadržaja vlaknastog i dopleritskog ksilita ($r = 0,33$ i $r = 0,47$) uzoraka iz kolubarskog basena (tabela 14.3), može se pretpostaviti da negativan uticaj uglja bogatog ksilitom na vrednosti HGI je jednim delom povezan sa visokim udelom rastvorljive organske materije.

Sadržaj zasićenih i aromatičnih ugljovodonika je pokazao pozitivan uticaj na vrednosti HGI za uzorke kolubarskog basena ($r = 0,60$), dok za uzorke kostolačkog basena nema korelacije. Sadržaj asflatena pokazuje blagu negativnu korelaciju sa vrednostima HGI za uzorke iz oba basena (tabela 14.3). Međutim, nema statistički značajne veze između sadržaja asfaltena i različitih litotipova (tabela 14.3).

Barski ugalj ne pokazuje značajnu korelaciju sa geohemijskim parametrima za ugljeve iz oba basena. Međutim, kao što je i očekivano, uočena je negativna korelacija između C_{org} i zemljastog uglja, $r = -0,66$ za uzorke kolubarskog i $r = -0,64$ za uzorke kostolačkog basena (tabela 14.3).

14.2.4. Molekularni sastav organske materije i vrednosti HGI

n-alkani i vrednosti HGI

Sadržaj ukupnih *n*-alkana ne utiče na karakteristike meljivosti uzoraka kolubarskih ($r = -0,09$) lignita, dok ima blago pozitivnu korelaciju ($r = 0,40$) sa vrednostima HGI kostolačkih lignita (tabela 14.4). Uzorci kolubarskih lignita pokazuju negativnu korelaciju između vrednosti HGI i parametara koji su povezani sa udelom srednjelančanih *n*-alkana (tabela 14.5): P_{aq} ($r = -0,56$), $n\text{-}C_{23}/(n\text{-}C_{27}+n\text{-}C_{31})$ ($r = -0,62$), $\Sigma n\text{-}C_{21}\text{-}n\text{-}C_{25}/\Sigma n\text{-}C_{13}\text{-}n\text{-}C_{33}$ ($r = -0,59$), a pozitivnu korelaciju vrednosti HGI sa P_{wax} ($r = 0,58$). Ovaj rezultat je praćen blagom pozitivnom korelacijom između sadržaja vlaknastog, dopleritskog i ukupnog sadržaja ksilita uzoraka kolubarskih lignita kako sa P_{aq} i $n\text{-}C_{23}/(n\text{-}C_{27}+n\text{-}C_{31})$, tako i sa sadržajem srednjelančanih alkana $\Sigma n\text{-}C_{21}\text{-}n\text{-}C_{25}/\Sigma n\text{-}C_{13}\text{-}n\text{-}C_{33}$ (tabela 14.5). Sa druge strane, ugalj sa visokim sadržajem dopleritskog ksilita u uzorcima kolubarskog lignita ispoljavaju negativnu korelaciju sa P_{wax} ($r = -0,67$, tabela 14.5). Stoga se može pretpostaviti da negativan uticaj kolubarskih lignita sa visokim sadržajem ksilita na vrednosti HGI jednim delom može biti povezan sa srednjelančanim *n*-alkanima.

U uzorcima uglja iz kostolačkog basena kratkolančani *n*-alkani ($\Sigma n\text{-}C_{13}\text{-}n\text{-}C_{20}/\Sigma n\text{-}C_{13}\text{-}n\text{-}C_{33}$) imaju pozitivan uticaj na vrednosti HGI ($r = 0,63$, tabela 14.5). Pored toga, vlaknasti ksiliti koji ispoljavaju najnegativniji uticaj na vrednosti HGI pokazuju negativnu korelaciju sa sadržajem kratkolančanih *n*-alkana ($r = -0,50$, tabela 14.5).

Barski ugalj, iz oba basena, ne pokazuje korelaciju sa raspodelom *n*-alkana. Zemljasti ugalj uzoraka kolubarskog basena ima pozitivnu korelaciju sa P_{wax} (sadržajem kratkolančanih i dugolančanih *n*-alkana) pri čemu je koeficijent korelacije $r = 0,81$, odnosno negativnu korelaciju sa sadržajem srednjelančanih *n*-alkana ($r = -0,78$) i CPI ($r = -0,71$) što je prikazano u tabeli 14.5.

Hopanoidi, steroidi i vrednosti HGI

Sadržaj hopana u zasićenoj i aromatičnoj frakciji, kao i ukupan sadržaj hopana (u zasićenoj i aromatičnoj frakciji) ne utiče na meljivost kostolačkih lignita (tabele 14.4. i 14.7). U uzorcima kolubarskih lignita postoji blaga pozitivna korelacija između

vrednosti HGI i sadržaja hopana u zasićenim frakcijama ($r = 0,46$) kao i ukupnih hopana ($r = 0,42$), dok sadržaj aromatičnih hopana pokazuje blagi negativan uticaj na vrednosti HGI ($r = -0,48$), što je prikazano u tabelama 14.4. i 14.7.

Aromatični hopani imaju blagu pozitivnu korelaciju sa sadržajem vlaknastog ($r = 0,50$) i dopleritskog ksilita ($r = 0,50$), kao i sa ukupnim sadržajem ksilita kolubarskih lignita pri čemu je koeficijent korelacije $r = 0,40$ (tabela 14.4). Ovaj podatak govori da negativan uticaj kolubarskih ugljeva bogatih ksilitom na vrednosti HGI delom može biti povezan sa aromatizacijom hopana. Sa druge strane, sadržaj ukupnih ksiliti (ksiliniti) u kolubarskim lignitima pokazuje negativnu korelaciju sa sadržajem hopana u zasićenoj frakciji ($r = -0,65$) i ukupnim hopanima ($r = -0,63$), koji pokazuju pozitivan uticaj na vrednosti HGI (tabele 14.4. i 14.7).

Barski ugalj kolubarskog basena ima pozitivnu korelaciju sa sadržajem hopana u zasićenoj frakciji ($r = 0,63$) i ukupnim hopanima ($r = 0,61$), odnosno blago negativnu korelaciju sa sadržajem aromatičnih hopana pri čemu je koeficijent korelacije $r = -0,43$ (tabele 14.4. i 14.7), što ukazuje da pozitivan uticaj barskog uglja na vrednosti HGI uzoraka iz kolubarskog basena (tabela 14.1) delom može biti povezan sa sadržajem nearomatičnih hopana.

Sadržaj sterana u zasićenim frakcijama pokazuje blagu negativnu korelaciju sa vrednostima HGI ($r = -0,30$) odnosno blagu pozitivnu korelaciju sa vrednostima HGI ($r = 0,38$) u aromatičnim frakcijama (tabela 14.4). Sadržaj ukupnih sterana pokazuje blagu negativnu korelaciju sa vrednostima HGI uzoraka kolubarskih lignita ($r = -0,45$), odnosno slabu pozitivnu korelaciju sa vrednostima HGI uzoraka kostolačkih lignita ($r = 0,23$) što je prikazano u tabeli 14.7.

Seskviterpani, diterpani, ne-hopanski triterpani i vrednosti HGI

Za uzorke uglja kostolačkog basena ne postoji značajnija statistička korelacija između vrednosti HGI i sadržaja ukupnih seskviterpana, diterpana i ne-hopanskih triterpana (u zasićenoj i aromatičnoj frakciji) kao i sadržaj ovih biomarkera u zasićenoj i aromatičnoj frakciji (tabele 14.4. i 14.7). Sa druge strane, sadržaj ukupnih seskviterpana i seskviterpana u zasićenoj frakciji pokazuju negativnu korelaciju sa vrednostima HGI uzoraka kolubarskih lignita, $r = -0,66$ i $r = -0,67$ respektivno (tabele 14.4 i 14.7).

Pozitivna korelacija sadržaja ukupnih seskviterpana i sadržaja seskviterpana u zasićenoj frakciji sa vlaknastim ksilitima iz kolubarskog basena ($r = 0,62$, tabele 14.4 i 14.7) pokazuju da se negativan uticaj vlaknastog ksilita i ukupnih ksilita na vrednosti HGI može pripisati sadržaju seskviterpana.

Barski ugalj pokazuje blagu negativnu korelaciju sa ukupnim seskviterpanima ($r = -0,35$), dok zemljasti ugalj pokazuje negativnu korelaciju sa ukupnim seskviterpanima iz kolubaskog basena ($r = -0,68$) što je prikazano u tabeli 14.7.

Korelaciona analiza kolubarskih uzoraka (tabele 14.4. i 14.7) pokazuje pozitivan uticaj sadržaja aromatičnih diterpana na vrednosti HGI ($r = 0,52$) i blagi negativan uticaj sadržaja aromatičnih ne-hopanskih triterpana na vrednosti HGI ($r = -0,39$), što je rezultat pozitivne korelacije odnosa $DT/(DT+TT)_{arom}$ i vrednosti HGI ($r = 0,57$). Ovaj rezultat je praćen negativnom korelacijom sadržaja aromatičnih diterpana, kao i odnosa $DT/(DT+TT)_{arom}$ sa vlaknastim ksilitom, dopleritskim ksilitom i ukupnim sadržajem ksilita i pozitivnom korelacijom između sadržaja ukupnih ksilita i sadržaja aromatičnih ne-hopanskih triterpana (tabele 14.4. i 14.7). Prethodni rezultati pokazuju da na negativan uticaj ksilitnog litotipa na vrednosti HGI uzoraka uglja kolubarskog basena utiče povećan sadržaj aromatičnih ne-hopanskih triterpana.

Barski ugalj kolubarskih uzoraka pokazuje blago negativnu korelaciju sa sadržajem aromatičnih ne-hopanskih triterpana ($r = -0,44$, tabela 14.4).

Između zemljastog uglja i sadržaja aromatičnih diterpana, kao i između odnosa $DT/(DT+TT)_{arom}$ i zemljastog uglja postoji značajna pozitivna korelacija ($r = 0,85$ i $r = 0,71$, respektivno) što je prikazano u tabelama 14.4. i 14.7.

CWDI (tabela 14.7) pokazuje blagu negativnu korelaciju sa vrednostima HGI uzoraka kolubarskog basena ($r = -0,42$), dok je za uzorke kostolačkog basena ova korelacija blago pozitivna ($r = 0,48$). Pozitivna korelacija između CWDI i vlaknastih ($r = 0,50$) i dopleritskih ksilita ($r = 0,63$) pokazuje da se negativan uticaj ksilitnog litotipa kolubarskih uzoraka na vrednosti HGI može povezati sa intenzivnom razgradnjom drvenastog tkiva. Kostolački ligniti pokazuju suprotan trend (tabela 14.7), tj. negativnu korelaciju između CWDI i vlaknastih ksilita ($r = -0,53$) i blago pozitivnu korelaciju CWDI i barskog uglja ($r = 0,40$).

15. Korelacione zavisnosti vrednosti HGI od tehničkih i petrografskih karakteristika ispitivanih ugljeva

Na osnovu eksperimentalnih rezultata tehničke i petrografske analize uzoraka ugljeva izvršena je korelaciona analiza navedenih parametara sa vrednostima HGI uzoraka ugljeva. Cilj je bio dobiti korelacioni izraz na osnovu regresionih analiza koji bi u dovoljno dobroj meri mogao predvideti vrednosti HGI ugljeva bez njegovog eksperimentalnog određivanja.

Regresione i korelacione analize izvršene su programskim paketom SPSS Statistics. Posebno su vršene analize za uzorke ugljeva kolubarskog i kostolačkog basena. Korelacioni izrazi su obuhvatili kako linearne zavisnosti tako i nelinearne zavisnosti.

U prvom navratu, analizirana je zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize uzoraka ugljeva, a zatim su u korelacione izraze pored tehničke analize uključivani kako litotipovi tako i petrografski sastav izabranih uzoraka ugljeva.

Korelaciona analiza vrednosti HGI u zavisnosti od tehničke analize ugljeva obuhvatila je svih 65 uzoraka uglja kolubarskog basena 24 uzoraka uglja kostolačkog basena.

Korelaciona analiza vrednosti HGI u zavisnosti od tehničke analize, litotipova i petrografskog sastava izvršena je na 11 izabranih uzoraka kolubarskog i 13 izabranih uzoraka uglja kostolačkog basena.

Pored toga, na osnovu izvršenih ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 u TENT B u Obrenovcu, izvršene su korelacione analize kapaciteta mlina i potrošnje električne energije za mlevenje sa elementima tehničke analize, vrednosti HGI i sitovne analize. Ove analize su rađene sa namerom da se na osnovu jednostavnih laboratorijskih ispitivanja odredi potrebna snaga za mlevenje uglja, što bi koristilo projektantima mlinova.

U daljem tekstu dati su korelacioni izrazi koji najbolje predviđaju vrednosti HGI, dok su u prilogu disertacije navedeni svi analizirani izrazi.

15.1. Uzorci uglja kolubarskog basena

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – linearna regresija

$$HGI = 15,373 + 0,658 \cdot WG - 0,578 \cdot V + 0,618 \cdot A,\ R^2 = 0,378, \qquad (15.1)$$

$$HGI = 59{,}16 - 1{,}63 \cdot W_h - 0{,}59 \cdot V + 0{,}283 \cdot A\,,\ R^2 = 0{,}383\,, \tag{15.2}$$

$$HGI = 64{,}127 - 1{,}386 \cdot W_{h,a} - 0{,}27 \cdot V_a + 0{,}07 \cdot A_a\,,\ R^2 = 0{,}342\,. \tag{15.3}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – nelinearna regresija

$$\begin{aligned} HGI = {} & 779{,}836 - 21{,}382 \cdot W + 0{,}152 \cdot W^2 + 1{,}542 \cdot A - \\ & -0{,}042 \cdot A^2 - 22{,}21 \cdot V + 0{,}085 \cdot V^2 - 0{,}015 \cdot W \cdot A + \qquad R^2 = 0{,}466\,, \\ & +0{,}341 \cdot W \cdot V + 0{,}062 \cdot A \cdot V \end{aligned} \tag{15.4}$$

$$\begin{aligned} HGI = {} & -81{,}115 + 15{,}501 \cdot W_{h,a} - 0{,}111 \cdot W_{h,a}^2 + 2{,}920 \cdot A_a - \\ & -0{,}009 \cdot A_a^2 + 1{,}069 \cdot V_a + 0{,}048 \cdot V_a^2 - 0{,}064 \cdot W_{h,a} \cdot A_a - \qquad R^2 = 0{,}510\,, \\ & -0{,}364 \cdot W_{h,a} \cdot V_a - 0{,}047 \cdot A_a \cdot V_a \end{aligned} \tag{15.5}$$

$$\begin{aligned} HGI = {} & 227{,}405 - 5{,}86 \cdot WG + 0{,}041 \cdot WG^2 + 1{,}572 \cdot A_a - \\ & -0{,}014 \cdot A_a^2 - 5{,}050 \cdot V_a + 0{,}026 \cdot V_a^2 + 0{,}007 \cdot WG \cdot A_a + \qquad R^2 = 0{,}496\,. \\ & +0{,}074 \cdot WG \cdot V_a - 0{,}016 \cdot A_a \cdot V_a \end{aligned} \tag{15.6}$$

Zavisnost vrednosti HGI od litotipova

$$\begin{aligned} HGI = {} & 44{,}231 + 0{,}136 \cdot BU - 0{,}236 \cdot TK - 5{,}483 \cdot DK - \\ & -0{,}592 \cdot ZU + 1{,}689 \cdot MM_L \end{aligned} \qquad R^2 = 0{,}907\,, \tag{15.7}$$

$$HGI = 53{,}885 - 0{,}389 \cdot TK - 5{,}617 \cdot DK - 1{,}142 \cdot ZU + 2{,}121 \cdot MM_L\,,\ R^2 = 0{,}899\,, \tag{15.8}$$

$$\begin{aligned} HGI = {} & -348{,}957 + 4{,}062 \cdot BU + 5{,}923 \cdot ZU + 3{,}479 \cdot MM_L + \\ & +3{,}724 \cdot KSI \end{aligned} \qquad R^2 = 0{,}892\,, \tag{15.9}$$

gde su

BU – sadržaj barskog uglja (maseni udeo u %),

TK – sadržaj trakastog ksilita (maseni udeo u %),

DK – sadržaj dopleritskog ksilita (maseni udeo u %),

ZU – sadržaj zemljastog uglja (maseni udeo u %),

MM_L – sadržaj mineralnih materija (maseni udeo u %),

KSI – sadržaj ksilinita – ukupnih ksilita (maseni udeo u %).

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i litotipova

$$HGI = -4,314 - 0,132 \cdot KSI + 0,329 \cdot W_{h,a} + 0,638 \cdot V_a + \\ +0,851 \cdot A_a + 0,549 \cdot MM_L \quad R^2 = 0,917, \tag{15.10}$$

$$HGI = 7,855 - 0,083 \cdot BU - 0,337 \cdot TK + 1,663 \cdot W_{h,a} + 0,940 \cdot A_a, \; R^2 = 0,941. \tag{15.11}$$

Zavisnost vrednosti HGI od petrografskog sastava

$$HGI = 44,710 - 0,326 \cdot Te + 1,450 \cdot Ch - 1,154 \cdot Su + 0,524 \cdot MM_M, \; R^2 = 0,762, \tag{15.12}$$

$$HGI = -2437,801 + 56,287 \cdot HUM + 21,803 \cdot LIP - \\ -8,073 \cdot MM_M - 0,324 \cdot HUM^2 - 1,507 \cdot LIP^2 + 0,539 \cdot MM_M^2 \quad R^2 = 0,928, \tag{15.13}$$

$$HGI = -65,009 + 3,788 \cdot Te + 13,450 \cdot Ch + 2,741 \cdot Su + \\ +0,100 \cdot MM_M - 0,053 \cdot Te^2 - 1,306 \cdot Ch^2 - 0,170 \cdot Su^2 + \\ +0,050 \cdot MM_M^2 \quad R^2 = 0,878, \tag{15.14}$$

gde su

Te – sadržaj tekstinita (zapremisnki udeo u %),

Ch – sadržaj korpohuminita (zapremisnki udeo u %),

Su – sadržaj suberinita (zapremisnki udeo u %),

MM_M – sadržaj mineralnih materija (zapremisnki udeo u %),

HUM – sadržaj huminita (zapremisnki udeo u %),

LIP – sadržaj liptinita (zapremisnki udeo u %).

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i petrografskog sastava

$$HGI = 43,882 - 0,112 \cdot HUM - 0,770 \cdot LIP + 1,040 \cdot INER - \\ -0,395 \cdot V_a + 0,116 \cdot W_{h,a} + 0,713 \cdot A_a \quad R^2 = 0,878, \tag{15.15}$$

$$HGI = 24,708 - 0,252 \cdot Te - 0,003 \cdot De - 0,179 \cdot MM_M - \\ -0,222 \cdot V_a + 1,284 \cdot W_{h,a} + 0,859 \cdot A_a \quad R^2 = 0,918. \tag{15.16}$$

15.2. Uzorci uglja kostolačkog basena

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – linearna regresija

$$HGI = 73,0073 - 0,491 \cdot WG - 0,634 \cdot V + 0,063 \cdot A, \; R^2 = 0,461, \tag{15.17}$$

$$HGI = 53,649 + 0,439 \cdot W_{h,a} - 0,500 \cdot V_a + 0,071 \cdot A_a\,,\ R^2 = 0,442\,, \tag{15.18}$$

$$HGI = 56,743 + 0,081 \cdot A - 0,451 \cdot V_a\,,\ R^2 = 0,433\,, \tag{15.19}$$

$$HGI = 68,344 - 0,241 \cdot W - 0,436 \cdot V_a\,,\ R^2 = 0,433\,. \tag{15.20}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – nelinearna regresija

$$\begin{aligned} HGI &= 1375,518 - 55,909 \cdot W + 0,514 \cdot W^2 - 20,848 \cdot A + \\ &+0,006 \cdot A^2 + 10,715 \cdot V - 0,067 \cdot V^2 + 0,566 \cdot W \cdot A - \\ &-0,126 \cdot W \cdot V - 0,106 \cdot A \cdot V \end{aligned} \quad R^2 = 0,742\,, \tag{15.21}$$

$$\begin{aligned} HGI &= 684,193 - 26,247 \cdot WG + 0,153 \cdot WG^2 - 8,588 \cdot A_a - \\ &-0,016 \cdot A_a^2 + 1,251 \cdot V_a - 0,063 \cdot V_a^2 + 0,284 \cdot WG \cdot A_a + \\ &+0,072 \cdot WG \cdot V_a + 0,005 \cdot A_a \cdot V_a \end{aligned} \quad R^2 = 0,770\,. \tag{15.22}$$

Zavisnost vrednosti HGI od litotipova

$$\begin{aligned} HGI &= 56,051 - 0,138 \cdot BU - 0,417 \cdot TK - 0,134 \cdot DK + \\ &+0,050 \cdot ZU + 2,343 \cdot MM_L \end{aligned} \quad R^2 = 0,744\,, \tag{15.23}$$

$$\begin{aligned} HGI &= 29,056 - 1,331 \cdot MM_L - 0,768 \cdot VLK + 1,430 \cdot TRK + \\ &+2,344 \cdot MM_L^2 + 0,017 \cdot VLK^2 - 0,023 \cdot TRK^2 \end{aligned} \quad R^2 = 0,859\,, \tag{15.24}$$

gde su

VLK – sadržaj vlaknastih ksilita (maseni udeo u %),

TRK – sadržaj trakastih ksilita (maseni udeo u %).

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i litotipova

$$\begin{aligned} HGI &= 46,580 - 0,142 \cdot BU - 0,476 \cdot TK + 2,933 \cdot MM_L + \\ &+0,289 \cdot W_{h,a} + 0,201 \cdot V_a \end{aligned} \quad R^2 = 0,735\,. \tag{15.25}$$

Zavisnost vrednosti HGI od petrografskog sastava

$$\begin{aligned} HGI &= 49,908 - 3,008 \cdot Te + 2,418 \cdot De + 6,617 \cdot Ch - 5,649 \cdot Su + \\ &+0,068 \cdot Te^2 - 0,084 \cdot De^2 - 0,647 \cdot Ch^2 + 0,971 \cdot Su^2 \end{aligned} \quad R^2 = 0,788\,, \tag{15.26}$$

$$\begin{aligned} HGI &= 80,720 - 0,741 \cdot Te - 2,308 \cdot Ul - 2,891 \cdot Su + 1,737 \cdot MM_M + \\ &+0,005 \cdot Te^2 + 0,038 \cdot Ul^2 + 0,378 \cdot Su^2 - 0,058 \cdot MM_M^2 \end{aligned} \quad R^2 = 0,854\,. \tag{15.27}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i petrografskog sastava

$$HGI = 73,048 - 0,303 \cdot Te + 0,078 \cdot Ch + 0,081 \cdot Su + \\ +0,144 \cdot MM_M - 0,438 \cdot V_a - 1,220 \cdot W_{h,a} \qquad R^2 = 0,830, \tag{15.28}$$

$$HGI = 54,615 - 0,334 \cdot Te - 0,122 \cdot De + 0,240 \cdot MM_M - \\ -0,320 \cdot V_a - 0,451 \cdot W_{h,a} + 0,202 \cdot A_a \qquad R^2 = 0,883. \tag{15.29}$$

15.3. Analiza korelacionih zavisnosti

Analizom korelacionih izraza zaključuje se da najniže koeficijente determinacije daju izrazi koji obuhvataju samo elemente tehničke analize. Prema tome podaci tehničke analize jesu najdostupniji i najlakše ih je odrediti, ali sa najmanjom tačnošću se mogu koristiti za predviđanje vrednosti HGI ugljeva (lignita kolubarskog i kostolačkog basena). Viši koeficijenti determinacije se dobijaju za uzorke ugljeva kostolačkog basena, jer su i vrednosti HGI i vrednosti elemenata tehničke analize uzorka uglja kostolačkog basena više homogeni (manja razlika između minimalnih i maksimalnih vrednosti). Razlog nižih koeficijenata determinacije treba tražiti u činjenici da su lignitski ugljevi mladi ugljevi, vrlo heterogenih vrednosti elemenata tehničke analize.

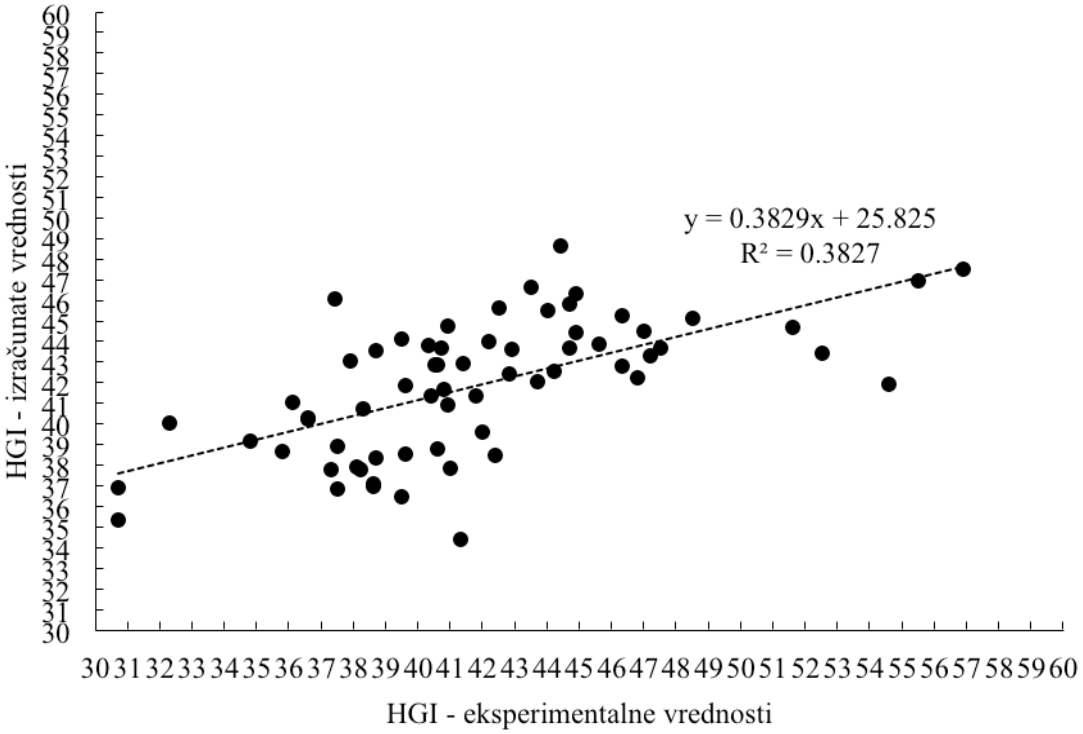
Znatno bolji koeficijenti determinacije se dobijaju kada se vrši korelaciona analiza između vrednosti HGI i pojedinih litotipova, odnosno između vrednosti HGI i tehničke analize i litotipova. Interesantno je primetiti da za lignit kolubarskog basena, iako je reč o heterogenijem uglju, dobijene veće vrednosti koeficijenta determinacije između vrednosti HGI i litotipova, nego što je to slučaj za lignite kostolačkog basena. Maksimalno postignuti koeficijenti determinacije zavisnosti vrednosti HGI od litotipova za lignite kolubarskog basena je iznosio $R^2 = 0,907$ (izraz 15.7), dok je za lignite kostolačkog basena iznosio $R^2 = 0,859$ (izraz 15.24). Objašnjenje ove pojave je verovatno u činjenici da glavni litotipovi (barski ugalj, ksiliti, zemljasti ugalj) i mineralne materije imaju izraženiji uticaj na meljivost ugljeva kolubarskog basena, što se jasno vidi iz korelacionih koeficijenata prikazanih u tabeli 14.1. u poglavlju 14. Već na osnovu podataka o litotipovima može se sa velikom pouzdanošću predvideti vrednost HGI kolubarskih i kostolačkih lignita, a kada se litotipovima priključe podaci tehničke analize kod kolubarskih lignita postignuta je još bolja korelacija ($R^2 = 0,941$

maksimalno, izraz 15.11), dok kod kostolačkih lignita nije uočeno značajnije poboljšanje u postavljanju korelacionih zavisnosti ($R^2 = 0,735$).

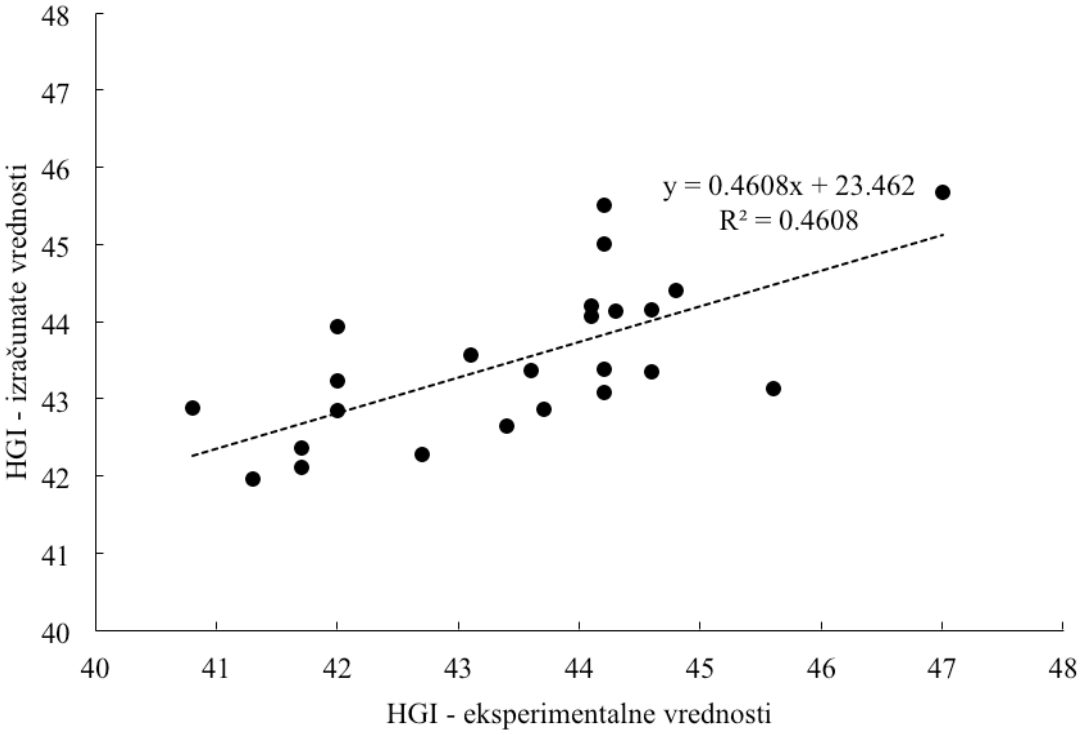
Kada se u korelacione izraze uključi petrografski sastav uglja i tehnička analiza uglja, dobijaju se jako visoke vrednosti koeficijenta determinacije: $R^2 = 0,918$ za uzorke kolubarskih lignita (izraz 15.16) odnosno $R^2 = 0,883$ za uzorke kostolačkih lignita (izraz 15.29). Slično kao i kod uspostavljanja korelacija između vrednosti HGI i litotipova, i ovde, pri uspostavljanju korelacija između vrednosti HGI i petrografskog sastava, nešto bolja korelacija je ostvarena kod kolubarskih lignita. Razlog je isti, ponovo jasnije izražen uticaj pojedinih macerala, bilo pozitivno ili negativno, na vrednosti HGI kolubarskih ugljeva, što se jasno vidi iz korelacionih koeficijenata prikazanih u tabeli 14.2. u poglavlju 14. I ovde, kod uzoraka iz kostolačkog basena, podaci tehničke analize u kombinaciji sa petrografskim sastavom ne doprinose daljem značajnijem poboljšanju koeficijenta determinacije. U tom smislu se može zaključiti da su analizom litotipova ili petrografskog sastava i njihovih uticaja na meljivost, dobrim delom već obuhvaćeni i uticaji podataka tehničke analize na vrednosti HGI ugljeva.

