

NUMERIČKA SIMULACIJA KRETANJA ČESTICA UGLJENOG PRAHA PRILIKOM NAPUŠTANJA MLINSKOG SEPARATORA KROZ KANAL AEROSMEŠE

Ognjen STAMENKOVIĆ¹, Titoslav ŽIVANOVIĆ², Dragan TUCAKOVIĆ³, Goran STUPAR⁴

¹*Mašinski Fakultet, Beograd, Srbija, ostamenkovic@mas.bg.ac.rs CA*

²*Mašinski Fakultet, Beograd, Srbija, tzivanovic@mas.bg.ac.rs*

³*Mašinski Fakultet, Beograd, Srbija, dtucakovic@mas.bg.ac.rs*

⁴*Mašinski Fakultet, Beograd, Srbija, gstupar@mas.bg.ac.rs*

ABSTRAKT

U radu su prikazani rezultati numeričke simulacije kretanja čestica ugljenog praha prilikom napuštanja mlinskog inercijalnog separatora i ulaza u kanal aerosmeše. Korišćeni geometrijski model u simulacijama obuhvata inercijalni separator ugljenog praha i deo kanala aerosmeše u kome je analizirano strujanje dvokomponentne mešavine.

Model separatora identičan je inercijalnom separatoru ventilatorskog mlina N 400.42 koji je sastavni deo postrojenja za pripremu ugljenog praha u termoelektrani "Nikola Tesla" B.

Kanal aerosmeše predstavlja sledeći element nakon inercijalnog separatora kroz koji struji aerosmeša. U korišćenom geometrijskom modelu površina i oblik poprečnog preseka kanala konstantni su na celoj njegovoj dužini i identični su izlaznom poprečnom preseku inercijalnog separatora. Ovakva koncepcija odgovara novijim konstrukcijama kanala koje se ugrađuju prilikom rekonstrukcije postojećih višeetažnih gorionika u cilju ugradnje gorionika sa niskom emisijom azotnih oksida nakon sagorevanja.

Za potrebe proračuna strujanja dvokomponentne mešavine korišćen je kombinovani Oiler – Lagrange pristup. Oiler-ov pristup i k-ε turbulentni model korišćeni su za modeliranje strujanja gasne faze dok su trajektorije čestica ugljenog praha različitih frakcija sračunate primenom Lagrange-ovog DPM (Discrete Phase Model) modela.

Za potrebe definisanja graničnih uslova analiziranog strujnog prostora korišćena su merenja izvršena na realnom modelu inercijalnog separatora u eksploataciji. Dostupna merenja izvršena su u izlaznom poprečnom preseku predmetnog separatora pri jednom određenom položaju tri regulacione klapne. Raspored čestica u ulaznom poprečnom preseku separatora (izlazu iz mlina) variran je sve do postizanja poklapanja granulometrijske karakteristike ugljenog praha u izlaznom poprečnom preseku sa pomenutim merenjima.

Nakon postizanja poklapanja sa rezultatima merenja izvršenim na separatoru u eksploataciji u daljim simulacijama variran je položaj dve regulacione klapne: nezavisne klapne postavljene ispod plafona separatora a ispred „kragne“ izlaznog kanala i tri regulacione klapne vezane za zajednički pokretni mehanizam i postavljene u prelaznom, horizontalnom kanalu separatora. Analizirano je strujanje aerosmeše za više različitih položaja svake od pomenutih klapni. Nakon toga, razmatrano je kretanje čestica ugljenog praha različitih dimenzija u izlaznom prostoru separatora i ulazu u kanal aerosmeše. Dodatno, izvršena je analiza rasporeda čestica različitih dimenzija u dva poprečna preseka po visini dela kanala za aerosmešu.

Izvedeni zaključci na osnovu dobijenih rezultata mogu doprineti boljem uvidu u kretanje ugljenih čestica različitih dimenzija prilikom napuštanja separatora. Takođe, oni se mogu iskoristiti u cilju poboljšanja procesa razdvajanja frakcija čvrste faze u individualnim modifikovanim sistemima za pripremu ugljenog praha sa direktnim uduvavanjem kao i u kotlovima sa višeetažnim gorionicima.

Ključne reči: ugljeni prah, aerosmeša, inercijalni separator, razdvajanje frakcija

1. Uvod

U poslednje dve decenije proizvodnja [1] i potrošnja [2] uglja sa izuzetkom u periodu od 2014 - 2016. godine je u porastu. Pored eksploatacionih i ekoloških izazova koji se javljaju pri njegovom sagorevanju u odnosu na ostala fosilna goriva prosečna godišnja potrošnja uglja za proizvodnju električne energije u poslednje dve decenije pokazuje tendenciju daljeg rasta [3]. Tako danas ugalj kao fosilno gorivo učestvuje sa oko 38% u ukupnom konzumu potrošene primarne energije za potrebe proizvodnje električne energije na svetskom nivou [3, 4]. Pritom, treba naglasiti da je ovaj udeo u Evropi uz neznatna smanjenja konstantan od početka 21. veka do danas, dok se značajna ekspanzija može uočiti i dalje očekivati u Aziji [5].

U Republici Srbiji, skoro 70 % električne energije dobija se u elektranama na ugalj [6]. Trenutne dokazane rezerve uglja [6] na teritoriji Srbije nalažu da energetska politiku u budućnosti treba dalje graditi na principu proširenja baznih kapaciteta prvenstveno revitalizacijom starih i po mogućnosti izgradnjom novih elektrana u

kojima se ugalj koristi kao glavni izvor primarne energije. Time se obezbeđuje korišćenje već primenjene tehnologije sagorevanja uglja u sprasenom stanju u srpskim termoelektranama i održava balans između ukupne potrošnje i proizvodnje električne energije korišćenjem isključivo domaćih kapaciteta.

Skoro 95 % dokazanih rezervi u Srbiji pripada lignitu [7]. Lignit pripada grupi geološki mlađih ugljeva i kao takvog karakteriše ga visok procenat volatila u suvoj masi ali i visok procenat vlage u ukupnoj radnoj masi goriva [8,9]. Zbog toga, pre uvođenja u ložište, a u cilju ostvarivanja stabilnog sagorevanja u ložištu, ugalj se suši i melje u sistemima za pripremu ugljenog praha. Intenzivno mlevenje i sušenje uglja odvija se u mlinovima nakon čega se smeša transportnog fluida i ugljenog praha odvodi u mlinski separator. U separatoru, pod dejstvom osnovnih sila na čestice ugljenog praha (sila Zemljine teže, centrifugalna i inercijalna sila) vrši se razdvajanje krupnijih od sitnijih čestica. Krupnije čestice se recirkulacionim kanalima vraćaju na ponovno mlevenje dok se sitnije putem kanala za aerosmešu kroz ložišne gorionike uvode u ložište. Kvalitet procesa mlevenja i sušenja uglja u mlinu može se proceniti na osnovu kapaciteta mlevenja mlina, udela vlage i finoće mlevenja ugljenog praha u kanalu aerosmeše nakon napuštanja mlinskog separatora.

U slučaju primene višetažnih gorionika kanal aerosmeše se, ispred ložišnog zida, deli na više manjih kanala kroz koje struji aerosmeša, menja pravac strujanja i kroz gorionike ulazi u ložište. Razdvajanjem aerosmeše po etažama vrši se i razdvajanje ugljenog praha po frakcijama tako da se one u ložište parnog kotla uduvavaju na različitim visinama. Pritom, razdvajanje frakcija ugljenog praha treba organizovati tako da se krupnije čestice u ložište uduvavaju na nižim a sitnije na višim etažama gorionika. Time se obezbeđuje dovoljno vremena da krupnije i sitnije čestice u ložištu potpuno sagore čime se ložišni gubici, pre svega gubici u šljaci i pepelu, odnosno gubici usled nesagorelog u letećem pepelu, svode na minimalnu moguću meru.

Na karakter razdvajanja frakcija, pored ostalog, može se značajno uticati ukoliko se detaljnije istraži kretanje i raspored čestica ugljenog praha različitih dimenzija u oblasti izlaznog poprečnog preseka separatora i ulaza u kanal aerosmeše. U zavisnosti od rezultata i tačnosti aproksimacije razdvajanje bi se moglo izvršiti prostim deljenjem kanala aerosmeše na više delova pri čemu bi svaki od njih, ciljano, odvodio pojedine frakcije aerosmeše sa krupnijim ili sitnijim česticama ka gorionicima. Tako je moguće, u individualnim sistemima za pripremu ugljenog praha sa direktnim uduvavanjem i sušenjem po zatvorenom procesu, bez razdvajanja aerosmeše, izvršiti odgovarajuću separaciju čestica ugljenog praha pre njihovog uvođenja u višetažni gorionik.

U ovom radu prikazani su rezultati 3D numeričke simulacije kretanja čestica ugljenog praha u transportnom fluidu pri napuštanju inercijalnog separatora i ulaza u kanal aerosmeše. Prilikom izvođenja numeričkih simulacija strujanja dvofaznog fluida dobijena su rešenja primenom Oiler-Lagrange-ovog pristupa. Turbulentni naponi u fluidu modelirani su primenom $k-\epsilon$ dvojednačinskog modela. Kretanje čestica tretirano je Lagrange-ovim pristupom. Trajektorija čestica ugljenog praha određivana je primenom Zakona o promeni količini kretanja prilagođenim za promenu položaja materijalne tačke u struji fluida gasnog agregatnog stanja.

