

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

581/5
(Број захтева)
14.05.2026.
(Датум)

Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

**Моделирање процеса млевења и сушења угља у млинском постројењу са
вентилаторским млином**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: Термотехника)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата: ОГЊЕН (Слободан) СТАМЕНКОВИЋ
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2013.
4. Година уписа на докторске студије: 2014.
5. Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Горан Ступар

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, Ž. Stevanović, S. Belošević, Predicting effects of air staging application on existing coal-fired power steam boiler, Applied Thermal Engineering, Vol. 149, p. 665-677, 2019, M21a, IF(2018)=4.026, ISSN 1359-4311 DOI: doi.org/10.2298/TSCI180413286S
2. G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, S. Belošević, N. Crnomarković, Air staging application effects on overall steam boiler operation, Thermal Science, 2019, M22, IF(2018)=1.541, vol. 23 Supplement 5, p. s1559-1574, , ISSN 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI180413286S.
3. G. Stupar, D. Tucaković, O. Stamenkovic, L. Petrović, B. Vujičić, Ž. Novaković, Ž. Milanović, Possibilities of steam boiler process optimization in the TPP Ugljevik, Thermal Science, 2022, M22, IF(2022) = 1.7, vol. 27, No. 1, p. 133-149, ISSN 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI2301133S
4. O. Stamenkovic, G. Stupar, D. Tucaković, Assessing the impact of specific weight of different-sized particles on operational performance of coal preparation plant, Thermal Science, 2022, M22, IF(2022) = 1.7, vol. 27, No. 1, p. 103-119, ISSN 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI2301103S
5. O. Stamenkovic, G. Stupar, D. Tucaković, A. Janković, Possibilities for increasing efficiency of milling plant operation for the purpose of optimizing combustion process within power steam boiler, Thermal Science, Vol. 29, Issue 3 Part B, pp. 2125-2140, 2025, M22, IF(2024) = 1.1, ISSN 0354-9836, DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI230529255>

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 14.05.2026. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена:

Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 581/5
Датум: 14.05.2026. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон 76/2023 и 19/2025), члана 64. Статута Универзитета у Београду – Машинског факултета – пречишћен текст, арх. бр. 667/4 од 31.03.2026. године. и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету – пречишћени текст, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 14.05.2026. године донело је:

О Д Л У К У

о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Огњена Стаменковића**, маг. инж. маш. под насловом **„Моделирање процеса млевења и сушења угља у млинском постројењу са вентилаторским млином“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Драган Туцаковић, ред. проф., др Горан Ступар, ред. проф. и др Драгана Животић, ред. проф., Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет.

За **ментора** докторске дисертације именује се **др Горан Ступар, ред. проф.**

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидата Огњена С. Стаменковића, маг. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 581/3 од 23.04.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом „Моделирање процеса млевења и сушења угља у млинском постројењу са вентилаторским млином” кандидата Огњена С. Стаменковића, маг. инж. маш.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Огњен С. Стаменковић рођен је у Београду, Србија 1990. године. Завршио је гимназију „Бора Станковић“ у Врању 2008. године, а Основне академске студије (ОАС) на Машинском факултету у Београду 2011. године са просечном оценом 9,49. Завршни (В. Sc.) рад је радио из предмета Примењена термодинамика, под менторством проф. др Милоша Бањца са називом „TRNSYS 16”, и добио оцену 10. Мастер академске студије (МАС) завршио је такође на Машинском факултету, на Модулу за термотехнику 2013. године, са највишом просечном оценом у генерацији која је Мастер студије уписала школске 2011./2012. године - 9,9. Мастер рад (М. Sc.) је одбрањен са оценом 10 на тему „3Д симулација процеса сепарације угљеног праха у млинском сепаратору” код проф. др Титослава Живановића стекавши академски степен Мастер инжењер машинства. Током ОАС и МАС више пута је награђиван за одличан успех током студирања. На Машинском факултету у Београду уписао је Докторске академске студије (ДАС) 2014. године. Тренутно је студент треће године ДАС и није одбранио докторску дисертацију.

Током МАС у 2012. години био је учесник **IAESTE** (енг. **International Association for the Exchange of Students for Technical Experience**) програма за размену студената техничке струке, у оквиру кога је радио у компанији „Xylem Water Solutions Inc“ у Стокхолму, Шведска, на позицији инжењера за истраживање и развој. Рад на пројекту подразумевао је израду прототипа уређаја за аерацију хемијски третиране воде, тестирање израђених склопова и упоређивање добијених резултата са резултатима претходно извршених прорачуна.

Са групом студената са Машинског, Архитектонског и Електротехничког факултета 2012. године учествовао је на међународном **ASHRAE** (енг. **American Society of**

Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) такмичењу и освојио треће место у ISBD (Integrated Sustainable Building Design) категорији. Награђени концепт идејног решења система за климатизацију предметног објекта (библиотеке Мансуето у Чикагу) представљен је у раду „Интегрално одрживо пројектовање зграда на примеру идејног пројекта библиотеке Мансуето у Чикагу“ који је објављен у часопису КГХ (Вол. 41, 4/2012, стр. 89-93).

Од 11/2013. до 08/2014. године радио је у пројектантском бироу фирме „МПП Јединство“ а. д. на пословима пројектовања малих хидроелектрана на подручју Републике Србије. Бавио се и анализом потенцијалних локација за изградњу МХЕ на водотоковима у Републици Србији и техно-економском анализом пројектованих и постојећих постројења. Учествовао је у анализи могућности уградње микротурбина у системима за дистрибуцију пијаће воде са великим природним падовима.

Од 08/2014. године радио је у Институту „Михајло Пупин“ – Центру за гасну технику (ИМП-ЦГТ) у звању инжењер-контролор и инжењер-испитивач. Учествовао је у испитивању и контролисању гасних трошила и гасних постројења (унутрашњих гасних инсталација, гасних котларница) у Лабораторији ИМП – ЦГТ. Самостално је изводио мерења топлотног оптерећења, степена корисности и концентрације појединих једињења у продуктима сагоревања гасних трошила на терену и у лабораторијским условима. Учествовао је у испитивањима гасних котлова према референтним хармонизованим стандардима као и процесима њихове сертификације за потребе домаћег тржишта.

Током 2017. године на Машинском факултету Универзитета у Београду похађао је обуку и положио испит за енергетског менаџера у индустрији.

Од 09/2017. године запослен је на Катедри за термотехнику Машинског факултета Универзитета у Београду у звању асистента, у Кабинету за парне котлове. Учествоје у извођењу аудиторних и лабораторијских вежби на предметима Групе за парне котлове Катедре за термотехнику на Мастер студијама Модула за термотехнику (Елементи и опрема парних котлова – позиција 1.1.5, Процеси у парним котловима – позиција 2.1.5) и Модула за термоенергетику (Енергетски парни котлови 1 - позиција 1.2.5, Енергетски парни котлови 2 – позиција 2.5.5.) као и Основним академским студијама (Основе парних котлова – позиција 5.4.5).

У периоду од 01/10/2017. год. до 20/05/2023. год. учествовао је у раду 8 Комисија за одбрану Мастер радова на Модулу за термотехнику, Модулу за термоенергетику и Модулу за хидрауличне машине и енергетске системе.

Током рада у Кабинету за парне котлове учествовао је у следећим пројектима сарадње са привредом:

- Израда потребних прорачуна котловског постројења за потребе наставка градње ТЕ „Колубара“, блок Б, 2019. год.;
- Идејно решење за смањење садржаја азотних оксида на парном котлу ТГМЕ-464/С у ТЕ-ТО Нови Сад, 2019. год.;
- Контролни термички прорачуни парног котла блока 2 у ТЕ „Костолац“, 2019. год.;
- Израда математичких модела главних постројења са контролним прорачуном, анализом рада и мјерама за побољшање стана ТЕ „Гацко“ – котловско постројење, 2020. год.;
- Израда математичких модела главних постројења са контролним прорачуном, анализом рада и мјерама за побољшање стана ТЕ „Угљевик“ – котловско постројење, 2020. год.;
- Контролни термички прорачуни парног котла блока 1 у ТЕНТ Б, 2020. год.;

- Анализа тренутног стања котла БФ-2301 и предлог мера за обезбеђење ефикаснијег и поузданијег рада – термички прорачуни и анализа рада процесног парног котла, за рафинерију Панчево, 2020. год.;
- Израда техничког рјешења модернизације ТЕ Угљевик, финансијска евалуација и консултантске услуге – котловско постројење, 2021. год.;
- Израда техничког рјешења модернизације ТЕ Гацко, финансијска евалуација и консултантске услуге – котловско постројење, 2021. год.;
- Контролни прорачуни за реконструкцију парног котла и модификацију система сагоревања примарним мерама – блокова 1 и 2 у ТЕНТ А, 2022. год.;
- Извештај о процени узрока хаварије на високопритисном индустријском парном котлу „BENT TUBE BOILER“ 31-A-16 – TYPE A – B-1001A (No. 88573-2) у ХИП „Петрохемија“, 2023. год.;
- Студија о подизању нивоа безбедности и поузданости рада парних котлова фабрике Етилен и ХИП „Петрохемија“ – котлова Б-1001А и Б-1001Б, 2023. год. ;
- Техничко решење модификације ложног уређаја парног котла за смањење садржаја NOx комбинованим мерама са обезбеђењем пројектних параметара котла ТЕКО Б1, 2022. год.;
- Специјална испитивања и експертизе котловског постројења у ТЕКО А1 и А2, 2023. год.;
- Ангажовање институције за потребе адаптације котла за ТЕ „Пљевља“, 2023. год.;
- Контролни термички прорачуни парног блока А6 у ТЕ „Никола Тесла“, 2023. год.;
- Контролни термички прорачуни парног блока 2 у ТЕ „Никола Тесла“ Б, 2024. год.
- Стручна контрола пројеката рецикулације хладног димног гаса на блоку А6 ТЕНТ А, 2026. год.

Током 2023. године са фирмом TeamCAD д.о.о успоставио је одржавање бесплатних обука у софтверу Revit MEP (основни курс) за првих десет студената 2. године Мастер студија Модула за термотехнику ранжираних према просечним оценама оствареним у току 1. године Мастер студија. Обука се одржава сваке школске године у летњем семестру у склопу предмета Стручна пракса - М.

Од 01/08/2023. год. ради на Катедри за термотехнику у звању истраживач-приправник.

У склопу истраживања на Докторским студијама бави се термичким, аеродинамичким и хидродинамичким моделирањем процеса струјања и размене количине топлоте у котловском постројењу са посебним освртом на моделирање процеса млевења и сушења угља у вентилаторским млиновима.

Интензивно користи следеће софтверске пакете у свом раду: Ansys Fluent, MS Office Suite, MATLAB/Octave, Eclipse C/C++, Autodesk Inventor (сертификат о завршеној обуци издат од стране Катедре за производно машинство МФ-УБ), AutoCAD 2D, Revit MEP (Сертификат о завршеној обуци издат од стране Autodesk-a), Autodesk Plant 3D (Сертификат о завршеној обуци издат од стране Autodesk-a), и SolidWorks.