Na slikama 15.1. do 15.6. dat je grafički prikaz rezultata dobijenih korišćenjem korelacionih izraza. Za grafički prikaz izabrani su izrazi koji daju najveće koeficijente determinacije.

Uzorci kolubarskog basena, izraz (15.2)

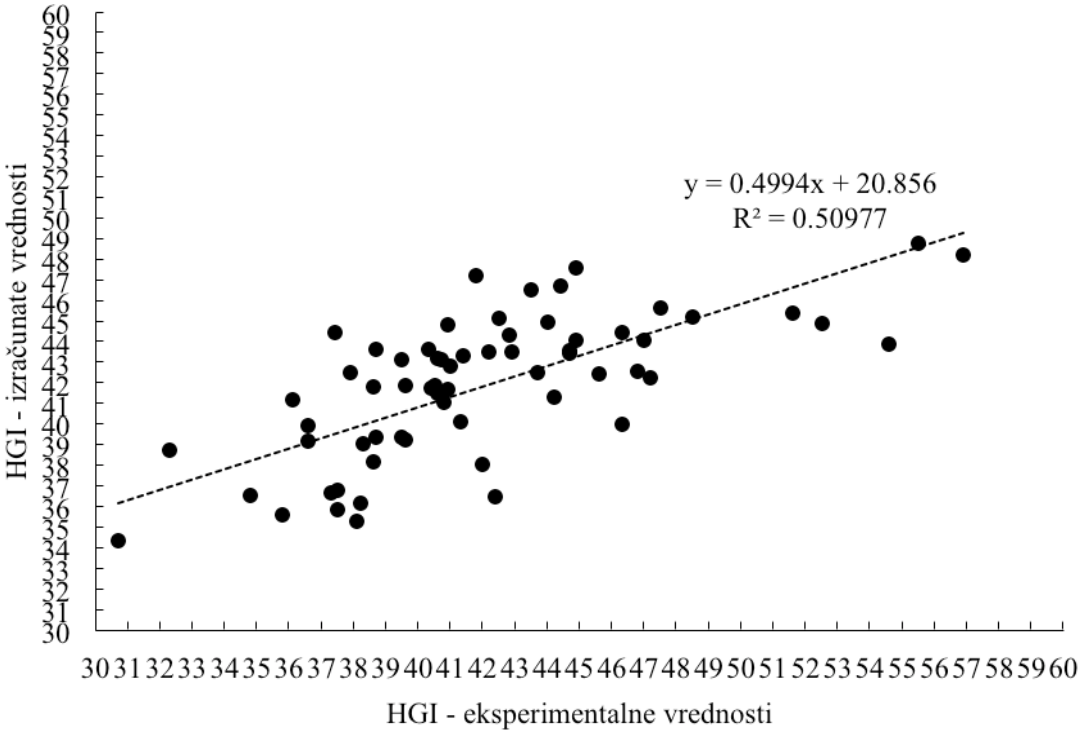


Uzorci kostolačkog basena, izraz (15.17)

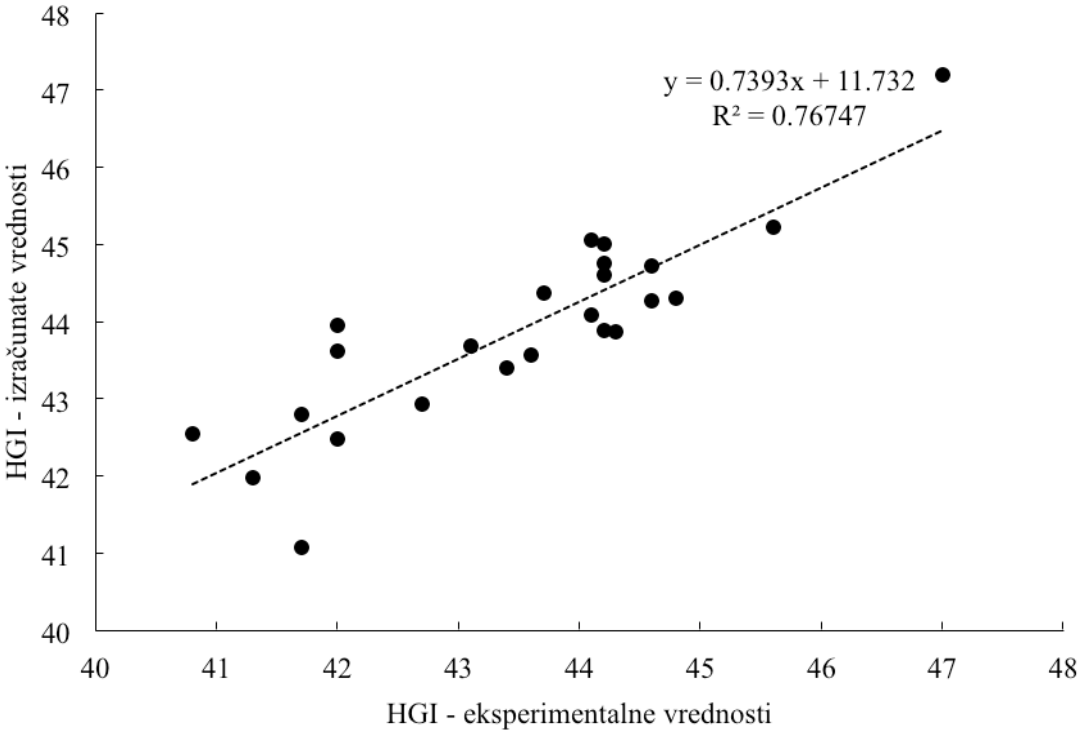


Slika 15.1. Zavisnost vrednosti HGI od elemenata tehničke analize – linearne

Uzorci kolubarskog basena, izraz (15.5)

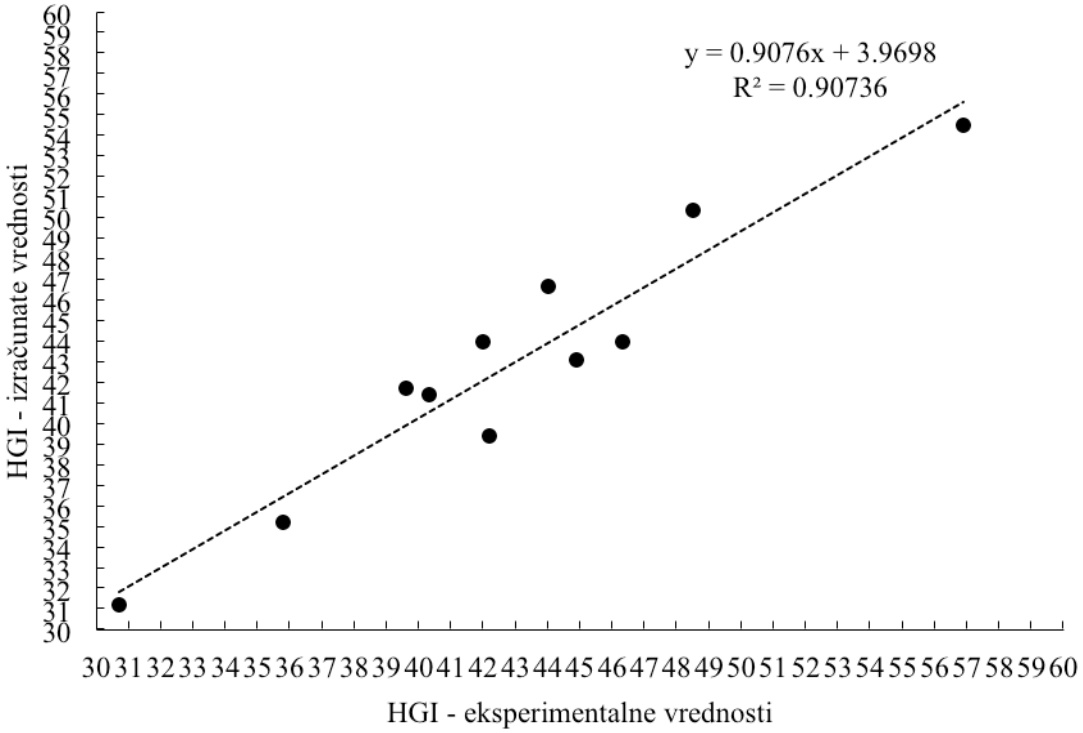


Uzorci kostolačkog basena, izraz (15.22)

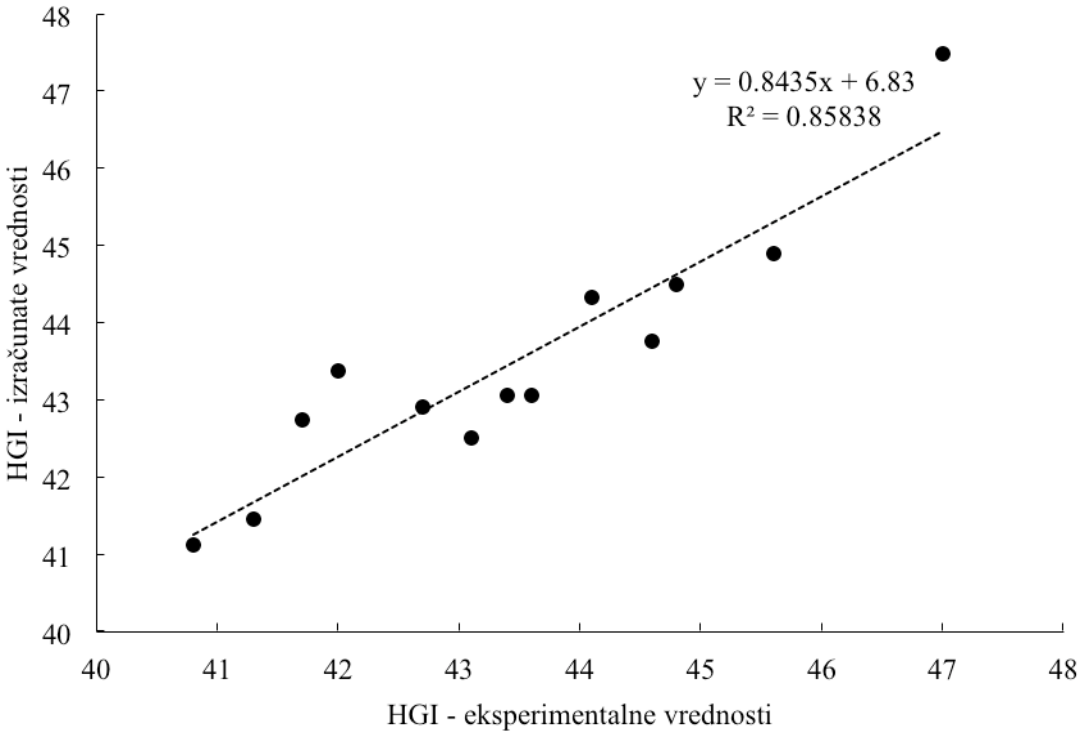


Slika 15.2. Zavisnost vrednosti HGI od elemenata tehničke analize – nelinearne

Uzorci kolubarskog basena, izraz (15.7)

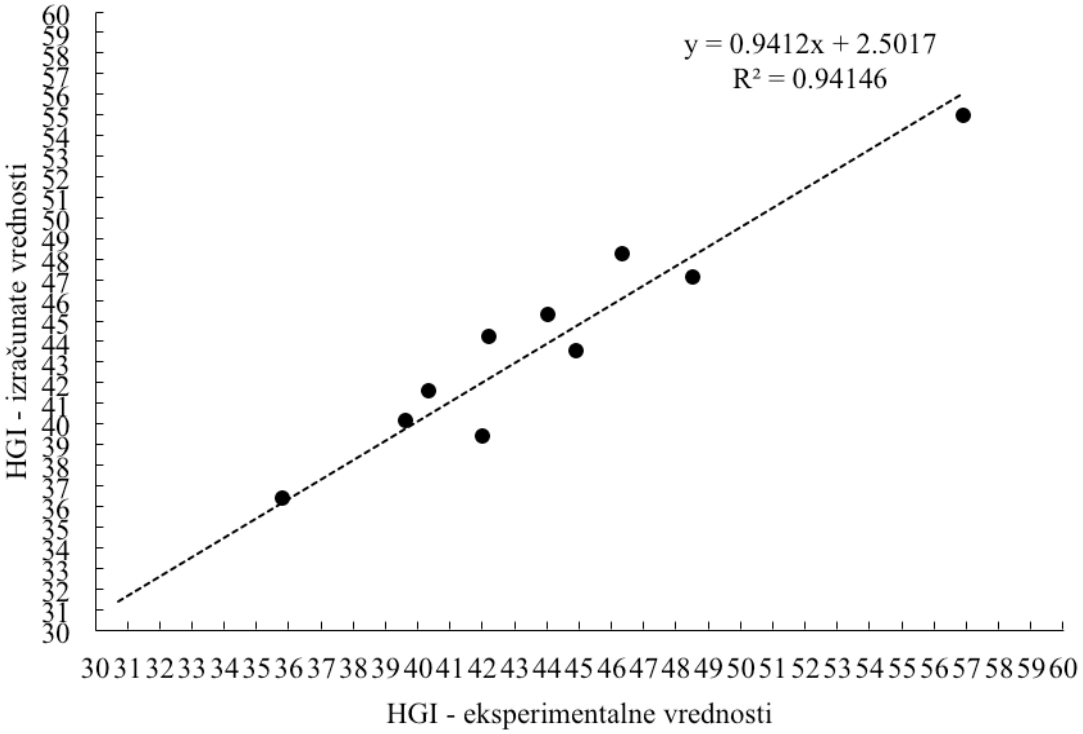


Uzorci kostolačkog basena, izraz (15.24)

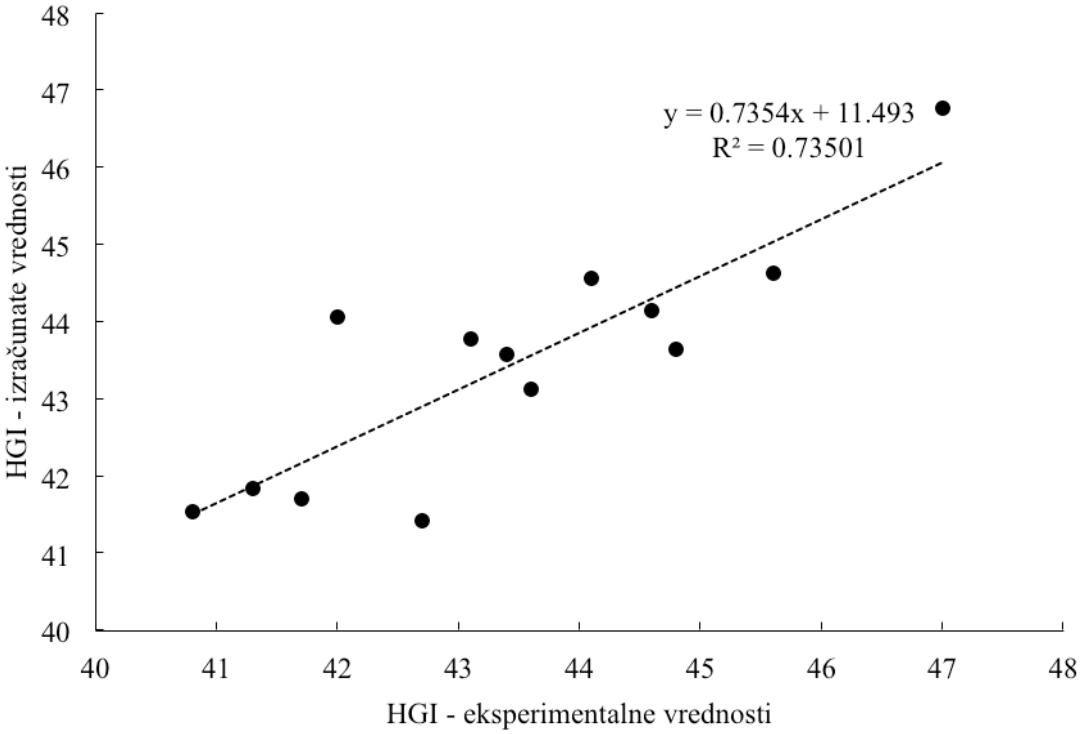


Slika 15.3. Zavisnost vrednosti HGI od litotipova

Uzorci kolubasrskog basena, izraz (15.11)

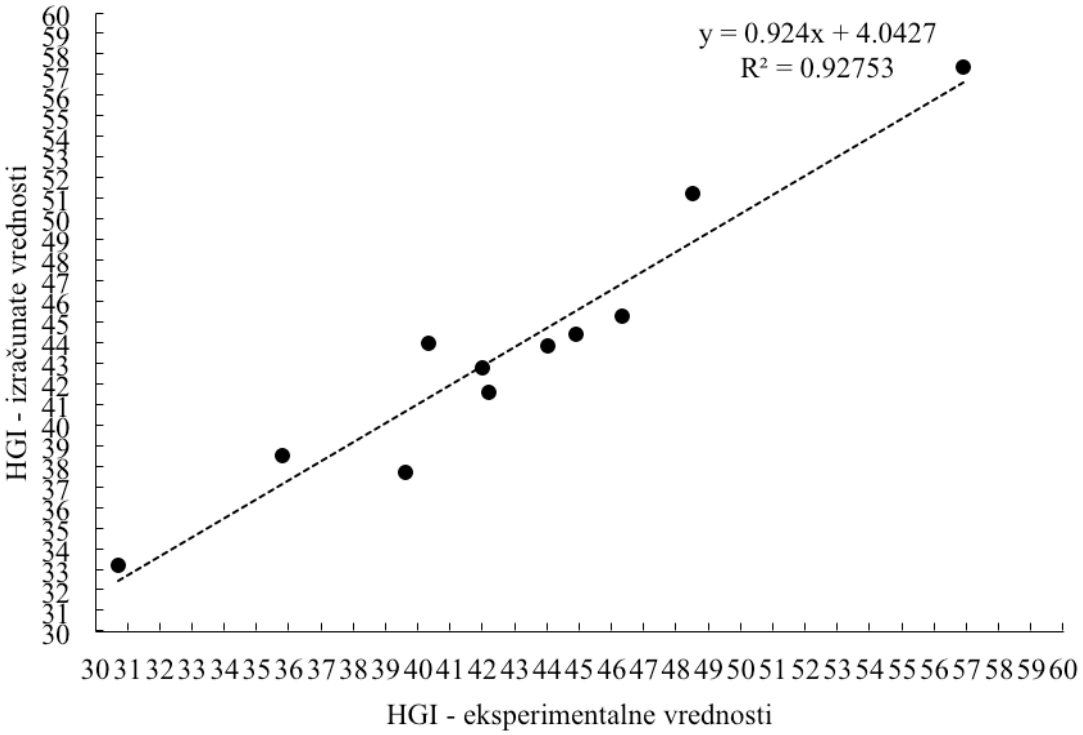


Uzorci kostolačkog basena, izraz (15.25)

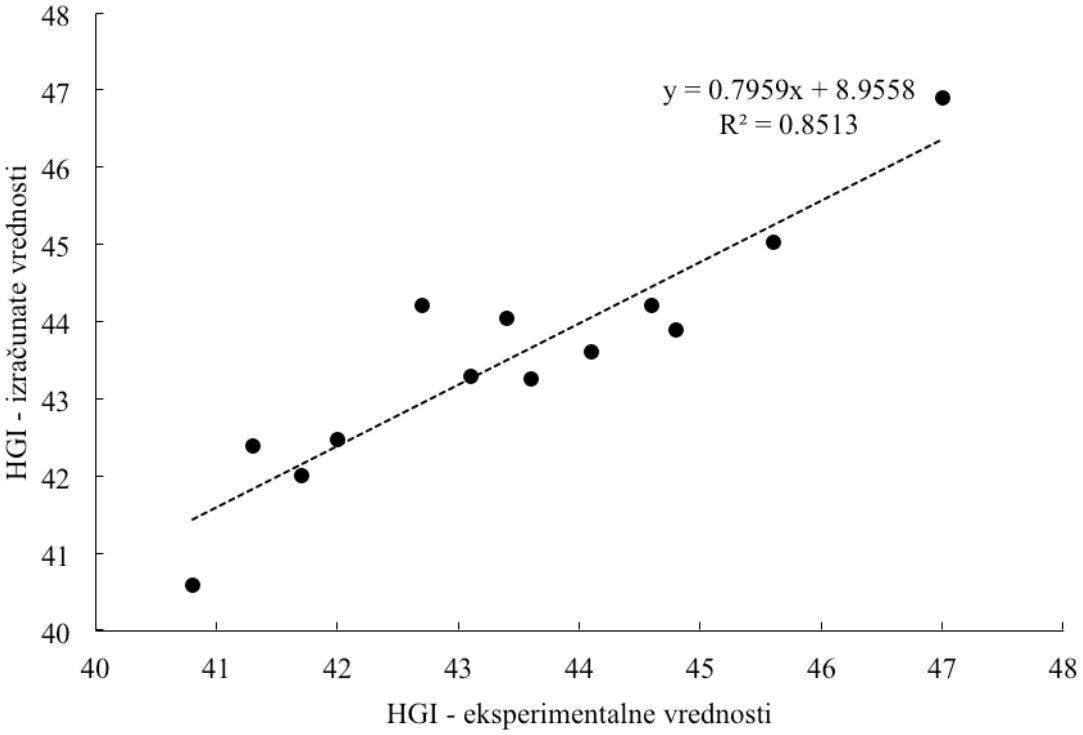


Slika 15.4. Zavisnost vrednosti HGI od litotipova i tehničke analize

Uzorci kolubarskog basena, izraz (15.13)

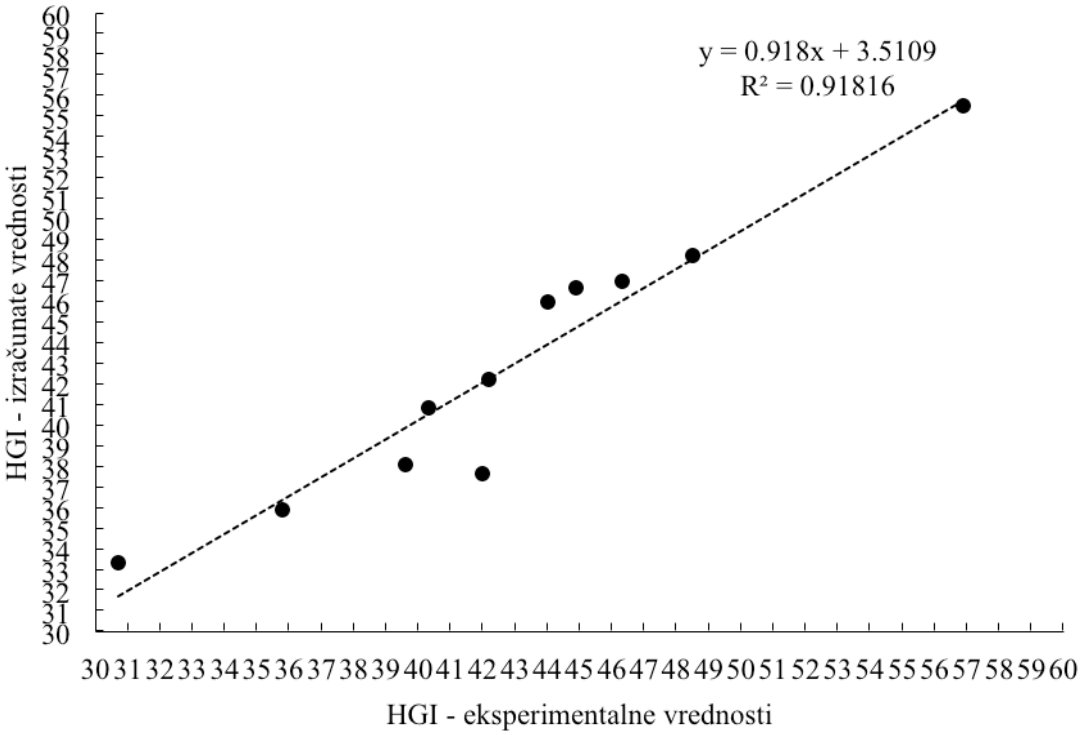


Uzorci kostolačkog basena, izraz (15.27)

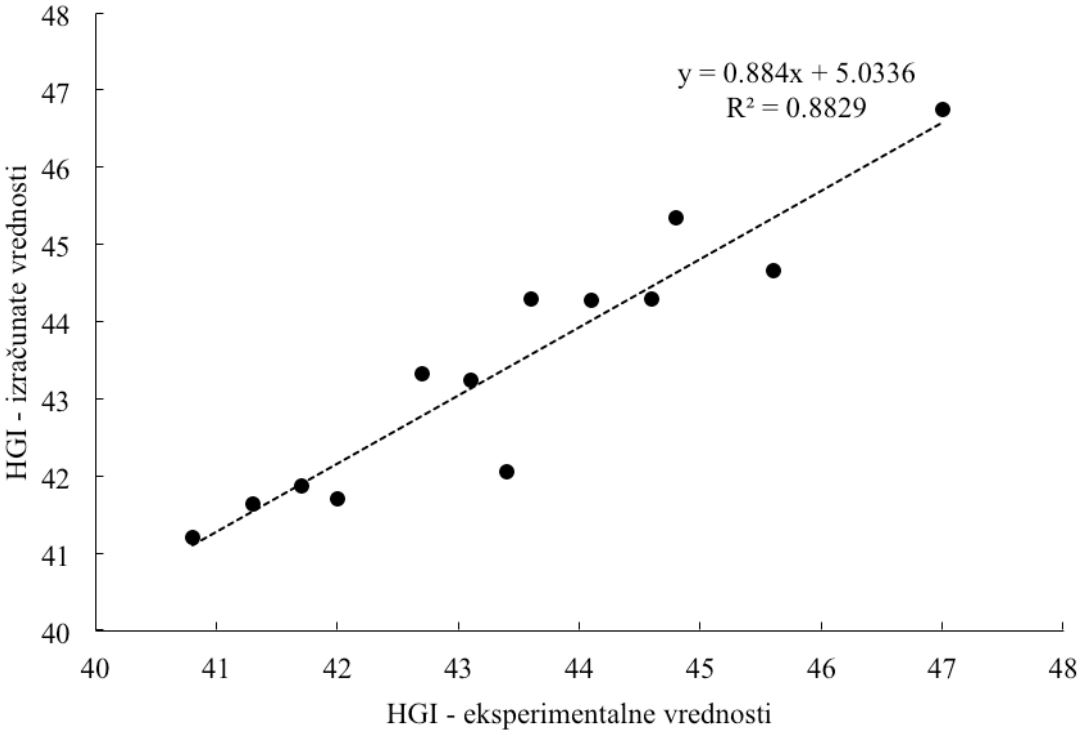


Slika 15.5. Zavisnost vrednosti HGI od petrografskog sastava

Uzorci kolubarskog basena, izraz (15.16)



Uzorci kostolačkog basena, izraz (15.29)



Slika 15.6. Zavisnost vrednosti HGI od petrografskog sastava i tehničke analize

U tabelama 15.1 – 15.4 dat je pregled izračunatih vrednosti HGI preko korelacionih izraza sa relativnim i apsolutnim greškama. Na osnovu ovih podataka može se zaključiti da korišćenjem korelacionih izraza sa najvećim koeficijentima determinacije, izračunata vrednost HGI u odnosu na eksperimentalno određenu odstupa:

- na osnovu podataka tehničke analize kolubarskih lignita za prosečno 6,8 – 7,6 %, a za kostolačke lignite 1,4 – 2,0 % (tabela 15.1. i 15.2),
- na osnovu podataka litotipova i tehničke analize za prosečno 3,3 – 4,2 % za kolubarske, odnosno 1,3 – 1,6 % za kostolačke lignite (tabela 15.3),
- na osnovu podataka petrografskog sastava i tehničke analize za prosečno 3,4 – 3,9 % za kolubarske, odnosno 1,1 – 1,3 % za kostolačke lignite (tabela 15.4).

Ovako mala odstupanja daju za pravo da se mogu usvojiti navedeni korelacioni izrazi kao pogodni za procenu vrednosti HGI domaćih lignita kolubarskog i kostolačkog basena. Brojne vrednosti koeficijenata determinacije i relativnih grešaka ukazuju na činjenicu da je manje više svejedno da li se koriste korelacione zavisnosti vrednosti HGI u odnosu na analizu litotipova ili analizu petrografskog sastava, dok podaci tehničke analize ipak daju značajno veću grešku predviđanja vrednosti HGI, odnosno dobijena odstupanja su značajno veća.