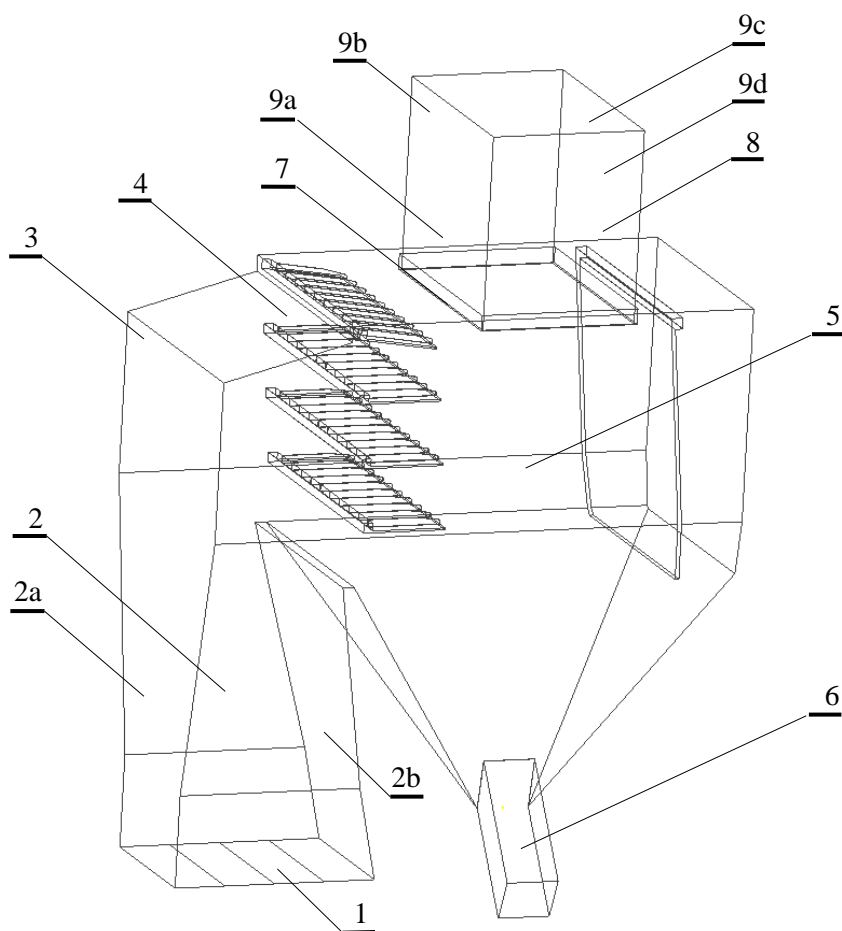
Dostupna merenja masenog protoka transportnog fluida u ventilatorskom mlinu, finoće mlevenja i temperature aerosmeše data u [10] korišćena su u svrhu definisanja graničnih uslova strujnog domena. Korišćena merenja izvršena su u kanalu aerosmeše neposredno nakon izlaznog poprečnog preseka separatora. Pojedini parametri na ostalim graničnim i granično-protočnim površima određeni su iterativno pretpostavljajući njihove vrednosti u početku i menjajući ih sve do poklapanja vrednosti određenih veličina u simulacijama sa izmerenim vrednostima u izlaznom poprečnom preseku separatora.

Na kraju, pomoću dijagrama, prikazani su rasporedi pojedinih frakcija u različitim poprečnim presecima u kanalu aerosmeše neposredno nakon inercijalnog separatora ugljenog praha za različiti položaj regulacionih klapni. Posebno je analiziran karakter raspodele krupnijih i sitnijih frakcija i karakter promene raspodele frakcija po visini kanala za aerosmešu.

2. Geometrijski model analiziranog strujnog prostora

Analizu strujanja dvofazne mešavine u kanalu aerosmeše neposredno nakon inercijalnog separatora nemoguće je izvršiti bez analize dvofaznog toka transportnog fluida i čestica ugljenog praha u celom inercijalnom separatoru. U skladu sa tim, geometrijski model korišćen u simulacijama obuhvata inercijalni separator ugljenog praha kao i deo vertikalnog kanala za aerosmešu koji se nastavlja na izlazni poprečni presek predmetnog separatora. Model samog inercijalnog separatora ugljenog praha identičan je mlinskom separatoru ventilatorskog mlina N 400.42 koji se koristi u sklopu postrojenja za pripremu ugljenog praha u termoelektrani „Nikola Tesla“ B.

Korišćena geometrija strujnog domena u simulacijama data je na slici 1. Čestice ugljenog praha zajedno sa transportnim fluidom nakon procesa mlevenja i sušenja u ventilatorskom mlinu ulaze u separator kroz ulazni poprečni presek (1) i kreću se kroz vertikalni kanal separatora (2). Nakon toga, pomoću skretne komore separatora (3) one menjanju pravac za skoro 90° i prolaze kroz horizontalni deo separatora (4) u kojem su postavljene regulacione klapne S13 i klapna S14 [10]. Zatim, ulaze u separacioni prostor (5) u kome brzina gasne faze (transportni fluid) naglo opada. Deo transportnog fluida zajedno sa krupnijim frakcijama napušta separacioni prostor kroz recirkulacioni kanal separatora (6). Veličina poprečnog preseka recirkulacionog kanala uslovljava naglo ubrzanje transportnog fluida koji za sobom povlači krupnije čestice ugljenog praha koje se

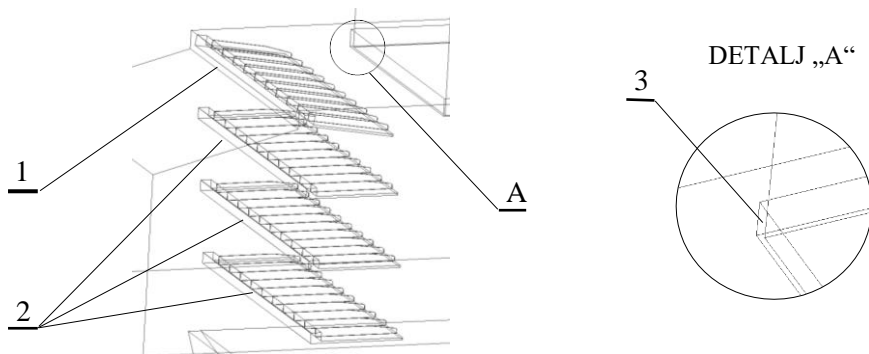


Slika 1. Inercijalni mlinski separator sa delom kanala za aerosmešu - prikaz korišćenog strujnog domena

1. Ulazni poprečni presek separatora; 2) Vertikalni kanal inercijalnog separatora; 2a) Prednji zid vertikalnog kanala za aerosmešu; 2b) Zadnji zid kanala za aerosmešu; 3) Skretna komora separatora; 4) Horizontalni deo separatora sa regulacionim klapnama; 5) Separacioni prostor; 6) Recirkulacioni kanal separatora; 7) Izlazni poprečni presek separatora; 8) Vertikalni deo kanala za aerosmešu; 9a) Prednji zid kanala aerosmeše; 9b) Levi bočni zid kanala aerosmeše; 9c) Zadnji zid kanala aerosmeše; 9d) Desni bočni zid kanala aerosmeše;

vraćaju u ventilatorski mlin na ponovno mlevenje. Ostatak gasne faze i finijih frakcija ugljenog praha napušta separacioni prostor kroz izlazni poprečni presek separatora (7) i ulazi u vertikalni deo kanala za aerosmešu (8). Njime se dalje dvofazna mešavina odvodi ka gorionicima. Kako je u TE „Nikola Tesla“ B primenjen individualni sistem za pripremu ugljenog praha sa direktnim uduvavanjem i sušenjem po zatvorenom procesu pre uvođenja aerosmeše u gorionike kanal aerosmeše se deli na „etaže“ u kojima dvokomponenta mešavina menja pravac strujanja. U nastavku „etaža“ postavljeni su gorionici putem kojih se aerosmeša uvodi u ložište.

Pri izradi geometrijskog modela posebna pažnja je posvećena modeliranju svih relevantnih regulacionih klapni separatora kao i „kragne“ separatora (sl. 2), koja predstavlja deo kanala aerosmeše koji je uronjen separacioni prostor (poz. 5 na sl. 1).