Поседује одлично знање енглеског језика (писање, читање, конверзација – напредни ниво) и служи се немачким језиком (писање, читање, конверзација – ниво А2).

Поседује возачку дозволу за управљање возилима Б категорије.

Ожењен је, отац је двоје деце.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

На Докторским академским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета Огњен С. Стаменковић је положио следеће испите: Виши курс математике (оцена 9), Нумеричке методе (оцена 10), ОМНИР и комуникација (оцена 10), Горива и посебна поглавља из сагоревања (оцена 10), Истраживање и публикување 1 (оцена 10), Одабрана поглавља из механике флуида (оцена 10), Аналогии физичких појава (оцена 10), Истраживање и публикување 2 (оцена 10), Вишефазна струјања (оцена 10), Постројења за припрему угљеног праха (оцена 10), Хидродинамика парних котлова (оцена 10), Истраживање и публикување 3, (оцена 10), Истраживање и публикување 4 (оцена 10) и Пројекат идеје докторске дисертације (оцена 10). Просечна оцена на докторским академским студијама кандидата је 9,96 уз остварених 120 ЕСПБ бодова.

Као докторанд Универзитета у Београду, у периоду од 31/8/2015. год. до 31/8/2017. године, учествовао је на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Софтверско окружење за интелигентно и адаптивно управљање комплексним пројектима“ (евиденциони број пројекта: ТР-32010) чији је руководилац др Сања Вранеш, редовни професор Универзитета у Београду. Током рада на пројекту учествовао је у изради техничког решења (М85) под називом „Систем за контролу и управљање на бази софтверског модула за оптимизацију комплексних инфраструктура са различитим изворима енергије“.

У периоду од 01/10/2017. год. до 31/12/2019. год. учествовао је на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Повећање енергетске и еколошке ефикасности процеса у ложишту за угљени прах и оптимизација излазне грејне површине енергетског парног котла применом сопствених софтверских алата“ (евиденциони број: ТР-33018) чији је руководилац др Срђан Белошевић, научни саветник у Институту за нуклеарне науке „Винча“.

У склопу активности за припрему лабораторијске опреме за испитивање механичких особина домаћих угљева извршио је машинско пројектовање и израду хидрауличне пресе за испитивање притисне чврстоће комада угља. У сарадњи са колегама из Института „Михајло Пупин“ – Аутоматика д.о.о. за хидрауличну пресу успоставио је систем управљања са корисничким интерфејсом и аквизицијом података током испитивања. Такође је извршио модификацију постојеће ударне дробилице у циљу прилагођавања њених радних параметара за потребе адекватне припреме узорка угља за испитивање коефицијента мељивости по Hardgrove методи.

Под менторством проф. др Драгане Животић (УБ-РГФ) извршио је литотипску анализу узорка угља са депоније угља блока 3 у Термоелектрани „Костолац“ за потребе процене афинитета ка млевењу угља у вентилаторским млиновима од стране фирме Тиажмаш, Сизран, Руска Федерација.

Коаутор је новог издања помоћног уџбеника „Термички прорачун парних котлова“ издатог 09/2025. год.

Аутор и коаутор је укупно 14 радова од којих 1 у међународном часопису категорије М22, 2 у међународном часопису категорије М23, 3 у часописима од националног значаја категорије М51, 6 саопштених на међународним скуповима и штампаним у целини категорије М33 и 2 рада саопштена на међународним скуповима штампаним у изводу М34. Такође је коаутор 2 техничка решења категорије М85.

Међународни часопис категорије M22

1. G. Stupar, D. Tucaković, **O. Stamenković**, L. Petrović, B. Vujičić, Ž. Novaković, Ž. Milanović, *Possibilities of steam boiler process optimization in the TPP Ugljevik*, Thermal Science, ISSN 0354-9836, <https://doi.org/10.2298/TSCI2301133S>, p. 133-149, 2022.

Међународни часопис категорије M23

2. **O. Stamenković**, G. Stupar, D. Tucaković, *Assessing the impact of specific weight of different-sized particles on operational performance of coal preparation plant*, Thermal Science, ISSN 0354-9836, <https://doi.org/10.2298/TSCI2301103S>, p. 103-119, 2023.
3. **O. Stamenković**, G. Stupar, D. Tucaković, A. Janković, *Possibilities for increasing efficiency of milling plant operation for the purpose of optimizing combustion process within power steam boiler*, Thermal Science, ISSN - 2683-3867, <https://doi.org/10.2298/TSCI230529255S>, pp. 2125-2140, 2025.

Рад у националном часопису категорије M52

1. **O. Stamenković**, G. Stupar, D. Tucaković, B. Bošković, *Detection of cause of pipe burst in economizer of Process CO steam boiler*, Tehnika, p. 55-69, ISSN 0461-2531, UDC: 658.1:665.6/.7(497.113) 621.184.2:539.4, [DOI: 10.5937/tehnika2201055S](https://doi.org/10.5937/tehnika2201055S), 2022.

Рад у националном часопису категорије M53

1. T. Bajc, M. Stevanović, N. Miletić, **O. Stamenković**, N. Krajnović, F. Vranić, M. Opačić, J. Svorcan, M. Jovanović-Popović, *Integralno održivo projektovanje zgrada na primeru idejnog projekta biblioteke Mansueto u Čikagu*, SAD, KGH časopis, Vol. 41, 4/2012, pp. 89-93.
2. **O. Stamenković**, G. Stupar, D. Tucaković, *Analiza uzroka havarije na visokopritisnom industrijskom parnom kotlu*, KGH časopis, Vol. 53, pp 89-95, 1/2024.

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

1. **O. Stamenković**, T. Živanović, D. Tucaković, G. Stupar, *3-D numerical simulation of two-phase flow during separation process of coal powder in mill inertial separator*, International conference „Power plants 2016“, Proceedings, p. 658 - 668, ISSN: 978-86-7877-027-2, 23.-26. November 2016, Zlatibor, Serbia.
2. G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, S. Belošević, **O. Stamenković**, *Impact analysis of primary measures reduction of NO_x processes in energy steam boiler of unit B1 TPP Kostolac*, International conference „Power plants 2016“, Proceedings p. 622 - 634, ISBN: 978-86-7877-027-2, 23-26. November 2016, Zlatibor, Serbia.
3. **O. Stamenković**, T. Živanović, D. Tucaković, G. Stupar, *Numerička simulacija kretanja čestica ugljenog praha prilikom napuštanja mlinskog separatora kroz kanal aerosmeše*, International conference „Power plants 2018“, Proceedings, p. 604 - 616, ISBN: 978-86-7877-029-6, 05.-08. November, Zlatibor, Serbia.
4. G. Stupar, D. Tucaković, **O. Stamenković**, L. Petrović, B. Vujičić, *Influence of the combustion system change on processes in the steam boiler in TPP Ugljevik*, International Conference „Power Plants 2021“, Proceedings, p. 322-333, ISBN: 978-86-7877-030-2, E2021-030, 17.-18. November 2021, Zlatibor, Serbia.
5. G. Stupar, D. Tucaković, **O. Stamenković**, S. Stevanović, *Impact analysis of primary measures reduction of NO_x processes in steam boiler K-3 of combined heat and power plant Novi Sad*,

International Conference „Power Plants 2021”, Proceedings, p. 340-352, ISBN: 978-86-7877-030-2, E2021-031, 17.-18. November 2021, Zlatibor, Serbia.

6. G. Stupar, D. Tucaković, **O. Stamenković**, *Measures for increasing overall heat output and ecological performances of TPP Kostolac B unit 1 after applying primary de-nox measures*, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2023", ISBN 978-86-7877-038-8, pp. 482 – 493, November 2023, Zlatibor, Serbia.

Саопштење међународног скуп штампано у изводу (M34)

1. **O. Stamenković**, G. Stupar, D. Tucaković, *Modelling Milling and Drying Process of Raw Coal in Fan Mill – Part 1: Characterization of Coal Particles Movement in Fan Mill Impeller*, 17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Book of Abstracts, p. 329, ISSN: 2706-3690, 6. - 11. November 2022, Pahpos, Cyprus.
2. **O. Stamenković**, G. Stupar, D. Tucaković, *Assessing the value of coal dust drying efficiency rate in impact-based milling facilities within TPP*, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2025", ISBN 978-86-7877-039-5, pp. 60, 04.-07. November 2025, Zlatibor, Serbia.

Ново техничко решење (M85)

1. Marko Batić, Nikola Tomašević, Dejan Paunović, **Ognjen Stamenković**, Tamara Jovanović, Sanja Vraneš, *Sistem za kontrolu i upravljanje na bazi softverskog modula za optimizaciju kompleksnih infrastruktura sa različitim izvorima energije*, SOFIA (TR-32010), 2015.
2. Marko Batić, Nikola Tomašević, Dejan Paunović, **Ognjen Stamenković**, Tamara Jovanović, Sanja Vraneš, *Kvalitativno unapređenje sistema za kontrolu i upravljanje energetske resursima kompleksnih infrastruktura sa različitim izvorima energije*, SOFIA (TR-32010), 2016.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија сматра да је кандидат **Огњен С. Стаменковић** испунио све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације и да је способан за самостални рад на предложеној теми. Поред одслушаних предавања, положених испита и одбрањеног пројекта идеје докторске дисертације, у протеклом периоду кандидат је обављао различита експериментална истраживања, учествовао у реализацији стручних пројеката и публиковао научне радове, што га квалификује за пријаву докторске дисертације „Моделирање процеса млевења и сушења угља у млинском постројењу са вентилаторским млином”.

2. Предмет и циљ истраживања

ПРЕДВИЂАЊА КРЕТАЊА ПОТРОШЊЕ И ПРОИЗВОДЊЕ ЕНЕРГИЈЕ У СВЕТУ И У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ У ПЕРИОДУ ДО 2050. год.

Интензитет технолошког развоја материјалних добара и процеса које обавља човек у регионалним и светским оквирима у 21. веку бележи завидне нивое у односу на блиску и, посебно, даљу прошлост његовог постојања. Последишно, човек постојеће процесе обавља све ефикасније истовремено откривајући нове чиме оптимизује своје окружење у складу са претходно дефинисаним циљевима. Процес електрификације и унапређења преноса информација, односно, података с почетка 21. века у томе предњачи чиме се постепено креира нови простор у коме се комуникација између објеката одвија брзо и

ефикасно без обзира на удаљености тачака између којих се она одвија. Овакав вид трансформације човековог окружења нужно је праћен континуираним повећањем укупне потрошње енергије из свих доступних извора примарне енергије.