Tabela 15.1. Pregled izmerenih i izračunatih vrednosti – zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize, uzorci uglja kolubarskog basena

Redni broj	Broj uzorka	HGI	Izraz 15.2	Izraz 15.5	Razlika 15.2	Razlika 15.5	Relat. 15.2 %	Relat. 15.5 %
1	1	44,2	42,6	41,3	1,6	2,9	3,7	6,6
2	2	44,4	48,6	46,7	-4,2	-2,3	9,5	5,2
3	3	44,0	45,5	44,9	-1,5	-0,9	3,4	2,1
4	4	40,7	43,7	43,1	-3,0	-2,4	7,3	6,0
5	5	37,9	43,1	42,5	-5,2	-4,6	13,6	12,1
6	6	40,9	44,7	44,8	-3,8	-3,9	9,4	9,5
7	7	56,9	47,5	48,2	9,4	8,7	16,5	15,3
8	8	44,9	44,5	44,0	0,4	0,9	1,0	1,9
9	9	40,3	43,8	43,6	-3,5	-3,3	8,7	8,3
10	10	46,3	42,8	40,0	3,5	6,3	7,5	13,6
11	11	38,7	43,5	43,6	-4,8	-4,9	12,5	12,7
12	12	42,9	43,7	43,5	-0,8	-0,6	1,8	1,4
13	13	39,6	41,9	41,9	-2,3	-2,3	5,7	5,8

Tabela 15.1. Pregled izmerenih i izračunatih vrednosti – zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize, uzorci uglja kolubarskog basena – nastavak

Redni broj	Broj uzorka	HGI	Izraz 15.2	Izraz 15.5	Razlika 15.2	Razlika 15.5	Relat. 15.2 %	Relat. 15.5 %
14	14	40,6	38,8	41,5	1,8	-0,9	4,4	2,2
15	15	44,7	45,8	43,4	-1,1	1,3	2,6	2,8
16	16	41,3	34,4	40,1	6,9	1,2	16,8	2,9
17	17	42,2	44,0	43,5	-1,8	-1,3	4,2	3,1
18	18	44,9	46,3	47,6	-1,4	-2,7	3,2	5,9
19	19	39,5	44,1	43,1	-4,6	-3,6	11,8	9,1
20	20	37,4	46,1	44,4	-8,7	-7,0	23,2	18,8
21	21	40,9	40,9	41,7	0,0	-0,8	0,1	1,9
22	22	37,5	38,9	36,8	-1,4	0,7	3,7	1,9
23	23	30,7	36,9	34,4	-6,2	-3,7	20,3	11,9
24	24	30,7	35,3	30,0	-4,6	0,7	15,1	2,4
25	25	36,6	40,3	39,2	-3,7	-2,6	10,0	7,0
26	26	40,8	41,7	41,1	-0,9	-0,3	2,2	0,6
27	27	46,8	42,2	42,6	4,6	4,2	9,8	9,1
28	28	38,1	37,9	35,3	0,2	2,8	0,5	7,4
29	29	35,8	38,7	35,6	-2,9	0,2	8,0	0,6
30	30	41,0	37,8	42,8	3,2	-1,8	7,7	4,5
31	31	43,7	42,1	42,5	1,6	1,2	3,7	2,8
32	32	42,8	42,4	44,3	0,4	-1,5	0,8	3,5
33	33	42,4	38,5	36,5	3,9	5,9	9,3	14,0
34	34	42,0	39,6	38,1	2,4	3,9	5,7	9,4
35	35	36,1	41,0	41,2	-4,9	-5,1	13,7	14,1
36	36	48,5	45,1	45,2	3,4	3,3	6,9	6,8
37	37	42,5	45,6	45,1	-3,1	-2,6	7,3	6,2
38	38	44,7	43,7	43,6	1,0	1,1	2,2	2,5
39	39	43,5	46,7	46,5	-3,2	-3,0	7,3	6,9
40	40	40,4	41,4	41,8	-1,0	-1,4	2,4	3,4
41	41	36,6	40,3	39,9	-3,7	-3,3	10,0	9,0
42	42	47,5	43,7	45,7	3,8	1,8	8,0	3,9
43	43	55,5	46,9	48,7	8,6	6,8	15,4	12,2
44	44	51,6	44,7	45,4	6,9	6,2	13,4	12,0
45	45	41,4	43,0	43,3	-1,6	-1,9	3,8	4,6
46	46	47,2	43,3	42,3	3,9	4,9	8,2	10,5
47	47	40,6	42,9	43,2	-2,3	-2,6	5,6	6,3
48	48	47,0	44,5	44,1	2,5	2,9	5,3	6,3
49	49	38,3	40,8	39,1	-2,5	-0,8	6,4	2,0
50	50	40,5	42,9	41,9	-2,4	-1,4	5,9	3,4
51	51	46,3	45,2	44,5	1,1	1,8	2,3	4,0

Tabela 15.1. Pregled izmerenih i izračunatih vrednosti – zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize, uzorci uglja kolubarskog basena – nastavak

Redni broj	Broj uzorka	HGI	Izraz 15.2	Izraz 15.5	Razlika 15.2	Razlika 15.5	Relat. 15.2 %	Relat. 15.5 %
52	52	34,8	39,2	36,6	-4,4	-1,8	12,6	5,1
53	53	32,3	40,0	38,7	-7,7	-6,4	24,0	19,9
54	54	38,6	37,0	41,8	1,6	-3,2	4,3	8,3
55	55	38,7	38,3	39,4	0,4	-0,7	0,9	1,7
56	56	39,6	38,5	39,2	1,1	0,4	2,7	1,0
57	57	38,6	37,1	38,1	1,5	0,5	3,9	1,2
58	58	39,5	36,4	39,4	3,1	0,1	7,7	0,3
59	59	37,5	36,8	35,8	0,7	1,7	1,8	4,4
60	60	38,2	37,8	36,1	0,4	2,1	1,1	5,4
61	61	37,3	37,8	36,7	-0,5	0,6	1,3	1,6
62	70	54,6	41,9	43,9	12,7	10,7	23,2	19,7
63	71	45,6	43,9	42,5	1,7	3,1	3,7	6,9
64	72	52,5	43,4	44,9	9,1	7,6	17,3	14,6
65	73	41,8	41,4	47,2	0,4	-5,4	1,0	12,9
						Srednja vrednost	**7,6**	**6,8**

Tabela 15.2. Pregled izmerenih i izračunatih vrednosti – zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize, uzorci uglja kostolačkog basena

Redni broj	Broj uzorka	HGI	Izraz 15.17	Izraz 15.22	Razlika 15.17	Razlika 15.22	Relat. 15.17 %	Relat. 15.22 %
1	1	45,6	43,1	45,2	2,5	0,4	5,4	0,8
2	2	41,3	42,0	42,0	-0,7	-0,7	1,6	1,7
3	3	44,2	43,4	44,6	0,8	-0,4	1,9	0,9
4	4	40,8	42,9	42,5	-2,1	-1,7	5,1	4,3
5	5	42,0	43,9	42,5	-1,9	-0,5	4,6	1,1
6	6	44,2	45,0	45,0	-0,8	-0,8	1,8	1,8
7	7	47,0	45,7	47,2	1,3	-0,2	2,8	0,4
8	8	44,2	45,5	44,8	-1,3	-0,6	3,0	1,3
9	9	44,1	44,2	45,1	-0,1	-1,0	0,2	2,2
10	10	42,0	43,2	44,0	-1,2	-2,0	2,9	4,7
11	11	44,8	44,4	44,3	0,4	0,5	0,9	1,1
12	12	44,3	44,1	43,9	0,2	0,4	0,4	1,0
13	13	41,7	42,1	41,1	-0,4	0,6	1,0	1,5
14	14	44,1	44,1	44,1	0,0	0,0	0,1	0,0
15	15	43,4	42,6	43,4	0,8	0,0	1,8	0,0
16	16	43,6	43,4	43,6	0,2	0,0	0,5	0,1
17	17	44,6	43,4	44,3	1,2	0,3	2,8	0,7
18	18	42,0	42,9	43,6	-0,9	-1,6	2,0	3,8
19	19	44,6	44,2	44,7	0,4	-0,1	1,0	0,3
20	20	44,2	43,1	43,9	1,1	0,3	2,5	0,7
21	21	41,7	42,4	42,8	-0,7	-1,1	1,6	2,6
22	22	43,1	43,6	43,7	-0,5	-0,6	1,1	1,4
23	23	42,7	42,3	42,9	0,4	-0,2	1,0	0,5
24	24	43,7	42,9	44,4	0,8	-0,7	1,9	1,5
						Srednja vrednost	**2,0**	**1,4**

Tabela 15.3. Pregled izmerenih i izračunatih vrednosti – zavisnost vrednosti HGI od litotipova i tehničke analize

Uzorci kolubarskog basena							
Uzorak	**HGI**	**Izraz 15.7**	**Izraz 15.11**	**Razlika 15.7**	**Razlika 15.11**	**Relat. 15.7, %**	**Relat. 15.11, %**
Kolubara 3	44,0	46,6	45,3	-2,6	-1,3	6,0	3,0
Kolubara 7	56,9	54,5	55,0	2,4	1,9	4,2	3,4
Kolubara 8	44,9	43,1	43,6	1,8	1,3	4,0	2,9
Kolubara 9	40,3	41,4	41,6	-1,1	-1,3	2,7	3,2
Kolubara 10	46,3	44,0	48,3	2,3	-2,0	5,0	4,3
Kolubara 13	39,6	41,7	40,2	-2,1	-0,6	5,3	1,4
Kolubara 17	42,2	39,4	44,3	2,8	-2,1	6,7	4,9
Kolubara 23	30,7	31,2	29,9	-0,5	0,8	1,5	2,7
Kolubara 29	35,8	35,2	36,4	0,6	-0,6	1,8	1,6
Kolubara 34	42,0	44,0	39,4	-2,0	2,6	4,7	6,2
Kolubara 36	48,5	50,4	47,1	-1,9	1,4	3,8	2,8
					Srednja vrednost	**4,2**	**3,3**
Uzorci kostolačkog basena							
Uzorak	**HGI**	**Izraz 15.24**	**Izraz 15.25**	**Razlika 15.24**	**Razlika 15.25**	**Relat. 15.24, %**	**Relat. 15.25, %**
Kostolac 1	45,6	44,9	44,6	0,7	1,0	1,6	2,1
Kostolac 2	41,3	41,4	41,8	-0,1	-0,5	0,4	1,3
Kostolac 4	40,8	41,1	41,5	-0,3	-0,7	0,8	1,8
Kostolac 5	42,0	43,4	44,1	-1,4	-2,1	3,3	4,9
Kostolac 7	47,7	47,5	46,8	-0,5	0,2	1,0	0,5
Kostolac 9	44,1	44,3	44,6	-0,2	-0,5	0,5	1,1
Kostolac 11	44,8	44,5	43,6	0,3	1,2	0,7	2,6
Kostolac 13	41,7	42,7	41,7	-1,0	0,0	2,5	0,0
Kostolac 15	43,4	43,1	43,6	0,3	-0,2	0,8	0,4
Kostolac 16	43,6	43,1	43,1	0,5	0,5	1,2	1,1
Kostolac 17	44,6	43,8	44,1	0,8	0,5	1,9	1,0
Kostolac 22	43,1	42,5	43,8	0,6	-0,7	1,4	1,6
Kostolac 23	42,7	42,9	41,4	-0,2	1,3	0,5	3,0
					Srednja vrednost	**1,3**	**1,6**

Tabela 15.4. Pregled izmerenih i izračunatih vrednosti – zavisnost vrednosti HGI od petrografskog sastava i tehničke analize

Uzorci kolubarskog basena							
Uzorak	**HGI**	**Izraz 15.13**	**Izraz 15.16**	**Razlika 15.13**	**Razlika 15.16**	**Relat. 15.13, %**	**Relat. 15.16, %**
Kolubara 3	44,0	43,8	46,0	0,2	-2,0	0,4	4,5
Kolubara 7	56,9	57,4	55,5	-0,5	1,4	0,8	2,5
Kolubara 8	44,9	44,4	46,6	0,5	-1,7	1,1	3,9
Kolubara 9	40,3	44,0	40,8	-3,7	-0,5	9,1	1,3
Kolubara 10	46,3	45,3	47,0	1,0	-0,7	2,2	1,5
Kolubara 13	39,6	37,7	38,0	1,9	1,6	4,8	3,9
Kolubara 17	42,2	41,6	42,2	0,6	0,0	1,5	0,1
Kolubara 23	30,7	33,2	33,3	-2,5	-2,6	8,1	8,5
Kolubara 29	35,8	38,5	35,9	-2,7	-0,1	7,5	0,2
Kolubara 34	42,0	42,8	37,7	-0,8	4,3	1,9	10,3
Kolubara 36	48,5	51,2	48,2	-2,7	0,3	5,6	0,6
					Srednja vrednost	**3,9**	**3,4**
Uzorci kostolačkog basena							
Uzorak	**HGI**	**Izraz 15.27**	**Izraz 15.29**	**Razlika 15.27**	**Razlika 15.29**	**Relat. 15.27, %**	**Relat. 15.29, %**
Kostolac 1	45,6	45,0	44,7	0,6	0,9	1,2	2,1
Kostolac 2	41,3	42,4	41,6	-1,1	-0,3	2,6	0,8
Kostolac 4	40,8	40,6	41,2	0,2	-0,4	0,5	1,0
Kostolac 5	42,0	42,5	41,7	-0,5	0,3	1,1	0,7
Kostolac 7	47,7	46,9	46,7	0,1	0,3	0,2	0,5
Kostolac 9	44,1	43,6	44,3	0,5	-0,2	1,1	0,4
Kostolac 11	44,8	43,9	45,3	0,9	-0,5	2,0	1,2
Kostolac 13	41,7	42,0	41,9	-0,3	-0,2	0,7	0,4
Kostolac 15	43,4	44,0	42,0	-0,6	1,4	1,5	3,1
Kostolac 16	43,6	43,3	44,3	0,3	-0,7	0,8	1,6
Kostolac 17	44,6	44,2	44,3	0,4	0,3	0,9	0,7
Kostolac 22	43,1	43,3	43,2	-0,2	-0,1	0,5	0,3
Kostolac 23	42,7	44,2	43,3	-1,5	-0,6	3,5	1,5
					Srednja vrednost	**1,3**	**1,1**

16. Uticaj vrednosti HGI i karakteristika uglja na kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje

U cilju određivanja uticaja karakteristika uglja a posebno Hardgrove-ovog indeksa meljivosti na karakteristike rada mlinskog postrojenja izvršena su ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 na termoelektrani TENT B u Obrenovcu.

Za ventilatorski mlin M-12 tip N400.42 maksimalni kapacitet mlevenja deklarisan od strane proizvođača za garantni ugalj donje toplotne moći od 5900 do 6700 kJ/kg koji ima sadržaj vlage 45 – 48,5 %, sadržaj pepela 20 – 23 %, granulaciju uglja na ulazu u mlin 0 – 30 mm odnosno ostatak na situ od 5 mm $R_{5000} = 28\ \%$ i sadržaj ksilita ispod 7 %, iznosi 40 kg/s odnosno 144 t/h.

Ostali deklarisani podaci za finoću mlevenja garantnog uglja, vrednosti indeksa meljivosti $HGI = 56$ određenog po metodi Hardgrove, su:

- ostatak na situ od 1 mm (R_{1000}) 6 ± 1 (5 – 7) %,
- ostatak na situ od 200 μm (R_{200}) 30 %,
- ostatak na situ od 90 μm (R_{90}) 65 %,
- ostatna vlaga u ugljenom prahu (procenjena) 10 %.

Statičko povećanje pritiska iznosi 700 Pa. Maksimalna snaga pogonskog elektromotora je 2000 kW pri broju obrtaja od 1500 (1487) o/min. Broj obrtaja udarnog kola mlina je promenljiv u dijapazonu 85 – 100 %, a maksimalni broj obrtaja na Voith spojnici iznosi 453 o/min.

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 obuhvatile su sledeće [170, 171]:

- povećanje spoljašnjeg prečnika udarnog kola sa 4100 mm na 4200 mm,
- povećanje širine spoljašnje udarne ploče za 50 mm,
- povećanje otvora na kućištu mlina za prolaz i smeštanje novog udarnog kola,
- izmeštanje kragne na vratima mlina u cilju boljeg zaptivanja kućišta,
- rekunstrukciju „nosa“ F pancira spirale kućišta,
- postavljanje dve prepreke u najužem delu spirale kućišta – A zona.

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 [172]. Ova ispitivanja su vršena u aprilu (test 1), maju (test 2) i septembru (testovi 3, 4 i 5) 2009. godine kao i u martu (test 6) 2010. godine. Na osnovu ovih ispitivanja prikupljen je dovoljan broj podataka za ocenu rada mlina pre rekonstrukcije što se prvenstveno odnosilo na finoću mlevenja i njegov kapacitet.

Posle rekonstrukcije ventilatorskog mlina M-12 obavljeno je više ispitivanja sa različitim režimima rada, odnosno više varijanti konstrukcionih rešenja [173]. Ova ispitivanja su obavljena u periodima jun 2010 (režim 1 – 5), jul – septembar 2010 (režim 6 – 10), oktobar 2010 – januar 2011 (režim 11 i 12) i februar 2011 (režim 13).

U tabeli 16.1 dati su podaci sa izvršenih ispitivanja.

Tabela 16.1. Rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12

	Redni broj	Datum	Režim, test	B, t/h	R_{90}, %	D_{90}, %	I, A	I_{sp}, $A/(t \cdot h^{-1})$	HGI	W, %	$W_{h,a}$, %	A, %	$W_{ha,up}$, %
Pre rekonstrukcije	1	24.04.2009.	Test 1	128,5	72,1	27,9	–	–	–	49,8	–	14,5	13,4
	2	04.05.2009.	Test 2	132,0	70,7	29,3	–	–	44,2	51,1	–	13,9	16,2
	3	07.09.2009.	Test 3	138,7	64,8	35,2	162	1,16799	38,7	49,6	19,22	12,3	15,7
	4	08.09.2009.	Test 4	140,2	62,3	37,7	165	1,17689	42,9	50,1	18,87	12,1	15,1
	5	09.09.2009.	Test 5	137,9	68,0	32,0	162	1,17476	39,6	49,7	19,7	13,7	12,5
	6	23.03.2010.	Test 6	125,5	63,8	36,2	170	1,35458	40,6	52,7	19,64	9,4	16,4
Posle rekonstrukcije	7	07.06.2010.	R1, T1	137,4	50,6	49,4	198	1,44105	40,9	49,0	18,4	17,9	4,1
	8	07.06.2010.	R1, T2	137,4	55,4	44,6	195	1,41921	37,5	49,5	19,3	16,3	3,4
	9	08.06.2010.	R2, T1	159,1	56,3	43,7	187	1,17536	30,7	52,6	23,7	10,4	9,0
	10	08.06.2010.	R2, T2	159,2	51,9	48,1	194	1,21859	30,7	52,1	23,5	9,8	6,8
	11	10.06.2010.	R1, T1	154,2	59,0	41,0	200	1,29702	40,8	49,8	18,3	17,2	11,9
	12	10.06.2010.	R1, T2	154,3	55,1	44,9	193	1,25081	46,8	49,7	19,5	16,2	10,8
	13	14.06.2010.	R3, T1	129,9	61,7	38,3	188	1,44727	38,1	50,3	20,0	14,2	14,1
	14	14.06.2010.	R3, T2	132,4	63,5	36,5	190	1,43505	41,0	49,1	18,3	18,3	10,5
	15	15.06.2010.	R4, T1	152,3	58,2	41,8	190	1,24754	43,7	50,6	20,3	15,6	14,0
	16	17.06.2010.	R5, T1	141,9	61,2	38,8	190	1,33897	42,8	51,6	21,4	13,6	15,0
	17	01.07.2010.	R6, T1	156,5	59,4	40,6	199	1,27157	36,1	52,4	23,4	11,2	17,7
	18	22.07.2010.	R7, T1	145,2	64,7	35,3	182	1,25344	48,5	48,7	17,2	20,6	11,3
	19	03.08.2010.	R8, T1	148,2	70,8	29,2	174	1,17409	35,6	49,0	17,8	16,8	13,5
	20	26.08.2010	R9, T1	144,0	55,2	44,8	175	1,21528	35,8	46,9	13,4	17,3	14,2
	21	20.09.2010.	R10, T1	147,8	63,0	37,0	175	1,18403	36,6	51,1	20,6	11,2	17,7
	22	13.01.2011.	R11, T1	138,4	62,9	37,1	168	1,21387	51,6	48,1	17,1	16,4	15,5
	23	19.01.2011.	R12, T1	137,4	72,0	28,0	175	1,27365	41,4	50,3	20,4	13,9	19,2
	24	01.02.2011.	R13, T1	148,6	68,8	31,2	180	1,21131	47,2	49,9	18,8	16,7	18,8
	25	01.02.2011.	R13, T2	146,9	64,3	35,7	180	1,22532	40,6	50,6	22,2	15,8	18,0
	26	01.02.2011.	R13, T3	147,2	66,7	33,3	182	1,23641	47,0	51,7	19,6	13,6	17,4

Tabela 16.1. Rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 – nastavak

	Redni broj	Datum	Režim, test	B, t/h	R_{90}, %	D_{90}, %	I, A	I_{sp}, $A/(t \cdot h^{-1})$	HGI	W, %	$W_{h,a}$, %	A, %	$W_{ha,up}$, %
Korelacije sa kapacitetom					-0,242	0,242	0,231	-0,689	-0,286	0,503	0,442	-0,449	0,030
Korelacije sa HGI				-0,286	0,355	-0,355	-0,249	0,035		-0,367	-0,402	0,571	0,306
Korelacije sa opterećenjem				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 µm
D_{90} – propad kroz sito veličine otvora 90 µm
I – opterećenje mlina (potrošnja električne energije)
I_{sp} – specifično opterećenje mlina (I/B)
W – ukupna vlaga uglja na ulazu u mlin (maseni udeo u %)
$W_{h,a}$ – analitička vlaga uglja na ulazu u mlin (maseni udeo u %)
A – udeo pepela u uglju na ulazu u mlin (maseni udeo u %)
$W_{h,a,up}$ – analitička vlaga ugljenog praha (maseni udeo u %)

Na osnovu rezultata merenja iz tabele 16.1, 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 μm 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 μm veće (veći udeo sitnije frakcije u sprašenom uglju). Suprotan zaključak važi za ostatak na situ veličine otvora 90 μm ($r = -0,633$).

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.

Za određivanje kapaciteta mlevenja korišćene su tri metode: preko geometrije dozatora, preko ugljenog praha i preko skidanja sa trake. Rezultati za sve tri metode su prikazani u tabeli 16.2.

Tabela 16.2. Podaci o kapacitetu mlevenja ventilatorskog mlina M-12

Kapacitet mlevenja t/h	**Redni broj iz tabele 16.1**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
preko geometrije dozatora	128,5	133,1	141,3	143,1	139,1	124,2	152,5		160,2	160,5	154,6	154,9	126,3
preko ugljenog praha	145,9	136,3	166,2	168,2	160,1	160,2	154,1	148,4	172,0	200,0	172,9	166,3	142,7
skidanjem sa trake	–	130,8	136,0	137,2	136,6	126,8	122,3		157,9		153,7		133,4
	14	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**
preko geometrije dozatora	131,3	164,0	138,6	156,7	146,0	151,7	141,5	144,4	133,2	132,6	145,3	139,4	139,6
preko ugljenog praha	148,7	156,6	147,7	146,7	128,4	174,1	150,6	153,3	112,2	115,2	152,1	156,2	138,1
skidanjem sa trake	133,4	140,5	145,1	156,4	144,5	144,8	146,5	151,3	143,7	142,2	151,9	154,5	154,9

Rezultati određivanja kapaciteta mlevenja preko geometrije dozatora i preko skidanja sa trake pokazuju dobru saglasnost (tabela 16.2).

Primenom metode određivanja kapaciteta mlevenja preko ugljenog praha javljaju se izražena odstupanja. Postupak određivanja kapaciteta mlevenja preko ugljenog praha je složeniji i zahteva dodatne podatke za preračunavanje određenog protoka ugljenog praha na protok sirovog uglja na ulazu u mlin. Pored toga postupak se zasniva na uzimanju uzoraka ugljenog praha u kanalima prema donjem, srednjem i gornjem gorioniku i to u definisanom broju tačaka poprečnog preseka svakog kanala (ukupno 64 tačke). Uzorci se ne mogu uzeti jednovremeno što za posledicu može imati grešku u određivanju protoka ugljenog praha. Da bi se na osnovu protoka ugljenog praha odredio

protok sirovog uglja potrebni su podaci o masenom udelu vlage u uglju i ugljenom prahu što takođe može uticati na pojavu greške merenja.

Ako se za određivanje kapaciteta mlevenja uzmu podaci merenja preko geometrije dozatora i preko skidanja sa trake dobijaju se srednje vrednosti koje su prikazane u tabeli 16.1.

Na osnovu podataka iz tabele 16.1. izvršena je korelaciona analiza u cilju dobijanja izraza koji će moći da predvide kapacitet mlevenja i potrošnju električne energije za mlevenje na osnovu podataka tehničke analize i vrednosti HGI. U Prilogu 1 disertacije navedeni su svi izrazi koji su razmatrani u analizi. U daljem tekstu se daju izrazi koji imaju najveće koeficijente determinacije. Za analizu su uzeti samo rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 posle njegove rekonstrukcije.

1. Izraz za izračunavanje kapaciteta mlevenja

$$B = 3,041 \cdot HGI^{-0,094} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,139} \cdot W^{1,025} \cdot A^{0,063} \cdot W_{h,a,up}^{0,054}, \; R^2 = 0,388. \tag{16.1}$$

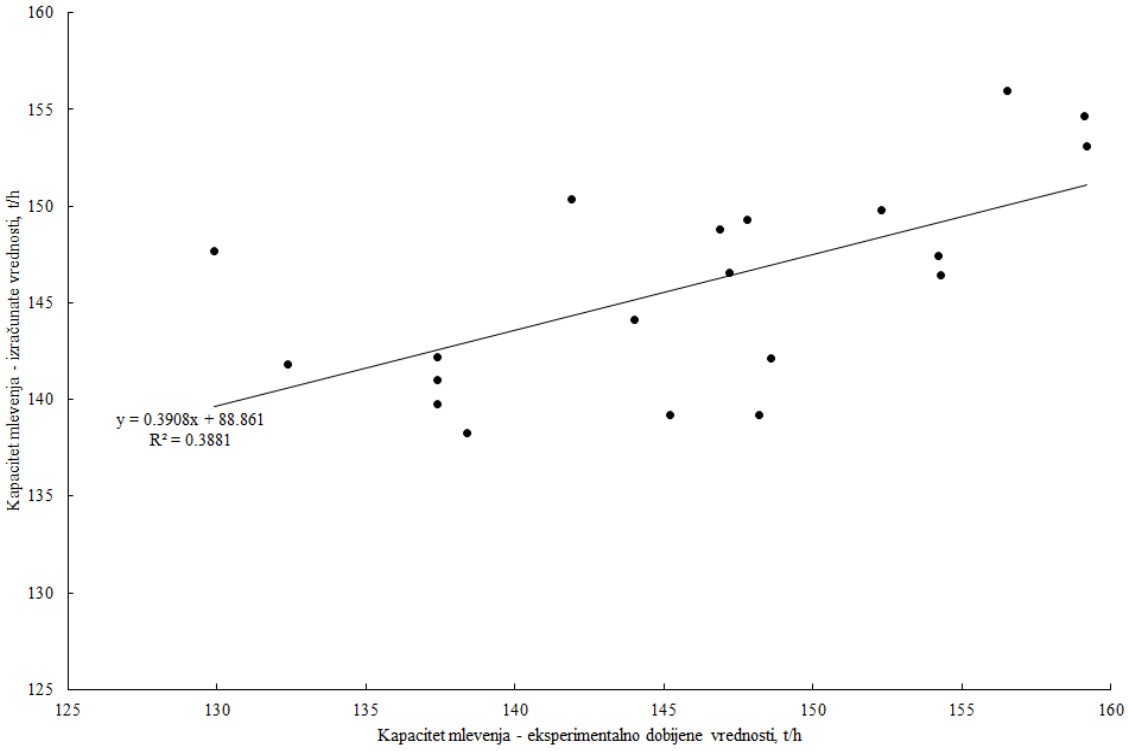
2. Izraz za izračunavanje potrošnje električne energije za mlevenje

$$I = 64,847 \cdot HGI^{-0,049} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,164} \cdot W_{h,a}^{0,301} \cdot A^{0,169}, \; R^2 = 0,667. \tag{16.2}$$

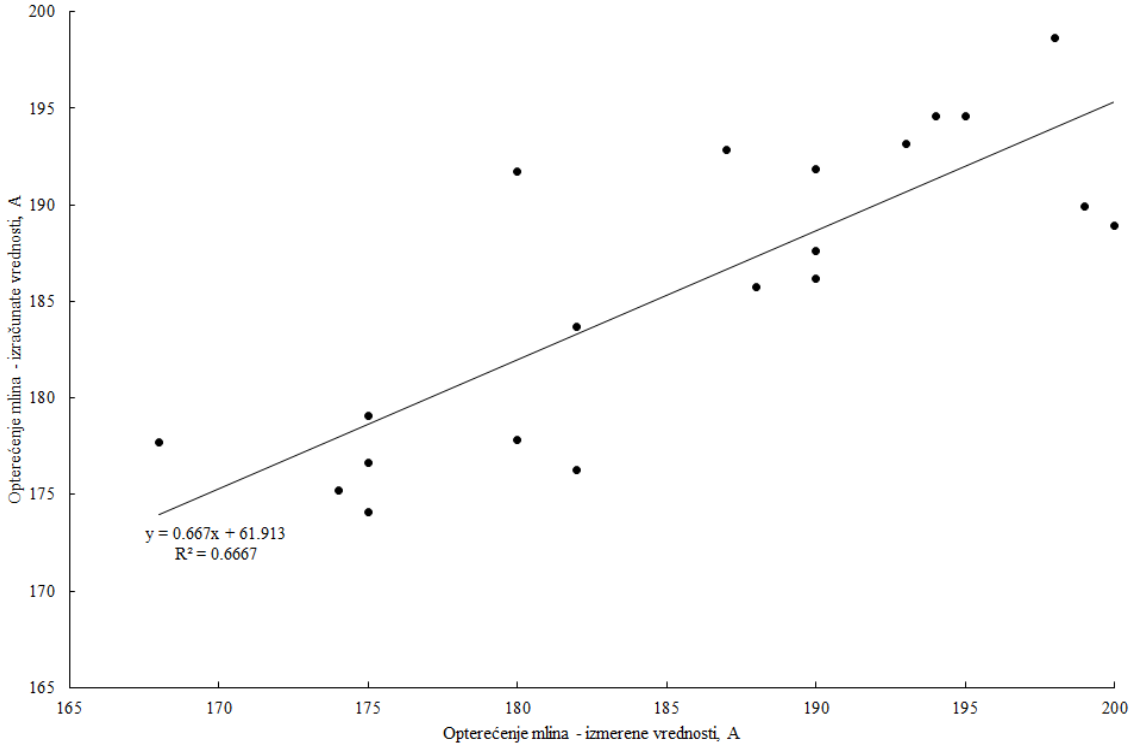
U tabeli 16.3, dat je uporedni prikaz izmerenih odnosno eksperimentalnih vrednosti sa rezultatima izraza 16.1 – 16.2. Na slikama 16.1 – 16.2 dat je grafički prikaz rezultata iz tabele 16.3.

Tabela 16.3. Uporedni prikaz izmerenih vrednosti kapaciteta mlevenja i potrošnje električne energije za mlevenje sa rezultatima korelacione analize

R. br.	Izmerene vrednosti			Izračunate vrednosti		Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti		Relativna greška, %	
	HGI	B, t/h	I, A	16.1	16.2	16.1	16.2	16.1	16.2
7	40,9	137,4	198	142,2	198,6	-4,8	-0,6	-3,5	-0,3
8	37,5	137,4	195	139,7	194,6	-2,3	0,4	-1,7	0,2
9	30,7	159,1	187	154,7	192,8	4,4	-5,8	2,8	-3,1
10	30,7	159,2	194	153,1	194,6	6,1	-0,6	3,8	-0,3
11	40,8	154,2	200	147,4	188,9	6,8	11,1	4,4	5,5
12	46,8	154,3	193	146,4	193,2	7,9	-0,2	5,1	-0,1
13	38,1	129,9	188	147,6	185,7	-17,7	2,3	-13,7	1,2
14	41,0	132,4	190	141,8	186,2	-9,4	3,8	-7,1	2,0
15	43,7	152,3	190	149,8	191,9	2,5	-1,9	1,6	-1,0
16	42,8	141,9	190	150,4	187,6	-8,5	2,4	-6,0	1,2
17	36,1	156,5	199	156,0	189,9	0,5	9,1	0,3	4,6
18	48,5	145,2	182	139,2	183,7	6,0	-1,7	4,1	-0,9
19	35,6	148,2	174	139,2	175,2	9,0	-1,2	6,1	-0,7
20	35,8	144,0	175	144,1	176,7	-0,1	-1,7	-0,1	-1,0
21	36,6	147,8	175	149,3	179,1	-1,5	-4,1	-1,0	-2,3
22	51,6	138,4	168	138,2	177,7	0,2	-9,7	0,1	-5,8
23	41,4	137,4	175	141,0	174,1	-3,6	0,9	-2,6	0,5
24	47,2	148,6	180	142,1	177,8	6,5	2,2	4,4	1,2
25	40,6	146,9	180	148,8	191,7	-1,9	-11,7	-1,3	-6,5
26	47,0	147,2	182	146,6	176,2	0,6	5,8	0,4	3,2



Slika 16.1. Grafički prikaz rezultata dobijenih korišćenjem izraza (16.1)



Slika 16.2. Grafički prikaz rezultata dobijenih korišćenjem izraza (16.2)

Ako se za vrednosti kapaciteta mlevenja uzmu podaci dobijeni preko protoka ugljenog praha, dobijaju se podaci predstavljeni u tabeli 16.4.

Na osnovu rezultata iz tabele 16.4, može se videti da postoji jaka negativna linearna korelacija između kapaciteta mlevenja i specifičnog potrošnje električne energije ($r = -0,933$) što je veća vrednost u odnosu na podatak iz tabele 16.1. ($r = -0,689$), ali je trend isti (ostaju negativne).

Međutim, između kapaciteta mlevenja i vrednosti HGI postoji jaka negativna korelacija ($r = -0,626$), što je znatno veća vrednost u odnosu na onu iz tabele 16.1 ($r = -0,286$). Ovaj fenomen je već objašnjen ranije.

U ovom slučaju, korelacije kapaciteta mlevenja sa sadržajem pepela ($r = -0,314$) i analitičke vlage u ugljenom prahu ($r = -0,423$) daju negativnu korelaciju, dok korelacije kapaciteta mlevenja sa potrošnjom električne energije daju više vrednosti koeficijenta korelacije ($r = 0,462$) od onih u tabeli 16.1, ali se trend zadržava (ostaju pozitivne).