Slika 2. Detaljni prikaz regulacionih klapni S13, klapne S14 i „kragne“ kanala aerosmeše

1. Gornja klapna S14; 2. Tri regulacione klapne S13; 3. Kragna kanala aerosmeše – uronjen deo kanala u separator.

Kanal za aerosmešu nastavlja se na izlazni poprečni presek separatora. Kao što je prikazano na slici 1, kanal je na celoj svojoj dužini (visini) konstantnog poprečnog preseka. Konačna visina vertikalnog dela kanala u geometrijskom modelu određena je sledećim iterativnim postupkom: visina je menjana sve do trenutka kada je uočeno da komponente brzina čestica različitih frakcija ugljenog praha u oblasti izlaznog poprečnog preseka ostaju približno jednake. To znači da je moguće, uz poznavanje vektora brzine čestica u izlaznom poprečnom preseku, predvideti raspodelu pojedinih frakcija i u presecima kanala za aerosmešu izvan analiziranog domena. Srednje vrednosti brzina čestica pojedinih frakcija u izlaznom poprečnom preseku analiziranog strujnog domena (1) i poprečnom preseku na većoj visinskoj koti – probnom/kontrolnom poprečnom preseku (2) date su u tabeli 1 uz sl. 3.

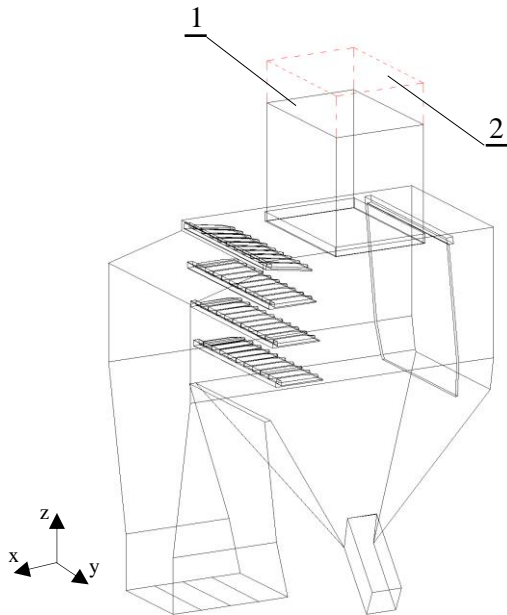


Tabela 1. Srednje vrednosti komponenta brzine čestica u različitim poprečnim presecima

Dimenzija čestica [mm]	Srednja vrednost komponenta brzina čestica [m/s]			
	Presek 1		Presek 2	
	V_x	V_y	V_x	V_y
4 mm	1.14	-0.46	1.12	-0.42
1 mm	1.24	-0.35	1.26	-0.39
0,2 μm	0.52	-1.12	0.49	-1.09
0,09 μm	0.61	-1.28	0.58	-1.27
0,05 μm	0.44	-1.56	0.42	-1.55

Slika 3. Prikaz korištenih poprečnih preseka vertikalnog dela kanala aerosmeše za određivanje analiziranog strujnog domena

1. Konačni izlazni poprečni presek dela kanala za aerosmešu; 2. Probni/kontrolni poprečni presek kanala.

3. Fizičko-matematički model strujanja dvofazne mešavine

3.1. Fizičko-matematički model strujanja transportnog fluida

Za dobijanje rešenja strujanja transportnog fluida u razmatranom strujnom prostoru primenjen je Oiler-ov pristup. Proračun je sproveden pomoću formiranih kontrolnih zapremina u kojima se izjednačava uticaj flukseva pojedinih strujnih parametara na graničnim površima i promena stanja fluida unutar tih zapreminama.

Strujanje gasne faze opisano je ukupno sa 4 jednačine: jednačinom kontinuiteta (JK), jednačinom promene količine kretanja (JKK) i dodatnih dveju jednačina za modeliranje turbulentnih napona. Nakon izvođenja inicijalnih simulacija samo gasne faze uočen je turbulentni karakter strujanja. Shodno tome korišćene JK i JKK osrednjene su po Reynolds-u i u takvoj formi i tenzorskoj notaciji date su u [11]. U [11] su priložena i objašnjenja svih članova pomenutih jednačina.

U dosadašnjim istraživanjima pokazalo se da dvojednačinski k- ϵ turbulentni model daje dobre rezultate prilikom razmatranja razvijenog turbulentnog strujanja bez izrazitog vrtložnog kretanja fluidnih delića [12].

U slučaju korišćenja pomenutog k- ϵ turbulentnog modela pretpostavlja se da je turbulentna kinematska viskoznost funkcija turbulentne kinetičke energije i turbulentne disipacije. Jednačine promene kinetičke turbulentne energije i turbulentne disipacije date su u mnogim literaturama, između ostalog i u [13].

U simulacijama je pretpostavljeno da čvrsta faza ne utiče na strujanje gasne faze. Shodno tome, sve pomenute jednačine primenjene su u izvornom obliku za turbulentno strujanje gasne faze bez dodatnih članova koji bi reflektovali ovaj uticaj.

Temperatura dvofazne mešavine u inercijalnom separatoru je viša u odnosu na temperaturu okoline. U cilju smanjivanja toplotnih gubitaka i hlađenja dvofazne mešavine sam separator je toplotno izolovan tako da su gubici zanemarljivi. Takođe, sušenje uglja je intenzivno u vertikalnom kanalu za dovod goriva u mlin i još intenzivnije tokom procesa mlevenja u ventilatorskom mlinu. Usled intenzivnog isparavanja vlage iz čestica tokom procesa mlevenja u mlinu temperatura gasne faze naglo opada i na ulazu u mlinski separator dostiže temperature između 150 i 200 °C. Kako je procenat vlage u česticama znatno smanjen, procenat vlage u transportnom fluidu

usled sušenja povećan, a temperatura gasne faze znatno niža od temperature na ulazu u mlin pretpostavlja se da je intenzitet sušenja čestica u mlinskom separatoru zanemarljiv i da ne utiče na promenu temperature gasne faze. Iz svega navedenog pretpostavljeno je da je strujanje izotermno usled čega se temperatura gasne faze ne smatra nepoznatom veličinom. To isključuje potrebu za uvođenjem jednačine energije u sistem jednačina potreban za rešavanje prezentovanog slučaja.

Pored toga, u simulacijama je pretpostavljeno da je strujanje stacionarno, nestišljivo i hemijski inertno.

3.2. Fizičko-matematički model kretanja čestica ugljenog praha

Lagranževim pristupom opisano je kretanje čestica ugljenog praha. Trajektorije čestica različitih dimenzija dobijene su primenom jednačine promene količine kretanja materijalne tačke na koju deluju sile svojstvene dvofaznom toku u ovakvim problemima. Shodno pretpostavkama da je čestica hemijski inertna i da nema razmene materije između transportnog fluida i razmatranih čestica u obzir su uzete tri sile: sila otpora čestice, sila koja potiče od gradijenta pritiska – neravnoteže u polju pritiska u neposrednoj blizini čestice i sila Zemljine teže. Smatra se da dejstvo ostalih sila koje mogu delovati na razmatranu česticu ne utiče u značajnoj meri na njeno kretanje. Analitička formulacija Zakona u ovoj formi data je u [11] zajedno sa pojašnjenjima korišćenih oznaka u njoj.

U postupku proračuna trajektorija čestica ugljenog praha najpre su određena rešenja strujanja transportnog fluida. Ta rešenja su se dalje koristila za određivanje mehaničkog dejstva fluida na česticu.

Interakcija između čestica čvrste faze i granica strujnog prostora opisana je modelom čvrste lopte (sfere)[13]. Model podrazumeva da pri kontaktu čestice i granice strujnog prostora ne dolazi do deformacije čestice. Brzina čestice u pravcu normalnom i tangentnom na sudarnu površ posle sudara opisuje se koeficijentima restitucije za ova dva pravca. Koeficijenti restitucije jednaki su odnosima brzina posle i pre sudara i uvek su manji od 1. Time se uvažava činjenica da se pri sudaru čestice i zida određeni impuls prenosi na sudarnu površ (telo koje miruje) pri čemu čestica u određenom obimu gubi svoju kinetičku energiju. Koeficijenti restitucije dati su sledećim jednačinama:

$$e_n = \frac{V_{2,n}}{V_{1,n}}; \quad e_t = \frac{V_{2,t}}{V_{1,t}}; \quad (1, 2)$$

Veličine u jednačinama imaju sledeće značenje:

- e_n, e_t - koeficijenti restitucije za normalni i tangentni pravac;
- $V_{2,n}, V_{2,t}$ - komponenta brzine čestice posle sudara u normalnom i tangentnom pravcu;
- $V_{1,n}, V_{1,t}$ - komponenta brzine čestice pre sudara u normalnom i tangentnom pravcu.

Prilikom određivanja rasporeda pojedinih frakcija na ulaznom poprečnom preseku separatora varirani su i normalni i tangentni koeficijenti restitucije. U svakoj iteraciji razmatrane su trajektorije svih frakcija i upoređivane sa očekivanim, inženjerski pretpostavljenim rešenjima ali i rezultatima merenja u izlaznom poprečnom preseku inercijalnog separatora. Na osnovu toga usvojeno je da vrednost koeficijentata restitucije od 0.7 za tangentni i 0.3 za normalni pravac najbolje oslikavaju očekivane trajektorije svih frakcija. Pritom, sa ovim graničnim uslovima, dobijeni rezultati u simulacijama poklapaju se sa merenjima izvršenim na separatoru u eksploataciji.