Такав тренд, приказан на дијаграму „*Global Energy Consumption*“ у [1], поред временски-локализованих и краткотрајних падова присутан је током читавог 20. века. У овом периоду потребе за енергијом у великој мери подмириване су коришћењем фосилних горива као извора примарне енергије уз умерено повећање учешћа обновљивих извора као и нуклеарне енергије. Према овом дијаграму [1] на крају 20. века укупна глобална потрошња енергије износила је $\approx 9,46 \text{ Gtoe/год.}$ или $3,75 \cdot 10^{17} \text{ Btu/год.}$

Имајући у виду промену на глобалном нивоу оправдано је претпоставити да у надоласећем периоду уз императив одржања и интензивирања процеса технолошког развоја и поред потребе за опрезношћу услед непредвиђених политичких и економско-социјалних кретања потрошња енергије настави да расте. На дијаграму [2] приказана је потрошња енергије по регионима/организацијама до 2025. године са пројекцијама до 2050. године. Према кретањима на овом дијаграму процењено је да ће потрошња енергије у 2050. години бити приближно $883 \cdot 10^{17} \text{ Btu/год.}$ што представља повећање за приближно 34% у односу на потрошњу остварену у 2025. год. ($\approx 660 \cdot 10^{17} \text{ Btu/год.}$) и чак $\approx 135\%$ у односу на потрошњу на крају 20. века. Такође се може приметити да је глобални тренд раста неједнако заступљен по регионима тако да је он умерен у земљама чланицама ОЕСР (eng. **OECD** – **Organization for Economic Cooperation and Development**) организације и интензиван у осталим државама на свим континентима.

Према овој расподели може се закључити да се даљи извори раста на глобалном нивоу очекују у средње развијеним и неразвијеним земљама Европе, блиског и далеког истока и афричког континента. Раст потрошње енергије очекује се у свим секторима с тим да је он израженији у секторима индустрије и транспорта што је приказано на дијаграму на страни 3 у [3].

У циљу одржавања енергетског баланса, односно праћења повећане потражње за енергијом на глобалном и регионалном нивоу, у наредним деценијама такође се предвиђа повећање капацитета за производњу електричне енергије. На дијаграму „*Primary energy consumption by energy source*“ у [4] уочљив је, пре свега, тренд повећања удела обновљивих извора енергије у укупном електро енергетско-производном миксу уз благи раст укупне количине електричне енергије произведене из фосилних горива (угаљ, природни гас).

Процењује се такође да ће потрошња и производња угља на глобалном нивоу до 2030. године доживети благу стагнацију а да се након тога до 2050. године очекује њихов благи раст. На дијаграму „*World coal consumption and production*“ у [4] приметно је да се у периоду након 2030. године предвиђа повећање потрошње и производње угља у Индији и земљама које нису чланице ОЕСР организације док се у земљама које припадају овој организацији предвиђа одржавање нивоа коришћења овог извора примарне енергије постигнутог током треће деценије 21. века.

ПРОМЕНА СТРУКТУРЕ ИЗВОРА ПРИМАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ЕНЕРГЕТСКОЈ ТРАНЗИЦИЈИ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ У ПЕРИОДУ ДО 2050. ГОД.

У Стратегији развоја енергетике Републике Србије до 2040. год. са пројекцијама до 2050. год. [5] која је објављена у Службеном гласнику 28/11/24. анализирана су два сценарија по питању кретања потрошње финалне енергије на територији Републике Србије. Сценарио БАУ предвиђа повећање ове потрошње које је процентуално у складу са предвиђањима на глобалном нивоу. Супротно томе, сценарио С предвиђа стагнацију и, касније, пад у потрошњи финалне енергије. Према БАУ сценарију повећање потрошње

финалне енергије очекује се у јавном и комерцијалном сектору као и сектору транспорта и индустрије што такође одговара предвиђањима на глобалном нивоу приказаним на слици 3 у [5].

Анализом доступних енергетских ресурса на територији Републике Србије и могућностима за њихово коришћење у поглављу 5.1 текста Стратегије [5] дат је кратак осврт на постојеће билансне, ванбилансне, геолошке и потенцијалне резерве угља. На основу количине само билансних резерви приказане у [5] констатовано је да је угаљ значајни енергетски потенцијал и да се њима може обезбедити рад постојећих термоенергетских објеката до 2050. год., потенцијално и дужи.

У складу са тим на слици 15 у [5] приказано је кретање потрошње примарне енергије по сценаријима до 2040. год. са пројекцијама до 2050. год. Може се приметити да до 2040. године угаљ остаје доминантан извор примарне енергије с тим да према сценарију БАУ овај енергент у укупној потрошњи учествује са приближно 44 % док према Сценарију С он учествује са приближно 29 %. И овде је потребно нагласити да сценарио БАУ за разлику од осталих представљених подразумева да ће у наредном периоду доћи до повећања потрошње финалне енергије уз повећано учешће обновљивих извора што је у складу са предвиђањима на глобалном нивоу датим на претходно анализираним дијаграмима у [2] и [3]. На основу основних претходних приказаних података може се закључити да угаљ остаје један од главних извора за базу производњу електричне енергије у термоенергетским постројењима у наредном периоду на територији Републике Србије.

У Стратегији се такође истичу потребе за прилагођавањем постојећих капацитета за производњу електричне енергије који као основно гориво користе домаће угљеве. У тачки 7.1 [5] поред поменуте потребе за декарбонизацијом и смањењем емисије штетних гасова са императивним значајем наведена је сигурност снабдевања тржишта потрошача електричне енергије. Сходно томе, предвиђено је максимално ангажовање термоенергетских капацитета који квалитативно предњаче у спровођењу процеса конверзије примарне у електричну енергију и парцијално ангажовање осталих ресурса према потреби.

У свим активним термоенергетским капацитетима за производњу електричне енергије пројекти унапређења еколошких перформанси парних котлова су завршени или су у поодмаклој фази пројектовања и изградње. Тако су, на пример, након изградње стављена у функцију постројења за снижавање емисије сумпорних оксида у Термоелектрани „Костолац“ – блокови Б1 и Б2 као и Термоелектрани „Никола Тесла“ – блокови А3 – А6. Изградња овог постројења у Термоелектрани „Никола Тесла“ – блокови Б1 и Б2 је у завршној фази. Према [5] у наредном периоду планирана је изградња ових постројења и у Термоелектрани „Костолац“ А као и у Термоелектрани „Никола Тесла“ за блокове А1 и А2 чиме би се овим термоелектранама значајно продужио радни век кроз прилагођавање постојећим еколошким легислативама.

По сличној динамици вршена је и ревитализација постојећих енергетских парних котлова у циљу примене мера за снижавања емисије азотних оксида. Блокови Б1 и Б2 у термоелектрани „Костолац“ опремљени су системима за примарну и секундарну некаталитичку редуцкију ових полутаната. На парном котлу Блока Б1 термоелектране „Никола Тесла“ завршен је пројекат уградње примарних мера док се њихова оперативна примена очекује и на енергетском парном котлу блока Б2 истог постројења. Блокови А3 – А5 у Термоелектрани „Никола Тесла“ такође поседују системе за примарну редуцкију азотних оксида с тим да се у блоковима А1 – А2 и А6 очекује њихова уградња у наредном периоду (фаза пројектовања је завршена, очекује се почетак фазе уградње ових система).

Сви поменути термоенергетски капацитети снабдевени су ефикасним системима за отпашивање чврстих материја из димних гасова на бази примене електростатичког поља у коронарно разређеној средини на атмосферском притиску.

Укупни оперативни термоенергетски капацитети за производњу електричне енергије повећани су изградњом и пуштањем у рад (06/2025. год.) блока Б3 Термоелектране „Костолац“ номиналне снаге 350 MW. Овај блок пројектован је и изграђен по најновијим стандардима по питању енергетске ефикасности и еколошких перформанси.

На основу анализе представљених података на државном и глобалном нивоу у вези потрошње енергије и производње електричне енергије из различитих извора а у складу са појединим циљевима поменуте Стратегије (повећана енергетска ефикасност електроенергетског система уз перманентну доступност електричне енергије имајући у виду њену повећану потрошњу у годинама које долазе) може се закључити да ће будућа кретања по питању остваривања ових циљева бити усмерена ка изградњи нових капацитета уз континуални рад на одржавању и унапређењу перформанси постојећих постројења. С тим у вези имајући у виду домаће потенцијале у виду извора примарне енергије сврсно сходно је вршити анализу рада постојећих термоенергетских постројења у циљу детектовања простора за побољшање њихове енергетске ефикасности, ефективности, поузданости и расположивости кроз увођење иновација базираних на закључцима научно-истраживачког рада релевантних чинилаца друштва.

ПРИПРЕМА УГЉЕНОГ ПРАХА ЗА ПОТРЕБЕ САГОРЕВАЊА УГЉА У ЛЕТУ

Енергетски парни котлови су уређаји у коме се хемијска енергија горива конвертује у топлотну енергију продуката сагоревања високе температуре која се посредством грејних површина предаје пријемнику топлоте који се загрева, испарава и прегрева на притиску вишем од атмосферског. Приликом сагоревања угљеног праха у лету а у циљу оптимизације овог процеса неопходно је извршити млевење (уситњавање) и сушење сировог угља пре увођења угљеног праха у ложиште. Процес припреме угља за сагоревање обавља се у млиновима у којима се млевење може извршити применом неколико различитих механизма [6] и то: сечењем, туцањем, ударом и трењем сирових комада о чврсте површи. Приликом млевења геолошки млађих угљева (лигнита, мрко-лигнитских угљева) енергија која се сировом комаду испоручи ударом о чврсту површ под одређеним (технички могућим и оправданим) условима довољна је за његово уситњавање до нивоа потребног за сагоревање високореакционог чврстог горива у спрашеном стању [7]. Имајући у виду да се у домаћим термоелектранама углавном користи лигнит као основно гориво за његово уситњавање примењени су млинови код којих се млевење врши трењем и ударом.

У термоелектранама на угаљ на територији Републике Србије примењени су млинови чекићари, ДГС млинови и вентилаторски млинови са инерцијалним сепараторима приказаним у [6, 8]. Вентилаторски млин најмањег капацитета млевења (8,11 kg/s) део је котловског постројења у Термоелектрани „Костолац“ блока А1 док је највећи у земљи али и у региону у погону у Термоелектрани „Никола Тесла“ блок Б1/2 (40,0 kg/s). ДГС млинови примењени су на блоковима А3 - А5 Термоелектране „Никола Тесла“. Млинови чекићари релативно малог капацитета млевења користе се у мањим блоковима Термоелектране „Колубара А“ (блокви А1 до А4).

Досадашња искуства у експлоатације угља са површинских копова говоре да се његов квалитет у сваком погледу и поред претходно спроведених истражних радњи у циљу процене потенцијала налазишта може мењати у одређеним границама по стохастичким правилима. Промена квалитета укључује осцилације у топлотној моћи горива, количини влаге, минералних материја и волатила у радној маси, удела појединих литотипова и мацерала у његовој структури и афинитета према процесу млевења ударом.

Због тога котловско постројење треба да поседује механизме којима би се ове промене прихватиле тако да њихов утицај на укупну топлотну снагу котла буде елиминисан.

Са друге стране радне карактеристике млина за припрему угљеног праха могу значајно утицати на процес сагоревања у ложишту парног котла. Приликом промене топлотне моћи радне масе угља у циљу одржања топлотне снаге котла неопходно је извршити промену капацитета млевења млинова у раду или, по потреби, извршити стављање млина из резерве у погон, односно, извршити стављање ван погона млина у раду.