Tabela 16.4. Rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 (kapacitet mlevenja određen preko protoka ugljenog praha)

	Redni broj	Datum	Režim, test	B, t/h	R_{90}, %	D_{90}, %	I, A	I_{sp}, $A/(t \cdot h^{-1})$	HGI	W, %	$W_{h,a}$, %	A, %	$W_{ha,up}$, %
Pre rekonstrukcije	1	24.04.2009.	Test 1	145,9	72,1	27,9	–	–	–	49,8	-	14,5	13,4
	2	04.05.2009.	Test 2	136,3	70,7	29,3	–	–	44,2	51,1	-	13,9	16,2
	3	07.09.2009.	Test 3	166,2	64,8	35,2	162	0,97473	38,7	49,6	19,22	12,3	15,7
	4	08.09.2009.	Test 4	168,2	62,3	37,7	165	0,98098	42,9	50,1	18,87	12,1	15,1
	5	09.09.2009.	Test 5	160,1	68,0	32,0	162	1,01187	39,6	49,7	19,7	13,7	12,5
	6	23.03.2010.	Test 6	160,2	63,8	36,2	170	1,06117	40,6	52,7	19,64	9,4	16,4
Posle rekonstrukcije	7	07.06.2010.	R1, T1	154,1	50,6	49,4	198	1,28488	40,9	49,0	18,4	17,9	4,1
	8	07.06.2010.	R1, T2	148,4	55,4	44,6	195	1,31402	37,5	49,5	19,3	16,3	3,4
	9	08.06.2010.	R2, T1	172,0	56,3	43,7	187	1,08721	30,7	52,6	23,7	10,4	9,0
	10	08.06.2010.	R2, T2	200,0	51,9	48,1	194	0,97000	30,7	52,1	23,5	9,8	6,8
	11	10.06.2010.	R1, T1	172,9	59,0	41,0	200	1,15674	40,8	49,8	18,3	17,2	11,9
	12	10.06.2010.	R1, T2	166,3	55,1	44,9	193	1,16055	46,8	49,7	19,5	16,2	10,8
	13	14.06.2010.	R3, T1	142,7	61,7	38,3	188	1,31745	38,1	50,3	20,0	14,2	14,1
	14	14.06.2010.	R3, T2	148,7	63,5	36,5	190	1,27774	41,0	49,1	18,3	18,3	10,5
	15	15.06.2010.	R4, T1	156,6	58,2	41,8	190	1,21328	43,7	50,6	20,3	15,6	14,0
	16	17.06.2010.	R5, T1	147,7	61,2	38,8	190	1,28639	42,8	51,6	21,4	13,6	15,0
	17	01.07.2010.	R6, T1	146,7	59,4	40,6	199	1,35651	36,1	52,4	23,4	11,2	17,7
	18	22.07.2010.	R7, T1	128,4	64,7	35,3	182	1,41745	48,5	48,7	17,2	20,6	11,3
	19	03.08.2010.	R8, T1	174,1	70,8	29,2	174	0,99943	35,6	49,0	17,8	16,8	13,5
	20	26.08.2010	R9, T1	150,6	55,2	44,8	175	1,16202	35,8	46,9	13,4	17,3	14,2
	21	20.09.2010.	R10, T1	153,3	63,0	37,0	175	1,14155	36,6	51,1	20,6	11,2	17,7
	22	13.01.2011.	R11, T1	112,2	62,9	37,1	168	1,49733	51,6	48,1	17,1	16,4	15,5
	23	19.01.2011.	R12, T1	115,2	72,0	28,0	175	1,51910	41,4	50,3	20,4	13,9	19,2
	24	01.02.2011.	R13, T1	152,1	68,8	31,2	180	1,18343	47,2	49,9	18,8	16,7	18,8
	25	01.02.2011.	R13, T2	156,2	64,3	35,7	180	1,15237	40,6	50,6	22,2	15,8	18,0
	26	01.02.2011.	R13, T3	138,1	66,7	33,3	182	1,31789	47,0	51,7	19,6	13,6	17,4

Tabela 16.4. Rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 (kapacitet mlevenja određen preko protoka ugljenog praha) – nastavak

	Redni broj	Datum	Režim, test	B, t/h	R_{90}, %	D_{90}, %	I, A	I_{sp}, $A/(t \cdot h^{-1})$	HGI	W, %	$W_{h,a}$, %	A, %	$W_{ha,up}$, %
Korelacije sa kapacitetom					-0,474	0,474	0,462	-0,933	-0,626	0,325	0,338	-0,314	-0,423
Korelacije sa HGI				-0,626	0,355	-0,355	-0,249	0,588		-0,367	-0,402	0,571	0,306
Korelacije sa opterećenjem				0,462	-0,633	0,633		-0,151	-0,249	0,360	0,377	-0,099	-0,563

B – kapacitet mlevenja
R_{90} – ostatak na situ veličine otvora 90 µm
D_{90} – propad kroz sito veličine otvora 90 µm
I – opterećenje mlina (potrošnja električne energije)
I_{sp} – specifično opterećenje mlina (I/B)
W – ukupna vlaga uglja na ulazu u mlin (maseni udeo u %)
$W_{h,a}$ – analitička vlaga uglja na ulazu u mlin (maseni udeo u %)
A – udeo pepela u uglju na ulazu u mlin (maseni udeo u %)
$W_{h,a,up}$ – analitička vlaga ugljenog praha (maseni udeo u %)

Na isti način, a na osnovu podataka iz tabele 16.4, izvršena je korelaciona analiza u cilju dobijanja izraza koji će moći da predvidi kapacitet mlevenja na osnovu podataka tehničke analize i vrednosti HGI. Za analizu uzeti su samo rezultati ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 posle njegove rekonstrukcije. U daljem tekstu se daju izrazi koji imaju najveće koeficijente determinacije.

1. Izrazi za izračunavanje kapaciteta mlevenja

$$B = 0,062 \cdot HGI^{-0,668} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,187} \cdot W^{2,384} \cdot A^{0,395}, \; R^2 = 0,548, \tag{16.3}$$

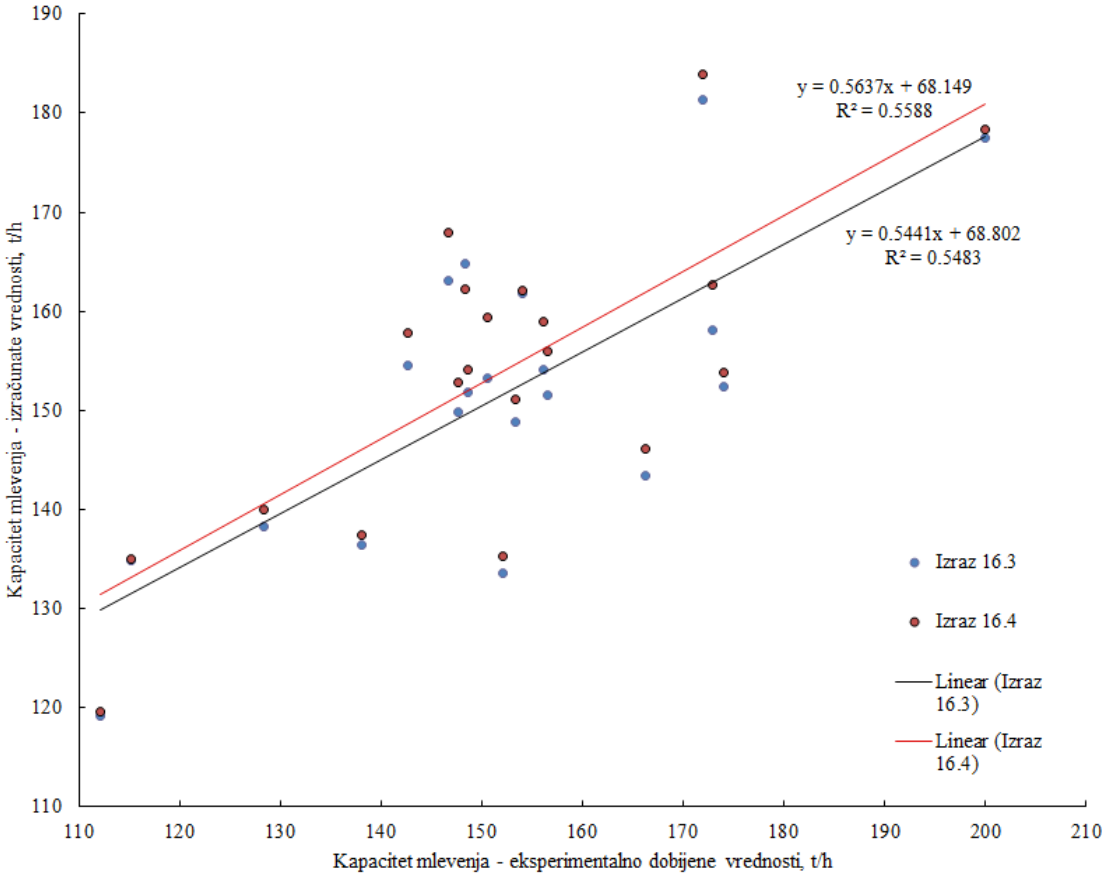
$$B = 0,025 \cdot HGI^{-0,732} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,254} \cdot W^{2,612} \cdot A^{0,474} \cdot W_{h,a,up}^{0,041}, \; R^2 = 0,559 . \tag{16.4}$$

U tabeli 16.5, dat je uporedni prikaz izmerenih odnosno eksperimentalnih vrednosti sa rezultatima izraza 16.3 – 16.4. Na slici 16.3 dat je grafički prikaz rezultata iz tabele 16.5.

Izraz koji se koristi za izračunavanje potrošnje električne energije (16.2) ostaje nepromenjen jer u njemu ne figuriše kapacitet mlevenja.

Tabela 16.5. Uporedni prikaz izmerenih vrednosti kapaciteta mlevenja sa rezultatima korelacione analize

R. br.	Izmerene vrednosti	Izračunate vrednosti		Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti		Relativna greška, %	
	B, t/h	16.3	16.4	16.3	16.4	16.3	16.4
7	154,1	161,8	162,0	-7,7	-7,9	-5,0	-5,1
8	148,4	164,8	162,3	-16,4	-13,9	-11,0	-9,4
9	172,0	181,4	183,9	-9,4	-11,9	-5,4	-6,9
10	200,0	177,5	178,3	22,5	21,7	11,2	10,8
11	172,9	158,0	162,7	14,9	10,2	8,6	5,9
12	166,3	143,4	146,2	22,9	20,1	13,8	12,1
13	142,7	154,5	157,8	-11,8	-15,1	-8,3	-10,6
14	148,7	151,8	154,1	-3,1	-5,4	-2,1	-3,6
15	156,6	151,6	156,0	5,0	0,6	3,2	0,4
16	147,7	149,8	152,8	-2,1	-5,1	-1,4	-3,5
17	146,7	163,1	168,0	-16,4	-21,3	-11,1	-14,5
18	128,4	138,3	140,0	-9,9	-11,6	-7,7	-9,0
19	174,1	152,4	153,8	21,7	20,3	12,4	11,7
20	150,6	153,2	159,3	-2,6	-8,7	-1,7	-5,8
21	153,3	148,8	151,1	4,5	2,2	2,9	1,5
22	112,2	119,1	119,6	-6,9	-7,4	-6,2	-6,6
23	115,2	134,9	135,0	-19,7	-19,8	-17,1	-17,2
24	152,1	133,5	135,3	18,6	16,8	12,2	11,0
25	156,2	154,1	158,9	2,1	-2,7	1,4	-1,7
26	138,1	136,4	137,4	1,7	0,7	1,3	0,5



Slika 16.3. Grafički prikaz rezultata dobijenih korišćenjem izraza (16.3) i (16.4)

Izrazi (16.1, 16.2 i 16.3) za izračunavanje kapaciteta mlevenja daju značajno niže koeficijente determinacije, u odnosu na izraz (16.2) koji se koristi za izračunavanje potrošnje električne energije. To je potpuno očekivano obzirom na činjenicu da je merenje potrošnje električne energije na motoru mlina daleko tačnije od vrlo problematičnog merenja kapaciteta (protoka uglja) mlevenja. 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.

16.1. Zavisnost između potrošnje energije za mlevenje i vrednosti HGI

Bondov radni indeks daje podatak o potrošnji energije za mlevenje nekog materijala. U literaturi postoje izrazi koji direktno povezuju Hardgrove indeks meljivosti sa

Bondovim radnim indeksom. Na ovaj način se može na osnovu podatka o vrednosti HGI, može doći do vrednosti o potrebnoj snazi za mlevenje.

Energija koja se troši za mlevenje i ostale procese po jedinici mase iznosi [26, 174]:

$$W_i = \frac{N}{B}, \ \frac{\text{kWh}}{\text{t}}, \tag{16.5}$$

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:

$$N_{\max} = \left(1 + \frac{1}{2 \cdot D_1^{0,66}}\right) \cdot N \text{, kW}, \tag{16.6}$$

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

Na osnovu podatka iz [174], za ventilatorski mlin N400.42 koji je instaliran u termoelektrani TENT B, specifična potrošnja energije za mlevenje iznosi 11,7 kWh/t za garantni ugalj. Ispitivanjima [174], za kapacitet mlevenja od 164,8 t/h i za ugljeni prah sa sadržajem vlage od 7,65 %, dobijena je specifična potrošnja energije od 10,7 kWh/t.

U literaturi se daju sledeći izrazi koji povezuju vrednosti HGI i specifičnu potrošnju energije za mlevenje:

$$W_i = \frac{435}{HGI} \text{ prema [29]}, \tag{16.7}$$

$$W_i = \frac{435}{HGI^{0,91}} \text{ prema [38, 40]}, \tag{16.8}$$

$$W_i = \frac{1662}{HGI^{1,08}} \text{ prema [40]}, \tag{16.9}$$

$$W_i = \frac{88}{HGI^{0,5}} \text{ prema [38]}, \tag{16.10}$$

$$W_i = \frac{468}{HGI^{0,82}} \text{ prema [41]}. \tag{16.11}$$

Na osnovu rezultata ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 u TENT B i eksperimentalno određenih vrednosti HGI (tabela 16.1), može se odrediti specifična potrošnja energije za mlevenje a prema izrazima 16.7 – 16.11. Tako na osnovu izračunatih vrednosti se mogu uporediti dobijene specifične potrošnje energije sa literaturnim podacima [174].

Takođe, na osnovu podatka o potrošnji električne energije za mlevenje (tabela 16.1) se može a na osnovu izraza

$$N_{\max} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi , \qquad (16.12)$$

dobiti podatak o ukupnoj snazi pogonskog elektromotora mlina, a dalje korišćenjem izraza (16.6) odnosno (16.5) izračunati specifična potrošnja energije za mlevenje. Za pogon ventilatorskog mlina M-12 koristi se elektromotor Sever ZKN 6230/4S. Napon motora iznosi $U = 6600$ V a $\cos\varphi = 0,9$.

Na ova dva načina izračunate specifične potrošnje energije za mlevenje trebalo bi da imaju iste vrednosti. Ukoliko to nije slučaj, odstupanja treba tražiti u problemima određivanja kapaciteta mlevenja, odnosno u greškama metoda određivanja kapaciteta mlevenja.

Sa druge strane, korišćenjem izraza (16.2) i izraza (16.12) se može na osnovu podataka tehničke analize uglja dobiti potrebna snaga za mlevenje.

Ovde treba napomenuti da se izraz (16.9) dobio na osnovu vrednosti HGI koje su određene sa početnim uzorkom određene zapremine a ne mase, što se razlikuje od standardnog postupka određivanja vrednosti HGI. Neslaganje eksperimentalnih rezultata sa izrazom (16.9) su dobili i autori u [47].

Takođe, izraz (16.11) nije dobijen korišćenjem uglja kao materijala koji se melje, već glinice i letećeg pepela iz termoelektrane [41].

Izraz (16.8) i (16.10) Bond je razvio za mineralne materije a ne za ugalj.

Jedini izraz koji daje zavisnosti između vrednosti HGI i specifične potrošnje energije u procesu mlevenja za ugalj je izraz (16.7) i može se naći u monografiji Lj. Novakovića [29]. Sva dalja izračunavanja će biti zasnovana na izrazu (16.7) koji daje vrednosti specifične potrošnje energije bliske vrednostima iz literature [174] za predmetni mlin.

U tabeli 16.6. date su dobijene vrednosti specifične potrošnje energije a na osnovu podataka o vrednosti HGI.

Tabela 16.6. Specifična potrošnja energije za mlevenje korišćenjem izraza (16.7)

	Redni broj	Datum	Režim, test	HGI	Specifična potrošnja energije, kWh/t
Pre rekonstrukcije	1	24.04.2009.	Test 1	–	–
	2	04.05.2009.	Test 2	44,2	9,842
	3	07.09.2009.	Test 3	38,7	11,240
	4	08.09.2009.	Test 4	42,9	10,140
	5	09.09.2009.	Test 5	39,6	10,985
	6	23.03.2010.	Test 6	40,6	10,714
				Srednja vrednost	**10,584**
Posle rekonstrukcije	7	07.06.2010.	R1, T1	40,9	10,636
	8	07.06.2010.	R1, T2	37,5	11,600
	9	08.06.2010.	R2, T1	30,7	14,169
	10	08.06.2010.	R2, T2	30,7	14,169
	11	10.06.2010.	R1, T1	40,8	10,662
	12	10.06.2010.	R1, T2	46,8	9,295
	13	14.06.2010.	R3, T1	38,1	11,417
	14	14.06.2010.	R3, T2	41,0	10,610
	15	15.06.2010.	R4, T1	43,7	9,954
	16	17.06.2010.	R5, T1	42,8	10,164
	17	01.07.2010.	R6, T1	36,1	12,050
	18	22.07.2010.	R7, T1	48,5	8,969
	19	03.08.2010.	R8, T1	35,6	12,219
	20	26.08.2010	R9, T1	35,8	12,151
	21	20.09.2010.	R10, T1	36,6	11,885
	22	13.01.2011.	R11, T1	51,6	8,430
	23	19.01.2011.	R12, T1	41,4	10,507
	24	01.02.2011.	R13, T1	47,2	9,216
	25	01.02.2011.	R13, T2	40,6	10,714
	26	01.02.2011.	R13, T3	47,0	9,255
				Srednja vrednost	**10,904**

Sa druge strane, specifična potrošnja energije za mlevenje se može dobiti i korišćenjem izraza (16.12), (16.6) i (16.5) a na osnovu izmerenih vrednosti napona, struje i kapaciteta mlevenja. Na ovaj način izračunate vrednosti su date u tabeli 16.7.

Tabela 16.7. Specifična potrošnja energije za mlevenje izračunata korišćenjem izmerenih vrednosti

	Redni broj	Datum	Režim, test	I, A	U, V	cosφ	N_{max}, kW	N, kW	B[1)], t/h	B[2)], t/h	W_i[3)], kWh/t	W_i[4)], kWh/t	W_i[5)], kWh/t
Pre rekonstrukcije	1	24.04.2009.	Test 1	–	6600	0,9	–	–	145,9	128,5	–	–	–
	2	04.05.2009.	Test 2	–	6600	0,9	–	–	136,3	132,0	–	–	9,842
	3	07.09.2009.	Test 3	162	6600	0,9	1666,7	1392,4	166,2	138,7	8,378	10,039	11,240
	4	08.09.2009.	Test 4	165	6600	0,9	1697,6	1418,2	168,2	140,2	8,431	10,115	10,140
	5	09.09.2009.	Test 5	162	6600	0,9	1666,7	1392,4	160,1	137,9	8,697	10,097	10,985
	6	23.03.2010.	Test 6	170	6600	0,9	1749,0	1461,1	160,2	125,5	9,121	11,643	10,714
Srednje vrednosti				165	6600	0,9	1695,0	1416,0	158,2	134,9	**8,657**	**10,473**	**10,584**
Posle rekonstrukcije	7	07.06.2010.	R1, T1	198	6600	0,9	2037,1	1706,2	154,1	137,4	11,072	12,418	10,636
	8	07.06.2010.	R1, T2	195	6600	0,9	2006,2	1680,4	148,4	137,4	11,323	12,230	11,600
	9	08.06.2010.	R2, T1	187	6600	0,9	1923,9	1611,4	172,0	159,1	9,369	10,128	14,169
	10	08.06.2010.	R2, T2	194	6600	0,9	1995,9	1671,8	200,0	159,2	8,359	10,501	14,169
	11	10.06.2010.	R1, T1	200	6600	0,9	2057,7	1723,5	172,9	154,2	9,968	11,177	10,662
	12	10.06.2010.	R1, T2	193	6600	0,9	1985,7	1663,1	166,3	154,3	10,001	10,779	9,295
	13	14.06.2010.	R3, T1	188	6600	0,9	1934,2	1620,1	142,7	129,9	11,353	12,472	11,417
	14	14.06.2010.	R3, T2	190	6600	0,9	1954,8	1637,3	148,7	132,4	11,011	12,366	10,610
	15	15.06.2010.	R4, T1	190	6600	0,9	1954,8	1637,3	156,6	152,3	10,455	10,750	9,954
	16	17.06.2010.	R5, T1	190	6600	0,9	1954,8	1637,3	147,7	141,9	11,085	11,538	10,164
	17	01.07.2010.	R6, T1	199	6600	0,9	2047,4	1714,8	146,7	156,5	11,689	10,957	12,050
	18	22.07.2010.	R7, T1	182	6600	0,9	1872,5	1568,3	128,4	145,2	12,215	10,801	8,969
	19	03.08.2010.	R8, T1	174	6600	0,9	1790,2	1499,4	174,1	148,2	8,612	10,117	12,219
	20	26.08.2010	R9, T1	175	6600	0,9	1800,5	1508,0	150,6	144,0	10,013	10,472	12,151
	21	20.09.2010.	R10, T1	175	6600	0,9	1800,5	1508,0	153,3	147,8	9,837	10,203	11,885
	22	13.01.2011.	R11, T1	168	6600	0,9	1728,4	1447,7	112,2	138,4	12,903	10,460	8,430
	23	19.01.2011.	R12, T1	175	6600	0,9	1800,5	1508,0	115,2	137,4	13,091	10,975	10,507
	24	01.02.2011.	R13, T1	180	6600	0,9	1851,9	1551,1	152,1	148,6	10,198	10,438	9,216
	25	01.02.2011.	R13, T2	180	6600	0,9	1851,9	1551,1	156,2	146,9	9,930	10,559	10,714
	26	01.02.2011.	R13, T3	182	6600	0,9	1872,5	1568,3	138,1	147,2	11,357	10,655	9,255
Srednje vrednosti				186	6600	0,9	1911,1	1600,1	151,8	145,9	**10,692**	**11,000**	**10,904**

1) kapacitet mlevenja dobijen preko protoka ugljenog praha
2) kapacitet mlevenja dobijen skidanjem uglja sa trake i preko geometrije dozatora
3) specifična potrošnja energije dobijena korišenjem kapaciteta mlevenja dobijenog preko protoka ugljenog praha
4) specifična potrošnja energije dobijena korišenjem kapaciteta mlevenja dobijenog skidanjem uglja sa trake i preko geometrije dozatora
5) specifična potrošnja energije dobijena korišćenjem izraza (16.7), tabela 16.6

Na osnovu podataka iz literature [174], 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 [174] 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.

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 16.7). 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 [174].

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 16.7) a specifična potrošnja energije 11,0 kWh/t.

Na osnovu tabele 16.7, potrebna ukupna snaga pogonskog elektromotora mlina pre rekonstrukcije iznosila je 1695,0 kW a posle rekonstrukcije 1911,1 kW.

Srednja vrednost specifične potrošnje energije izračunata preko kapaciteta mlevenja dobijenog kao srednja vrednost kapaciteta mlevenja skidanjem uglja sa trake i preko geometrije dozatora (tabela 16.2) se bolje slaže sa izračunatim vrednostima specifične potrošnje energije korišćenjem podataka o vrednostima HGI (tabela 16.6. i 16.7) nego kada se specifična potrošnja energije izračuna na osnovu kapaciteta mlevenja preko protoka ugljenog praha. Ovaj zaključak važi kako za vrednosti specifične potrošnje energije za mlin pre rekonstrukcije tako i za mlin posle rekonstrukcije.

Što se tiče pojedinačnih vrednosti specifične potrošnje energije, u nekim slučajevima dolazi do znatnog odstupanja vrednosti dobijenih ispitivanjem mlina i izračunatih vrednosti preko korišćenjem izraza (16.7). 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).

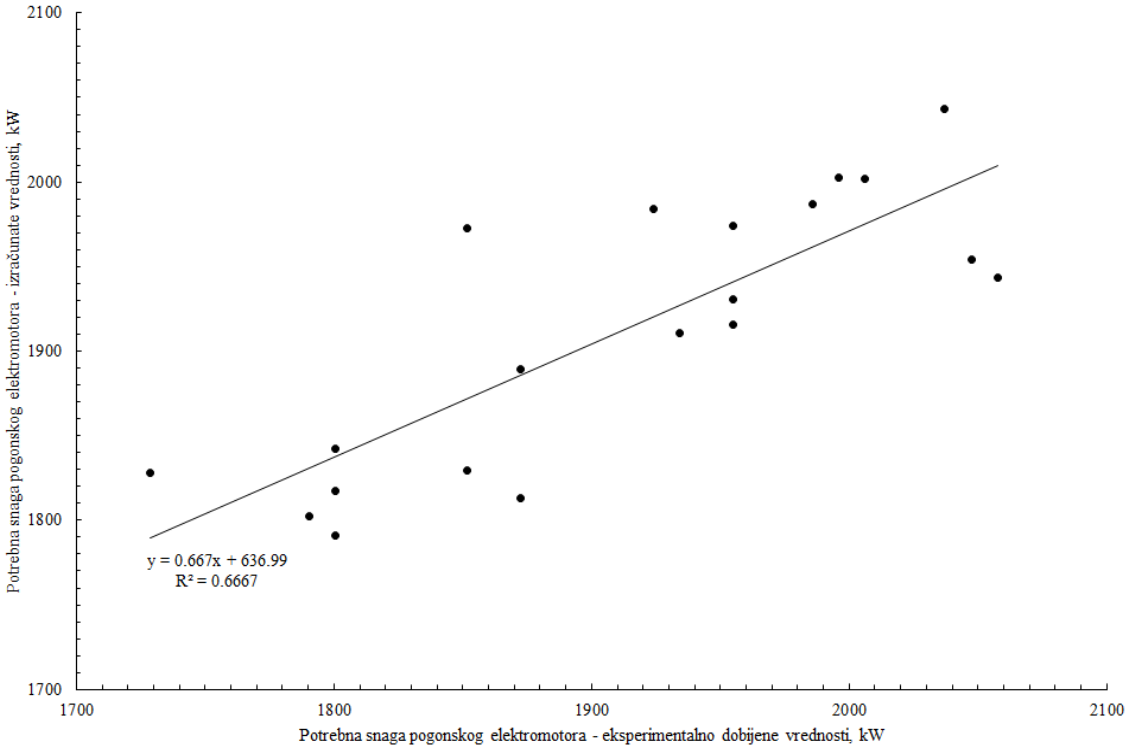
Korišenjem izraza (16.12) i dobijenog korelacionog izraza za opterećenje mlina (potrošnju električne energije) koje je dato izrazom (16.2), moguće je na osnovu podataka o vrednosti HGI, podataka o tehničkoj analizi uglja i ugljenog praha, kao i o granulometrijskim podacima ostatka na situ veličine otvora 90 μm, izračunati potrebnu ukupnu snagu pogonskog elektromotora mlina. Podaci dobijeni proračunom su dati u tabeli 16.8, a grafička interpretacija rezultata na slici 16.4.

Može se videti da se vrednosti dobijene korišćenjem korelacionih izraza u dobroj meri slažu sa izmerenim vrednostima (tabela 16.8), što znači da se dobijeni izrazi mogu koristiti pri proračunu opterećenja i potrebne snage za mlevenje uglja posmatranog mlinskog postrojenja.

Tabela 16.8. Snaga pogonskog elektromotora mlina dobijena na osnovu izmerenih i izračunatih vrednosti i korišćenjem izraza (16.2)

	Redni broj	Datum	Režim, test	I[1)], A	N_{max}[2)] kW	I[3)], A	N_{max}[4)] kW
Posle rekonstrukcije	7	07.06.2010.	R1, T1	198	2037,1	198,6	2043,4
	8	07.06.2010.	R1, T2	195	2006,2	194,6	2001,8
	9	08.06.2010.	R2, T1	187	1923,9	192,8	1984,1
	10	08.06.2010.	R2, T2	194	1995,9	194,6	2002,3
	11	10.06.2010.	R1, T1	200	2057,7	188,9	1943,5
	12	10.06.2010.	R1, T2	193	1985,7	193,2	1987,2
	13	14.06.2010.	R3, T1	188	1934,2	185,7	1911,0
	14	14.06.2010.	R3, T2	190	1954,8	186,2	1915,8
	15	15.06.2010.	R4, T1	190	1954,8	191,9	1973,9
	16	17.06.2010.	R5, T1	190	1954,8	187,6	1930,5
	17	01.07.2010.	R6, T1	199	2047,4	189,9	1954,0
	18	22.07.2010.	R7, T1	182	1872,5	183,7	1889,5
	19	03.08.2010.	R8, T1	174	1790,2	175,2	1802,8
	20	26.08.2010	R9, T1	175	1800,5	176,7	1817,7
	21	20.09.2010.	R10, T1	175	1800,5	179,1	1842,6
	22	13.01.2011.	R11, T1	168	1728,4	177,7	1828,1
	23	19.01.2011.	R12, T1	175	1800,5	174,1	1791,0
	24	01.02.2011.	R13, T1	180	1851,9	177,8	1829,4
	25	01.02.2011.	R13, T2	180	1851,9	191,7	1972,6
	26	01.02.2011.	R13, T3	182	1872,5	176,2	1813,3
			Srednje vrednosti	**186**	**1911,1**	**185,8**	**1911,7**

1) izmerena vrednost
2) izračunata vrednost potrebne snage pogonskog elektromotora na osnovu izmerenih vrednosti
3) izračunata vrednost korišćenjem izraza (16.2), tabela 16.3
4) izračunata vrednost korišćenjem izraza (16.2) i (16.12)



Slika 16.4. Prikaz rezultata proračuna potrebne snage pogonskog elektromotora mlina korišćenjem izraza (16.2) i (16.12)

17. Zaključak

Disertacija obrađuje problem uticaja karakteristika ugljeva niske toplotne vrednosti na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja.

U uvodnim delovima disertacije dat je osvrt na poreklo i nastanak ugljeva, njihovu klasifikaciju sa težištem na domaće ugljeve a prema međunarodnim standardima. Takođe, dati su osnovni pojmovi iz oblasti petrologije i obrađeni macerali i litotipovi domaćih ugljeva (lignita). Kako disertacija ima za temu domaće ugljeve, dat je pregled i karakteristike lignita iz dva najvažnija domaća basena: kolubaraskog i kostolačkog.