Lom čestica u separatoru pri njihovom sudaru sa granicama strujnog domena zanemaren je iz više razloga. Najpre, smatra se da je najveći deo procesa mlevenja završen u ventilatorskom mlinu gde se inače čestice ugljenog praha, pre i posle mlevenja, kreću višestruko većim brzinama u odnosu na njihovu brzinu u bilo kom poprečnom preseku separatora. Dalje, proces usitnjavanja sitnijih čestica zahteva daleko više energije u odnosu na proces usitnjavanja krupnijih čestica jer su međumolekulske veze u sitnijim česticama jače u odnosu na veze u krupnijim česticama [9].

4. Granični uslovi

Za rešavanje navedenih jednačina neophodno je poznavati i u simulacijama primeniti granične uslove strujanja transportnog fluida i kretanja čestica ugljenog praha u karakterističnim protočnim presecima.

U tu svrhu iskorišćeni su sledeći rezultati merenja: granulometrijska karakteristika ugljenog praha na izlazu iz separatora, maseni protok i temperatura transportnog fluida. Merenja data u [10] izvršena u izlaznom poprečnom preseku predmetnog inercijalnog separatora prikazana su u Tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati merenja

Mereni parametri		Oznake	Jedinice	Izmerene vrednosti
Maseni protok gasne faze		\dot{m}	kg/s	109.27
Temperatura aerosmeše		T	°C	170
Udeo vlage u ugljenom prahu		W^P	%	14.8
Sitovna analiza	Ostatak na situ od 1000 μm	R_{1000}	%	5
	Ostatak na situ od 200 μm	R_{200}	%	30
	Ostatak na situ od 90 μm	R_{90}	%	65
Donja toplotna moć		H_d	kJ/kg	7703

Međutim, dostupni rezultati merenja prikazani u prethodnoj tabeli nisu dovoljni da se definišu granični uslovi na svim protočnim preseccima analiziranog strujnog prostora. Tako je raspodela pojedinih frakcija u ulaznom poprečnom preseku separatora određena sledećim iterativnim postupkom: varirana je sve do postizanja vrednosti udela ostataka na sitima od 90, 200 i 1000 μm dobijenim merenjima (Tabela 2). Pritom, tokom postavljanja i variranja raspodele frakcija uvažavana je pretpostavka da se krupnije čestice, usled dejstva centrifugalne sile u radnom kolu mlina ali i svoje inercije, grupišu bliže prednjem zidu vertikalnog kanala separatora (poz. 2a na sl. 1), dok sitnije u separator ulaze bliže zadnjem zidu (poz. 2b na sl. 1) pomenutog vertikalnog kanala. Zbog toga je ulazni poprečni presek separatora (poz. 1 na sl. 1) podeljen na 4 jednake površine, pomoću kojih je u ovom iterativnom procesu vršena preraspodela čestica svih analiziranih dimenzija.

Modeliranje interakcije između čestica ugljenog praha i graničnih površina strujnog domena opisano je u okviru fizičko-matematičkog modela čestica ugljenog praha.

5. Prikaz i analiza rezultata

5.1. Prikaz rezultata

Rezultati simulacija prikazani su u formi dijagrama raspodele sitnijih čestica (D_{200} – propad kroz sito otvora 200 μm) i krupnijih čestica (R_{200} – ostatak na situ otvora 200 μm). Analizirane su raspodele dve grupe čestica u dva različita poprečna preseka kanala za aerosmešu: u ulaznom poprečnom preseku kanala koji se poklapa sa izlaznim poprečnim presekom separatora i izlaznom poprečnom preseku dela vertikalnog kanala za aerosmešu.

U izvršenim simulacijama analiziran je raspored čestica u kanalu za aerosmešu za položaje klapni S13 (+20°, 0, -20°) u odnosu na horizontalnu ravan i dva položaja klapne S14 (0, -9°). Svi uglovi mereni su odnosu na horizontalnu ravan uvažavajući pravilo da negativni predznak označava zakretanje klapni u smeru kazaljke na časovniku.

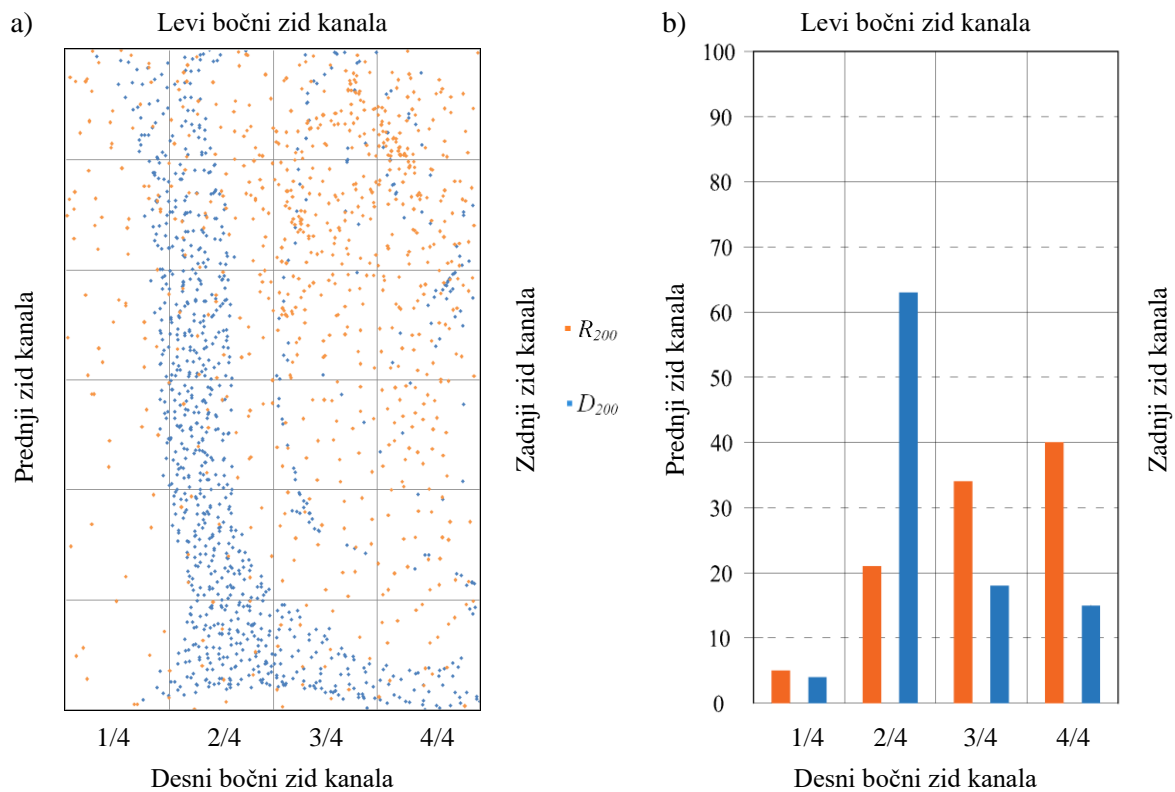
Nazivi stranica (zidova) kanala za aerosmešu usklađeni su sa nazivima njegovih zidova prema slici 1. Poprečni preseki podeljeni su po dubini kanala na 4 jednaka dela (1/4 – 4/4). U skladu sa tom podelom a u cilju preciznijeg prikaza rezultata, uz svaki grafički prikaz raspodele čestica, dat je dijagram sa procentualnom raspodelom sitnijih i krupnijih frakcija po dubini kanala u odnosu na ukupnu masu sitnijih i krupnijih čestica, respektivno. Kao prilog svakom grafičkom prikazu dati su položaji klapni S13 i klapne S14 za koje je strujanje dvofazne mešavine analizirano.

Dodatno, u cilju boljeg pojašnjenja rezultata date su slike 7 (a) do 7 (e) na kojima su prikazane vrednosti brzine transportnog fluida u središnjem preseku domena po širini separatora.