Смањење коефицијента мељивости угља може утицати на погоршање финоће млевења угљеног праха на излазу из млина чиме се умањује укупна површина угљених честица у контакту са околином [7, 8] што доводи до успоравања процеса коначног сушења, деволатилизације и паљења горива у зони горионика. Како је ложиште простор коначне запремине а време које честица проведе у њему ограничено [10] погоршање финоће млевења угљеног праха доводи до повећања губитка услед механичке непотпуности сагоревања [6, 9]. Тиме се директно смањује степен корисности ложишта и степен корисности котла у целини.

Извођењем модификација у млинском тракту као и променама радних карактеристика самог радног кола такође се може утицати на перформансе млинског постројења у целини. Увођењем додатних аеродинамичких отпора у канале за аеросмешу смањује се проток сушећег и транспортног флуида чиме се смањују брзине гасне фазе и њен потенцијал за транспорт честица угља [11]. Одређеним повећањем угаоне брзине радног кола могуће је побољшати интензитет удара којима се врши уситњавање честица угља чиме се побољшава финоћа млевења угљеног праха. Међутим, уколико се ова промена примени без претходне свеобухватне анализе нових радних услова система могуће је негативно утицати на свеукупне перформансе млинског постројења. Тако се, на пример, повећањем угаоне брзине радног кола млина повећава и проток сушећег флуида на улазу у млин чиме расту потребе за примарним ваздухом у циљу одржања температуре аеросмеше. Тиме се у значајном мери може извршити прерасподела примарног и секундарног ваздуха по млину у односу на пројектне вредности што се може негативно одразити на кинетику сагоревања у ложишту [12].

Поред тога, адекватна примена примарних мера за снижавање емисије азотних оксида захтева побољшање финоће млевења угљеног праха како би се успешно вршило сагоревање честица горива у подстехиометријској средини [13]. С тим у вези потребно је извршити модификацију постојећих млинских постројења у циљу прилагођавања свеукупног рада енергетских парних котлова новим радним условима.

Детекцију поменутих нежељених ефеката, предвиђање интензитета њиховог утицаја на радне карактеристике млинског постројења као и њихово уклањање могуће је спровести употребом адекватног математичког модела у коме се са довољном тачношћу може извршити предикција процеса кретања двофазне мешавине, сушења чврсте фазе и млевења честица угља. Такође, оваквим приступом било би могуће извршити анализу рада постојећих млинских постројења са циљем предлагања модификација за потребе постизања веће ефикасности у процесу припреме горива у термоелектранама које као основно гориво користи угаљ.

МОДЕЛИРАЊЕ МЛЕВЕЊА ЧВРСТИХ ЧЕСТИЦА УДАРОМ – РАЗВОЈ ПРОРАЧУНСКИХ МОДЕЛА, ТРЕНУТНО СТАЊЕ И ТРЕНДОВИ У НАУЦИ

Математички модели базирани на емпиријским подацима и експерименталним испитивањима

Први прорачунски модели уситњавања честица настали су средином 20. века. Због комплексности самог процеса у недостатку рачунарских ресурса за потребе спровођења великог броја рачунских операција у кратком временском року ови модели формиран су углавном на зависностима добијеним експерименталним или емпиријским путем. Како би њихово коришћење у инжењерским прорачунима било релативно једноставно ове зависности су, након идентификације главних утицајних параметара процеса, представљене у форми израза који се користе у свакодневној инжењерској пракси. Израз за срачунавање капацитета млевења вентилаторског млина с почетка 70-их година прошлог века приказан у литератури [14]. Израз сличне форме дат је у [8], док је израз са мање утицајних параметара приказан у [9].

Паралелно са наглим повећњем рачунарских ресурса приступ моделирању овог процеса постајају све сложенији. Постепено су изрази за предвиђање гранулације честица након млевења као и капацитета млевења постајали сложенији са већим бројем утицајних параметара и повећаном прецизношћу коначног резултата прорачуна. У радовима [15, 16] објављеним с почетка 21. века анализиран је рад млина са ваљцима у случају млевења зрна пшенице у прехранбеној индустрији. Аутори у раду [15] предлажу да се корелација између гранулације материјала пре и после млевења успостави помоћу „једначине лома“ (израз (8) у [15]). У овој векторској једначини компоненте вектора σ представљају масене фракције честица различитих пречника после млевења чије се вредности срачунавају скаларним множењем „матрице лома“ B (вектор другог реда) и векторске функције f (масене фракције честица различитих пречника пре процеса млевења). Вредности коефицијената у „матрици лома“ након спроведених експеримената дате су у табели 2 у [15] и одређени су експериментално за сваку анализирану вредност размака између ваљака. У раду [16] извршена је генерализација једначине лома тако што су вредности матрица лома моделиране употребом полиномске зависности другог реда у функцији од односа размака између ваљака и иницијалне карактеристичне дужине зрна пре млевења (G/D). Овакав начин моделирања је показао добра слагања са резултатима експеримената за променљиви размак између ваљака. Поредбени приказ резултата извршених експеримената и прорачуна предложеног математичког модела дат је на слици 2 у [15]. Трендови на слици указују на чињеницу да се честице мање карактеристичне дужине теже мељу, односно, да је након њиховог млевења мањи удео фрагмената ситнијих фракција од иницијалних. Упоредјујући удео фрагмената мањих карактеристичних дужина након млевења за исту иницијалну дужину зрна игличастиг облика и различите размаке између ваљака може се закључити да је тај удео мањи за веће вредности размака из чега следи да се финоће млевења зрна погоршава удаљавањем ваљака млина. Овај закључак је очекиван јер се повећањем размака повећава проточни пресек између ваљака кроз који могу да прођу зрна карактеристичне дужине једнаке или мање од поменутог размака без интеракције са ваљцима млина.

Сложенији приступ моделирања млевења ударом приказан је у публикацији [17] у којој је предложен и анализиран модел за предикцију лома честица без обзира на врсту материјала који се меље у ударним млиновима. Аутори полазе од претпоставке да се вероватноћа да ће до лома честице доћи може срачунати помоћу израза (1) у [17]. Према овом изразу вероватноћа „лома“ зависи од механичких особина материјала, броја судара честица о чврсту површ, кинетичке енергије честице током судара и мини-

малне кинетичке енергије честице при којој се она распада на мање фрагменте. У даљој анализи наведено је да се у укупној маси свих честица након млевења (на излазу из млина) могу налазити, у општем случају, „нове“ честице које су продукт уситањавања крупнијих и честице чија димензија и маса у процесу млевења није промењена (које су услед своје чврстоће за услове судара остале „несамлеване“). За потребе прорачуна функције лома (q_v) аутори предлажу израз (3) у [17] на бази бимодалне функције нормализоване логаритамске расподеле. Параметри у овом изразу (станрадне девијације, медијалне вредност, фактор расподеле максимума функција) су затим изражени у функцији од димензије иницијалне честице, ефективне енергије која се честици у судару испоручи и параметра материјала f_{Mat} . Уколико вредност овог параметра није унапред позната у раду се наводи да је могуће изразити је у функцији од индекса ломљивости материјала - H/K_c .

За потребе валидације модела коришћени су резултати извршених експерименталних испитивања млевења честица израђених од следећих материјала: глицин, сахароза, тартарна (винска) киселина, ацетил-салицилна киселина, аскорбинска киселина, лактоза, кречњак, амонијум-сулфата, прах од епокси смоле.

Према ауторима овакав приступ моделирању лома честице даје задовољавајуће резултате за случајеве код којих је вредност параметра S једнака или мања од 90%. За веће вредности функције вероватноће лома постоје одступања која је потребно додатно анализирати, посебно за случајеве већих „ударних“ брзина честица. Аутори такође наводе да у истраживању није узет у обзир облик честице што може у одређеној мери утицати на коначни резултат процеса. Такође, додатну пажњу треба посветити моделирању утицаја трења честице о чврсту површ на процес устињавања што није обухваћено овим истраживањем. У извршеним експериментима за потребе валидације модела прилазни угао честице у односу на чврсту површ био је 60° и 90°. Аутори сматрају да је промена прилазног угла на коначни резултат прорачунског модела узета у обзир имајући у виду да се кинетичка енергија честице приликом судара рачуна помоћу пројекције брзине честице на правац управан на сударну раван.

У раду [18] анализиране су перформансе лабораторијског млина са чекићима приликом млевења индонежанског угља ЕСО са циљем прилагођавања коефицијената у РВЕ (eng. *Population balance equation*) једначини датој од стране Остина (енг. *Ostin*) за потребе моделирања функције лома. Анализиран је рад млина са различитом гранулацијом сировог угља и различитим отворима на сити у излазном попречном пресеку млина. У оваквим условима рада аутори закључују да улазна гранулација не утиче на финоћу млевења што се може сматрати карактеристиком млинова са ситима у излазном попречном пресеку. Код оваквих конструкција материјал који се меље остаје довољно дуго у млину све док гранулација свих честица не буде једнака или мања од отвора на примењеном сити. У складу са тим, време задржавања честица у млину повећава се са смањењем отвора на сити, погоршавањем гранулације угља на улазу у млин као и са повећањем протока честица које се уводе у млин. Са слике 5 из [18] може се такође уочити да након одређене вредности капацитета млевења за различите димензије отвора на сити резиденцијално време честица нагло расте. Фокус истраживања процеса млевења је оптимизација енергије утрошене за свеукупни рад млина са циљем да се избегне продукција „премлевог“ угљеног праха (према ауторима „премлеване“ честице су пречника мањег од 100 μm). С тим у вези, аутори се у раду не баве анализом и објашњавањем уоченог тренда на слици 5 из [18]. Међутим, имајући у виду да млин поседује коначни број ударних чекића, односно, ударних површина може се претпоставити да повећање протока чврсте фазе на улазу у млин након одређене вредности није праћено повећањем судара честица са ударним чекићима због чега се резиденцијално време честица за примењено сито на излазу из млина повећава.

У раду је даље анализирана погодност примене познатих закона (енг. *Rittringer, Kick, Bond*) за апроксимацију енергије утрошене приликом млевења. Након анализе резултата прорачуна за сва три коришћена закона аутори закључују да употреба Ритрингеровог (енг. *Rittringer*) закона даје најмања одступања у односу на измерене вредности на лабораторијском млину.

Још један модел лома честице приказан је у раду [19]. За потребе моделирања примењена је шема класификације и предвиђања расподеле честица након лома са повратном спрегом са слике 1 у [19]. У складу са приказаном шемом аутор примењује израз (1) из [19] за потребе срачунавања гранулације честица на излазу из млина. За потребе моделирања функције класификације коришћена је кумулативна Вајбулова (енг. *Weibull*) расподела при чему је претпостављено да у овој функцији коефицијент k зависи од угаоне брзине ротора. Минимални пречник честице након лома одређује се помоћу израза (8) из [19]. Функција лома представља збир две Бродбен-Калкот (енг. *Bro-adbent-Calcott*) расподеле. Параметрима m и l у овој функцији контролише се њен облик а њихове вредности зависе од карактеристика материјала. Параметар ϕ представља удео ситних честица (фракција) у чврстим честицама на крају процеса млевења. Његова вредност рачуна се помоћу зависности (12) из [19] која је исте форме као и израз за срачунавање d_{min} .