Date su osnovne teorije usitnjavanja na čijim principima funkcionišu mlinovi u velikim termoenergetskim postrojenjima. Jedan od parametara koji utiče na kapacitet mlinova jeste meljivost ugljeva. Stoga je u posebnom poglavlju obrađena problematika meljivosti ugljeva, koja se definiše preko vrednosti Hardgrove indeksa meljivosti (HGI). Dat je osvrt na samu problematiku HGI kao i uticaj karakteristika ugljeva na vrednosti HGI. Na meljivost ugljeva utiče više faktora, kako sam rang uglja tako i petrografski sastav i elementi tehničke analize.
Ugljevi koji se lakše melju su ugljevi u grupi ugljeva sa niskim i srednjim sadržajem isparljivih materija. Oni imaju bolje karakteristike meljivosti od ugljeva sa visokim udelom isparljivih materija i antracita.
Poseban problem na meljivost predstavalja sadržaj vlage u uglju, naročito u ugljevima nižeg ranga (ligniti). Pri smanjenju sadržaja vlage u uglju (njegovim sušenjem) dolazi do opadanja vrednosti HGI do nekog minimuma koji predstavlja udeo vlage u uglju osušenom na vazduhu. Posle ovog minimuma, daljim snižavanjem sadržaja vlage, dolazi do porasta vrednosti HGI, usled pojave naprslina u uglju. Posle ovog maksimuma, vrednosti HGI se neznatno povećavaju ili se opet smanjuju.
Takođe, obrađen je uticaj vrednosti HGI na sam rad mlinskog postrojenja.

Za određivanje vrednosti koeficijenta meljivosti uglja razvijeno je više laboratorijskih metoda. Najpoznatije metode za određivanje vrednosti koeficijenta meljivosti su metoda Hargrove-a i VTI (Savezni termotehnički institut metoda). Pored ovih metoda, postoje i

metode VUK, CKTI (Centralni kotlovsko-turbinski institut), metoda ASTM-mlin dobošar sa 100 čeličnih kugli kao i Bondov postupak. U disertaciji je opisana svaka od navedenih metoda kao i međusobne zavisnosti između koeficijenta meljivosti koje ove metode daju.

Navedene metode su po principu slične. Podrazumevaju ili odnos finoće mlevenja pri konstantnom radu ili odnos utroška energije pri mlevenju etalonskog uglja i ispitivanog uglja. U oba slučaja se polazi od iste krupnoće zrna, a u drugom slučaju i do jednake finoće mliva.

Najpoznatija od njih jeste Hardgrove-ova metoda koja se zasniva na tome da se vrednost HGI određuje pomoću finoće meljave pri čemu je konstantan rad mlevenja. Postupak određivanja je standardizovan. Treba napomenuti da je postupak prevashodno razvijen za kamene ugljeve ali se u velikoj meri primenjuje i na ostale tipove ugljeva.

U delu pregleda literature, izvršen je prikaz i analiza najvažnijih radova iz oblasti koje odrađuju ovu problematiku. Predstavljene su korelacione zavisnosti do kojih su autori dolazili analizirajući ugljeve različitih rangova. Ovi izrazi su obuhvatili uticaj kako elemenata tehničke analize ugljeva (sadržaj vlage, pepela i isparljivih materija) tako i uticaj petrografskog sastava uglja (macerala) na vrednosti HGI. Posebno se daje podatak da na meljivost lignita negativno utiču ksilitne partije (litotipovi). Analiza literaturnih podataka je imala za cilj da se identifikuju bitni uticajni parametri na meljivost ugljeva i na taj način planiraju eksperimentalna istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji i analitičke metode koje su povoljne za definisanje korelacionih zavisnosti između različitih parametara domaćih ugljeva i njihove meljivosti.

Za ostvarivanje cilja doktorske disertacije realizovana su istraživanja na dovoljnom broju uzoraka kako bi se statističkom obradom rezultata dobile funkcionalne zavisnosti koje karakteriše koeficijent determinacije R^2.

Naučni metode koji su primenjene u disertaciji odnose se na:

- na osnovu pregleda literature i analize u njoj prikazanih rezultata, utvrđeni su pravci istraživanja u doktorskoj disertaciji. Posebno su ovi podaci bili bitni za planiranje eksperimentalnih istraživanja i predviđanje koje karakteristike ugljeva mogu bitno uticati na meljivost ugljeva,

- izbor i uzorkovanje dovoljnog broja uzoraka uglja sa ciljem formiranja reprezentativnog statističkog uzorka,
- eksperimentalno su određene vrednosti Hardgrove indeksa meljivosti (HGI) svih uzoraka uglja iz oba domaća basena (kolubarskog i kostolačkog),
- izvršene su laboratorijske analize uzoraka ugljeva, kako tehničke tako i kompletne petrografske (litotipovi i macerali) i organo-geohemijske,
- izvršena je statistička analiza dobijenih rezultata i utvrđene su korelacije uticajnih karakteristika ugljeva sa vrednostima HGI, kao i korelacioni izrazi,
- eksperimentalnim ispitivanjima realnog mlinskog postrojenja, u različitim pogonskim uslovima, dobijene su analitičke zavisnosti kojima se mogu definisati opterećenje mlina i potrošnja energije za mlevenje.

Eksperimentalni rad je obuhvatio određivanje indeksa meljivosti uzoraka ugljeva po metodi Hardgrove-a a u skladu sa standardom ISO 5074 kao i laboratorijske analize uzoraka ugljeva prema odgovarajućim važećim standardima.
Obrada rezultata je sprovedena metodama statističke analize u cilju utvrđivanja zavisnosti eksperimentalno dobijene vrednosti HGI od uticajnih karakteristika ugljeva.
Pri tome, korišćeni su podaci dostupni iz literature o ispitivanim ugljevima i korelacionim izrazima za određivanje vrednosti HGI.
Disertacija obuhvata sledeće celine, kroz koje se ogleda njena naučna opravdanost, očekivani rezultati i praktična primena:

- dat je pregledan prikaz naučnih saznanja koja se odnose na oblast istraživanja disertacije,
- utvrđeno je da se standardna Hardgrove-ova metoda za određivanje vrednosti HGI može primeniti za domaće lignite, a ovaj parametar se može koristiti za upoređivanje meljivosti domaćih lignita sa sličnim ugljevima niskog ranga,
- izvršena je potpuna identifikacija porekla (uslovi sredine, prekursori i putanje nastanka) i sastava ugljeva dva najveća domaća basena uglja (kolubarski i kostolački),
- izvršena je analiza zavisnosti između vrednosti HGI i elemenata tehničke analize (sadržaj vlage, pepela i isparljivih materija), petroloških i organo-geohemijskih karakteristika ugljeva. Na osnovu analize dobijenih rezultata i vrednosti uticajnih

koeficijenata, određeni su parametri i karakteristike ispitivanih ugljeva koji dominantno utiču na njihovu meljivost i koji se zato moraju uzeti u obzir za predviđanje ponašanja ugljeva u procesu mlevenja,

- izvedeni su korelacioni izrazi između vrednosti HGI i uticajnih karakteristika ugljeva, koji se mogu iskoristiti za predviđanje ponašanja domaćih ugljeva pri mlevenju u mlinovima. Pokazano je da je moguće na osnovu elemenata tehničke analize predvideti vrednosti HGI, dok ukoliko je za uzorke ugljeva poznat litotipni sastav ili petrografske analize dobijaju se vrednosti HGI sa visokim koeficijentom determinacije. Na ovaj način se vrednosti HGI mogu dobiti bez eksperimentalnog određivanja,
- izvršena je analiza uticaja meljivosti uglja i njegovih karakteristika na kapacitet mlevenja i potrošnju energije za mlevenje ventilatorskih mlinova u termoelektranama i izvedeni su izrazi za izračunavanje kapaciteta mlevenja i potrošnje električne energije za mlevenje u funkciji uticajnih karakteristika uglja uključujući i vrednosti HGI,
- 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;
- rezultati disertacije mogu biti korisni stručnjacima u cilju optimizacije rada ne samo postrojenja za pripremu ugljenog praha nego i optimizacije rada celog termoenergetskog postrojenja.

U eksperimentalnom delu disertacije izvršena je laboratorijska analiza uzoraka ugljeva iz dva najvažnija domaća basena: kolubarskog i kostolačkog. Iz kolubarskog basena analizirano je 65 uzoraka ugljeva uzetih u periodu od maja 2009. godine do marta 2012. godine, što predstavlja vremenski period koji je u velikoj meri reprezentativan za obradu i predviđenje rezultata. Iz kostolačkog basena izvršena je analiza 24 uzorka uglja, za period januar – februar 2010. godine.

Pre svega za sve uzorke je izvršeno određivanje vrednosti HGI, prema standardizovanom postupku. Takođe, za sve uzorke izvršena je tehnička analiza,

odnosno određivanje sadržaja vlage, pepela i isparljivih materija. Analiza je vršena u skladu sa međunarodnim standardima.

Za izabrane uzorke kolubarskih lignita, na način da se pokrije cela oblast dobijenih vrednosti HGI (od najmanje vrednosti do najveće), izvršena je analiza uticaja vlage na vrednosti HGI. Eksperiment je obuhvatio šest uzoraka ugljeva kolubarskog basena i to: uzorak 23, uzorak 29, uzorak 34, uzorak 8, uzorak 36 i uzorak 7. Pored toga, za svih šest izabranih uzoraka izvršene su petrološke i organsko-geohemijske analize.

Za 11 uzoraka kolubarskog i 13 uzoraka kostolačkog basena izvršeno je određivanje masenog sadržaja i tipova ksilita, kao i petrografska i organsko-geohemijska analiza. Uzorci su izabrani na način da pokriju celokupnu oblast vrednosti HGI. Pored analize pojedinačnih uzoraka, izvršene su i analize zbirnog uzorka pojedinih litotipova kolubarskog i kostolačkog basena. Kompletno ispitivanje geohemijskih karakteristika zbirnog uzorka lignita kolubarskog i kostolačkog basena je urađeno u cilju što potpunije identifikacije porekla i sastava ovih ugljeva. Pretpostavka je da se zaključci u pogledu meljivosti ovih ugljeva mogu primeniti na druge ugljeve, sličnog sastava i porekla.

Analiza je obuhvatila barski litotip, mumificirani ksilit, trakasti ksilit, strukturni ksilit i dopleritski ksilit. Zbirni uzorak litotipa predstavlja uzorak koji je nastao spajanjem odgovarajućeg litotipa svih ispitivanih uzoraka (11 uzoraka kolubarskog i 13 uzoraka kostolačkog basena). Analize geohemijskih karakteristika zbirnih uzoraka litotipova imale su za cilj da pokažu uslove sredine, prekursore i putanje nastanka ugljeva naša dva najznačajnija basena.

Svi litotipovi kolubarskog basena imaju nizak sadržaj organskog sumpora, dok je kod litotipova kostolačkog basena ovaj sadržaj viši što ukazuje na blago redukcionu sredinu ili netralnu do slabo alkalnu sredniu u kojoj je stvaran ugalj.

Podaci elementrarne analize, odnosno odnos C/N, koji je za sve litotipove iznosio preko 40, ukazuje da svi ispitivani uzorci vode poreklo od viših kopnenih biljaka.

Sadržaj *n*-alkana u svim ksilitnim litotipovima je izrazito nizak dok u uzorcima dominira diterpan, ukazuje na to da su više kopnene biljke i to četinari, dali najveću masu za stvaranje barskog i ksilitnih litotipova kod lignita kolubarskog i kostolačkog basena. Odnos pristana i fitana veći od 1 ukazuje na oksidacione uslove sedimentacije organske materije. Na razgradnju organske materije jak uticaj su imali mikroorganizmi.

U cilju određivanja uticaja karakteristika uglja a posebno vrednosti HGI na karakteristike rada mlinskog postrojenja izvršena su ispitivanja ventilatorskog mlina M-12 na termoelektrani TENT B u Obrenovcu. Ova ispitivanja su vršena u aprilu, maju i septembru 2009. godine kao i u martu 2010. godine. Druga serija ispitivanja mlina izvršena je u periodu jun 2010, jul – septembar 2010, oktobar 2010 – januar 2011 i februar 2011.

Na osnovu rezultata ispitivanja izvršena je korelaciona analiza kako bi se dobili izrazi za određivanje kapaciteta mlevenja kao i potrošnje energije za mlevenje. Poseban deo ovog poglavlja obuhvatio je analizu mogućnosti predviđanja ukupne snage pogonskog elektromotora, potrebnu za mlevenje uglja, od vrednosti HGI i ispitivanih vrednosti karakteristika mlinskog postrojenja. Na osnovu dobijenih korelacionih izraza za potrošnju električne energije, određena je potrebna snaga za mlevenje a zatim i specifična potrošnja energije za mlevenje uglja a na osnovu izmerenog kapaciteta mlevenja. Sa druge strane, na osnovu literaturnih izraza koji daju vezu između vrednosti HGI i specifične potrošnje energije, izračunata je vrednost specifične potrošnje energije.

Eksperimentalni rezultati određivanja vrednosti HGI pokazali su da su se za uzorke uglja kolubarskog basena vrednosti HGI kretale u opsegu 30,7 do 56,9 sa srednjom vrednošću 41,8. Za uzorke ugljeva kostolačkog basena vrednosti HGI su homogenije i imale su vrednosti 40,8 do 47,0 i srednjom vrednosti 43,5.

Tehnička analiza uzoraka ugljeva je pokazala tipične vrednosti za kolubarske u kostolačke lignite. Za uzorke kolubarskih ugljeva srednje vrednosti sadržaja vlage, isparljivih materija i pepela iznose: 49,6 %, 21,30 % i 15,98 %, respektivno. Za ugljeve kostolačkog basena sadržaj isparljivih materija je imao slične vrednosti kao kod kolubarskih uzoraka i iznosio je 22,57 %. Sadržaj vlage kostolačkih lignita je niži i iznosio je 40,56 % a sadržaj pepela viši nego kod kolubarskih uzoraka i iznosio je 28,77 %.

Koleracije vrednosti HGI sa podacima tehničke analize kolubarskih uzoraka, pokazuju da sadržaj pepela ima pozitivan uticaj na vrednosti HGI ($r = 0,356$, za analitički uzorak). Sadržaj isparljivih materija ima negativan uticaj na vrednosti HGI ($r = -0,476$, za radnu masu uzorka). Sadržaj higroskopne vlage ima negativan uticaj ($r = -0,509$, za

analitički uzorak), dok grube vlage pozitivan ($r = 0,228$). Sadržaj ukupne vlage nema uticaja na meljivost ($r = 0,073$).

Što se tiče uzoraka uglja iz kostolačkog basena, negativan uticaj na vrednosti HGI ima sadržaj isparljivih materija ($r = -0,640$, za analitički uzorak), zatim sadržaj higroskopne vlage ($r = -0,250$, za analitički uzorak), grube ($r = -0,395$) i ukupne vlage ($r = -0,418$). Pozitivan uticaj ima sadržaj pepela ($r = 0,362$, za radnu masu uzorka).

Dobijene korelacione zavisnosti se slažu sa literaturnim izvorima.

Hardgrove indeks meljivosti ugljeva (HGI) ima nelinearnu zavisnost od udela vlage u uglju. Sve krive imaju dve prevojne tačke, jedan minimum i jedan maksimum vrednosti HGI u ispitivanoj oblasti. Minimalne vrednosti HGI ima u intervalu 15 – 22 % masenog udela ukupne vlage u uglju, dok maksimalne vrednosti HGI ima za sadržaj ukupne vlage 5 – 13 %. Eksperimentalnim ispitivanjima ventilatorskog mlina M-12, dobijeno je da srednja vrednost sadržaja vlage u ugljenom prahu iznosila 13,15 %, pa se može smatrati da mlin radi sa približno optimalnim vrednostima udela vlage sa stanovišta vrednosti HGI. Ovde treba napomenuti da je garantovana vrednost udela vlage u ugljenom prahu za ventilatorski mlin M-12 iznosila 10 %.

Dominantini litotip u uzorcima ugljeva je barski, sem jednog uzorka iz kolubarskog basena (uzorak 23) gde dominira ksilitni litotip. Strukturni ksilit je dominantni tip ksilita u skoro svim ispitivanim uzorcima sem jednom uzorku kolubarskog (uzorak 23). Uzorci kostolačkih ugljeva imaju više udela dopleritskog ksilita nego kolubarski uzorci.

Analizom uticaja litotipova na vrednosti HGI može se zaključiti sledeće:

- u uzorcima kolubarskog basena postoji izrazito negativna linearna korelacija između sadržaja trakastog ksilita i vrednosti HGI ($r = -0,77$), dok je za uzorke kostolačkog basena korelacija takođe negativna ($r = -0,57$),
- svi tipovi ksilita, kao i sadržaj ukupnih ksilita uzoraka uglja kolubarskog basena imaju negativan uticaj na karakteristike meljivosti uglja ($r = -0,79$). Što se tiče uzoraka uglja kostolačkog basena, negativan uticaj na meljivost imaju vlaknasti ksiliti sa $r = -0,57$,

- vlaknasti ksiliti imaju najveći negativan uticaj na meljivost pogotovo za uzroke kolubarskog basena,
- barski ugalj ima pozitivan uticaj na meljivost kolubarskog uglja ($r = 0,62$), dok je kod kostolačkih ugljeva primećen slabi negativan uticaj ($r = -0,22$). Ovo variranje uticaja se može objasniti velikom heterogenošću uglja,
- dopleritski ugalj nema značajan uticaj na vrednosti HGI kolubarskih lignita ($r = 0,04$), dok za kostolačke lignite ima slab negativan uticaj pri čemu je $r = -0,34$,
- zemljasti ugalj, naročito iz kolubarskih lignita ima pozitivan uticaj na meljivost ($r = 0,69$),
- mineralne materije, naročito za kolubarske uzorke imaju pozitivan uticaj na vrednosti HGI ($r = 0,72$),
- vrednosti HGI zavise od količine i vrste mineralnih materija. Mineralne materije uzoraka uglja kolubarskog basena su uglavnom sastavljene od kvarca, koji ima pozitivan uticaj na meljivost uglja.

Najzastupljenija grupa macerala u ispitivanim uzorcima je grupa huminita čiji se sadržaj kreće od 57,2 do 85,7 zap. %. Najzastupljeniji macerali grupe huminita su tekstinit (13,3 – 53,6 zap. %), ulminit (3,8 – 38,3 zap. %) i densinit (9,2 – 25,5 zap. %) sa promenljivim sadržajem atrinita (0,9 – 10,1 zap. %) i korpohuminita (1,6 – 9,0 zap. %). Sadržaj gelinita je nizak (<5,0 zap. %).

Sadržaj liptinita se kreće u opsegu 3,2 – 10,90 zap. % sa suberinitom (0,8 – 5,60 zap. %), sporinitom (0,5 – 3,20 zap. %) i liptodetrinitom (0,5 – 4,10 zap. %) kao najzastupljenijim maceralima.

Sadržaj inertinita, pretežno inertodetrinita, funginita, fuzinita, semifuzinita i makrinita kreće se od 3,0 do 8,7 zap. %. Sadržaj mineralnih materija varira od 6,3 do 30,6 zap. %.

Analizom rezultata petrografskih ispitivanja je uočena značajna negativna linearna korelacija između sadržaja tekstinita i vrednosti HGI kako za kolubarske ugljeve ($r = -0,83$) tako i za kostolačke ($r = -0,70$). Ovim se ukazuje na negativan uticaj ovog macerala na meljivost ugljeva, što je takođe u skladu sa visokim udelom vlaknastih ksilita.

Interesantno je zapaziti kod kostolačkih uzoraka da je sadržaj ulminita koji pozitivno utiče na meljivost viši od sadržaja tekstinita koji utiče negativno na meljivost uglja što se odražava na vrednosti HGI koje su ujednačenije kog kostolačkih uzoraka nego kod kolubarskih (u kojima je značajno niži sadržaj ulminita).

Analiza organsko-geohemijskih karakteristika uzoraka ugljeva pokazuje negativan uticaj organskog ugljenika na meljivost ugljeva. Veći negativan uticaj ima za kolubarske uzorke ($r = -0,90$) nego za kostolačke uzorke ugljeva ($r = -0,65$). Sadržaj vlaknastih ksilita i ukupan sadržaj ksilita imaju pozitivnu korelaciju sa sadržajem organskog ugljenika ali negativnu sa vrednosti HGI. Ovaj negativan uticaj se pripisuje većem sadržaju organskog ugljenika u uzorcima uglja.
Takođe, postoji blaga negativna korelacija ($r = -0,39$) između sadržaja bitumena i vrednosti HGI, što je i očekivano usled nepovoljnih mehaničkih karakteristika bitumena. Kako je korelacija između sadržaja bitumena i sadržaja vlaknastog i dopleritskog ksilita pozitivna, pretpostavlja se da je negativan uticaj uglja bogatog ksilitom na vrednosti HGI delom povezan i sa visokim udelom rastvorljive organske materije.

Molekularni sastav organske materije pokazuje da negativan uticaj kolubarskih lignita sa visokim sadržajem ksilita na vrednosti HGI može biti povezan sa srednjelančanim *n*-alkanima.
U uzorcima uglja iz kostolačkog basena kratkolančani *n*-alkani imaju pozitivan uticaj na vrednosti HGI ($r = 0,63$). Pored toga, vlaknasti ksiliti koji ispoljavaju najnegativniji uticaj na vrednosti HGI pokazuju negativnu korelaciju sa sadržajem kratkolančanih *n*-alkana ($r = -0,50$).
Aromatični hopani imaju blagu pozitivnu korelaciju sa sadržajem vlaknastog ($r = 0,50$) i dopleritskog ksilita ($r = 0,50$), kao i sa ukupnim sadržajem ksilita kolubarskih lignita pri čemu je koeficijent korelacije $r = 0,40$. Ovaj podatak govori da negativan uticaj kolubarskih ugljeva bogatih ksilitom na vrednosti HGI delom može biti povezan sa aromatizacijom hopana.

Za uzorke uglja kostolačkog basena ne postoji značajnija statistička korelacija između vrednosti HGI i sadržaja ukupnih seskviterpana, diterpana i ne-hopanskih triterpana (u zasićenoj i aromatičnoj frakciji) kao i sadržaj ovih biomarkera u zasićenoj i aromatičnoj frakciji. Sa druge strane, sadržaj ukupnih seskviterpana i seskviterpana u zasićenoj frakciji pokazuju negativnu korelaciju sa vrednostima HGI uzoraka kolubarskih lignita, $r = -0,66$ i $r = -0,67$ respektivno.

Pozitivna korelacija sadržaja ukupnih seskviterpana i sadržaja seskviterpana u zasićenoj frakciji sa vlaknastim ksilitima iz kolubarskog basena ($r = 0,62$) pokazuju da se negativan uticaj vlaknastog ksilita i ukupnih ksilita na vrednosti HGI može pripisati sadržaju seskviterpana.

Korelaciona analiza kolubarskih uzoraka pokazuje da na negativan uticaj ksilitnog litotipa na vrednosti HGI uzoraka uglja kolubarskog basena utiče povećan sadržaj aromatičnih ne-hopanskih triterpana.

Pozitivna korelacija između CWDI i vlaknastih ($r = 0,50$) i dopleritskih ksilita ($r = 0,63$) pokazuje da se negativan uticaj ksilitnog litotipa kolubarskih uzoraka na vrednosti HGI može povezati sa intenzivnom razgradnjom drvenastog tkiva.

Na osnovu svih izvršenih laboratorijskih analiza uzoraka ugljeva, učinjen je pokušaj da se pronađu korelacioni izrazi koji će u dovoljno dobroj meri predvideti vrednosti HGI a na osnovu tehničke analize, masenog sadržaja litotipova i petrografske analize. Posebno su vršene korelacione analize za uzorke ugljeva kolubarskog i kostolačkog basena. Korelacioni izrazi su obuhvatili kako linearne zavisnosti tako i nelinearne. U prilogu disertacije dat je pregled svih korelacionih izraza dok je u samom tekstu dat tabelarni i grafički prikaz izabranih izraza. Kriterijum za izbor je bio najveća vrednost koeficijenta determinacije.

Prvi izrazi sadržali su samo elemente tehničke analize ugljeva, izražene na raznim osnovama, i obuhvatili su svih 65 uzoraka kolubarskih i 24 uzorka kostolačkog basena. Zatim su u korelacionu analizu uključeni i litotipovi i na kraju i petrografski sastav uzoraka ugljeva. Izbor članova korelacionih izraza izvršen je na osnovu ranije određenih korelacionih koeficijenata.

Na osnovu dobijenih korelacionih izraza, najniže koeficijente determinacije imaju izrazi u koje je uključena samo tehnička analiza uzoraka. Za kolubarske lignite, koeficijent

determinacije iznosi $R^2 = 0,383$ za linearni korelacioni izraz, odnosno $R^2 = 0,510$ za nelinearnnu zavisnost. Za uzorke uglja kolubarskog basena, dobijaju se veće vrednosti koeficijenta determinacije i iznose $R^2 = 0,461$ za linearni korelacioni izraz, odnosno $R^2 = 0,770$ za nelinearni, što predstavlja jako visok koeficijent determinacije. Više vrednosti koeficijenta determinacije kostolačkih lignita se mogu objasniti homogenijim vrednostima kako HGI tako i tehničke analize. Niske vrednosti koeficijenta determinacije se mogu donekle objasniti i samom heterogenošću uglja.

Znatno bolji koeficijenti determinacije se dobijaju kada se izrazi formiraju sa sadržajem pojedinih litotipova. Za kolubarske ugljeve koeficijent determinacije iznosi $R^2 = 0,907$, dok za kostolačke $R^2 = 0,859$. Uključenjem tehničke analize i litotipova u izraz, dobijaju se koeficijenti determinacije $R^2 = 0,941$ za kolubarske uzorke i $R^2 = 0,735$ za uzorke ugljeva iz kostolačkog basena.

Koeficijenti determinacije za izraze u kojima figuriše samo sadržaj macerala iznose $R^2 = 0,928$ za uzorke kolubarskih lignita, odnosno $R^2 = 0,854$ za uzorke uglja iz kostolačkog basena. Na kraju, ukoliko se analiziraju izrazi koji obuhvataju tehničku analizu i petrografski sastav dobijaju se sledeći koeficijenti determinacije: $R^2 = 0,918$ za uzorke kolubarskog basena i $R^2 = 0,883$ za uzorke kostolačkog basena.

Može se zaključiti da se najviše vrednosti koeficijenta determinacije dobijaju ako se za predviđanje vrednosti HGI primenjuje izraz u kojima figuriše sadržaj litotipova i tehničke analize za kolubarske ugljeve ($R^2 = 0,941$), odnosno petrografski sastav i tehnička analiza za ugljeve kostolačkog basena ($R^2 = 0,883$). Slična tačnost se dobija i kada se za ugljeve kostolačkog basena koristi i izraz u kome figuriše samo sadržaj pojedinih litotipova ($R^2 = 0,859$).

Na ovaj način, pokazalo se da je moguće na osnovu elemenata tehničke analize predvideti vrednosti HGI, ali ukoliko je za uzorke ugljeva poznat litotipni sastav ili petrografske analize, korišćenjem izraza koji su dati u disertaciji, dobijaju se vrednosti HGI sa visokim koeficijentom determinacije.

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).

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 snergije (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.

18. Literatura

1. **Podgajni Oleg**: *Petrologija kaustobiolita*, Beopres, Beograd 1992.
2. **Jelenković R, Simić V, Kostić A, Životić D:** *Ležišta mineralnih sirovina, poglavlje V – Ležišta fosilnih goriva*, Rudarsko-geološki fakultet Beograd, 2010.
3. **Đorđević Živojin:** *Geologija ugljeva – opšti i posebni deo*, Zavod za geološka i geofizička istraživanja i Savezni geološki zavod, Beograd, 1965.
4. **Nikolić P, Dimitrijević D:** *Ugalj Jugoslavije*, Pronalazaštvo Beograd, 1990.
5. **Stach E, Mackowsky M-Th, Teichmüller M, Taylor G. H, Chandra D, Teichmüller R**: *Stach`s Textbook od Coal Petrology*, second completely revised edition, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 1975.
6. **Suarez-Ruiz I, Crelling J:** *Applied Coal Petrology – the role of petrology in coal utilization*, Academic press, 2008.
7. **Pantić N, Nikolić P**: *Ugalj*, Naučna knjiga, Beograd, 1973.
8. **Naeth J, Asmus S. C, Littke R**: *Petrographic and geophysical assessment of coal quality as related to briquetting: the Miocene lignite of the Lower Rhine Basin, Germany*, International Journal of Coal Geology 60, pp. 17-41, 2004.
9. ***: *International Classification of in-Seam Coals*, Economic Comission for Europe, Committee on Sustainable Energy, United nations, New York and Geneva, 1998.
10. ***: *International Codification System for Low-rank Coal Utilization*, Economic Comission for Europe, Committee on Sustainable Energy, United nations, New York and Geneva, 2002.
11. ***: *ISO 11760:2005 – Classification of Coals (classification des charbons)*, International Standard, The International Organization for Standardization, 2005.
12. **Ercegovac M, Životić D, Kostić A**: *Genetic – industrial classification of brown coals in Serbia*, International Journal of Coal Geology 68, pp. 39-56, 2006.
13. **Sykorova I, Pickel W, Chistanis K, Wolf M, Taylor G. H, Flores D**: *Classification of huminite – ICCP System 1994*, International Journal of Coal Geology 62, pp. 85-106, 2005.
14. ***: *The new vitrinite classifiation (ICCP System 1994)*, International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), Fuel 77, pp. 349-358, 1998.

15. ***: *Chapter 2 – Organic petrology, macerals, microlithotypes, lithotypes, minerals, rank*, ICCP Training Course on Dispersed Organic Matter, Porto, Portugal, 2011.
16. ***: *The new inertinite classifiation (ICCP System 1994)*, International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), Fuel 80, pp. 459-471, 2001.
17. **Thomas Larry**: *Coal as substance (Chapter 4) in Coal Geology*, 2nd edition, Wiley-Blackwell, 2013.
18. **Ercegovac M**: *Mikropetrografski sastav uglja iz Stanara sa posebnim osvrtom na sadržaj ksilita i mogućnosti briketiranja*, *Rudarski glasnik* Vol. 28 Nr. 3, Beograd, pp. 28-37, 1989.
19. **Jacob H**: *Die petrographische Bestimmung des Xylitgehaltes von Weichbraunkohlen*, Geologisches Jahrbuch. 79, pp. 145-172, 1961.
20. **Ercegovac M**: *Palinološko-petrološke osobine i geneza uglja Krekanskog basena*, Geol. an. Balk. pol., knj. XXXV, Beograd, pp. 211-280, 1970.
21. **Životić D, Stojanović K, Gržetić I, Jovančićević B, Cvetković O, Šajnović A, Simić V, Stojaković R, Scheeder G**: *Petrological and geochemical composition of lignite from the D field, Kolubara basin (Serbia)*, International Journal of Coal Geology 111, pp. 5-22, 2013.
22. **Pantić N, Dulić I**: *Pontian palynomorphs in Serbia, In: Planderova E, Konzalova M (eds) – Paleofloristic and Paleoclimatic Changes during Cretaceous and Tertiary*, Bratislava, pp. 181-186, ISBN 80-85314-26-6, 1993.
23. **Ercegovac M, Pulejković D**: *Petrographic composition and coalification degree of coal in the Kolubara coal basin*, Annales Geologiques de la Peninsule Balkanique 52, pp. 201-202, 1991.
24. **Stojanović K, Životić D**: *Comparative study of Serbian Miocene coals – Insights from biomarker composition*, Inernational Journal of Coal Geology 107, pp. 3-23, 2013.
25. **Stojanović K, Životić D, Šajnović A, Cvetković O, Nytoft H. P, Scheeder G**: *Drmno lignite field (Kostolac Basin, Serbia): origin and palaeoenvironmental implications from petrological and organic geochemical studies*, Journal of Serbian Chemical Society 77 (8), pp. 1109-1127, 2012.