5.2. Analiza rezultata

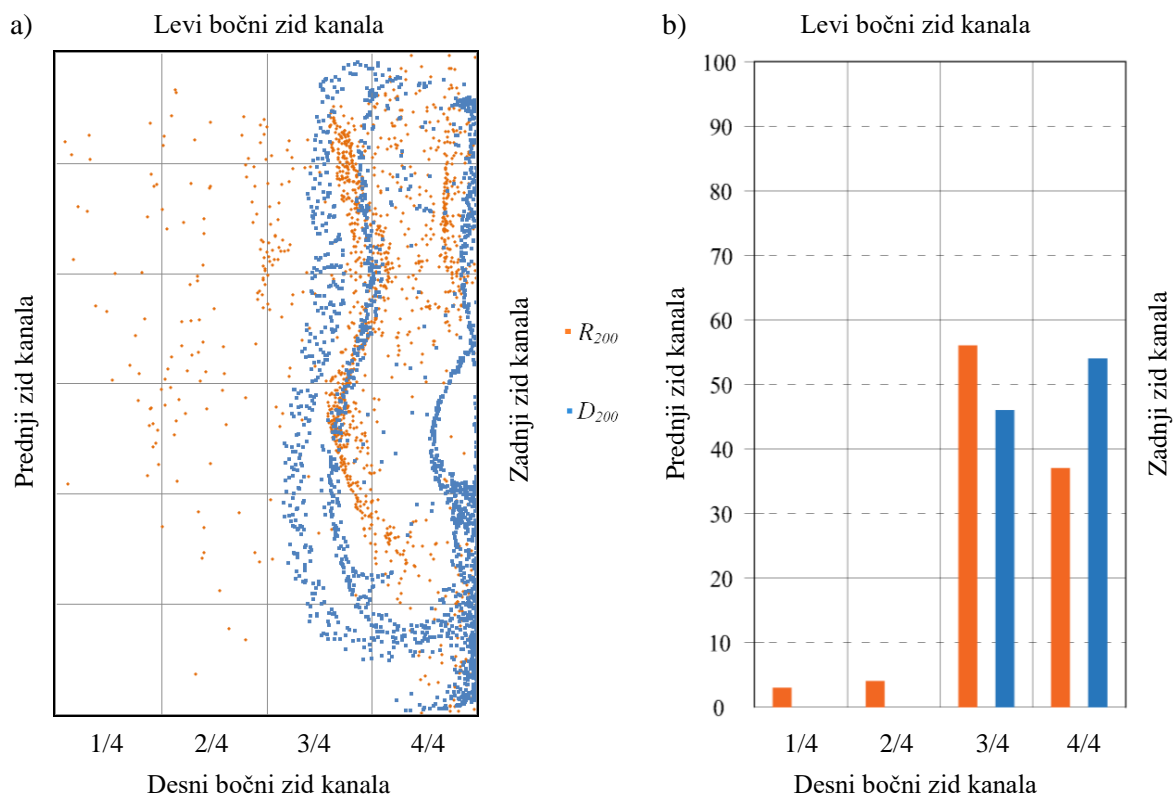
Analizirajući sve date dijagrame može se primetiti jedna zajednička karakteristika svih prikazanih raspodela u ulaznom poprečnom preseku kanala za aerosmešu (sl. 3-1 do sl. 6-1). Može se uočiti da prva četvrtina kanala koja se oslanja na njegov prednji zid ostaje praktično sa jako malim masenim protokom čestica ugljenog praha. Razmatrajući strujanje transportnog fluida, sl. 7(a) do 7 (d), može se primetiti da pri skretanju fluida u kanala aerosmeše dolazi do odvajanja fluidne struje od prednjeg zida kanala aerosmeše i stvaranja recirkulacione, vrtložne zone. U tom delu kanala brzine fluida su znatno manje u odnosu na prostor u kome se ne formira recirkulaciona zona. Uzimajući u obzir da je kretanje svih čestica u mnogome određeno karakterom strujanja transportnog fluida i da je sila kojom transportni fluid deluje na česticu direktno zavisna od intenziteta njegove brzine u okolini ugljene čestice, može se zaključiti da se čestice koncentrišu u delu poprečnog preseka kanala u kom transportni fluid ima veću brzinu.

Zatim, može se uočiti da je u ulaznom poprečnom preseku pri bilo kom položaju regulacionih klapni koncentracija sitnijih čestica u drugoj i trećoj četvrtini kanala (sl. 3-1 do 6-1) veća od koncentracije krupnijih čestica. Usled njihove manje mase i posledično manje inercije pri skretanju u kanal aerosmeše sitnije čestice u



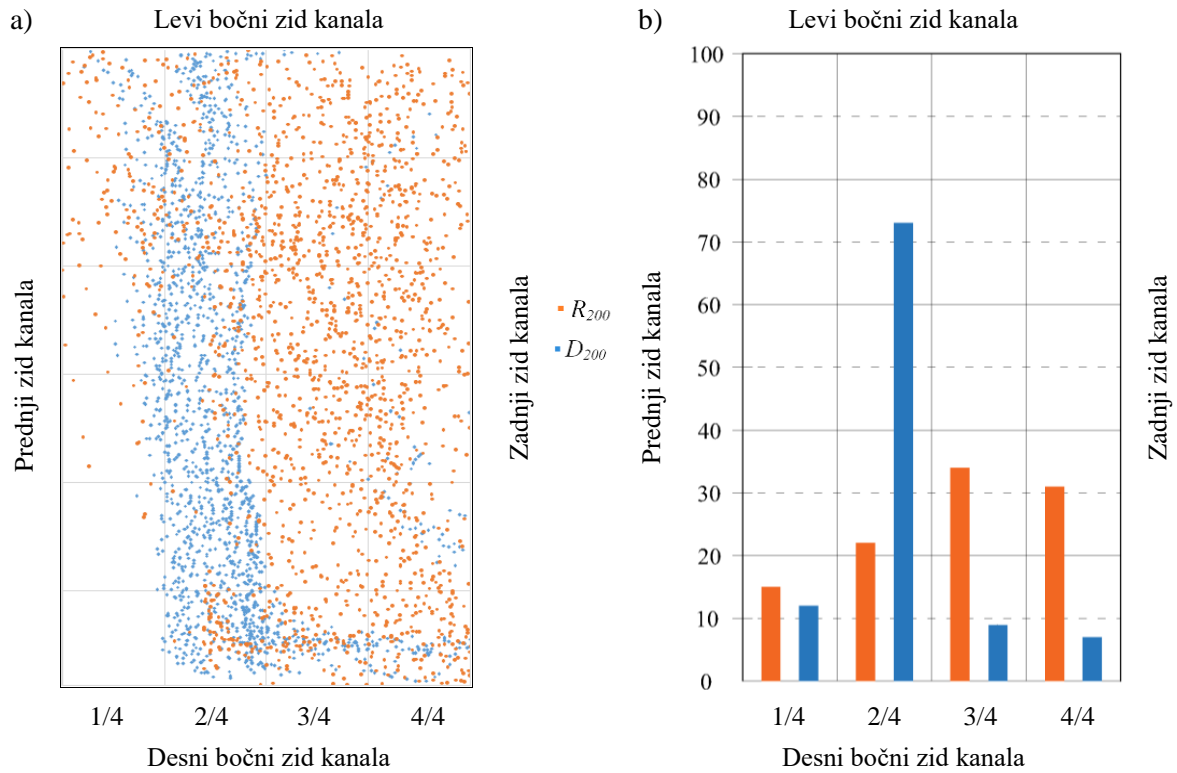
Slika 3-1. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku separatora i b) procentima po masi krupnijih od 200 μ m i sitnijih frakcija od 200 μ m po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - 0°; S14 - 0°;



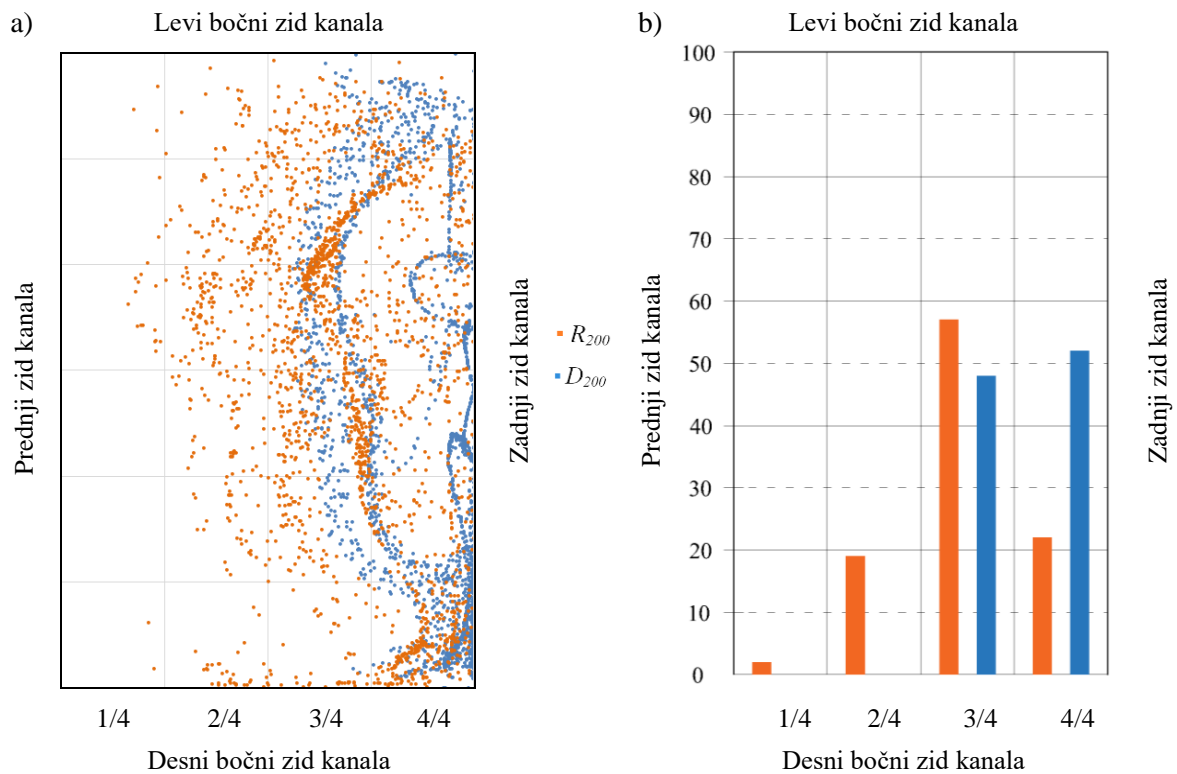
Slika 3-2. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku vertikalnog dela kanala za aerosmešu i b) procentima po masi krupnijih od 200 μ m i sitnijih frakcija od 200 μ m po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - 0°; S14 - 0°;