Предложени математички модел валидиран је у складу са резултатима мерења извршеним за различите угаоне брзине ротора и капацитете млевења на чекићарском млину пречника 650 mm и дужине ударног дела од 450 mm. Слагање резултата прорачуна и извршених експеримената приказано је на сликама 2 и 3 у [19]. Анализом трендова са ових слика може се закључити да без обзира на проток чврсте фазе на улазу у млин финоћа млевења се побољшава убрзавањем радног кола млина. На дијаграмима су такође уочљиве минималне разлике између резултата прорачуна и извршеног експеримента. Такође се може закључити да је финоћа млевења честица лошија у случају рада млина са већим протоком чврсте фазе на његовом улазу (слика 13б, проток чврсте фазе - 7 t/h) у односу на рад млина са 2 t/h и истим угаоним брзинама радног кола. Са слика 3а и 3б из [19] приметно је смањење минималног пречника честице као и повећања параметра ϕ (израз 12 из [19]) у случају повећања угаоне брзине ротора што је у складу са претпоставком да се за већу уложу ударну енергију честица у контакту са ротирајућом површи распада на финије фрагменте.

Резултати испитивања лома чврстих комада две различите врсте гипса (са садржајем влаге од 30% и 40%) сферичног облика приказани су у раду [20]. Комади различитих пречника сфере (50, 60 и 75 mm) подвргнути су испитивањима двоструког удара (енг. *double impact test*) коришћењем лабораторијске апаратуре у истраживању (енг. *Dynatup 8250*) којом је могуће варирати ударну брзину у распону од 1 до 9 m/s.

Посматрајући гранулацију честица након лома аутори су детектовали укупно 12 образаца лома у које су могли да сврстају продукте укупно 140 извршених испитивања комада гипса. Ови обрасци приказани су на слици 4 у [20]. На слици 9 у [20] дат је приказ просечне утрошене енергије приликом теста двоструког удара за сваки од испитиваних случајева.

Сагледавајући расподелу честица након лома аутори наводе да је степени закон Гејт-Гаудин-Шуман-а (енг. *Gate-Gaudin-Schuhmann*, израз (2) у [20]) одговарајући за њено описивање с тим да се након лома уочавају две групе честица – крупније и ситније, због чега експонент у изразу (2) у [20] може да се креће у границама од 0,8 до 1,6. Више вредности одговарају већој ударној енергији и финијој гранулацији након млевења док ниже вредности одговарају мањој ударној енергији и већој чврстоћи материјала који се испитује. Такође, на дијаграмима слике 9 у [20] уочљиво је да се приликом повећања ударне енергије повећава финоћа самлевених честица за различите по-

четне пречнике сфера. У даљем излагању анализиран је енергетски биланс честице у току лома. Констатовано је да је укупна енергија која се саопшти честици ударом пре лома једнака збиру енергије која је потрошена на стварање нових површина (дисолуције почетног комада), кинетичке енергије фрагмената/продукта млевења и енергије коју су фрагменти апсорбовали у виду пластичних деформација. Овај закон искоришћен је за предикцију вредности специфичне енергије честице (γ) и модула лома (H). Анализом кретања ових параметара уочено је да γ не зависи од пречника честице али се мења у складу са променом њене чврстоће. Насупрот томе, параметар H се смањује са смањењем пречника честице и не зависи од њене чврстоће.

У раду [21] дат је сажети преглед поступака испитивања карактеристика лома појединачних честица угља (енг. *Single particle breakage*). Аутори наводе да се за потребе карактеризације механичких особина честице најчешће користе поступци једноструктог удара честице (енг. *Single impact tests*), двоструктог удара (енг. *Double impact tests*) и испитивања притисне чврстоће малим брзинама утискивања испитног комада. За потребе процене утрошене енергије приликом лома честице аутори наводе да је поступак испитивања клатном одговарајући. Овим поступком извршено је испитивање утицаја ударне енергије и улазне гранулације честица за млевење на финоћу млевења за две врсте угља – *Ensham* и *South Blackwater* угљ (Аустралија). На слици 6 из [21] приказана је промена финоће млевења за исти тип угља идентичне улазне гранулације у случају када се за млевење ударом на лабораторијском клатну примењују две различите ударне енергије. Сходно трендовима на слици може се закључити да се за већу уложену ударну енергију финоћа млевења угљеног праха побољшава. Ову тезу потврђују и трендови на слици 8 из [21] при чему је за два различита типа угља анализиран утицај примењене ударне енергије као и утицај улазне гранулације угља на финоћу млевења угљеног праха. Побољшањем улазне гранулације за исту примењену ударну енергију утиче се позитивно на финоћу млевења угљеног праха након испитивања. Коментаришући резултате ових испитивања аутори [21] предлажу математички модел којим би се вршила процена коначне финоће млевења као и утрошене енергије за млевење угља само на основу једног познатог параметра лома разматраног типа честице. Анализом остатака на различитим ситима долазе до закључка да постоји приближно линеарна зависност између остатка на сити које је 50 пута мање од медијалног пречника групе честица пре испитивања (ознака t_{50}) и остатка на осталим ситима ($t_{1,4}$, t_2 , t_5 , t_{10} , t_{25} , t_{100}), што је приказано на слици 9 у [21]. На основу тога претпоставља се да уз познавање параметра t_{50} и његове промене у функцији специфичне енергије која се троши за млевење угља (слика 9 из [21]) као и улазне гранулације угља, могу одредити остаци на осталим ситима, односно, укупна финоћа угљеног праха након млевења.

Овакав тренд уз нешто веће расипање тачака и одступања од линеарног закона зависности ових параметара потврђен је приликом испитивања две анализираних врсте угља и приказан је на слици 10 из [21]. Такође, висок степен линеарности тренда промене параметра t_{50} у функцији од специфичне утрошене енергије за млевење угља приметан је на слици 12 из [21].

Овакав приступ моделирању млевења угља ударом у многоструку олакшава предикцију главних параметара процеса млевења уз неопходност претходног познавања наведеног параметра t_{50} и утицаја специфичне енергије за млевење као улазне гранулације угља. Иако показује добро слагање са резултатима испитивања неопходно је извршити његову потврду на већем броју угљева различитог геолошког и географског порекла.

Овакав приступ моделирању процеса уситњавања чврстих честица ударом има ограничену примену због тога што би свако одступање анализираних параметара у односу на поставке експерименталних испитивања према којима су изрази добијени довело до

великих одступања у предикцијама резултата млевења. Утицај одступања анализираних процеса и експерименталних испитивања је приказан у [15, 16] где су за сваку нову вредност размака између ваљака вршена додатна испитивања у циљу одређивања нових вредности коефицијената матрице лома. Тиме су након корекције коефицијената матрице одступања резултата предложеног математичког модела у односу на резултате експеримента значајно смањена. Дакле, примењен је алгоритам: успостављање прорачунског модела → извођење експеримената → корекција прорачунског модела → провера валидности резултата у новим радним условима. Овакав приступ не пружа могућност да се са задовољавајућом тачношћу математичким моделом предвиде перформансе млевења у случају промене геометрије елемената млина којима се врши млевење. Међутим, добијени изрази могу са одређеном сигурношћу бити коришћени за идентификацију утицајних параметара и апроксимацију тренда њиховог утицаја на срачунати параметре процеса млевења. На пример, из свега наведеног у овом поглављу може се закључити да су параметри процеса ударног млевења који се од стране аутора у цитираним публикацијама сматрају најутицајнијим: чврстоћа материјала који се подвргава ударном млевењу, улазна гранулација честица и уложена ударна енергија (односно, релативна брзина при којој се честица судара са чврстом површи). Поред тога, ови модели погодни су за спровођење брзих инжењерских прорачуна са задовољавајућом тачношћу за процесе који су слични онима помоћу којих су модели формирани.

Моделирање процеса лома моделирањем унутрашње структуре честице

Као што је већ напоменуто, увођењем рачунара у научно-истраживачку делатност крајем 20. века појавила се могућност да се, поред моделирања процеса млевења емпијским и експерименталним методама, овај процес разматра уз претходну апроксимацију унутрашње структуре честица. Тако је у раду [22] из 1994. године дат опис новог модела лома једне честице кружног облика у дводимензионалном простору за случајеве промене кинетичке енергије честице приликом удара E_{kin}/E_{cr} , односа брзине честице и брзине простирања поремећаја у њеној структури у тренутку удара V_0/C и Поасоновог коефицијента ν . Приликом моделирања унутрашње структуре честице претпостављено је да је она састављена од великог броја троуглова чије се изводнице додирују осим изводница „спољашњих“ троуглова које чине спољашњу контуру круга. За потребе моделирања кохезионих сила између два елемента у контакту претпостављено је да је заједничка изводница састављена од одређеног броја „влакана“ који повезују два елемента на случајно изабраним тачкама. Свако влакно има одређену крутост у правцу нормалном на заједничку изводницу између елемената (K_n) као и крутост у правцу тангентном на правац изводнице (K_t). Интензитет кохезионе силе у правцу нормалном на границу између елемената добија се множењем пројекције дужине влакна на правац нормалан на границе елемената и коефицијента крутости у том правцу. Аналогно сили у нормалном правцу на заједничку изводницу може се срачунати интензитет силе у тангентном правцу. Раздвајање елемената (иницијални лом честице) настаје у случају када вредност напона који се јави у влакнима на границама елемената буде већа од критичног/граничног – фигуративно, пуцање влакана. Троуглови од од кога је „изграђен“ круг у тренутку судара са чврстом површи се не деформишу већ се њихово „преклапање“ или „удаљавање“ сагледава кроз повећање односно смањење кохезионих сила у два управна правца. Неки од резултата приказани на слици 4 из [22]. Приликом прорачуна кретања честице и фрагмената након лома, односно, коришћен је компјутерски код израђен на бази ДЕМ (енг. **DEM** - *Distinct Element Method*) методе. Након свих извршених прорачуна аутори закључују да повећање кинетичке енергије лома као и односа V_0/C доприносе финијој гранулацији нових честица на крају лома, што је и

оčekivano. Такође констатују да промене вредности Поасоновог коефицијента не утичу значајно на коначан резултат прорачуна. У даљем образлагању резултата упоређују се доприноси финијој гранулацији у случају повећања кинетичке енергије честице и ударне брзине о чврсту површ.

Даљи развој овог модела приказан је у [23] где се приликом дисолуције честице разматрају два доминантна механизма – I механизам који се манифестује приликом реакције честице у тренутку судара са чврстом површи и II механизам који настаје након иницијалног лома и индукован је „заосталим“ напонима између новонасталих фрагмената. Визуелни приказ резултата манифестације ова два механизма дат је на слици 7 у [23]. Велики комади који се након лома удаљавају од места контакта са чврстом површи резултат су рада I механизма док се даље уситњавање фрагмената у близини контакта наставља II механизмом.