26. **Živanović Titoslav**: *Postrojenja za pripremu ugljenog praha sa ventilatorskim mlinovima*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2000.
27. **Magdalinović Nedeljko**: *Usitnjavanje i klasiranje mineralnih sirovina*, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
28. **Bond C. Fred**: *Confirmation of the third theory*, AIME Trans, Vol. 217, pp 139-153, 1960.
29. **Novaković Ljubomir**: *Ugljena materija i njena meljivost*, Rudarski institut, Beograd 1976.
30. **Tatsuo Tanaka**: *Comminution laws – Several Probabilities*, I&EC Process Design and Development, Vol. 5 no. 4, October 1966.
31. ***: *ACARP – Hardgrove Grindability Index*, The Australian Coal industry's Research Program, September 2008.
32. **Lowry H. H**: *Chemistry of coal utilization, Volume I*, John Wiley & Sons, New York, 1945.
33. **Lowry H. H**: *Chemistry of coal utilization, Supplementary Volume*, John Wiley & Sons, New York, 1962.
34. ***: *ISO 5074:1994 – Hard coal – Determination of Hardgrove grindability index*, International Organization for Standardization, 1994.
35. ***: *ASTM D409/D409M-09ae1 – Standard Test Method for Grindability of Coal by the Hardgrove-Machine Method*, ASTM International, 2009.
36. ***: GOST 15489.1-93 – Brown coals, hard coals, anthracite and combustible shales. Methods for VTI determination of coefficient of grindability, Federal Agency on Technical Regulating and Metrology
37. **Magdalinović Nedeljko**: *Meljivost mineralnih sirovina*, Nauka, Beograd, 1997.
38. **Fred C. Bond**: *Crushing and grinding calculations*, Allis-Chalmers Bulletin 07R9235B, Milwaukee, 1961.
39. **Magdalinović Nedeljko**: *A procedure for rapid determination of the Bond Work Index*, International Journal of Mineral Processing 27, pp. 125-132, 1989.
40. **Tichanek Frantishek**: *Contribution to determination of coal grindability using Hardgrove method*, GeoScience Engineering, Volume LIV, No. 1, pp. 27-32, ISSN 1802-5420, 2008.

41. **Mucsi Gabor**: *Fast test method for the determination of the grindability of fine matherials*, Chemical Engineering Research and Design, Volume 86, pp. 395-400, 2008.
42. **Ganguli R, Bandopadhyay S**: *Field-scale investigation of pulverized coal mill power consumption*, Minerals&Metallurgical Processing, Vol. 25, No. 3, pp. 139-142, August 2008.
43. **Sengupta, Ambar Nath**: *An assessment of grindability index of coal*, Fuel Processing Technology, 76, pp. 1-10, 2002.
44. **Vuthaluru H. B, Zhang D. K, Yan H. M, Brooke R. J**: *Effects of moisture and coal blending on Hardgrove Grindability Index of Western Australian coal*, Fuel Processing Technology 81, pp. 67-76, 2003.
45. **Ural Suphi, Akyildiz Mustafa**: *Studies of the relationship between mineral matter and grinding properties for low-rank coals*, International Journal of Coal Geology 60, pp. 81-84, 2004.
46. **Csoke B, Bokanyi L, Bohm J, Petho Sz**: *Selective grindability of lignites and their application for producing an advanced fuel*, Applied Energy 74, pp. 359-368, 2003.
47. **Hower J. C**: *Interrelationship of coal grinding properties and coal petrology*, Minerals and Metallurgical Processing, 15(3), pp. 1-16, 1998.
48. **Hower J. C, Trimble A**: *Studies of the relationship between coal petrology and grinding properties*, International Journal of Coal Geology 54, pp. 253-260, 2003.
49. **Jorjani E, Hower J, Chelgani C, Shirazi M, Mesroghli Sh**: *Studies of relationship between petrography and elemental analysis with grindability for Kentucky coals*, Fuel 87, pp. 707-713, 2008.
50. **Chehreh Chelgani S, Hower J, Jorjani E, Mesroghli Sh, Bagherieh A. H**: *Prediction of coal grindability based on petrography, proximate and ultimate analysis using multiple regression and artificial neural network models*, Fuel Processing Technology 89, pp. 13-20, 2008.
51. **Bagherieh A. H, Hower J, Bagherieh A. R, Jorjani E**: *Studies of the relationship between petrography and grindability for Kentucky coals using artificial neural network*, International Journal of Coal Geology 73, pp. 130-138, 2008.

52. **Peisheng Li, Youhui Xiong, Dunxi Yu, Xuexin Sun**: *Prediction of grindability with multivariable regression and neural network in Chinese coal*, Fuel 84, pp. 2384-2388, 2005.
53. **Rao Venkoba B, Gopalakrishna**: *Hardgrove grindability index prediction using support vectro regression*, Int. J. Miner. Process. 91, pp. 55-59, 2009.
54. **Gülhan Özbayoğlu, Murat Özbayoğlu, Evren Özbayoğlu**: *Estimation of Hardgrove grindability index of Turkish coals by neural networks*, Int. J. Miner. Process. 85, pp. 93-100, 2008.
55. **Gomez Manuel, Hazen Kathleen**: *Prediction of coal grindability from exploration data*, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, report of investigations 7421, Washington, 1970.
56. **Lester E, Kingman S**: *Effect of Microwave Heating on the Physical and Petrografic Charactersitics of a U.K. Coal*, Energy&Fuels 18, pp. 140-147, 2004.
57. **Lester E, Kingman S**: *The effect of microwave pre-heating on five different coals*, Fuel 83, pp. 1941-1947, 2004.
58. **Marland S, Han B, Merchant A, Rowson N**: *The effect of microwave radiation on coal grindability*, Fuel 79, pp. 1283-1288, 2000.
59. **Lester Ed, Kingman Sam, Dodds Chris**: *Increased coal grindability as a result of microwave pretreatment at economic energy inputs*, Fuel 84, pp. 423-427, 2005.
60. **Samanli S**: *A comparison of the results obtained from grinding in a stirred media mill lignite coal samples treated with microwave and untreated samples*, Fuel 90, pp. 659-664, 2011.
61. **Sahoo B. K, De S, Meikap B. C**: *Improvment of grinding characteristics of Indian coal by microwave pre-treatment*, Fuel Processing Technology 92, pp. 1920-1928, 2011.
62. **Rubiera F, Arenillas A, Fuente E, Miles N, Pis J.J**: *Effect of the grinding behavior of coal blends on coal utilisation for combustion*, Powder Technology 105, pp. 351-356, 1999.
63. **Tiryaki B**: *Practical Assessment of the Grindability of Coal Using its Hardness Characteristics*, Rock Mechanics and Rock Engineering 38, pp. 145-151, 2005.

64. **Bhattacharya S, Anand V, Banerjee P**: *Estimation of grindability from sink-float test data for two different coals*, International Journal of Mineral Processing 53, pp. 99-106, 1998.
65. **Fengnian Shi, Weiran Zuo**: *Coal breakage characterisation – Part 1: Breakage testing with JKFBC*, Fuel 117, pp. 1148-1155, 2014.
66. **Fengnian Shi**: *Coal breakage characterisation – Part 2: Multi-component breakage modelling*, Fuel 117, pp. 1156-1162, 2014.
67. **Fengnian Shi**: *Coal breakage characterisation – Part 3: Applications of the multi-component model for HGI prediction and breakage simulations*, Fuel 117, pp. 1163-1169, 2014.
68. **Narayanan S. S, Whiten W. J**: *Determination of comminution characteristics from single particle breakage tests and its application to ball mill scale up*, Trans. Inst. Miner. Metall 97, pp. 115-124, 1988.
69. **Fengnian Shi, Kojovic Toni**: *Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect*, International Journal of Mineral Processing 82, pp. 156-163, 2007.
70. **Agus F, Waters P. L**: *Determination of the grindability of coals, shales and other minerals by a modified Hardgrove-machine method*, Fuel 50 (4), pp. 405-431, 1971.
71. **Joshi R. Narayan**: *Relative grindability of bituminous coals on volume basis*, Fuel 58 (6), pp. 477-478, 1979.
72. **Taylor G. H, Teichmüller M, Davis A, Diessel C. F. K, Littke R, Robert P**: *Organic petrology*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1998.
73. ***: *Methods for the Petrographic Analysis of Coal – Part 3: Method of Determing maceral Group Composition*, ISO 7404-3: 2009
74. **Radke M, Willsch H, Welte D. H**: *Preparative hydrocarbon group type determination by automated medium pressure liquid chromatography*, Analytical Chemistry 52, pp. 406-411, 1980.
75. **Meyers P. A, Lallier-Vergés E**: *Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates*, J. Paleolimnol. 21, pp. 345-372, 1999.
76. **Tyson R. V**: *Sedimentary Organic Matter*, Chapman & Hall, London, 615 p, 1995.

77. **Meyers P. A, Ishiwatari R**: *Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments*, Org. Geochem. 20, pp. 867-900, 1993.

78. **Edress N**: *Coalification, Coal Facies and Depositional Environment of the 9th to 12th Coal seams of the Jan Šverma Mine Group, Lampertice Member (Intra-Sudetic Basin, Czech Republic) from the View Point of Coal Petrology*, PhD Thesis, Charles University in Prague, Faculty of Sciences, 205 p, 2007.

79. **Bechtel A, Gruber W, Sachsenhofer R. F, Gratzer R, Lücke A, Püttmann W**: *Depositional environment of the Late Miocene Hausruck lignite (Alpine Foreland Basin): insights from petrography, organic geochemistry, and stable carbon isotopes*, Int. J. Coal Geol. 53, pp. 153-180, 2003.

80. **Bechtel A, Sachsenhofer R. F, Markic M, Gratzer R, Lücke A, Püttmann W**: *Paleoenvironmental implications from biomarker and stable isotope investigations on the Pliocene Velenje lignite seam (Slovenia)*, Org. Geochem. 34, pp. 1277-1298, 2003.

81. **Bechtel A, Markic M, Sachsenhofer R. F, Jelen B, Gratzer R, Lücke A, Püttmann W**: *Paleoenvironment of the upper Oligocene Trbovlje coal seam (Slovenia)*, Int. J. Coal Geol. 57, pp. 23-48, 2004.

82. **Bechtel A, Reischenbacher D, Sachsenhofer R. F, Gratzer R, Lücke A**: *Paleogeography and paleoecology of the upper Miocene Zillingdorf lignite (Austria)*, Int. J. Coal Geol. 69, pp. 119-143, 2007.

83. **Hagemann H. W, Hollerbach A**: *Relationship between the macropetrographic and organic geochemical composition of lignites*, In: Douglas, A. G, Maxwell, J. R. (Editors). Adv. Org. Geochem. Pergamon, London, pp. 631-638, 1979.

84. **Henderson W, Eglinton G, Simmonds P, Lovelock J. E**: *Thermal alteration as a contributory process to the genesis of petroleum*, Nature 219, pp. 1012-1014, 1968.

85. **Smith P. V**: *Studies on origin of petroleum: Occurrence of hydrocarbons in recent sediments*, AAPG Bull. 38, pp. 377-382, 1954.

86. **Avramidis P, Zelilidis A**: *Potential source rocks, organic geochemistry and thermal maturation in the southern depocenter (Kipourio-Grevena) of the Mesohellenic Basin, central Greece*, Int. J. Coal Geol. 71, pp. 554-567, 2007.

87. **Del Rio J. C, Philp R. P**: *High molecular weight hydrocarbons: a new frontier in organic geochemistry*, Trends Anal. Chem. 5, pp. 187-193, 1992.

88. **Philp R. P**: *High temperature gas chromatography for the analysis of fossil fuels*, J. High. Resolut. Chromatogr. 17, pp. 398-406, 1994.

89. **Philp R. P**: *Fossil Fuel Biomarkers: Applications and Spectra, Methods in Geochemistry and Geophysics*, Elsevier, Amsterdam, 294 p, 1985.

90. **Cranwell P. A**: *Organic geochemistry of Cam Loch (Sutherland) sediments*, Chem. Geol. 20, pp. 205-221, 1977.

91. **Waples D**: *Geochemistry in Petroleum Exploration*, International Human Resources Development Corporation, Boston, 232 p, 1985.

92. **Dehmer J**: *Petrological and organic geochemical investigation of recent peats with known environments of deposition*, Int. J. Coal Geol. 28, pp. 111-138, 1995.

93. **Ficken K. J, Li B, Swain D. L, Eglinton G**: *An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes*, Org. Geochem. 31, pp. 745-749, 2000.

94. **Nott C. J, Xie S, Avsejs L. A, Maddy D, Chambers F. M, Evershed R. P**: *n-Alkane distributions in ombrotrophic mires as indicators of vegetation change related to climate variation*, Org. Geochem. 31, pp. 231-235, 2000.

95. **Giger W, Schaffner C**: *Aliphatic, olefinic and aromatic hydrocarbons in recent sediments of a highly eutrophic lake*, In: Campos, R, Goni, J. (Eds), Advances in Organic Geochemistry, 1975. Pergamon, Oxford, pp. 375-390, 1977.

96. **Matsumoto G. I, Akiyama M, Watanuki K, Torii T**: *Unusual distribution of long-chain n-alkanes and n-alkenes in Antarctic soil*, Org. Geochem. 15, pp. 403-412, 1990.

97. **Otto A, Simoneit B. R. T**: *Chemosystematics and diagenesis of terpenoids in fossil conifer species and sediment from the Eocene Zeitz Formation, Saxony, Germany*, Geochim. Cosmochim. Acta 65, pp. 3505-3527, 2001.

98. **Allen J. E, Fornery F. W, Markovetz A. J**: *Microbial degradation of n-alkanes*, Lipids 6, pp. 448-452, 1971.

99. **Cranwell P. A, Eglinton G, Robinson N**: *Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments II*, Org. Geochem. 11, pp. 513-525, 1987.

100. **Otto A, Walther H, Püttmann W**: *Molecular composition of a leaf- and root bearing Oligocene oxbow Lake Clay, Weisselster Basin, Germany*, Org. Geochem. 22, pp. 275-286, 1995.
101. **Eglinton G, Hamilton, R. J**: *Leaf epicuticular waxes*, Science 156, pp. 1322-1335, 1967.
102. **Tissot B. T, Welte D. H**: *Petroleum Formation and Occurrences*, 2nd ed. Springer, Berlin, 699 p, 1984.
103. **Püttmann W, Bracke R**: *Extractable organic compounds in the clay mineral sealing of a waste disposal site*, Org. Geochem. 23, pp. 43-54, 1995.
104. **Bray E. E, Evans E. D**: *Distribution on n-paraffins as a clue to recognition of source beds*, Geochim. Cosmochim. Acta 22, pp. 2-15, 1961.
105. **Shimoyama A, Johns W. D**: *Formation of alkanes from fatty acids in the presence of* $CaCO_3$, Geochim. Cosmochim. Acta 36, pp. 87-91, 1972.
106. **Welte D. H, Waples O. W**: *Über die Bevorzugung geradzahliger n-Alkane in Sedimentgesteinen*, Naturwissenschaften 60, pp. 516-517, 1973.
107. **Vitorović D, Jovančićević B**: *Osnovi organske geohemije*, Hemijski fakultet Univerziteta u Beogradu, 249 st, 2005.
108. **Chappe B, Albrecht P, Michaelis W**: *Polar lipids of archaebacteria in sediments and petroleum*, Science 217, pp. 65-66, 1982.
109. **Goosens H, de Leeuw J. W, Schenck P. A, Brassell S. C**: *Tocopherols as likely precursors of pristane in ancient sediments and crude oils*, Nature 312, pp. 440-442, 1984.
110. **Illich H. A**: *Pristane, phytane and lower molecular weight isoprenoid distributions in oils*, AAPG Bull. 67, pp. 385-393, 1983.
111. **Rowland S. J**: *Production of acyclic isoprenoid hydrocarbons by laboratory maturation of methanogenic bacteria*, Org. Geochem. 15, pp. 9-16, 1990.
112. **ten Haven H. L, de Leeuw J. W, Rullkötter J, Sinninghe Damste J. S**: *Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a paleoenvironmental indicator*, Nature 330, pp. 641-643, 1987.
113. **Peters K. E, Moldowan J. M**: *The biomarker Guide. Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 363 p, 1993.

114. **Didyk B. M, Simoneit B. R. T, Brassel S. C, Eglinton G**: *Organic geochemical indicators of paleoenvironmental conditions of sedimentation*, Nature 272, pp. 216-222, 1978.

115. **Volkman J. K, Maxwell J. R**: *Acyclic isoprenoids as biological markers*, In: Johns, R.B. (Ed.) Biological Markers in the Sedimentary Record. Elsevier, New York, pp. 1-42, 1986.

116. **Tissot B. P, Califet-Debyser Y, Deroo G, Oudin, J. L**: *Origin and evolution of hydrocarbons in early Toarcian shales, Paris Basin, France*, AAPG Bull. 55, pp. 2177-2193, 1971.

117. **Alexander R, Kagi R. I, Woodhouse G. W**: *Geochemical correlation of Windalia oils and extracts of Winning Group (Cretaceous) potential source rocks, Barrow sub basin, Western Australia*, AAPG Bull. 65, pp. 235-250, 1981.

118. **Bechtel A, Gruber W, Sachsenhofer R. F, Gratzer R, Püttmann W**: *Organic geochemical and stable carbon isotopic investigation of coals formed in low-lying and raised mires within the Eastern Alps (Austria)*, Org. Geochem. 32, pp. 1289-1310, 2001.

119. **Brassell S. C, Eglinton G, Maxwell J. R**: *The geochemistry of terpenoids and steroids*, Biochem. Soc. Trans. 11, pp. 575-586, 1983.

120. **Otto A, Wilde V**: *Sesqui-, di- and triterpenoids as chemosystematic markers in extant conifers-a review*, Bot. Rev. 67, pp. 141-238, 2001.

121. **Sukh Dev**: *Terpenoids*, In Natural Products of Woody Plants I. (ed. Rowe J. W). Springer, Berlin, pp. 691-807, 1989.

122. **Otto A, Simoneit B. R. T, Rember W. C**: *Conifer and angiosperm biomarker in clay sediments and fossil plants from the Miocene Clarkia Formation, Idaho, USA*, Org. Geochem. 36, pp. 907-922, 2005.

123. **Otto A, Walther H, Püttmann W**: *Sesqui- and diterpenoid biomarkers preserved in Taxodium-rich Oligocene oxbow lake clays, Weisselster Basin, Germany*, Org. Geochem. 26, pp. 105-115, 1997.

124. **Simoneit B. R. T, Grimalt J. O, Wang T. G, Cox R. E, Hatcher P. G, Nissenbaum A**: *Cyclic terpenoids of contemporary resinous plant detritus and of fossil woods, amber and coal*, *Org. Geochem.* 10, pp. 877-889, 1986.

125. **Stefanova M, Markova K, Marinov S, Simoneit B. R. T**: *Molecular indicators for coal-forming vegetation of the Miocene Chukurovo lignite, Bulgaria*, Fuel 84, pp. 1830-1838, 2005.
126. **Corbet B, Albrecht P, Ourisson G**: *Photochemical or photomimetic fossil triterpenoids in sediments and petroleum*, J. Am. chem. Soc. 102, pp. 1171-1173, 1980.
127. **Schmitter J. M, Arpino P. J, Guiochon G**: *Isolation of degraded pentacyclic triterpenoid acids in a Nigerian crude oil and their identification as tetracyclic carboxylic acids resulting from ring A cleavage*, Geochim. Cosmochim. Acta I 45, pp. 1951-1955, 1981.
128. **ten Haven H. L, Rullkötter J**: *The diagenetic fate of taraxer-14-ene and oleanane isomers, Geochim*, Cosmochim. Acta 52, pp. 2543-2548, 1998.
129. **Bechtel A, Sachsenhofer R. F, Gratzer R, Lücke A, Püttmann W**: *Parameters determining the carbon isotopic composition of coal and fossil wood in the Early Miocene Oberdorf lignite seam (Styrian Basin, Austria)*, Org. Geochem. 33, pp. 1001-1024, 2002.
130. **Otto A, Simoneit B .R. T, William R. C**: *Resin compounds from the seed cines of three fossil conifer species from the Miocene Clarkia flora, Emerald Creek, Idaho, USA, and from related extant species*, Rev. Palaeobot. Palynol. 126, pp. 225-241, 2003.
131. **Farrimond P, Eglinton G, Brassell S. C, Jenkyns H.C**: *The Cenomanian/Turonian anoxic event in Europe: an organic geochemical study*, Marine Petrol. Geol. 7, pp. 78-89, 1990.
132. **Boon J. J, Hines H, Burlingame A. L, Klok J, Rijpstra W. I, de Leeuw J. W, Edmunds K. E, Eglinton G**: *Organic geochemical studies of Solar Lake laminated cyanobacterial mats*, In: Bjorøy, M. et al. (Eds) Advances in Organic Geochemistry 1981. Wiley and Sons, Chichester, pp. 207-227, 1983.
133. **Bennett B, Abbott G**: *A natural pyrolisis experiment – hopanes from hopanoic acids*, Org. Geochem. 30, pp. 1509-1516, 1999.
134. **Ourisson G, Albrecht P, Rohmer M**: *The hopanoids paleochemistry and paleobiochemistry of a group of natural products*, Pure Appl. Chem. 51, pp. 709-729, 1979.

135. **Kvenvolden K. A, Simoneit B. R. T**: *Hydrothermally derived petroleum: examples from Guaymas Basin, Gulf of California, and Escanaba Trough, northeast Pacific Ocean*, AAPG Bull. 74, pp. 223-237, 1990.

136. **van Dorselaer A, Albrecht P, Connan J**: *Changes in composition of polycyclic alkanes by thermal maturation (Yallourn Lignite, Australia)*, In: Campos, R, Goni, J. (Eds), Advances in Organic Geochemistry, Enadimsa, Madrid, pp. 53-59, 1975.

137. **Brassell S. C, Comet P. A, Eglinton G, Isaacson P. J, McEvoy J, Maxwell J. R, Thompson I. D, Tibbetts P. J. C, Volkman J. K**: *The origin and fate of lipids in the Japan Trench*, In: Douglas, A.G, Maxwell, J.R. (Eds), Advances in Organic Geochemistry, Pergamon Press, Oxford, pp. 375-392, 1980.

138. **Volkman J. K, Allen D. I, Stevenson P. L, Burton H. R**: *Bacterial and algal hydrocarbons from a saline Antarctic lake. Ace Lake*, Org. Geochem. 10, pp. 671-681, 1986.

139. **Wakeham S. G**: *Algal and bacterial hydrocarbons in particulate material and interfacial sediment of the Cariaco-Trench*, Geochim. Cosmochim. Acta 54, pp. 1325-1336, 1990.

140. **Sinninghe Damsté J. S, Rijpstra W. I. C, Schouten S, Fuerst J. A, Jetten M. S. M, Strous M**: *The occurrence of hopanoids in planctomycetes: implications for the sedimentary biomarker record*, Org. Geochem. 35, pp. 561-566, 2004.

141. **Wolff G. A, Ruskin N, Marshall J. D**, *Biogeochemistry of an early diagenetic concretion from the Birchi Bed (L. Lias, W. Dorset, U.K.)*, Org. Geochem. 19, pp. 431-444. 1992.

142. **Mackenzie A. S, Patience R. L, Maxwell J. R**: *Molecular changes and the maturation of sedimentary organic matter*, In: Atkinson, G, Zuckermann, J.J. (Eds), Proc. 3rd Annu. Karcher Symp. Origin and Chemistry of Petroleum. Pergamon Press, Oxford, pp. 1-31, 1981.

143. **Kohl W, Gloe A, Reichenbach H**: *Steroids from the myxobacterium Nannocystic exendes*, J. Gen. Microbiol. 129, pp. 1629-1635, 1983.

144. **McCaffrey M. A, Farrington J. W, Repeta D. J**: *Geochemical implications of the lipid composition of Thioploca spp. from the Peru upwelling region-15°S*, Org. Geochem. 14, pp. 61-68, 1989.

145. **Mackenzie A. S, Brassell S. C, Eglinton G, Maxwell J. R**: *Chemical fossils: The geological fate of steroids*, Science 217, pp. 491-504, 1982.

146. **Volkman J. K**: *A review of sterol biomarkers for marine and terrigenous organic matter*, Org. Geochem. 9, pp. 83-89, 1986.

147. **de Leeuw J. W, Cox H. C, van Graas G, van de Meer F. W, Peakman T. M, Baas J. M. A, van de Graaf V**: *Limited double bond isomerisation and selective hydrogenation of sterenes during early diagenesis*, Geochim. Cosmochim. Acta 53, pp. 903-909, 1989.

148. **Moldowan J. M, Seifert W. K, Gallegos E. J**: *Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rock*, AAPG Bull. 69, pp. 1255-1268, 1985.

149. **Rubinstein I, Sieskind O, Albrecht P**: *Rearranged steranes in a shale: Occurrence and simulated formations*, J. Chem. Soc. Perkin Transaction 1, pp. 1833-1836, 1975.

150. **Sieskind O, Joly G, Albrecht P**: *Simulation of the geochemical transformations of steroles. Superacid effects of clay minerals*, Geochim. Cosmochim. Acta 43, pp. 1675-1679, 1979.

151. **Moldowan J. M, Sundararaman P, Salvatori T, Alajbeg A, Đukić B, Lee C. Y, Demaison G. J**: *Source correlation and maturity assessment of select oils and rocks from the central Adriatic Basin (Italy and Yugoslavia)*, In: Moldowan, J. M, Albrecht, P, Philp, R. P. (Eds) Biological Markers in Sediments and Petroleum. Prentice Hall, New York, pp. 370-401. 1992.

152. **Volkman J. K, Barrett S. M, Blackburn S. I**: *Eustigmatophyte microalgae are potential sources of C29 sterols, C22–C28 n-alcohols and C28–C32 n-alkyl diols in freshwater environments*, Org. Geochem. 30, pp. 307-318, 1999.

153. **van Aarsen B. G. K, Cox H. C, Hoogendoorn N. P, de Leeuw J. W**: *A cadinene biopolimer in fossil and extant dammar resins as a source for cadinanes and biocadinanes in crude oils from South East Asia*, Geochim. Cosmochim. Acta 54, pp. 3021-3031, 1990.

154. **Haberer M. R, Mangelsdorf K, Wilkes H, Horsfield B**: *Occurrence and palaeoenvironmental significance of aromatic hydrocarbon biomarkers in*

Oligocene sediments from the Mallik 5L-38 Gas Hydrate Production Research Well (Canada), Org. Geochem. 37, pp. 519-538, 2006.

155. **Wakeham S. G, Schaffner C, Giger W**: *Polycyclic aromatic hydrocarbons in Recent lake sediments. II. Compounds derived from biological precursors during early diagenesis*, Geochim. Cosmochim. Acta 44, pp. 415-429, 1980.
156. **Alexander G, Hazai I, Grimalt J, Albaiges J**: *Occurrence and transformation of phyllocladane in brown coals from Nograd Basin, Hungary*, Geochim. Cosmochim. Acta 51, pp. 2065-2073, 1987.
157. **Oros D. R, Simoneit B. R. T**: *Identification of molecular tracers in organic aerosols from temperate climate vegetation subjected to biomass burning*, Aerosol Sci. Technol. 31, pp. 433-445, 1999.
158. **Dehmer J**: *Petrographische und organisch-geochemische Untersuchungen an rezenten Torfen und tertia¨ren Braunkohlen. Ein Beitrag zur Fazies und Genese geba¨nderter Braunkohlen*, Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation, Von der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Techischen Hochschule Aachen, Aachen, 304 p, 1988.
159. **Nakamura H, Sawada K, Takahashi M**: *Aliphatic and aromatic terpenoid biomarkers in Cretaceous and Paleogene angiosperm fossils from Japan*, Org. Geochem. 41, pp. 975-980, 2010.
160. **Otto A, Simoneit B. R. T**: *Biomarkers of Holocene buried conifer logs from Bella Coola and North Vancouver, British Columbia, Canada*, Organic Geochemistry 33, pp. 1241-1251, 2002.
161. **Stout S**: *Aliphatic and aromatic triterpenoid hydrocarbons in a Tertiary angiospermous lignite*, Org. Geochem. 18, pp. 51-66, 1992.
162. **Bechtel A, Reischenbacher A, Sachsenhofer R. F, Gratzer R, Lücke A, Püttmann W**: *Relations of petrogragraphical and geochemical parameters in the middle Miocene Lavantall lignite (Austria)*, Int. J. Coal Geol 70, pp. 325-349, 2007.
163. **Zdravkov A, Bechtel A, Sachsenhofer R. F, Kortenski J, Gratzer R**: *Vegetation differences and diagenetic changes between two Bulgarian lignite*

deposits – insights from coal petrology and biomarker composition, Org. Geochem. 42, pp. 237-254, 2011.

164. **Stefanova M, Oros D. R, Otto , Simoneit B. R. T**: *Polar aromatic biomarkers in the Miocene Maritza-East lignite, Bulgaria*, Org. Geochem. 33, pp. 1079-1091, 2002.
165. **Stefanova M, Markova K, Marinov S, Simoneit B. R. T**: *Biomarkers in the fossils from Miocene-aged Chukurovo lignite, Bulgaria: sesqui- and diterpenoids*, Bull. Geosci. 80, pp. 93-97, 2005.
166. **Marynowski L, Smolarek J, Bechtel A, Philippe M, Kurkiewicz S, Simoneit B. R. T**: *Perylene as an indicator of conifer fossil wood degradation by wood-degrading fungi*, Organic Geochemistry 59, pp. 143-151, 2013.
167. **Oikonomopoulos I. K, Perraki M, Tougiannidis N, Perraki T, Frey M. J, Antoniadis P, Ricken W**: *A comparative study on structural differences of xylite and matrix lignite lithotypes by means of FT-IR, XRD, SEM and TGA analyses: An example from the Neogene Greek lignite deposits*, International Journal of Coal Geology 115, pp. 1-12, 2013.
168. **Simić V, Đurić S, Životić D**: *Bentonitic clays of the Drmno Deposit (Kostolac Coal Field)*, Bulletin A,B – Geology, Hydrogeology and Engineering Geology 1450-8451, 47, pp. 107-126, 1997.
169. **Hower J. C, Graese A. M, Klapheke J. G**: *Influence of microlithotype composition on Hardgrove grindability for selected Eastern Kentucky coals*, International Journal of Coal Geology 7, pp. 227-244, 1987.
170. **Živanović T, Tucaković D, Brkić Lj, Ivljanin B, Galić R**: *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*, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu (evidencioni broj 09/07/24), Beograd, avgust 2009.
171. **Živanović T, Tucaković D, Brkić Lj, Stupar G, Ivljanin B, Galić R**: *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*,

Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu (evidencioni broj 10/09/24), Beograd, septembar 2010.

172. **Stanojević M, Radić D, Jovović A, Obradović M, Todorović D**: *Izveštaj o ispitivanju mlina M-12 na TENT B1 pre i posle rekonstrukcije*, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu (evidencioni broj 507/707/2010), Beograd, jul 2010.

173. **Stanojević M, Radić D, Jovović A, Obradović M, Todorović D**: *Izveštaj o ispitivanju mlinova posle rekonstrukcije na blokovima TENT B1 i B2 u cilju određivanja efekata rekonstrukcije*, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu (evidencioni broj 503/707/2011), Beograd, april 2011.

174. **Gulič M, Brkić Lj, Živanović T, Petković B**: *Proračun ventilatorskih mlinova*, Minel Kotlogradnja, Beograd 1982.