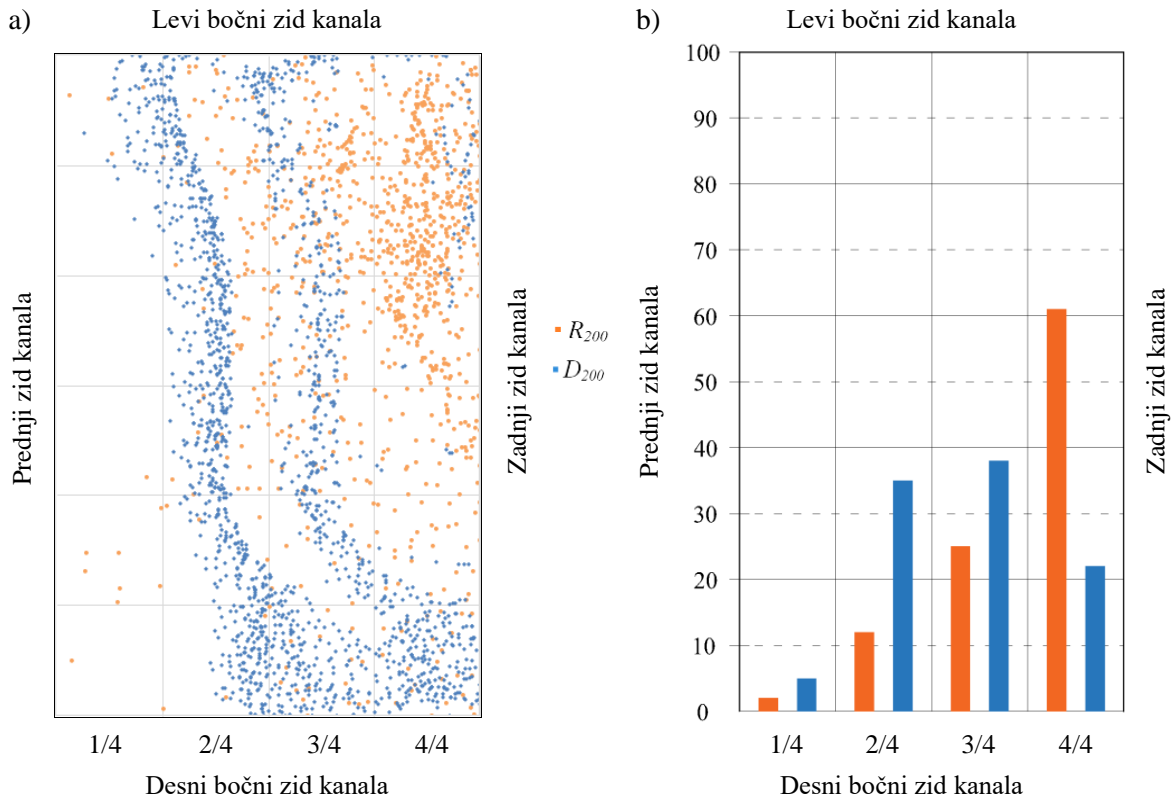
Slika 4-1. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku separatora i b) procentima po masi krupnijih od $200 \mu\text{m}$ i sitnijih frakcija od $200 \mu\text{m}$ po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - $+20^\circ$; S14 - -9° ;



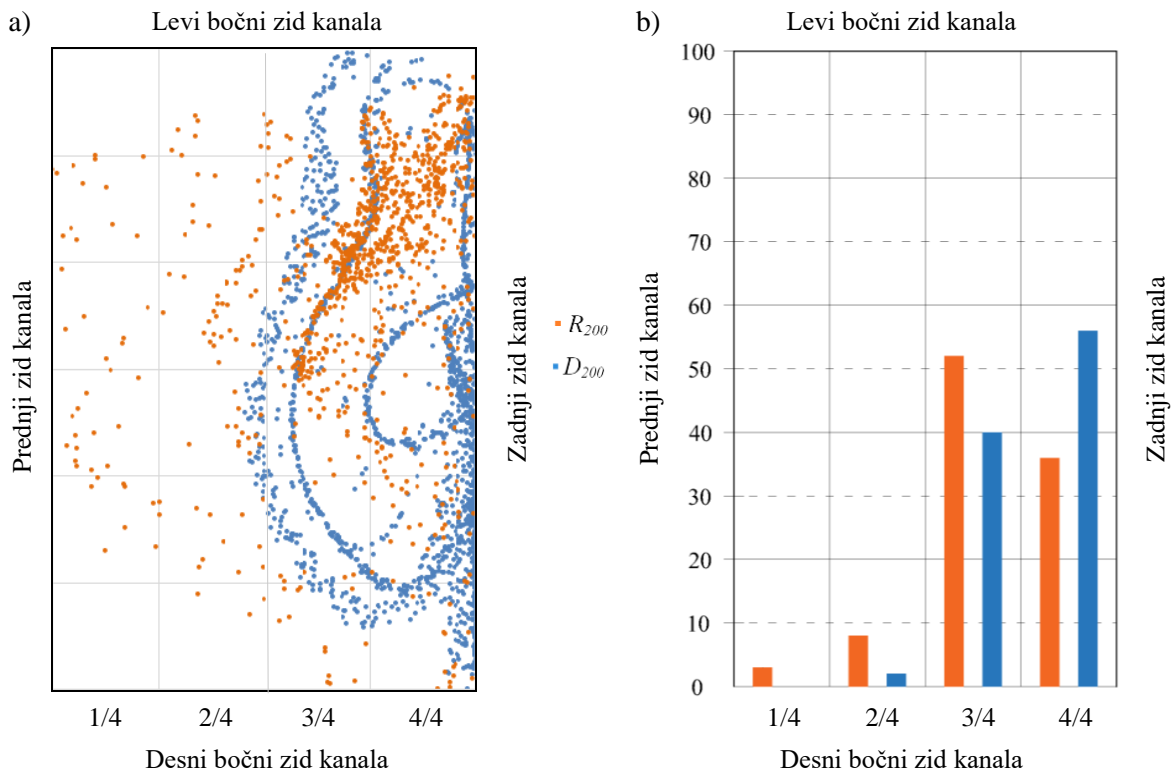
Slika 4-2. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku vertikalnog dela kanala za aerosmešu i b) procentima po masi krupnijih od $200 \mu\text{m}$ i sitnijih frakcija od $200 \mu\text{m}$ po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - $+20^\circ$; S14 - -9° ;



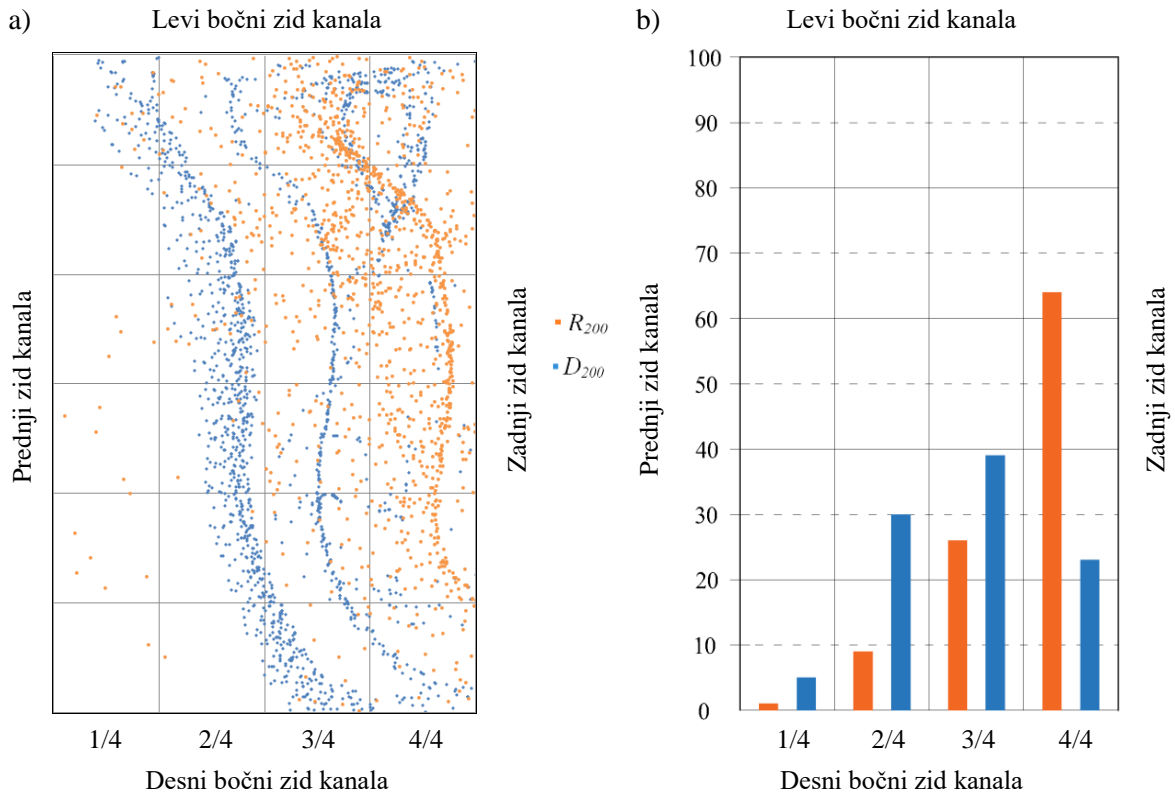
Slika 5-1. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku separatora i b) procentima po masi krupnijih od $200\ \mu\text{m}$ i sitnijih frakcija od $200\ \mu\text{m}$ po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - 0° ; S14 - 9° ;