У раду [24] је анализиран лом честице „растреситог“ агломерата манитола, чија хемијска форма одговара дугачким угљоводоничним ланцима из фамилије шећерних алкохола. Агломерат је у математичком моделу описан као скуп честица пречника 5 μm између којих, поред осталих сила при кретању, делују и привлачне Ван дер Валсове силе. У овом истраживању аутори су разматрали утицај брзине судара и угла прилаза честице чврстој површи на карактер њене дисолуције. На слици 2 из [24] приказан је интензитет промене силе на зиду и број новонасталих честица у кратком периоду након судара (случај када је ударна брзина честице 10 m/s а прилазни угао 45°). Сила на зиду достиже свој маскимум само након 4 μs од тренутка иницијалног контакта након чега убрзано опада и прилази вредности која ће остати константна након судара. Број новонасталих фрагмената достиже константну вредност од приближно 700 комада након 160 μs од тренутка судара.

Графички приказ резултата прорачуна дат је на сликама 12а и 12б у [24]. Са слике 12а из [24] је уочљиво да приликом повећања брзине судара гранулација новонасталих честица константно бива финија. Насупрот томе, симулирањем судара при ударној брзини од 10 m/s и различитим прилазним угловима (слика 12б из [24]) добија се да је гранулација честица најфинија при сударима под прилазним углом од приближно 45°. Овакав тренд објашњен је чињеницом да се код „растреситих агломерата (за разлику од „чврстих“) приликом судара прекидају постојеће везе али услед дејства унутрашњих кохезионних сила настају нове због чега се идеалним не сматра судар честице са равном површи под правим углом. И у овом истраживању за моделирање лома честице и интеракције између компонената агломерата коришћен је **DEM** метод.

Сличан приступ прорачунском моделу у [25] описан је и у радовима [22, 23, 24] где је анализирано понашање комада угља приликом његовог контролисаног утискивања између две плоче по моделу „бразилског“ теста. Комад угља моделиран је као агломерат од честица пречника 100 μm (доња гранична вредност услед ограничености прорачунских капацитета). Иако прорачунски модел показује добро слагање са резултатима испитивања аутори наводе да његова примена није могућа у случају симулирања рада млина због малог инкременталног временског корака потребног за одржања стабилности симулације (испод 100 μs). У раду [25] је такође наведено да су одређени механички параметри испитиваног узорка усвојени из литературе (Јунгов модул еластичности, Посаонов коефицијент). С обзиром да је угаљ нехомогени материјал и да његова унутрашња структура зависи од великог броја параметара који нису унапред познати оваква апроксимација може довести до одређених незанемарљивих одступања у коначним разматрањима овог процеса.

У раду [26] приказани су резултати примене новог модела дисолуције агломерата ударом у коме степен лома агломерата (број раскинутих веза у односу на укупан број веза између елемената у агломерату) зависи од ударне брзине, механичких особина

градивних елемената и контактне енергије између њих. Уведена је нова бездимензиона група која даје бољу предикцију кретања степена лома од различитих вредности контактних енергије између елемената у односу на случај када се овај параметар изражава искључиво у функцији Веберовог (енг. *Weber*) броја. За потребе прорачуна и у овом случају коришћен је **DEM** метод. Важно је истаћи да и у овом приступу, као и у претходним описаним, повећање ударне брзине утиче на повећање степена лома агломерата, што је приказано на слици 1 из [26]. Тај ефекат је још израженији уколико је површинска енергија између елемената агломерата мања.

Овакав приступ моделирању процеса уситњавања честице ударом је применљив у случају када је могуће извршити апроксимацију интензитета кохезионих сила у хомогеном материјалу између основних елемената од кога је она изграђена. Примена детаљног моделирања унутрашње структуре честице у случају млевења у проточним системима као што је ударни млин могуће је уколико се разматра судар свега неколико до неколико стотина честица. У супротном, потребни су значајни компјутерски ресурси да се неки од ових модела примене за потребе апроксимације процеса млевења нехомогеног материјала какав је угаљ по својој структури за огроман број честица које улазе у млин котловског постројења. Међутим, анализирајући овај приступ моделирању дисолуције честице на фрагменте може се закључити да се унутрашња структура може описати применом параметра површинске енергије честице или моделирањем интерструктурних (привлачних и одбојних) сила између основних елемената у материјалу помоћу модела „меке” или „тврде” сфере [11]. И код оваквог приступа треба нагласити да су резултати свих анализираних публикација у складу са закључцима приказаним у претходном поглављу – слабије материјале карактерише нижа вредност површинске енергије градивних елемената, односно, нижи интензитет интерструктурних сила између фрагмената због чега се применом исте вредности ударне енергије добијају финији фрагменти у односу на чврстије материјале (важи и обрнуто).

Моделирање кретања честица у млину без ефекта лома

Приликом млевења ударом честица почетног пречника d креће се у унутрашњој запремини млина до тренутку иницијалног судар са чврстом површи (која може бити покретна или непокретна) након чега се она распада на ситније фрагменте. У закључцима анализа из [22] и [26] показано је да на ефекат лома значајно утиче прилазна, односно, ударна, брзина честице и прилазни, односно, ударни угао у односу на вектор нормале сударне површи. С тим у вези, за потребе побољшања перформанси млина сврсисходно је анализирати кретање честица под дејством сила које на њу делују у циљу оптимизације параметара којима се описује њено кретање а који доминантно утичу на лом при судару о чврсту површ. У складу са тим део истраживања процеса млевења фокусиран је на изучавање кретања чврсте фазе у млинском простору без моделирања процеса дисолуција самих честица. Овај приступ подразумева решавање једначине кретања честица у датом простору примењујући модел „тврде” сфере за потребе описивања интеракције чврсте фазе са ударним површинама млина.

У раду [27] приказани су резултати анализе струјања двофазне мешавине (гасне фазе и чврстих честица) у ударном млину. Геометрија анализираних млинских постројења са уводним каналом дата је на слици 1 из [27]. Пречник радног кола је 610 mm док је његов број обртаја 6000 %/min. Погонски агрегат је дизел мотор снаге 222 kW са 6 цилиндара. За потребе квантификације граничних услова прорачунског модела испитно постројење снабдевано је мерачима статичког притиска и температуре у његовом улазном и излазном попречном пресеку.

Прорачун струјање двофазне мешавине извршен је помоћу софтверског пакета FLUENT применом Ојлер-Лагранжовог (енг. *Oiler-Lagrange*) модела [31] који подразумева нумеричко решавање једначине струјања флуида уз интеракцију са чврстом фазом у мешавини. Кретање чврсте фазе одређено је решавањем другог Њутновог закона укључујући и утицаје којима гасна фаза делује на честице у двофазној струји. За потребе формирања система једначина затвореног типа решавање су још и једначина континуитета гасне фазе, као и једначине енергије обе фазе у мешавини. За потребе укључивања ефекта ротације радног кола на струјање двофазне мешавине примењен је РРФ (енг. **RRF** - *Rotating Reference Frame*) модел. Интеракција између чврсте фазе и граничних површи модела описана је моделом „тврде“ сфере [11].

Резултати прорачуна представљени су графички на сликама 5 до 8 у [27] приказом поља температуре, поља притиска и расподеле Маховог броја у анализираној запремини. Анализом кретања чврсте фазе аутори долазе до закључка да прилазна брзина честица радном колу зависи од пречника честица и може се апроксимирати Вајбуловом (енг. *Weibull*) расподелом. Приказ ове зависности дат је на слици 10 из [27]. Сумирањем броја судара у прорачунском моделу аутори наводе да је њихов број највећи о површи радног кола млина. Међутим, незанемарљив број судара дешава се и у дифузору на улазу у радно коло али и спирали кола, односно, о површи запремине непосредно пре излазног попречног пресека. Аутори наводе да су судари у дифузору резултат кретања честица изузетно малог пречника приликом њиховог кретања кроз локалне вртлоге у гасној фази, али и повратног кретања крупнијих честица након иницијалног удара о тело радног кола. Графички приказ ових констатација дат је на слици 12 из [27].

Резултати још једног истраживања кретања честица у ударном млину приказани су у раду [28]. У овој публикацији аутори разматрају карактер интеракције између чврстих инертних честица и граница струјног простора приликом њиховог кретања у самом млину. Приказ испитне инсталације, 3D модела и нумеричке мреже за спровођење прорачуна дати су на слици 2 из [28]. Радно коло млина састоји се од 8 чекића димензија 8 x 15 mm (ширина x висина) чији је пречник 119 mm са укупном ширином унутрашње запремине од 30 mm. Зазор између чекића и статорског дела износи 0,5 mm. Статорско коло израђено је од конвексно-конкавних површи ради побољшања процеса млевења. Номинална угаона брзина радног кола износи 267 %s при којој је обимна брзина врха чекића 105,7 m/s.

Приликом прорачуна струјања двофазне мешавине коришћен је CFD-DPM (енг. *Computational Fluid Dynamics - Discrete Parcel Method*) приступ [31]. Струјање носећег флуида (ваздуха) окарактерисано је као стишљиво, турбулентно и тродимензионално при чему је за моделирање турбулентних напона коришћен $k-\epsilon$ турбулентни модел [11]. За потребе прорачуна кретања чврстих честица коришћен је Лагранжов приступ при чему је за сваку честицу решавана једначина кретања крутог тела (II Њутнов закон) у којој је претпостављено да на честицу делују сила отпора честице пре кретању кроз флуид и сила земљине теже. Лом честице приликом контакта са границама струјног поља у овом случају није моделиран. Све честице коришћене у анализи истог су хемијског састава, сферичног облика и идентичног пречника (монодисперзни прах). Утицај кретања чврсте фазе на струјање флуида је занемарен услед чињенице да је запремински удео чврсте фазе у струјном простору мањи од 10,0% (аутори наводе вредност од 3,4%). Ротација радног кола млина моделирана је помоћу СММ (енг. **SMM** - *Sliding Mesh Model*, [29]) а струјање двофазне мешавине посматрано као квази-стационарно.

Приликом анализе поља статичког притиска (слика 5 из [28]) у ударном млину аутори наводе да је поље повишеног притиска у односу на осталу запремину разматраног струјног простора распоређено по обиму ударног млина из два разлога: 1) напоре, услед дејства центрифугалне силе статички притисак флуида расте у радијалном

правцу у односу на осу радног кола млина и најнижије у области улазног попречног пресека флуида у струјни простор и 2) ефекат повишавања статичког притиска је у овом случају израженији услед постојања статора чија је површина конкавно-конвексног облика.

Аналогно пољу притиска, поље брзине (приказано на слици 7 из [28]) карактерише ротационо струјање флуида при чему је брзина флуида најмања у близини осе ротације а највећа у близини спољашњег пречника ударног тела. Изразито вртложно струјање локалног карактера приметно је у конкавном делу статору што се може тумачити као последица наизменичног пролажења чекића при ротацији радног кола и геометрије статорског дела млина. Аутори такође наводе да је брзина флуида у непосредној близини ударног тела за 3% већа од брзине ударног тела што је објашњено чињеницом да је у близини спољашњег пречника ударног тела статички притисак флуида повишен и да је ефекат стишљивости у том подручју најизраженији.