Prilog 1 – Pregled korelacionih izraza

Uzorci uglja kolubarskog basena

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – linearna regresija

U daljem tekstu su date zavisnosti vrednosti HGI od elemenata tehničke analize (udela vlage, pepela i isparljivih materija) izraženih na različitim uslovima. Dobijeni su sledeći izrazi:

$$HGI = 8,502 + 0,736 \cdot W - 0,649 \cdot V + 0,667 \cdot A,\ R^2 = 0,343, \quad \text{(P1.1)}$$

$$HGI = 15,373 + 0,658 \cdot WG - 0,578 \cdot V + 0,618 \cdot A,\ R^2 = 0,378, \quad \text{(P1.2)}$$

$$HGI = 59,16 - 1,63 \cdot W_h - 0,59 \cdot V + 0,283 \cdot A,\ R^2 = 0,383, \quad \text{(P1.3)}$$

$$HGI = 64,127 - 1,386 \cdot W_{h,a} - 0,27 \cdot V_a + 0,07 \cdot A_a,\ R^2 = 0,342, \quad \text{(P1.4)}$$

$$HGI = 67,766 - 1,272 \cdot W_{h,a} - 0,614 \cdot V,\ R^2 = 0,359, \quad \text{(P1.5)}$$

$$HGI = 68,131 - 1,482 \cdot W_{h,a} - 0,297 \cdot V_a,\ R^2 = 0,337, \quad \text{(P1.6)}$$

$$HGI = 50,328 + 0,233 \cdot A - 0,321 \cdot V_a,\ R^2 = 0,165, \quad \text{(P1.7)}$$

$$HGI = 40,128 + 0,375 \cdot W - 0,444 \cdot V_a,\ R^2 = 0,172. \quad \text{(P1.8)}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – nelinearna regresija

U daljem tekstu su date zavisnosti vrednosti HGI od elemenata tehničke analize (udela vlage, pepela i isparljivih materija) izraženih na različitim uslovima. Dobijeni su sledeći izrazi:

$$HGI = 319,606 - 11,179 \cdot W + 1,498 \cdot A - 1,983 \cdot V + 0,117 \cdot W^2 - \\ -0,025 \cdot A^2 + 0,030 \cdot V^2 \quad R^2 = 0,420, \quad \text{(P1.9)}$$

$$HGI = 130,148 - 7,517 \cdot W_{h,a} - 0,104 \cdot A_a - 1,810 \cdot V_a + \\ +0,263 \cdot W_{h,a}^2 + 0,002 \cdot A_a^2 + 0,021 \cdot V_a^2 \quad R^2 = 0,420, \quad \text{(P1.10)}$$

$$HGI = 779,836 - 21,382 \cdot W + 0,152 \cdot W^2 + 1,542 \cdot A - 0,042 \cdot A^2 - \\ -22,21 \cdot V + 0,085 \cdot V^2 - 0,015 \cdot W \cdot A + 0,341 \cdot W \cdot V + 0,062 \cdot A \cdot V \quad R^2 = 0,466, \quad \text{(P1.11)}$$

$$HGI = -81{,}115 + 15{,}501 \cdot W_{h,a} - 0{,}111 \cdot W_{h,a}^2 + 2{,}920 \cdot A_a - \\ -0{,}009 \cdot A_a^2 + 1{,}069 \cdot V_a + 0{,}048 \cdot V_a^2 - 0{,}064 \cdot W_{h,a} \cdot A_a - \\ -0{,}364 \cdot W_{h,a} \cdot V_a - 0{,}047 \cdot A_a \cdot V_a \quad R^2 = 0{,}510, \tag{P1.12}$$

$$HGI = 227{,}405 - 5{,}86 \cdot WG + 0{,}041 \cdot WG^2 + 1{,}572 \cdot A_a - \\ -0{,}014 \cdot A_a^2 - 5{,}050 \cdot V_a + 0{,}026 \cdot V_a^2 + 0{,}007 \cdot WG \cdot A_a + \\ +0{,}074 \cdot WG \cdot V_a - 0{,}016 \cdot A_a \cdot V_a \quad R^2 = 0{,}496, \tag{P1.13}$$

$$HGI = 156{,}832 - 5{,}791 \cdot WG + 1{,}583 \cdot A - 1{,}416 \cdot V + \\ +0{,}073 \cdot WG^2 - 0{,}024 \cdot A^2 + 0{,}020 \cdot V^2 \quad R^2 = 0{,}454, \tag{P1.14}$$

$$HGI = 174{,}278 - 5{,}657 \cdot WG + 0{,}902 \cdot A_a - 1{,}870 \cdot V_a + \\ +0{,}072 \cdot WG^2 - 0{,}008 \cdot A_a^2 + 0{,}020 \cdot V_a^2 \quad R^2 = 0{,}460. \tag{P1.15}$$

Zavisnost vrednosti HGI od litotipova

U daljem tekstu su date zavisnosti vrednosti HGI od litotipova. Dobijene su sledeće zavisnosti:

$$HGI = 44{,}231 + 0{,}136 \cdot BU - 0{,}236 \cdot TK - 5{,}483 \cdot DK - \\ -0{,}592 \cdot ZU + 1{,}689 \cdot MM_L \quad R^2 = 0{,}907, \tag{P1.16}$$

$$HGI = 42{,}754 + 0{,}049 \cdot BU - 0{,}323 \cdot TK + 1{,}505 \cdot MM_L, \; R^2 = 0{,}796, \tag{P1.17}$$

$$HGI = 53{,}885 - 0{,}389 \cdot TK - 5{,}617 \cdot DK - 1{,}142 \cdot ZU + 2{,}121 \cdot MM_L, \; R^2 = 0{,}899, \tag{P1.18}$$

$$HGI = 47{,}589 + 1{,}408 \cdot MM_L - 0{,}371 \cdot VLK - 0{,}048 \cdot TRK, \; R^2 = 0{,}796, \tag{P1.19}$$

$$HGI = 84{,}614 - 0{,}317 \cdot BU + 0{,}589 \cdot MM_L - 0{,}593 \cdot KSI, \; R^2 = 0{,}752, \tag{P1.20}$$

$$HGI = -348{,}957 + 4{,}062 \cdot BU + 5{,}923 \cdot ZU + 3{,}479 \cdot MM_L + \\ +3{,}724 \cdot KSI \quad R^2 = 0{,}892, \tag{P1.21}$$

$$HGI = 50{,}779 - 1{,}444 \cdot MM_L - 0{,}517 \cdot VLK + 0{,}036 \cdot TRK + \\ +0{,}419 \cdot MM_L^2 + 0{,}003 \cdot VLK^2 - 0{,}002 \cdot TRK^2 \quad R^2 = 0{,}830. \tag{P1.22}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i litotipova

$$HGI = 100{,}154 + 0{,}094 \cdot BU - 0{,}162 \cdot TK + 0{,}191 \cdot MM_L + \\ +0{,}085 \cdot W_{h,a} - 1{,}659 \cdot V_a \quad R^2 = 0{,}853, \tag{P1.23}$$

$$HGI = 24{,}404 - 0{,}141 \cdot KSI + 0{,}602 \cdot W_{h,a} - 0{,}112 \cdot V_a + 0{,}768 \cdot A_a, \; R^2 = 0{,}912, \tag{P1.24}$$

$$HGI = -4,314 - 0,132 \cdot KSI + 0,329 \cdot W_{h,a} + 0,638 \cdot V_a + \\ +0,851 \cdot A_a + 0,549 \cdot MM_L \quad R^2 = 0,917, \tag{P1.25}$$

$$HGI = 7,855 - 0,083 \cdot BU - 0,337 \cdot TK + 1,663 \cdot W_{h,a} + 0,940 \cdot A_a, \; R^2 = 0,941, \tag{P1.26}$$

$$HGI = 100,793 - 0,267 \cdot VLK + 0,257 \cdot MM_L - 1,482 \cdot V_a, \; R^2 = 0,845. \tag{P1.27}$$

Zavisnost vrednosti HGI od petrografskog sastava

$$HGI = -342,147 + 3,889 \cdot HUM + 3,168 \cdot LIP + 4,849 \cdot MM_M, \; R^2 = 0,738, \tag{P1.28}$$

$$HGI = 63,002 - 0,544 \cdot Te - 0,059 \cdot De + 0,756 \cdot Ch - 0,367 \cdot Su, \; R^2 = 0,698, \tag{P1.29}$$

$$HGI = 44,710 - 0,326 \cdot Te + 1,450 \cdot Ch - 1,154 \cdot Su + 0,524 \cdot MM_M, \; R^2 = 0,762, \tag{P1.30}$$

$$HGI = -2437,801 + 56,287 \cdot HUM + 21,803 \cdot LIP - 8,073 \cdot MM_M - \\ -0,324 \cdot HUM^2 - 1,507 \cdot LIP^2 + 0,539 \cdot MM_M^2 \quad R^2 = 0,928, \tag{P1.31}$$

$$HGI = 46,193 - 1,315 \cdot Te + 1,371 \cdot De + 0,485 \cdot Ch + 12,861 \cdot Su + \\ +0,015 \cdot Te^2 - 0,030 \cdot De^2 - 0,057 \cdot Ch^2 - 3,982 \cdot Su^2 \quad R^2 = 0,755, \tag{P1.32}$$

$$HGI = -65,009 + 3,788 \cdot Te + 13,450 \cdot Ch + 2,741 \cdot Su + \\ +0,100 \cdot MM_M - 0,053 \cdot Te^2 - 1,306 \cdot Ch^2 - 0,170 \cdot Su^2 + \\ +0,050 \cdot MM_M^2 \quad R^2 = 0,878. \tag{P1.33}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i petrografskog sastava

$$HGI = 43,882 - 0,112 \cdot HUM - 0,770 \cdot LIP + 1,040 \cdot INER - \\ -0,395 \cdot V_a + 0,116 \cdot W_{h,a} + 0,713 \cdot A_a \quad R^2 = 0,878, \tag{P1.34}$$

$$HGI = 99,374 - 0,265 \cdot Te + 1,062 \cdot Ch - 1,081 \cdot Su + \\ +0,217 \cdot MM_M - 1,612 \cdot V_a + 0,722 \cdot W_{h,a} \quad R^2 = 0,873, \tag{P1.35}$$

$$HGI = 24,708 - 0,252 \cdot Te - 0,003 \cdot De - 0,179 \cdot MM_M - \\ -0,222 \cdot V_a + 1,284 \cdot W_{h,a} + 0,859 \cdot A_a \quad R^2 = 0,918, \tag{P1.36}$$

$$HGI = 8,910 + 0,922 \cdot HUM + 1,387 \cdot MM_M - 1,553 \cdot V_a, \; R^2 = 0,844, \tag{P1.37}$$

$$HGI = -53,035 + 1,151 \cdot HUM + 1,810 \cdot MM_M - 1,816 \cdot W_{h,a}, \; R^2 = 0,795, \tag{P1.38}$$

$$HGI = -24,736 + 0,466 \cdot HUM + 0,683 \cdot MM_M + 0,735 \cdot A_a, \; R^2 = 0,878. \tag{P1.39}$$

Uzorci uglja kostolačkog basena

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – linearna regresija

U daljem tekstu su date zavisnosti vrednosti HGI od elemenata tehničke analize (udela vlage, pepela i isparljivih materija) izraženih na različitim uslovima. Dobijeni su sledeći izrazi:

$$HGI = 71,423 - 0,389 \cdot W - 0,605 \cdot V + 0,052 \cdot A,\ R^2 = 0,429, \quad \text{(P1.40)}$$

$$HGI = 73,0073 - 0,491 \cdot WG - 0,634 \cdot V + 0,063 \cdot A,\ R^2 = 0,461, \quad \text{(P1.41)}$$

$$HGI = 48,591 + 1,074 \cdot W_h - 0,718 \cdot V + 0,165 \cdot A,\ R^2 = 0,410, \quad \text{(P1.42)}$$

$$HGI = 53,649 + 0,439 \cdot W_{h,a} - 0,500 \cdot V_a + 0,071 \cdot A_a,\ R^2 = 0,442, \quad \text{(P1.43)}$$

$$HGI = 59,910 - 0,062 \cdot W_{h,a} - 0,703 \cdot V,\ R^2 = 0,330, \quad \text{(P1.44)}$$

$$HGI = 59,851 + 0,144 \cdot W_{h,a} - 0,511 \cdot V_a,\ R^2 = 0,413, \quad \text{(P1.45)}$$

$$HGI = 56,743 + 0,081 \cdot A - 0,451 \cdot V_a,\ R^2 = 0,433, \quad \text{(P1.46)}$$

$$HGI = 68,344 - 0,241 \cdot W - 0,436 \cdot V_a,\ R^2 = 0,433. \quad \text{(P1.47)}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize – nelinearna regresija

U daljem tekstu su date zavisnosti vrednosti HGI od elemenata tehničke analize (udela vlage, pepela i isparljivih materija) izraženih na različitim uslovima. Dobijeni su sledeći izrazi:

$$HGI = -135,264 + 5,670 \cdot W + 1,677 \cdot A + 5,360 \cdot V - 0,078 \cdot W^2 - \\ -0,030 \cdot A^2 - 0,131 \cdot V^2 \quad R^2 = 0,503, \quad \text{(P1.48)}$$

$$HGI = 11,110 - 3,113 \cdot W_{h,a} + 0,925 \cdot A_a + 1,887 \cdot V_a + 0,197 \cdot W_{h,a}^2 - \\ -0,010 \cdot A_a^2 - 0,035 \cdot V_a^2 \quad R^2 = 0,470, \quad \text{(P1.49)}$$

$$HGI = 1375,518 - 55,909 \cdot W + 0,514 \cdot W^2 - 20,848 \cdot A + \\ +0,006 \cdot A^2 + 10,715 \cdot V - 0,067 \cdot V^2 + 0,566 \cdot W \cdot A - \\ -0,126 \cdot W \cdot V - 0,106 \cdot A \cdot V \quad R^2 = 0,742, \quad \text{(P1.50)}$$

$$HGI = 210,700 - 12,743 \cdot W_{h,a} - 0,523 \cdot W_{h,a}^2 - 0,449 \cdot A_a - \\ -0,010 \cdot A_a^2 - 5,485 \cdot V_a - 0,049 \cdot V_a^2 - 0,032 \cdot W_{h,a} \cdot A_a + \\ +0,695 \cdot W_{h,a} \cdot V_a + 0,049 \cdot A_a \cdot V_a \qquad R^2 = 0,538, \tag{P1.51}$$

$$HGI = 684,193 - 26,247 \cdot WG + 0,153 \cdot WG^2 - 8,588 \cdot A_a - \\ -0,016 \cdot A_a^2 + 1,251 \cdot V_a - 0,063 \cdot V_a^2 + 0,284 \cdot WG \cdot A_a + \\ +0,072 \cdot WG \cdot V_a + 0,005 \cdot A_a \cdot V_a \qquad R^2 = 0,770, \tag{P1.52}$$

$$HGI = -25,836 - 0,755 \cdot WG + 2,388 \cdot A + 6,243 \cdot V - \\ -0,001 \cdot WG^2 - 0,043 \cdot A^2 - 0,151 \cdot V^2 \qquad R^2 = 0,572, \tag{P1.53}$$

$$HGI = 1,737 - 0,476 \cdot WG + 1,308 \cdot A_a + 2,186 \cdot V_a - \\ -0,001 \cdot WG^2 - 0,015 \cdot A_a^2 - 0,037 \cdot V_a^2 \qquad R^2 = 0,521. \tag{P1.54}$$

Zavisnost vrednosti HGI od litotipova

U daljem tekstu su date zavisnosti vrednosti HGI od litotipova. Dobijene su sledeće zavisnosti:

$$HGI = 56,051 - 0,138 \cdot BU - 0,417 \cdot TK - 0,134 \cdot DK + \\ +0,050 \cdot ZU + 2,343 \cdot MM_L \qquad R^2 = 0,744, \tag{P1.55}$$

$$HGI = 54,023 - 0,126 \cdot BU - 0,363 \cdot TK + 2,405 \cdot MM_L, \quad R^2 = 0,720, \tag{P1.56}$$

$$HGI = 47,610 - 0,367 \cdot TK - 0,083 \cdot DK + 0,420 \cdot ZU + \\ +1,369 \cdot MM_L \qquad R^2 = 0,654, \tag{P1.57}$$

$$HGI = 43,869 + 2,482 \cdot MM_L - 0,291 \cdot VLK + 0,087 \cdot TRK, \quad R^2 = 0,639, \tag{P1.58}$$

$$HGI = 76,647 - 0,380 \cdot BU + 2,116 \cdot MM_L - 0,329 \cdot KSI, \quad R^2 = 0,557, \tag{P1.59}$$

$$HGI = 83,984 - 0,478 \cdot BU - 3,354 \cdot ZU + 2,962 \cdot MM_L - \\ -0,372 \cdot KSI \qquad R^2 = 0,587, \tag{P1.60}$$

$$HGI = 29,056 - 1,331 \cdot MM_L - 0,768 \cdot VLK + 1,430 \cdot TRK + \\ +2,344 \cdot MM_L^2 + 0,017 \cdot VLK^2 - 0,023 \cdot TRK^2 \qquad R^2 = 0,859. \tag{P1.61}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i litotipova

$$HGI = 46,580 - 0,142 \cdot BU - 0,476 \cdot TK + 2,933 \cdot MM_L + \\ +0,289 \cdot W_{h,a} + 0,201 \cdot V_a \qquad R^2 = 0,735, \tag{P1.62}$$

$$HGI = 52,848 - 0,051 \cdot KSI + 0,701 \cdot W_{h,a} - 0,575 \cdot V_a + 0,152 \cdot A_a,\ R^2 = 0,526, \quad \text{(P1.63)}$$

$$HGI = 53,087 - 0,037 \cdot KSI + 0,505 \cdot W_{h,a} - 0,517 \cdot V_a + \\ +0,118 \cdot A_a + 0,758 \cdot MM_L \quad R^2 = 0,543, \quad \text{(P1.64)}$$

$$HGI = 34,877 - 0,059 \cdot BU - 0,392 \cdot TK + 1,065 \cdot W_{h,a} + 0,175 \cdot A_a,\ R^2 = 0,552, \quad \text{(P1.65)}$$

$$HGI = 48,397 - 0,286 \cdot VLK + 2,256 \cdot MM_L - 0,054 \cdot V_a,\ R^2 = 0,574. \quad \text{(P1.66)}$$

Zavisnost vrednosti HGI od petrografskog sastava

$$HGI = 31,518 + 0,164 \cdot HUM + 0,086 \cdot LIP - 0,014 \cdot MM_M,\ R^2 = 0,131, \quad \text{(P1.67)}$$

$$HGI = 50,123 - 0,344 \cdot Te - 0,050 \cdot De + 0,236 \cdot Ch - 0,040 \cdot Su,\ R^2 = 0,554, \quad \text{(P1.68)}$$

$$HGI = 50,419 - 0,307 \cdot Te + 0,165 \cdot Ch - 0,033 \cdot Su - 0,087 \cdot MM_M,\ R^2 = 0,566, \quad \text{(P1.69)}$$

$$HGI = 45,813 - 0,225 \cdot Te + 0,099 \cdot Ul + 0,167 \cdot Su - 0,035 \cdot MM_M,\ R^2 = 0,578, \quad \text{(P1.70)}$$

$$HGI = 328,246 - 8,575 \cdot HUM + 0,042 \cdot LIP + 0,906 \cdot MM_M + \\ +0,063 \cdot HUM^2 - 0,001 \cdot LIP^2 - 0,031 \cdot MM_M^2 \quad R^2 = 0,649, \quad \text{(P1.71)}$$

$$HGI = 49,908 - 3,008 \cdot Te + 2,418 \cdot De + 6,617 \cdot Ch - 5,649 \cdot Su + \\ +0,068 \cdot Te^2 - 0,084 \cdot De^2 - 0,647 \cdot Ch^2 + 0,971 \cdot Su^2 \quad R^2 = 0,788, \quad \text{(P1.72)}$$

$$HGI = 74,045 - 3,556 \cdot Te + 8,178 \cdot Ch - 6,993 \cdot Su - 0,752 \cdot MM_M + \\ +0,080 \cdot Te^2 - 0,796 \cdot Ch^2 + 1,210 \cdot Su^2 + 0,029 \cdot MM_M^2 \quad R^2 = 0,731, \quad \text{(P1.73)}$$

$$HGI = 80,720 - 0,741 \cdot Te - 2,308 \cdot Ul - 2,891 \cdot Su + 1,737 \cdot MM_M + \\ +0,005 \cdot Te^2 + 0,038 \cdot Ul^2 + 0,378 \cdot Su^2 - 0,058 \cdot MM_M^2 \quad R^2 = 0,854. \quad \text{(P1.74)}$$

Zavisnost vrednosti HGI od tehničke analize i petrografskog sastava

$$HGI = 67,187 - 0,120 \cdot HUM + 0,008 \cdot LIP - 0,150 \cdot INER - \\ -0,714 \cdot V_a + 0,0,374 \cdot W_{h,a} + 0,163 \cdot A_a \quad R^2 = 0,551, \quad \text{(P1.75)}$$

$$HGI = 73,048 - 0,303 \cdot Te + 0,078 \cdot Ch + 0,081 \cdot Su + \\ +0,144 \cdot MM_M - 0,438 \cdot V_a - 1,220 \cdot W_{h,a} \quad R^2 = 0,830, \quad \text{(P1.76)}$$

$$HGI = 54,615 - 0,334 \cdot Te - 0,122 \cdot De + 0,240 \cdot MM_M - \\ -0,320 \cdot V_a - 0,451 \cdot W_{h,a} + 0,202 \cdot A_a \quad R^2 = 0,883, \quad \text{(P1.77)}$$

$$HGI = 67,028 - 0,004 \cdot HUM - 0,011 \cdot MM_M - 0,661 \cdot V_a,\ R^2 = 0,464, \quad \text{(P1.78)}$$

$$HGI = 40,458 + 0,098 \cdot HUM - 0,021 \cdot MM_M - 0,387 \cdot W_{h,a},\ R^2 = 0,138, \quad \text{(P1.79)}$$

$$HGI = 34,851 + 0,053 \cdot HUM + 0,012 \cdot MM_M + 0,108 \cdot A_a,\ R^2 = 0,171. \quad \text{(P1.80)}$$

Korelacione zavisnosti vrednosti HGI od karakteristika mlinskog postrojenja – kapacitet mlevenja određen skidanjem uglja sa trake i preko geometrije dozatora

$$HGI = 31,720 + 0,008 \cdot B - 0,176 \cdot D_{90} - 0,090 \cdot I + 0,506 \cdot W_{h,a} + \\ +1,410 \cdot A \quad R^2 = 0,414, \quad \text{(P1.81)}$$

$$HGI = -104,641 - 0,061 \cdot B + 0,124 \cdot D_{90} - 0,305 \cdot I + 3,366 \cdot W + \\ +2,454 \cdot A \quad R^2 = 0,486, \quad \text{(P1.82)}$$

$$HGI = 30,211 - 0,239 \cdot D_{90} - 5,231 \cdot I_{sp} + 0,319 \cdot W_{h,a} + 1,331 \cdot A,\ R^2 = 0,411, \quad \text{(P1.83)}$$

$$HGI = -1,045 - 0,048 \cdot B + 0,209 \cdot D_{90} - 0,061 \cdot I + 0,783 \cdot W_{h,a} + \\ +1,830 \cdot A + 0,667 \cdot W_{h,a,up} \quad R^2 = 0,522, \quad \text{(P1.84)}$$

$$HGI = -10,503 + 0,124 \cdot D_{90} + 0,696 \cdot I_{sp} + 0,548 \cdot W_{h,a} + 1,719 \cdot A + \\ +0,656 \cdot W_{h,a,up} \quad R^2 = 0,515, \quad \text{(P1.85)}$$

$$HGI = 4,978 \cdot B^{-0,184} \cdot \left(\ln \frac{100}{D_{90}} \right)^{-0,109} \cdot W_{h,a}^{0,328} \cdot W_{h,a,up}^{0,145} \cdot A^{0,619},\ R^2 = 0,520, \quad \text{(P1.86)}$$

$$HGI = 82,713 \cdot B^{0,098} \cdot \left(\ln \frac{100}{D_{90}} \right)^{0,038} \cdot W_{h,a}^{0,398} \cdot I^{-0,765} \cdot A^{0,598},\ R^2 = 0,448, \quad \text{(P1.87)}$$

$$HGI = 7,238 \cdot I_{sp}^{-0,283} \cdot D_{90}^{-0,135} \cdot W_{h,a}^{0,265} \cdot A^{0,555},\ R^2 = 0,426. \quad \text{(P1.88)}$$

Korelacione zavisnosti vrednosti HGI od karakteristika mlinskog postrojenja – kapacitet mlevenja određen preko protoka ugljenog praha

$$HGI = 37,063 - 0,138 \cdot B - 0,040 \cdot D_{90} - 0,020 \cdot I + 0,583 \cdot W_{h,a} + \\ +1,212 \cdot A \quad R^2 = 0,573, \quad \text{(P1.89)}$$

$$HGI = -102,636 - 0,140 \cdot B + 0,229 \cdot D_{90} - 0,221 \cdot I + 3,294 \cdot W + \\ +2,234 \cdot A \quad R^2 = 0,645, \quad \text{(P1.90)}$$

$$HGI = 6,806 - 0,161 \cdot D_{90} + 16,458 \cdot I_{sp} + 0,222 \cdot W_{h,a} + 1,015 \cdot A\,,\ R^2 = 0,560\,, \tag{P1.91}$$

$$HGI = 7,477 - 0,118 \cdot B + 0,209 \cdot D_{90} - 0,010 \cdot I + 0,741 \cdot W_{h,a} + \\ +1,527 \cdot A + 0,483 \cdot W_{h,a,up} \quad R^2 = 0,629\,, \tag{P1.92}$$

$$HGI = -22,298 + 0,154 \cdot D_{90} + 14,686 \cdot I_{sp} + 0,483 \cdot W_{h,a} + \\ +1,459 \cdot A + 0,545 \cdot W_{h,a,up} \quad R^2 = 0,635\,, \tag{P1.93}$$

$$HGI = 19,816 \cdot B^{-0,511} \cdot \left(\ln \frac{100}{D_{90}} \right)^{-0,252} \cdot W_{h,a}^{0,426} \cdot W_{h,a,up}^{0,130} \cdot A^{0,618}\,,\ R^2 = 0,689\,, \tag{P1.94}$$

$$HGI = 154,975 \cdot B^{-0,492} \cdot \left(\ln \frac{100}{D_{90}} \right)^{-0,020} \cdot W_{h,a}^{0,367} \cdot I^{-0,253} \cdot A^{0,501}\,,\ R^2 = 0,605\,, \tag{P1.95}$$

$$HGI = 12,764 \cdot I_{sp}^{0,502} \cdot D_{90}^{-0,129} \cdot W_{h,a}^{0,149} \cdot A^{0,399}\,,\ R^2 = 0,574\,. \tag{P1.96}$$

Korelacione zavisnosti potrošnje električne energije (linearne) – kapacitet mlevenja određen skidanjem uglja sa trake i preko geometrije dozatora

$$I_{sp} = 1,118 - 0,004 \cdot D_{90}\,,\ R^2 = 0,072\,, \tag{P1.97}$$

$$I_{sp} = 0,990 + 0,005 \cdot D_{90} + 0,002 \cdot HGI\,,\ R^2 = 0,091\,, \tag{P1.98}$$

$$I_{sp} = 1,428 + 0,005 \cdot D_{90} + 0,002 \cdot HGI - 0,008 \cdot W\,,\ R^2 = 0,105\,, \tag{P1.99}$$

$$I_{sp} = 1,062 + 0,005 \cdot D_{90} + 0,002 \cdot HGI - 0,003 \cdot W_{h,a}\,,\ R^2 = 0,095\,, \tag{P1.100}$$

$$I_{sp} = 1,348 - 0,001 \cdot D_{90} + 0,003 \cdot HGI - 0,011 \cdot W_{h,a,up}\,,\ R^2 = 0,244\,, \tag{P1.101}$$

$$I_{sp} = 1,283 + 0,003 \cdot HGI - 0,010 \cdot W_{h,a,up}\,,\ R^2 = 0,241\,, \tag{P1.102}$$

$$I = 149,218 + 0,985 \cdot D_{90} - 0,045 \cdot HGI\,,\ R^2 = 0,401\,, \tag{P1.103}$$

$$I = 16,799 + 1,045 \cdot D_{90} + 0,206 \cdot HGI + 2,390 \cdot W\,,\ R^2 = 0,523\,, \tag{P1.104}$$

$$I = 111,693 + 1,008 \cdot D_{90} + 0,201 \cdot HGI + 1,354 \cdot W_{h,a}\,,\ R^2 = 0,508\,, \tag{P1.105}$$

$$I = 163,676 + 0,742 \cdot D_{90} - 0,025 \cdot HGI - 0,443 \cdot W_{h,a,up}\,,\ R^2 = 0,424\,, \tag{P1.106}$$

$$I = 135,887 + 0,965 \cdot D_{90} - 0,015 \cdot HGI + 0,088 \cdot B\,,\ R^2 = 0,407\,. \tag{P1.107}$$

Korelacione zavisnosti potrošnje električne energije (linearne) – kapacitet mlevenja određen preko protoka ugljenog praha

$$I_{sp} = 1,517 - 0,007 \cdot D_{90},\ R^2 = 0,084, \tag{P1.108}$$

$$I_{sp} = 0,749 - 0,002 \cdot D_{90} + 0,014 \cdot HGI,\ R^2 = 0,353, \tag{P1.109}$$

$$I_{sp} = 0,745 - 0,002 \cdot D_{90} + 0,014 \cdot HGI + 6,370 \cdot 10^{-5} \cdot W,\ R^2 = 0,353, \tag{P1.110}$$

$$I_{sp} = 0,678 - 0,002 \cdot D_{90} + 0,015 \cdot HGI + 0,003 \cdot W_{h,a},\ R^2 = 0,355, \tag{P1.111}$$

$$I_{sp} = 0,758 - 0,002 \cdot D_{90} + 0,014 \cdot HGI + 0,000 \cdot W_{h,a,up},\ R^2 = 0,353, \tag{P1.112}$$

$$I_{sp} = 0,621 + 0,015 \cdot HGI + 0,002 \cdot W_{h,a,up},\ R^2 = 0,349, \tag{P1.113}$$

$$I = 149,218 + 0,985 \cdot D_{90} - 0,045 \cdot HGI,\ R^2 = 0,401, \tag{P1.114}$$

$$I = 16,799 + 1,045 \cdot D_{90} + 0,206 \cdot HGI + 2,390 \cdot W,\ R^2 = 0,523, \tag{P1.115}$$

$$I = 111,693 + 1,008 \cdot D_{90} + 0,201 \cdot HGI + 1,354 \cdot W_{h,a},\ R^2 = 0,508, \tag{P1.116}$$

$$I = 163,676 + 0,742 \cdot D_{90} - 0,025 \cdot HGI - 0,443 \cdot W_{h,a,up},\ R^2 = 0,424, \tag{P1.117}$$

$$I = 124,443 + 0,858 \cdot D_{90} + 0,197 \cdot HGI + 0,131 \cdot B,\ R^2 = 0,443. \tag{P1.118}$$