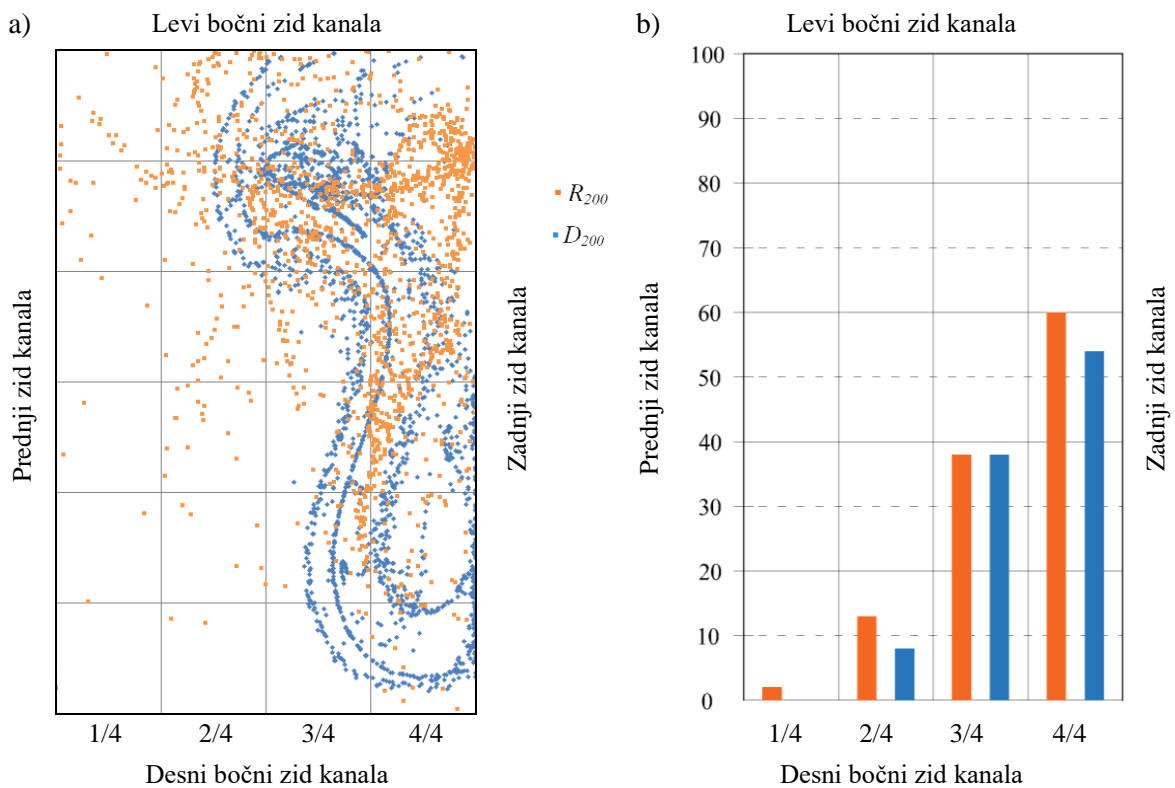
Slika 5-2. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku vertikalnog dela kanala za aerosmešu i b) procentima po masi krupnijih od $200\ \mu\text{m}$ i sitnijih frakcija od $200\ \mu\text{m}$ po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - 0° ; S14 - 9° ;



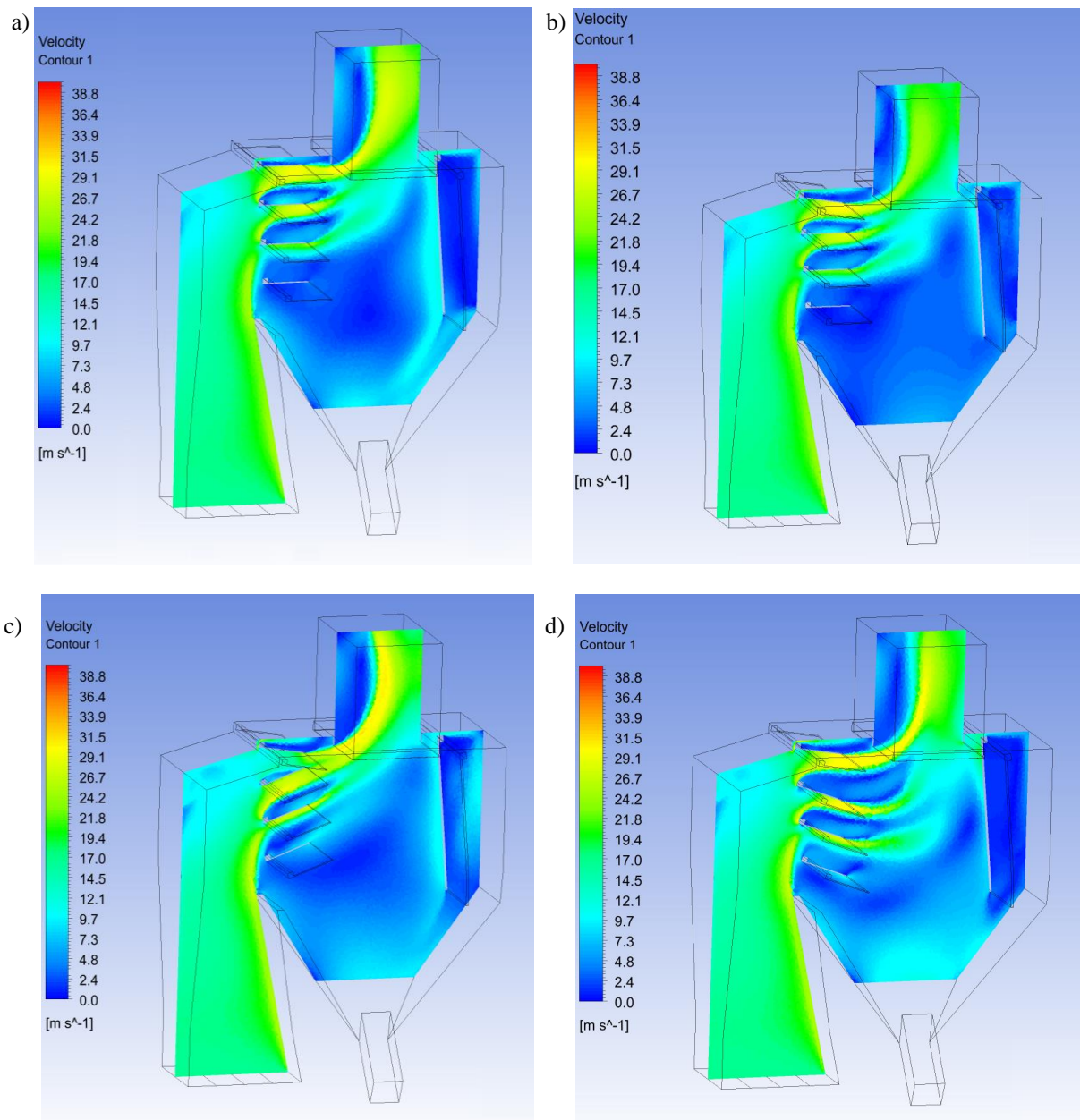
Slika 6-1. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku separatora i b) procentima po masi krupnijih od $200\ \mu\text{m}$ i sitnijih frakcija od $200\ \mu\text{m}$ po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - -20° ; S14 - 9° ;



Slika 6-2. Raspodela krupnijih i sitnijih frakcija u: a) izlaznom poprečnom preseku vertikalnog dela kanala za aerosmešu i b) procentima po masi krupnijih od $200\ \mu\text{m}$ i sitnijih frakcija od $200\ \mu\text{m}$ po dubini kanala;

Položaji regulacionih klapni: S13 - -20° ; S14 - 9° ;



Slika 7. Prikaz intenziteta brzine transportnog fluida u središnjoj ravni razmatranog strujnog domena po širini inercijalnog separatora

Položaji regulacionih klapni: a) S13 - 0°; S14 - 0°; b) S13 - 0°; S14 - 9°; c) S13 - +20°; S14 - -9°; d) S13 - -20°; S14 - -9°;

većoj meri prate strujnice transportnog fluida od krupnijih čestica i u kanal aerosmeše skreću zajedno sa transportnim fluidom koncentrišući se oko sredine kanala po njegovoj širini.