Након сагледавања карактера струјања гасне фазе аутори даље анализирају карактер кретања честица у струји носећег флуида у близини чекића, односно, у пољу највиших обимних брзина роторског дела млина. У раду се наводи да честице у близини чекића убрзавају услед дејства силе отпора кретања чврсте фазе а не услед судара у површи ударног тела (слика 9а у [28]). Затим, са нешто већим интензитетом брзине улазе у конкавни део статора (слика 9б [28]) и ударају о конкавну површ (слика 9ц у [28]) након чега се одбијају настављајући даље кретање (слика 9д у [28]). Приметно је локално повишење притиска у близини посматраних честица пре (слика 9б у [28]) и у тренутку судара (слика 9ц у [28]).

Претходно описано кретање честица потврђено је снимком кретања честица у овом делу млина направљеним помоћу камере велике резолуције (слика 10 у [28]). Анализирајући укупан број, локацију и брзину при којој се судари дешавају (слика 11 у [28]) аутори наводе да се већина судара дешава о границе струјног простора при брзинама које су знатно мање од обимне брзине чекића. Број судара опада са повећањем „ударне“ брзине да би достигао локални минимум након чега расте до достизања вредности обимне брзине чекића. Међутим са порастом брзине значајно већим интензитетом расте број судара честица са конкавним статором у односу на број судара са чекићима радног кола. Аутори додатно наводе да је максимална брзина судара честице и конкавног статора чак 1,4 пута већа од брзине ударног тела млина и да ће се процес млевења честице већим делом дешавати услед судара честице са статором млина. Имајући у виду геометрију струјног простора може се закључити да за млинове код којих су ширина чекића, разлика између спољашњег и унутрашњег пречника чекића као и укупни број чекића релативно мали број судара честица са чекићима је мањи у односу на број судара честица са осталим површинама у млину. Сходно томе, стиче се утисак да је радно коло, поред учествовања у процесу млевења, пројектовано и димензионисано тако да својом ротацијом обезбеди оптимално струјно поље носећег флуида како би се већина судара при високим брзинама дешавала о конкавну површу статора млина.

Приликом смањења угаоне брзине радног кола може се приметити да се смањује распон вредности брзина при којима се судари дешавају (слика 11 [28]). Међутим, општи облик зависности у сва три случаја има облик бимодалне криве због чега се може тврдити да се променом угаоне брзине радног кола не мења карактер струјног поља гасне фазе.

На слици 12 у [28] приказана је зависност удела броја удара у функцији од ударне брзине за различите пречнике честица. Може се приметити да честице мањег пречника (25 μm) контакте са границама струјног поља остварују већином при брзинама које су мање од обимне брзине чекића. Аутори овакав тренд објашњавају чиње-

ницом да на мање честице делује инерцијална сила мањег интензитета и да се услед тога њихове трајекторије у великој мери поклапају са струјницама гасне фазе. Како се пречник честица повећава дејство инерцијалне силе има све већи значај при одређивању њене коначне трајекторије па се судари чврсте фазе са границама струјног поља дешавају већином у области брзина једнаких или већих од обимне брзине чекића.

Валидација кретања честица у радном колу вентилаторског млина приказана је у публикацији [30]. У овом раду анализирано је кретање двофазне мешавине (транспортни флуид и честице угља) у млину N400.42 термоелектране „Никола Тесла“ блок Б1.

Предметни домен обухвата уводни канал млина, радно коло са спиралом (до улазног попречног пресека сепаратора) и рецикулациони канал из сепарационог простора. За потребе примене граничних услова (проток, температура, састав сушећег флуида на улазу у домен као, његова гранулација и удео влаге у сировом угљу на улазу у падни шахт) искоришћени су резултати мерења на истом млину извршени 2009. године. Проток чврсте фазе кроз рецикулациони канал сепаратора одређен је у ранијим анализама такође на основу спроведених мерења на млину. Резултати ове анализе приказани су у раду [31]. За потребе моделирања струјања двофазне мешавине коришћен је CFD-DPM приступ који се заснива на Ојлеровој методи контролних запремина за потребе прорачуна струјања гасне фазе и Лагранжовом приступу прорачуна кретања сваке од честица у домену решавањем II Њутновог закона укључујући дејство околног флуида на чврсту фазу. Ротација домена којем припада радно коло угаоном брзином 7,0 %/s узета је у обзир коришћењем СММ модела [29] због чега је струјање двофазне мешавине посматрано као квази-стационарно. Интеракција чврсте фазе са границама струјног поља моделирана је методом „тврде“ сфере [11]. Поље брзина у прорачунском домену приказано је на слици 3 из [30]. Релативно низак интензитет вектора брзине приметан је у близини осе ротације млина. Он се повећава у радијалном правцу и достиже максималну вредност у излазном попречном пресеку ротирајућег домена (у непосредној близини излазне изводнице ударне плоче ван радног кола млина). Слични закључци о струјању гасне фазе наведени су у раду [28] због чега је могуће успоставити аналогију између две различите геометрије млина без обзира на разлику у њиховим коначним димензијама.

Повратно струјање из спирале ка ротирајућем домену уочљиво је у близини „носа“ млина. Овај ефекат је очекиван пре свега због наглог сужења струјног простора услед релативно малог зазора (мањи од 100 mm) између „носа“ млина и ударних плоча радног кола где гасна фаза нагло убрзава а статички притисак нагло опада проузрокујући ефекат присисавања транспортног флуида на вишем статичком притиску из дела домена непосредно испред „носа“ млина. Последиčno, изразито неравномерна расподела масеног протока гасне фазе у области „носа“ млина приказана је на слици 5 из [30]. Такође, нешто мањи удели масеног протока у доњем делу радног кола последица су повећане концентрације чврсте фазе у том делу домена што се може уочити на слици 7 из [30]. На слици 3 у [30] приметне су зоне максималних брзина гасне фазе у близини задњег зида прорачунског домена. Пратећи правило да се у зони већих брзина очекује интензивније хабање зидова струјног простора и упоређујући резултате прорачуна брзинског поља са локацијама зоне хабања спирале у области „носа“ млина (слика 4 у [30]) може се констатовати да расподела брзинског поља у овом попречном пресеку одговара струјању у реалном моделу млина. Анализом геометрије похабаних ударних плоча приказаних на слици 8 из [30] може се закључити да се чврста фаза након улазне изводнице ударних елемената концентрише уз задњи зид радног кола. У тим зонама је губитак материјала најинтензивнији. Анализирајући концентрацију чврсте фазе у овом делу домена (слика 7 из [30]) може се приметити да је се максималне вредности јављају управо у овој зони у односу на расподелу овог параметра по површини ударне плоче.

Додатна потврда расподеле брзинског поља са слике 3д у [30] може се приметити на слици 13 из [32] на којој је приказана расподела интензитета брзине по ширини лопатице радног кола центрифугалног компресора.

У раду [33] дати су резултати прорачуна струјања честица угљеног праха и транспортног флуида у млинском постројењу Термоелектране „Костолац“ блока Б1 укључујући припадајући млин (N270.45), инерцијални сепаратор, канал за аеросмешу са уређајем за расподељивање чврсте фазе и припадајуће млазне горионике до уласка у ложиште енергетског парног котла. Прорачуни су извршени за потребе одређивање оптималног положаја лопатица вртложника за раздвајање аеросмеше. У прорачунима није примењен модел за апроксимирање процеса млевења честица угља.

За разлику од модела коришћених у претходним цитираним публикацијама у овом раду струјање двофазне мешавине моделирано је коришћењем Ојлер-Ојлеров модел због чега је чврста фаза - угљени прах третиран као континуални флуид веће густине од околног транспортног/носећег флуида. Моделирање ротације радног кола извршено је применом MPM (енг. **MRM** - *Multiple Reference Model*, [31]) модела.

Према препорукама датим у [31] за потребе прорачуна кретања полидисперзних честица у струји флуида у затвореној запремини препоручује се примена DPM модела [31]. Према [31] мања одступања приликом описивања интеракције флуида и затворене запремине која ротира добијају се применом CMM модела. С тим у вези, другачији прорачунски модели за описивање двофазног струјања у истраживањима публикованим у [30] и [33] могу бити узрок разлике расподеле интензитета брзине у попречном пресеку на слици 7 у [33] у односу на слику 3 [30]. Због тога резултати приказани у публикацији [33] који се тичу процене карактера струјања чврсте фазе и интеракције са границама струјног простора даље неће бити коментарисани.

У радовима [31, 34, 35] приказани су резултати анализе струјања двофазне мешавине у елементима млинског постројења у којима се врши класификација честица које се из млина одводе ка горионицима котла и честица које се рециркулишу назад у млин на поновно млевање. У овима анализама није моделиран домен у коме се врши уситњавање честица па, сходно томе, резултати прорачуна приказаним у овим публикацијама овде неће бити посебно коментарисати. Важно је истаћи да су у анализама вршени нумерички прорачуни струјања такође коришћењем CFD-DPM приступа при чему су резултати извршених мерења на конкретним постројењима коришћени за потребе уношења граничних услова и да је при свакој спроведеној анализи извршена валидација резултата прорачуна.

Имајући у виду наведене закључке као и аналогije са резултатима прорачуна у публикованим истраживањима сличног карактера може се закључити да се употребом CFD-DPM приступа са моделом квази-стационарне „клизајуће“ ротације домена унутар прорачунског струјног простора за потребе прорачуна струјања двофазне мешавине могу добити резултати упоредиви са радним условима на реалним постројењима.

Механичке особине угља

За потребе моделирања процеса лома честице угља неопходно је познавати њене механичке особине. Према [36] са геолошког аспекта „угаљ представља органогену седиментну стену мрке и црне боје која има способност да гори“. У [36] је наведено да хемијске и физичке особине угља превасходно зависе од природе прекурсорске биљне материје, количине и врсте минералне материје, као и од врсте, интензитета и дужине трајања дијагенетских и катагенетских процеса који врше преображај наталожене органске супстанце. У складу са тим може се претпоставити да је егзактно описивање његових механичких особина на основу његовог састава и порекла врло сложен процес.

Међутим, на почетку развоја математичких модела за потребе прорачуна или димензионисања млинских постројења тежило се ка свођењу механичких особина угља на један параметар погодан за коришћење у свакодневној инжењерској пракси. Пратећи ову замисао дефинисан је коефицијент мељивости који представља вредност која означава афинитет или склоност угља да се уситњава под дејством екстерног механичког оптерећења. Као поредбена вредност изабрана је коефицијент мељивости еталон угаља и она износи 100,0. Више вредности овог параметра одговарају лако мељивом угљу док ниже карактеришу угаљ који се теже меље. Детаљан опис процедуре и лабораторијске апаратуре која се користи за одређивање вредности овог параметра према званично прихваћеној Хардгров (енг. *Hardgrove*) методи дат је у [7]. Поред Хардгров методе користи се и ВТИ метода развијена у другој половини 20. века од стране Централно когловско-турбинском Институту (СССР, Лењинград). Временом су успостављени једноставнији изрази путем којих се резултати једне методе свде на вредности које би тај угаљ имао у случају испитивања његовог коефицијента мељивости другим методом. Последњих година истраживачи развијају нове методе помоћу којих се ефективно у краћем временском периоду са мање захтевном лабораторијском опремом могу одредити вредности овог параметра. Једна таква метода приказана је у [37]. Ова метода подразумева коришћење млина са прстеновима у којима се меље угаљ гранулације између 1,18 и 1,7 mm у трајању од 20 секунди. Аутори наводе да је могуће успоставити довољно прецизну зависност (корелациони фактор 0,9443) између остатка на сити од 90 μm и вредности коефицијента мељивости одређеним према Хардгров методи за узорке третиране у млину са прстеновима.