Korelacione zavisnosti kapaciteta mlevenja i potrošnje električne energije od vrednosti HGI i tehničke analize (bez pepela) – kapacitet mlevenja određen skidanjem uglja sa trake i preko geometrije dozatora

$$B = 229,030 \cdot HGI^{-0,114} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,042},\ R^2 = 0,124, \tag{P1.119}$$

$$B = 104,671 \cdot HGI^{-0,114} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,019} \cdot I^{0,147},\ R^2 = 0,133, \tag{P1.120}$$

$$B = 123,877 \cdot HGI^{-0,076} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,138} \cdot W_{h,a}^{0,136} \cdot W_{h,a,up}^{0,056},\ R^2 = 0,345, \tag{P1.121}$$

$$B = 117,304 \cdot HGI^{-0,057} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,049} \cdot W_{h,a}^{0,156},\ R^2 = 0,229, \tag{P1.122}$$

$$B = 169,447 \cdot HGI^{-0,055} \cdot R_{90}^{-0,101} \cdot W_{h,a}^{0,157}, \; R^2 = 0,228, \tag{P1.123}$$

$$B = 309,374 \cdot HGI^{-0,049} \cdot R_{90}^{-0,136} \cdot W_{h,a}^{0,173} \cdot I^{-0,101}, \; R^2 = 0,232, \tag{P1.124}$$

$$B = 274,245 \cdot HGI^{-0,072} \cdot R_{90}^{-0,303} \cdot W_{h,a}^{0,128} \cdot I^{0,065} \cdot W_{h,a,up}^{0,065}, \; R^2 = 0,362, \tag{P1.125}$$

$$B = 28,772 \cdot HGI^{-0,046} \cdot R_{90}^{-0,307} \cdot W^{0,784} \cdot I^{-0.028} \cdot W_{h,a,up}^{0,052}, \; R^2 = 0,396, \tag{P1.126}$$

$$B = 14,879 \cdot HGI^{-0,015} \cdot R_{90}^{-0,194} \cdot W^{1,070} \cdot I^{-0,202}, \; R^2 = 0,322, \tag{P1.127}$$

$$B = 7,657 \cdot HGI^{-0,021} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,090} \cdot W^{1,044} \cdot I^{-0,191}, \; R^2 = 0,319, \tag{P1.128}$$

$$B = 4,662 \cdot HGI^{-0,032} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,057} \cdot W^{0,921}, \; R^2 = 0,307, \tag{P1.129}$$

$$I = 14,431 \cdot HGI^{0,058} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,179} \cdot W^{0,764} \cdot B^{-0,105}, \; R^2 = 0,545, \tag{P1.130}$$

$$I = 12,360 \cdot HGI^{0,060} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,173} \cdot W^{0,667}, \; R^2 = 0,535, \tag{P1.131}$$

$$I = 110,381 \cdot HGI^{0,054} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,167} \cdot W_{h,a}^{0,148}, \; R^2 = 0,534, \tag{P1.132}$$

$$I = 210,937 \cdot HGI^{0,005} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,124} \cdot W_{h,a,up}^{-0,023}, \; R^2 = 0,429, \tag{P1.133}$$

$$I = 107,445 \cdot HGI^{0,064} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,123} \cdot W_{h,a}^{0,157} \cdot W_{h,a,up}^{-0,028}, \; R^2 = 0,572. \tag{P1.134}$$

Korelacione zavisnosti kapaciteta mlevenja i potrošnje električne energije od vrednosti HGI i tehničke analize (bez pepela) – kapacitet mlevenja određen preko protoka ugljenog praha

$$B = 1074,793 \cdot HGI^{-0,497} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,175}, \; R^2 = 0,469, \tag{P1.135}$$

$$B = 26,154 \cdot HGI^{-0,503} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,064} \cdot I^{0,700}, \; R^2 = 0,514, \tag{P1.136}$$

$$B = 663,210 \cdot HGI^{-0,451} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,180} \cdot W_{h,a}^{0,109} \cdot W_{h,a,up}^{-0,002},\ R^2 = 0,481, \tag{P1.137}$$

$$B = 663,160 \cdot HGI^{-0,452} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,183} \cdot W_{h,a}^{0,108},\ R^2 = 0,481, \tag{P1.138}$$

$$B = 2748,241 \cdot HGI^{-0,439} \cdot R_{90}^{-0,394} \cdot W_{h,a}^{0,114},\ R^2 = 0,486, \tag{P1.139}$$

$$B = 54,296 \cdot HGI^{-0,493} \cdot R_{90}^{-0,160} \cdot W_{h,a}^{0,007} \cdot I^{0,667},\ R^2 = 0,516, \tag{P1.140}$$

$$B = 52.989 \cdot HGI^{-0,498} \cdot R_{90}^{-0,226} \cdot W_{h,a}^{-0,007} \cdot I^{0,724} \cdot W_{h,a,up}^{0,023},\ R^2 = 0,520, \tag{P1.141}$$

$$B = 58,331 \cdot HGI^{-0,498} \cdot R_{90}^{-0,227} \cdot W^{-0,027} \cdot I^{0,723} \cdot W_{h,a,up}^{0,024},\ R^2 = 0,520, \tag{P1.142}$$

$$B = 43,086 \cdot HGI^{-0,485} \cdot R_{90}^{-0,172} \cdot W^{0,102} \cdot I^{0,642},\ R^2 = 0,516, \tag{P1.143}$$

$$B = 23,029 \cdot HGI^{-0,497} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,068} \cdot W^{0,052} \cdot I^{0,683},\ R^2 = 0,514, \tag{P1.144}$$

$$B = 25,981 \cdot HGI^{-0,503} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,064} \cdot W_{h,a}^{-0,002} \cdot I^{0,703},\ R^2 = 0,514, \tag{P1.145}$$

$$B = 113,208 \cdot HGI^{-0,443} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,187} \cdot W^{0,526},\ R^2 = 0,482, \tag{P1.146}$$

$$I = 8,233 \cdot HGI^{0,103} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,152} \cdot W^{0,598} \cdot B^{0,100},\ R^2 = 0,570, \tag{P1.147}$$

$$I = 12,360 \cdot HGI^{0,060} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,173} \cdot W^{0,667},\ R^2 = 0,535, \tag{P1.148}$$

$$I = 110,381 \cdot HGI^{0,054} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,167} \cdot W_{h,a}^{0,148},\ R^2 = 0,534, \tag{P1.149}$$

$$I = 210,937 \cdot HGI^{0,005} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,124} \cdot W_{h,a,up}^{-0,023},\ R^2 = 0,429, \tag{P1.150}$$

$$I = 107,445 \cdot HGI^{0,064} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,123} \cdot W_{h,a}^{0,157} \cdot W_{h,a,up}^{-0,028},\ R^2 = 0,572, \tag{P1.151}$$

Korelacione zavisnosti kapaciteta mlevenja i potrošnje električne energije od vrednosti HGI i tehničke analize – kapacitet mlevenja određen skidanjem uglja sa trake i preko geometrije dozatora

$$B = 166,410 \cdot HGI^{0,007} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,052} \cdot W_{h,a}^{0,057} \cdot A^{-0,108}, \; R^2 = 0,269, \tag{P1.152}$$

$$B = 7,521 \cdot HGI^{-0,020} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,057} \cdot W^{0,803} \cdot A^{-0,025}, \; R^2 = 0,308, \tag{P1.153}$$

$$B = 3,041 \cdot HGI^{-0,094} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,139} \cdot W^{1,025} \cdot A^{0,063} \cdot W_{h,a,up}^{0,054}, \; R^2 = 0,388, \tag{P1.154}$$

$$B = 129,075 \cdot HGI^{-0,067} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,134} \cdot W_{h,a}^{0,124} \cdot A^{-0,014} \cdot W_{h,a,up}^{0,054}, \; R^2 = 0,346, \tag{P1.155}$$

$$I = 64,847 \cdot HGI^{-0,049} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,164} \cdot W_{h,a}^{0,301} \cdot A^{0,169}, \; R^2 = 0,667, \tag{P1.156}$$

$$I = 64,893 \cdot HGI^{-0,048} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,163} \cdot W_{h,a}^{0,300} \cdot A^{0,168} \cdot W_{h,a,up}^{0,000}, \; R^2 = 0,667, \tag{P1.157}$$

$$I_{sp} = 0,506 \cdot HGI^{0,005} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,027} \cdot W_{h,a}^{0,188} \cdot A^{0,190} \cdot W_{h,a,up}^{-0,058}, \; R^2 = 0,376, \tag{P1.158}$$

Korelacione zavisnosti kapaciteta mlevenja i potrošnje električne energije od vrednosti HGI i tehničke analize – kapacitet mlevenja određen preko protoka ugljenog praha

$$B = 341,761 \cdot HGI^{-0,604} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,176} \cdot W_{h,a}^{0,313} \cdot A^{0,228}, \; R^2 = 0,515, \tag{P1.159}$$

$$B = 0,062 \cdot HGI^{-0,668} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,187} \cdot W^{2,384} \cdot A^{0,395}, \; R^2 = 0,548, \tag{P1.160}$$

$$B = 0,025 \cdot HGI^{-0,732} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,254} \cdot W^{2,612} \cdot A^{0,474} \cdot W_{h,a,up}^{0,041}, \; R^2 = 0,559, \tag{P1.161}$$

$$B = 261,207 \cdot HGI^{-0,683} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,258} \cdot W_{h,a}^{0,387} \cdot A^{0,328} \cdot W_{h,a,up}^{0,051},\ R^2 = 0,530, \tag{P1.162}$$

$$I = 64,847 \cdot HGI^{-0,049} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,164} \cdot W_{h,a}^{0,301} \cdot A^{0,169},\ R^2 = 0,667, \tag{P1.163}$$

$$I = 64,893 \cdot HGI^{-0,048} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,163} \cdot W_{h,a}^{0,300} \cdot A^{0,168} \cdot W_{h,a,up}^{0,000},\ R^2 = 0,667, \tag{P1.164}$$

$$I_{sp} = 0,362 \cdot HGI^{0,638} \cdot \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{-0,169} \cdot W_{h,a}^{-0,144} \cdot A^{-0,230} \cdot W_{h,a,up}^{-0,081},\ R^2 = 0,409. \tag{P1.165}$$

Prilog 2 – Fotografije litotipova

Barski ugalj (uzorak Kostolac 22)

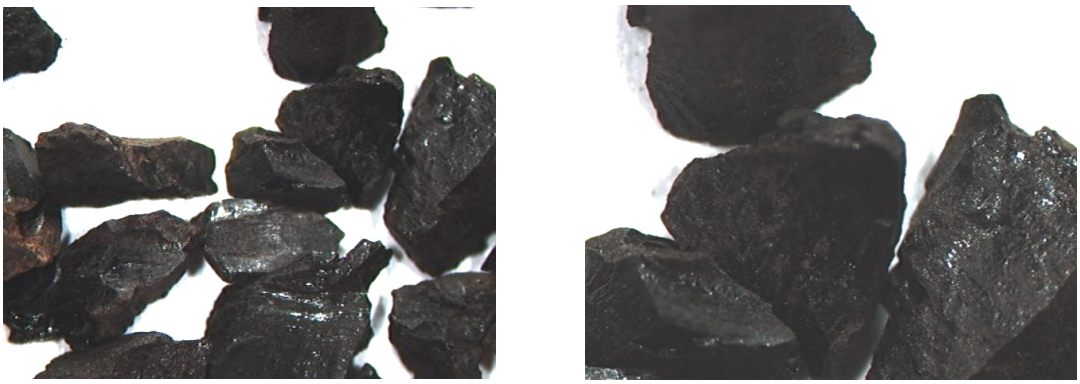
Mumificirani ksilit (uzorak Kolubara 23)

uzorak Kolubara 23 uzorak Kostolac 22

Trakasti ksilit

Strukturni ksilit (uzorak Kolubara 23)

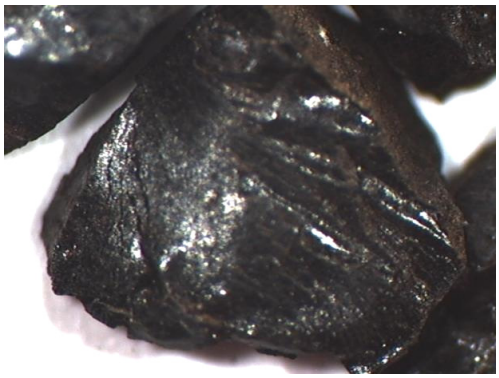
uzorak Kostolac 4



uzorak Kostolac 22

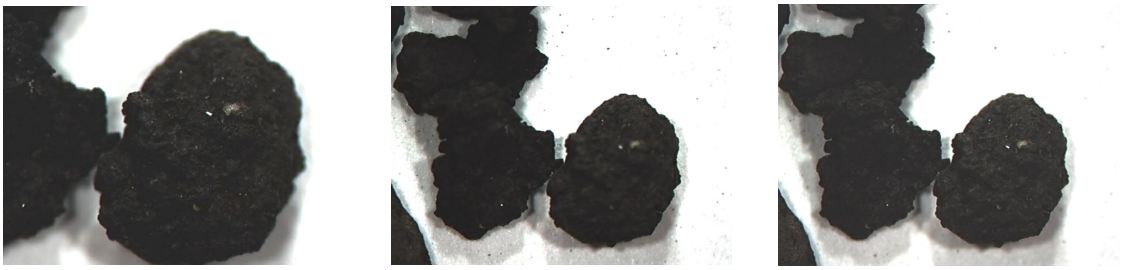
Dopleritski ksilit

Vlaknasti ksilit (uzorak Kolubara 23)

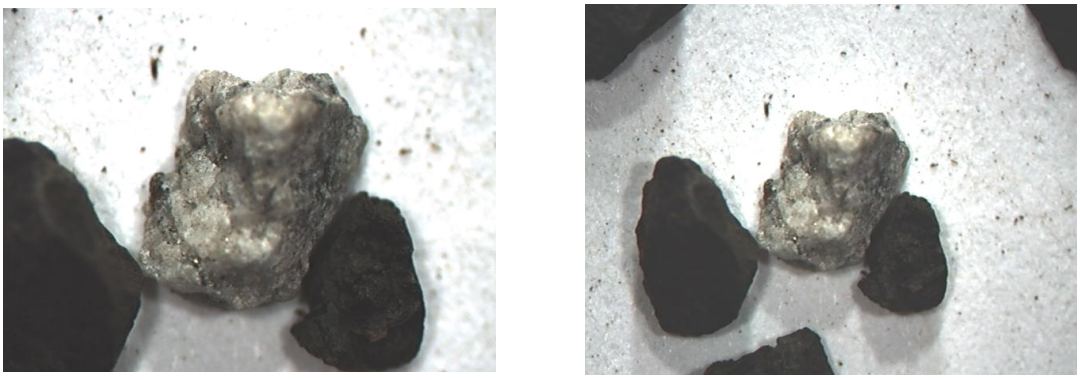


Dopleritski ugalj (uzorak Kostolac 22)

Fuzenizirani ugalj (uzorak Kostolac 4)

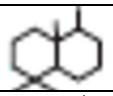
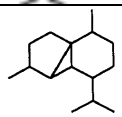
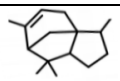
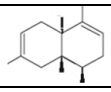
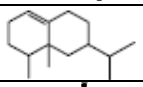
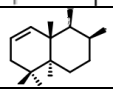
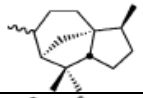
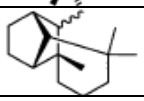
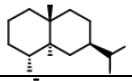
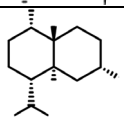
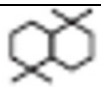
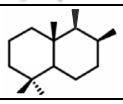


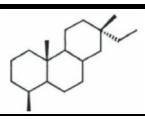
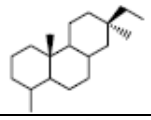
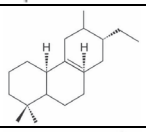
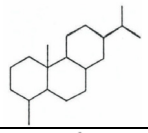
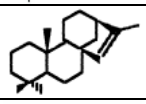
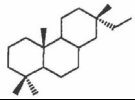
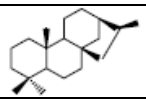
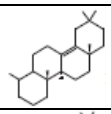
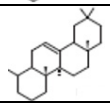
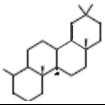
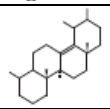
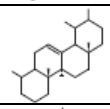
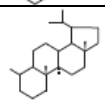
Zemljasti ugalj (uzorak Kostolac 22)

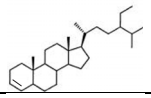
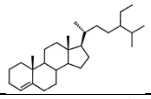
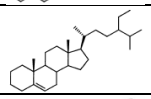
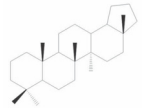
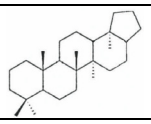
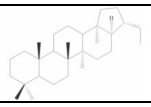
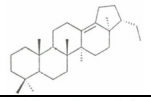
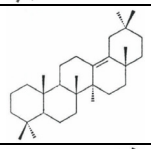
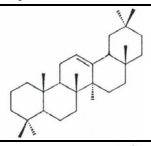
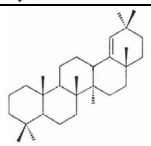
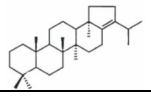
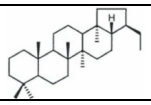


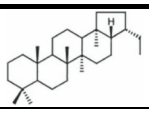
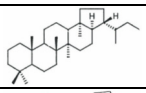
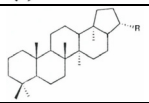
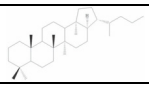
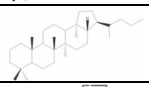
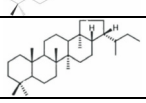
Mineralne materije (uzorak Kostolac 4)

Prilog 3 – Identifikacija pikova u masenim spektrima alkanske frakcije

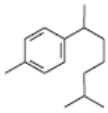
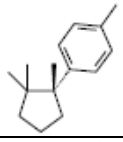
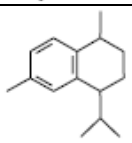
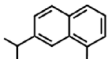
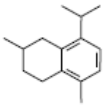
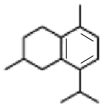
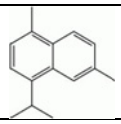
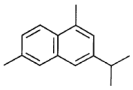
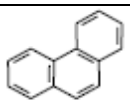
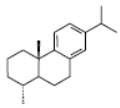
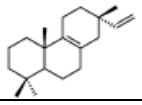
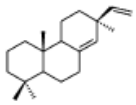
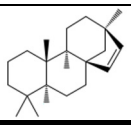
Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
***n*-C_{12} (dodekan)**	*n*-alkan	$C_{12}H_{26}$	170	57	
***n*-C_{13} (tridekan)**	*n*-alkan	$C_{13}H_{28}$	184	57	
C_{14} biciklicni seskviterpan	Seskvi-terpan	$C_{14}H_{26}$	194	81, 110	
Kubeben	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{24}$	204	81, 177	
Kedren	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{24}$	204	119	
***n*-C_{14} (tetradekan)**	*n*-alkan	$C_{14}H_{30}$	198	57	
Kadinen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{26}$	206	163	
Dihidrovalencen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{26}$	206	163	
Drimen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{26}$	206	191	
Kedran	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{26}$	206	123	
Longifolan	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{26}$	206	95	
4β-Eudesman	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{28}$	208	109	
Kadinan	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{28}$	208	109	
C_{15} biciklicni seskviterpan	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{28}$	208	123	
C_{15} biciklicni seskviterpan	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{28}$	208	96	
***n*-C_{15} (pentadekan)**	*n*-alkan	$C_{15}H_{32}$	212	57	
***n*-C_{16} (heksadekan)**	*n*-alkan	$C_{16}H_{34}$	226	57	
Norpristan	Izoprenoidni alkan		254	183	
***n*-C_{17} (heptadekan)**	*n*-alkan	$C_{17}H_{36}$	240	57	
Pristan	Izoprenoidni alkan	$C_{19}H_{40}$	268	57	
***n*-C_{18} (oktadekan)**	*n*-alkan	$C_{18}H_{38}$	254	57	
Fitan	Izoprenoidni alkan	$C_{20}H_{40}$	282	57	

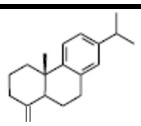
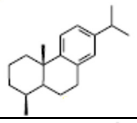
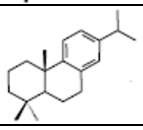
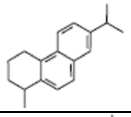
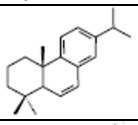
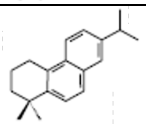
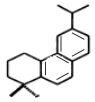
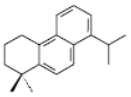
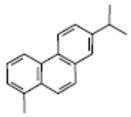
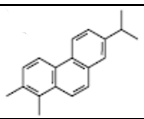
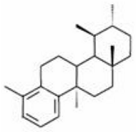
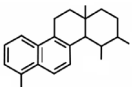
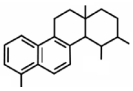
Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
Izonorpimaran	Diterpan	$C_{19}H_{34}$	262	233	
***n*-C_{19} (nanodekan)**	*n*-alkan	$C_{19}H_{40}$	268	57	
Norpimaran	Diterpan	$C_{19}H_{34}$	262	233	
Dihidrorimuen	Diterpan	$C_{20}H_{34}$	274	259	
Norabietan	Diterpan	$C_{19}H_{34}$	262	109	
Izofilokladen	Diterpan	$C_{20}H_{32}$	272	120	
Pimaran	Diterpan	$C_{20}H_{36}$	276	95	
***n*-C_{20} (eikosan)**	*n*-alkan	$C_{20}H_{42}$	282	57	
16α(H)-filokladan	Diterpan	$C_{20}H_{34}$	274	123	
***n*-C_{21} (heneikosan)**	*n*-alkan	$C_{21}H_{44}$	296	57	
***n*-C_{22} (dokosan)**	*n*-alkan	$C_{22}H_{46}$	310	57	
***n*-C_{23} (trikosan)**	*n*-alkan	$C_{23}H_{48}$	324	57	
***n*-C_{24} (tetrakosan)**	*n*-alkan	$C_{24}H_{50}$	338	57	
De-A-olean-13(18)-en	De-A-Triterpan	$C_{24}H_{40}$	328	189	
De-A-olean-12-en	De-A-Triterpan	$C_{24}H_{40}$	328	203	
De-A-olean-18-en	De-A-Triterpan	$C_{24}H_{40}$	328	313	
De-A-urs-13(18)-en	De-A-Triterpan	$C_{24}H_{40}$	328	313	
De-A-urs-12-en	De-A-Triterpan	$C_{24}H_{40}$	328	218	
De-A-lupan	De-A-Triterpan	$C_{24}H_{42}$	330	123	
***n*-C_{25} (pentakosan)**	*n*-alkan	$C_{25}H_{52}$	352	57	
***n*-C_{26} (heksakosan)**	*n*-alkan	$C_{26}H_{54}$	366	57	

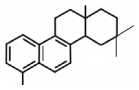
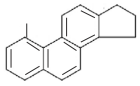
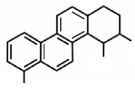
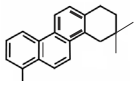
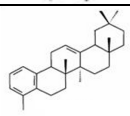
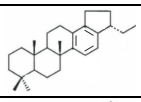
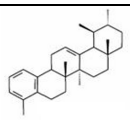
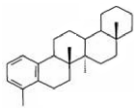
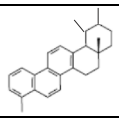
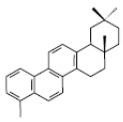
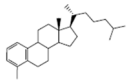
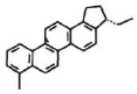
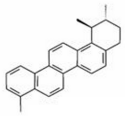
Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
***n*-C_{27} (heptakosan)**	*n*-alkan	$C_{27}H_{56}$	380	57	
***n*-C_{28} (oktakosan)**	*n*-alkan	$C_{28}H_{58}$	394	57	
Stigmast-3-en	Steren	$C_{29}H_{50}$	398	215	
Stigmast-4-en	Steren	$C_{29}H_{50}$	398	215	
Stigmast-5-en	Steren	$C_{29}H_{50}$	398	215	
C_{27}17α(H)-22,29,30-trisnorhopan	Hopan	$C_{27}H_{46}$	370	191	
***n*-C_{29} (nanokosan)**	*n*-alkan	$C_{29}H_{60}$	408	57	
C_{27}17β(H)-22,29,30-trisnorhopan	Hopan	$C_{27}H_{46}$	370	149	
***n*-C_{30} (triakontan)**	*n*-alkan	$C_{30}H_{62}$	422	57	
C_{29}17α(H)21β(H)-30-norhopan	Hopan	$C_{29}H_{50}$	398	108	
30-Norneohop-13(18)-en	Hopan	$C_{29}H_{50}$	396	191	
Olean-13(18)-en	Triterpan	$C_{30}H_{50}$	410	205	
Olean-12-en	Triterpan	$C_{30}H_{50}$	410	218	
Olean-18-en	Triterpan	$C_{30}H_{50}$	410	218	
Hop-17(21)-en	Hopan	$C_{30}H_{50}$	410	191	
***n*-C_{31} (hentriakontan)**	*n*-alkan	$C_{31}H_{64}$	436	57	
C_{29} 17β(H)21α(H)-30-normoretan	Hopan	$C_{29}H_{50}$	398	191	
C_{30} 17α(H)21β(H)-hopan	Hopan	$C_{30}H_{52}$	412	191	

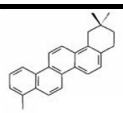
Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
C_{29} 17β(H)21β(H)-30-norhopan	Hopan	$C_{29}H_{50}$	398	177	
***n*-C_{32} (dotriakontan)**	*n*-alkan	$C_{32}H_{66}$	450	57	
C_{31} 17α(H)21β(H)-homohopan	Hopan	$C_{31}H_{54}$	426	191	
C_{30} 17β(H)21β(H)-hopan	Hopan	$C_{30}H_{52}$	412	191	
***n*-C_{33} (tritriakontan)**	*n*-alkan	$C_{33}H_{68}$	464	57	
C_{32}17α(H)21β(H)-bishomohopan	Hopan	$C_{33}H_{68}$	440	219	
C_{32}17β (H)21α (H)-bishomohopan	Hopan	$C_{32}H_{56}$	440	219	
C_{31}17β(H),21β(H)-homohopan	Hopan	$C_{31}H_{54}$	426	205	
***n*-C_{34} (tetratriakontan)**	*n*-alkan	$C_{34}H_{70}$	478	57	
***n*-C_{35} (pentatriakontan)**	*n*-alkan	$C_{35}H_{72}$	492	57	

Prilog 4 – Identifikacija pikova u masenim spektrima aromatične frakcije

Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
Dihidro-ar-kurkumen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{22}$	204	119	
Kuparen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{22}$	202	132	
Kalamenen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{22}$	202	159	
1-Metil, 7-izopropil naftalen (eudalen)	Seskvi-terpan	$C_{14}H_{16}$	184	169	
Kadina-1(10),6,8-trien	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{22}$	202	187, 159	
5,6,7,8-Tetrahidrokadalen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{22}$	202	187	
Kadalen	Seskv-iterpan	$C_{15}H_{18}$	198	183	
Izokadalen	Seskvi-terpan	$C_{15}H_{18}$	198	183	
Fenantren	Diterpan	$C_{14}H_{10}$	178	178	
19-Norabieta-8,11,13-trien	Diterpan	$C_{19}H_{28}$	256	241, 159	
Izopimaradien	Diterpan	$C_{20}H_{32}$	272	257	
Pimaradien	Diterpan	$C_{20}H_{32}$	272	137	
Hibaen	Diterpan	$C_{20}H_{32}$	272	134	

Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
18-Norabieta-6,8,11,13-tetraene	Diterpan	$C_{19}H_{26}$	254	239	
18-Norabieta-8,11,13-triene	Diterpan	$C_{19}H_{28}$	256	241, 159	
Dehidroabietan	Diterpan-monoaromatični	$C_{20}H_{30}$	270	255	
1,2,3,4-Tetrahydroretene	Diterpan	$C_{18}H_{22}$	238	223	
Abieta-6,8,11,13-tetraen	Diterpan	$C_{19}H_{24}$	268	197	
Simonelit	Diterpan-diaromatični	$C_{19}H_{24}$	252	237	
Totaran	Diterpan	$C_{19}H_{24}$	252	237, 195, 179	
Semperviran	Diterpan	$C_{19}H_{24}$	252	237, 193, 179, 207	
Reten	Diterpan	$C_{18}H_{18}$	234	219	
2-Metilreten	Diterpan	$C_{19}H_{20}$	248	233	
Pentametildodeka-hidrohrizen	Triterpan	$C_{24}H_{22}$	310	145	
3,4,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-octahidrohrizen izomer	Triterpan	$C_{22}H_{28}$	292	292	
3,4,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-octahidrohrizen	Triterpan	$C_{22}H_{28}$	292	207	

Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
3,3,7,12a-Tetrametil-1,2,3,4,4a,11,12,12a-octahidrohrizen	Triterpan	$C_{22}H_{28}$	292	292, 207	
1-Metil-6,7-(izopropilciklopentano) fenantren	Triterpan	$C_{21}H_{22}$	274	231	
3,4,7- Trimetil-1,2,3,4-tetrahidrohrizen	Triterpan	$C_{21}H_{22}$	274	259	
3,3,7-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidrohrizen	Triterpan	$C_{21}H_{22}$	274	218	
Perilen	Policiklična aromatična jedinjenja	$C_{20}H_{12}$	252	252	
24,25-Dinoroleana-1,3,5(10),12-tetraen	Triterpan	$C_{28}H_{40}$	376	145, 158	
Monoaromatični D-prsten hopan	Hopan	$C_{27}H_{40}$	364	211	
24,25-Dinorursa-1,3,5(10),12-tetraen	Triterpan	$C_{28}H_{40}$	376	145	
24,25-Dinorlupa-1,3,5(10)-trien	Triterpan	$C_{28}H_{42}$	378	145	
1,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a, 5,6,14b-octahidropicen	Triterpan	$C_{26}H_{30}$	342	257	
2,2,4a,9-Tetrametil-1,2,3,4,4a,5,6,14b-octahidropicen	Triterpan	$C_{26}H_{30}$	342	257	
4-Metil, 24-etil, 19-norcholesta-1,3,5(10)-trien	Triterpan	$C_{29}H_{46}$	394	211	
7-Metil, 3'-etil, 1,2-ciklopentanohrizen	Triterpan	$C_{24}H_{22}$	310	281	
1,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen	Triterpan	$C_{25}H_{24}$	324	324, 309	

Jedinjenje	Klasa jedinjenja	Formula	Molekulska masa (MW)	Bazni pik (*m/z*)	Strukturna formula
2,2,9-Trimetil-1,2,3,4-tetrahidropicen	Triterpan	$C_{25}H_{24}$	324	324, 268	

BIOGRAFIJA

Ime i prezime:	Marko Obradović
Datum rođenja:	13.12.1979. godine
Mesto rođenja:	Gornji Milanovac, Srbija
Porodično stanje:	neoženjen

Školovanje:

1990 – 1994	Osnovna škola „Takovski partizanski bataljon“ u Gornjem Milanovcu (nagrađen Vukovom diplomom)
1994 – 1998	Tehnička škola „Jovan Žujović“ u Gornjem Milanovcu (nagrađen Vukovom diplomom)
1998 – 2003	Studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu, odsek za procesnu tehniku. Tokom studija nagrađivan za postignut izvanredan uspeh. Diplomirao 16. jula 2003. godine sa srednjom ocenom 9,46 i ocenom 10 na diplomskom radu

Kretnje u poslu:

2003 – 2005	Mašinski fakultet Beograd, Katedra za procesnu tehniku, stipendista Fondacije za razvoj naučnog i umetničkog podmlatka
2005 – 2011	Mašinski fakultet Beograd, Katedra za procesnu tehniku, saradnik
2011 –	Mašinski fakultet Beograd, Katedra za procesnu tehniku, asistent

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани: Марко О. Обрадовић

број индекса: D10-6/03

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ИСТРАЖИВАЊЕ И КОМПАРАЦИЈА УТИЦАЈА КАРАКТЕРИСТИКА УГЉЕВА НИСКЕ ТОПЛОТНЕ ВРЕДНОСТИ НА ЊИХОВУ МЕЉИВОСТ И ПАРАМЕТРЕ ПРОЦЕСА МЛЕВЕЊА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 11.12.2014.

_____

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Марко О. Обрадовић

Број индекса: D10-6/03

Студијски програм: Докторске академске студије – Машинско инжењерство

Наслов рада: Истраживање и компарација утицаја карактеристика угљева ниске топлотне вредности на њихову мељивост и параметре процеса млевења

Ментор: проф. др Дејан Радић, дипл. инж. маш.

Потписани/а Марко О. Обрадовић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 11.12.2014.

_____

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ИСТРАЖИВАЊЕ И КОМПАРАЦИЈА УТИЦАЈА КАРАКТЕРИСТИКА УГЉЕВА НИСКЕ ТОПЛОТНЕ ВРЕДНОСТИ НА ЊИХОВУ МЕЉИВОСТ И ПАРАМЕТРЕ ПРОЦЕСА МЛЕВЕЊА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 11.12.2014.

_____

1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.