Sa druge strane, krupnije čestice uglja se usled svoje inercije gomilaju u gornjem levom uglu skretne komore separatora (što pokazuju i merenja izvršena u kanalu aerosmeše iza ventilatroskog dela kombinovanog mlina [14]) odakle kretanjem praktično uz plafon separatora prolaze ispod klapne S14 i dolaze u oblast izlaznog poprečnog preseka separatora. Zbog svoje inercije a pod dejstvom sila koje na njih deluju od strane okolnog fluida manji deo njih uspeva da skrene i napusti separator ulazeći u kanal za aerosmešu uz njegov zadnji zid.

Pritom, potrebno je naglasiti da je protočna komponenta vektora brzine krupnijih čestica u odnosu na izlazni poprečni presek separatora manja od komponente koja leži u ravni poprečnog preseka pa krupne čestice i po ulasku u kanal aerosmeše nastavljaju da se približavaju zadnjem zidu kanala o koga udaraju i značajno menjaju svoj pravac kretanja. Veći deo najkrupnijih čestica nastavlja svoje kretanje ka separacionom prostoru (poz. 5 na sl. 1), udara o zadnji zid separatora i padaju u levak odakle se recirkulacionim kanalom odvođe na ponovno mlevenje.

Zakretanjem klapne S14 od položaja 0° do -9° (sl. 3-1 i 5-1) može se uočiti da se razućenost ćestica smanjuje, da se njihova koncentracija pomera ka zadnjem zidu kanala za aerosmešu i da je broj krupnijih ćestica manji pri položaju klapne od 0° u odnosu na položaj od -9° . Pri položaju klapne S14 od 0° krupnije ćestice su pri prolasku pored regulacionih klapni usmerene tako da udaraju o „kragnu“ separatora i skreću ka separacionom prostoru. Na taj naćin smanjuje se broj krupnijih ćestica u izaznom poprećnom preseku separatora što je moguće uoćiti na sl. 3-1 u donosu na sl. 5-1.

Zakretanjem klapni S13 od položaja $+20^\circ$ do -20° (sl. 4-1 do 6-1) uoćava se da se „jezgro“ koncentracije sitnijih ćestica pomera od prednjeg ka zadnjem zidu kanala za aerosmešu. Zakretanjem klapni S13 nadole utiće se na vektor brzine fluidne struje pa, samim tim, i na vektor brzine svih ćestica. One se postepeno usmeravaju ka levku separatora pri ćemu se povećava radijus skretanja transportnog fluida i ćestica pri njihovom kretanju ka izlaznom poprećnom preseku separatora što za rezultat ima pomeranje njihovog „jezgra“ koncentracije ka zadnjm zidu kanala.

Razmatrajući pormenu koncentracije sitinijih i krupnijih ćestica u izlaznom poprećnom preseku analiziranog domena može se zakljućiti da se trend u odnosu na ulazni poprećni presek kanala za aerosmešu u velikoj meri menja. Sitnije ćestice, krećući se naviše, od ulaza ka izlazu analiziranog domena, asimptotski prilaze zadnjem zidu kanala što je posledica i strujanja fluida u kanalu aerosmeše ali i vrednosti komponentata vektora brzine sitnijih ćestica u ulaznom poprećnom preseku kanala. Naime, sitnije ćestice u kanal ulaze tako da je njihov vektor brzine sa znaćajnom protoćnom komponentom nagnut ka zadnjem zidu kanala aerosmeše. Usled toga, ćestice od ulaza do izlaza analiziranog dela kanala kreću se kazadenjm zidu kanala. Nasuprot tome, krupnije ćestice pri ulasku u kanal aerosmeše udaraju o njegov zadnji zid i nastavljaju svoje kretanje po visini kanala ka njegovom prednjem zidu. Shodno tome, na slikama 3-2 do 6-2 može se uoćiti povećanje koncentracije sitnijih ćestica u blizini zadnjeg zida kanala aerosmeše u odnosu na koncentraciju sitnijih ćestica u izlaznom poprećnom preseku separatora. Suprotna promena na istim slikama uoćljiva je ukoliko se razmatra koncentracija krupnijih ćestica.

6. Zaključak

U ovom radu predstavljeni su rezultati simulacija dvofaznog toka u kanalu za aerosmešu neposredno nakon inercijalnog separatora za različiti položaj dve grupe klapni. Razmatrana je koncentracija pojedinih frakcija u različitim poprećnim presećima po visini kanala za aerosmešu.

Analizom rezultata zapaženo je da, za sve položaje klapni, ćetvrtina kanala koja se oslanja na prednji zid kanala ostaje sa malom koncentracijom i krupnijih i sitnijih ćestica. Međutim, ukoliko se uvaći ćinjenica da u tom delu dolazi do odvajanje struje transportnog fluida usled njegovog naglog skretanja iz separacionog prostora, da u toj oblasti transportni fluid formira vrtlog i da su u tom delu brzine transportnog fluida male u odnosu na ostali deo kanala, niska koncentracija svih ćestica u tom delu je razumljiva i oćekivana.

Takođe je uoćeno da koncentracija krupnijih i sitnijih ćestica po širini kanala pri njihovom kretanju od ulaznog do izlaznog poprećnog preseka kanala menja karakter tako da se sitnije ćestice priblićavaju zadnjem zidu kanala dok se krupnije pri ulasku u kanal od njega odbijaju i daljim kretanjem priblićavaju prednjem zidu kanala.

Zakretanjem klapni S13 u pozitivnom matematićkom smeru postiće se veća razućenost, sitnijih frakcija u ulaznom poprećnom preseku kanala za aerosmešu. Veći deo sitnijih ćestica se u tom slućaju koncentriše u drugoj i trećoj ćetvrtini kanala po njegovoj širini. Veću razućenost u raspodeli pokazuju i krupnije ćestice s tim da se ipak veći deo mase zadržava u trećoj i ćestvrtoj ćetvrtini kanala po njegovoj širini.

Promenom položaja klapne S14 od 0° do -9° utiće se na smanjenje koncetracije, odnosno, broja krupnijih ćestica u izlaznom porećnom preseku kanala dok se raspored sitnijih ćestica zakretanjem ove klapne menja neznatno.

Date zaključke treba imati u vidu prilikom planiranja ugradnje uređaja za odvajanje frakcija ili prilikom rekonstrukcije kanala za aerosmešu nakon mlinskog separatora. Posebno treba voditi raćuna o budućoj geometriji, položaju i naćinu delovanja uređaja za razdvajanje krupnijih i sitnijih frakcija. Prikazana analiza pruća mogućnost ugradnje uređaja (klapne sa mogućnošću zakretanja) kojim bi se, pored efikasnog razdvajanja frakcija, omogućilo da pri radu postrojenja pad pritiska u sistemu za pripremu ugljenog praha ostane praktićno nepromenjen ili neznatno povećan.

Sprovođenje daljih, preciznijih analiza nalaće izvođenje dodatnih merenja koncentracije ćestica kao i parametara transportnog fluidau protoćnim poprećnim presećima pri različitim radnim režimima pripadajućih ventilatorskih mlinova.

7. Reference

- [1] Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook 2018, Coal, lignite production, <https://yearbook.enerdata.net/coal-lignite/coal-production-data.html>
- [2] Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook 2018, Coal, lignite consumption, <https://yearbook.enerdata.net/coal-lignite/coal-world-consumption-data.html>

- [3] The World Bank, Electricity production from coal sources, <https://data.worldbank.org/indicator/eg.elc.coal.zs?end=2015&start=2000>
- [4] World Coal Association, Coal & electricity, <https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/coal-electricity>
- [5] International Energy Agency, Coal 2017, <https://www.iea.org/coal2017/>
- [6] World Energy Council, Coal in Serbia, <https://www.worldenergy.org/data/resources/country/serbia/coal/>
- [7] M. Radovanović, Goriva, Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1994. godine
- [8] Lj. Brkić, T. Živanović, D. Tucaković, Parni kotlovi, Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2010. godine.
- [9] Lj. Brkić, T. Živanović, D. Tucaković, Postrojenja za pripremu ugljenog praha, Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2009. godine.
- [10] T. Živanović, Lj. Brkić, D. Tucaković, G. Stupar, B. Ivljanin, R. Galić, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, Analiza stanja udarnog kola ventilatorskog mlina N 400.42 i proces njegove adaptacije, 2011.
- [11] G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, V. Ivanović, V. Živanović, D. Komarov, 3-D Model of Solid and Gas Phase Flow in the Duct Bend Behind the Mill Gas Classifier at the Fan Mill, ECOS Conference, Novi Sad, 2011.
- [12] S. K. Jha, F. A. Bombardelli, Two-phase modeling of turbulence in dilute sediment-laden, open-channel flows, Environ Fluid Mech, 2009.
- [13] C. T. Crowe, J. D. Schwarzkop, M. Sommerfeld, Y. Tsuji, Multiphase flow with droplet and particles, Second edition, CRC Press, 2012.
- [14] T. Živanović, M. Gulić, Mašinski fakultet Beograd, Uticaj separacionih klapni DGS mlina na kvalitet ugljenog praha, IX Stručno savetovanje o termoelektranama, Novi Sad, 1991. god.