Вредност овог параметра и других механичких особина зависе од сложене, хетерогене структуре честице угља због чега је тешко са довољном прецизношћу корелирати је са његовом једном или више унапред познатих особина. Због тога од средине 20. века истраживачи настоје да изврше, најпре, идентификацију најугицајнијих параметара на механичке особине угља а затим да успоставе релативно једноставне и довољно тачне корелације којима би се могло предвидети понашање честица или зрна угља у случају примене екстерног механичког оптерећења. Један такав покушај представљен је дијаграмом на слици 1 из [38] у Поглављу 5 на коме је, са одређеним одступањима, графички приказана зависност коефицијента мељивости од врсте угља. На овој слици уочљиво је да релативно низак афинитет према млевењу имају нискокалорични угљеви (енг. *Lignite, Subbituminous B, C*) као и угљеви изразито високе калоричне вредности – антрацити док највише вредности показују средње-волатилни и ниско-волатилни угљеви. Стиче се утисак да се, полазећи од лигнита на дијаграму, коефицијент мељивости повећава смањивањем удела воде и достиже максималне вредности за поменуте типове угља. Након максимума на дијаграму даљим повећањем удела фиксног угљеника у сувој маси ова вредност се смањује што би се могло објаснити снижавањем удела лако испарљивих компонената и минералних материја и значајним повећањем удела механички издржљиве структуре фиксног угљеника. Свакако при анализи трендова на слици 1 из [38] треба имати у виду расејање тачака од којих је крива формирана. Сходно томе криву треба схватити условно уз потребу да се за потпуно објашњење приказаних кретања вредности коефицијента мељивости морају укључити и друге особине угља.

Генерални утицај воде на коефицијент мељивости приказан је графички на слици 23 у [39]. Према учртаној кривој на дијаграму коефицијент мељивости има највеће вредности за угаљ са влагом у радној маси. Његово уситњавање у оваквом стању олакшано је присуством воде у прослојцима и шупљинама због дејства клизне површи фронтова воде која се налази између слојева остатка масе угља са којима је у контакту. Сушењем угља утицај овог дејства се смањује при чему минималну вредност коефици-

цијент мељивости имају узорци сушени на ваздуху. Даљим сушењем удео влаге се смањује остављајући за собом шупљине и иницијалне пукотине у маси угља због чега се њен коефицијент мељивости достиже локални максимум да би се коначним сушењем даље незнатно смањио или повећао.

Резултати још једног истраживања утицаја влаге на карактеристике процеса млевења угља из рудника Xilinhote Shengli No. 2, НРК, у лабораторијском млину са куглама (Хардгров метода) приказани су у раду [40]. Истраживање је изведено са циљем оптимизације процеса млевења и сушења угља у поступку припреме угљеног праха.

За потребе испитивања припремљено је укупно 7 узорка са различитим уделима влаге: по један узорак са влагом у радној маси (37,9 %), са аналитичком влагом (16,61 %) и потпуно осушени узорак (0,0 %) као и по два узорка са уделима влаге између влаге у радној маси и аналитичке влаге (34,12 %, 29,11 %) и са уделима влаге између аналитичке и потпуно сувог узорка (11,20 %, 6,50 %). Графички приказ са процентним уделима влаге у наведеним узорцима дат је на слици 1 [40].

Пре испитивања извршена је анализа поновљивости резултата млевењем укупно 6 узорка са аналитичком влагом. Резултати овог припремног тестирања показују да је 95% резултата просејавања на коришћеним ситима (0,09 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 0,71 mm) са одступањима од 5% или мање.

Употребом мерача снаге најпре је анализирана динамика потрошње електричне енергије током млевења 7 узорка у лабораторијском млину. Млевење за све узорке трајало је 360 секунди. Графички приказ потрошње електричне енергије дат је на слици 3 из [40]. На слици уочљиво је да се потрошња електричне енергије приликом испитивања угља са влагом у радној маси мења у ширим границама у односу на остале узорке. Аутори овакав резултат објашњавају присуством велике количине влаге због које се поред процеса млевења дешава стохастичко лепљење и клизање масе угља у додиру са куглама и унутрашњим површинама млина због чега промена оптерећења млина има скоковит карактер. Затим, потрошња енергије у узорцима са влагом већом од аналитичке већа приближно је једнака потрошњи у случају испитивања узорка са влагом у радној маси. Како се влага у угљу смањује од аналитичке до потпуно сувог узорка приметан је знатан пораст у потрошњи енергије за погон млина. Према ауторима снага млина сразмерна је оптерећењу које кугле остварују на анализирани узорак, коефицијенту трења кугли о испитивани узорак, броју кугли у млину и линеарној брзини млина. У складу са тим повећање потрошње електричне енергије за млевење узорка са мањим уделом влаге од аналитичке објашњавају повећањем коефицијента трења између узорка и кугли који се јавља услед мањег удела влаге у испитиваном узорку. На дијаграму слици 3 у [40] се такође види да се енергија за погон млина за сваки анализирани узорак у времену постепено смањује. Оваква промена у току млевења може се објаснити интензивнијем уситњавању честица „свежег“ узорка на почетку процеса млевења. Након иницијалног уситњавања у млину се повећава удео мањих честица који је теже мељив због чега се све више уложене енергије троши на кретање узорка и кугли унутар млина а све мање на даље уситњавање испитиваног узорка.

У даљој анализи резултата сагледаван је утицај удела влаге на финоћу млевења. Резултати остатка на ситима са највећим и најмањим отвором дати су на сликама 4 и 6 из [40]. Повећано присуство влаге при истим условима млевења у млину са куглама погоршава финоћу млевења имајући за резултат повећање удела фракција на сити са највећим отворима смањивајући пропад кроз сито са најмањим отвором. Анализирајући даље ПСД (енг. *PSD – Particle Size Distribution*) криве са слике 7 из [40] за анализирани узорке након млевења у лабораторијском млину може се уочити да је највећа разлика у остацима на ситима од 5 μm до 100 μm .

На основу свеобухватне анализе представљених резултата испитивања датим у [40] може се закључити да се смањењем влаге предметног угља (Xilinhong Shengli No. 2, НРК) приликом млевења у лабораторијском млину са куглама количина повећава количина утрошене електричне енергије за његово млевење. Упоредјујући димензије фрагмената угља након млевења у истом млину уочљиво је да се сукцесивним сушењем сирових комада угља пре спровођења овог процеса добија угљени прах побољшане финоће млевења. Овакве констатације нису у потпуности у корелацији са трендовима приказаних на слици 23 у [39].

На слици 14 из [41] приказане су промене коефицијента мељивости одређених угљева са територије САД према Хардгров методу и млевењем у млину МПС-32 за различите уделе влаге. Може се приметити да су све криве конкавног или конвексног карактера и да за уделе влаге у радној маси па све до удела влаге у аналитичкој маси имају локалне минималне и максималне вредности. За неке угљеве (енг. *Mississippi lignite*) ове вредности варирају за више од 50 %.

У дисертацији [42] је приказан детаљнији увид у утицајне факторе на коефицијент мељивости угља. Такође, анализиран је утицај укупне, грубе и аналитичке влаге, и приказани су резултати техничке, литотипске и мацералне анализе на коефицијент мељивости за испитиване узорке угљева из Костолачког и Колубарског басена. У закључку дисертације наведено је да садржај пепела (састављен углавном од кварца) има позитиван а садржај волатила и хигроскопске влаге негативан утицај на вредности коефицијента мељивости код обе врсте угљева. Према резултатима литотипске анализе уочено је да сви типови ксилита имају негативан утицај на мељивост угља док барски литотип утиче позитивно у случају Колубарског угља и благо негативно у случају Костолачког угља. Резултати мацералне анализе указују на велики удео хуминита у свим испитиваним узорцима док текстинит утиче изразито негативно на коефицијент мељивости. У дисертацији су дати аналитички изрази зависности великог броја анализираних параметара на вредности коефицијента мељивости.

Млевење угља у вентилаторском млину одвија се доминантно ударом. Честици која је у контакту са ударном плочом саопштава се значајна ударна сила која се у погледу њене унутрашње структуре манифестује у виду наглог пораста напона на притисак. Поред испитивања утицајних параметара на коефицијент мељивости сврхосходно је анализирати процес, односно, динамику лома честице приликом примене екстерног оптерећења у циљу одређивања њене притисне чврстоће у различитим условима. Резултати испитивања ове механичке карактеристике за три различита угља са територије НРК приказани су у раду [43]. Прва врста угља потиче из Кианки (енг. *Qianqiu*) рудник – Хенан (енг. *Henan*) провинције (скраћена ознака у раду – QB, QC) и класификован је као битуменски угаљ са „дугачким пламеном“ (волатилни угљеви средње геолошке старости). Друга врста угља добијена је из Таншан (енг. *Tangshan*) рудника – Хебеи (енг. *Hebei*) провинције (скраћена ознака у раду – TB) и представља коксни угаљ. Трећа врста угља потиче из Јанта рудник и одговара особинама антрацита. У табели 1 у раду [43] дат је сумарни приказ комада са њиховим димензијама који су допремљени у лабораторију за потребе испитивања. Сви узорци су цилиндричног облика приближно дужине 100 mm и пречника 50 mm.

На сликама 3 до 5 [43] приказани су резултати испитивања притисне чврстоће у дијаграмима напон-деформација. Према подацима са дијаграма аутори закључују:

- тренд криве у дијаграму напон-деформација за све испитиване узорке је углавном линеарног карактера;
- сви испитани узорци углавном имају карактеристике кртог материјала са малим пластичним деформацијама до тренутка дисолуције;

– угаљ је еластично-крт материјал и при апроксимацији закона деформација-напон може се служити линеарним зависношћу.

Може се такође уочити да притисна чврстоћа расте са квалитетом угља, односно да је најнижа за угаљ нижег квалитета са ознаком QB (приближно 16 МПа) а највиша за антрацит са ознаком YM (у распону од 30 до 60 МПа). Додатном анализом података добијеним испитивањем притисне чврстоће аутори успостављају зависност између модула еластичности и притисне чврстоће. Она је приказана на слици 7 из [43]. Ова зависност потврђује тезу да су квалитетнији угљеви (на пример антрацит) кртији и чвршћи материјал у односу на угљеве са већим уделом волатила у сагорљивој маси и ниже топлотне моћи. Ова констатација у потпуности је у складу са трендом приказаним на слици 1 из [44] добијеним испитивањем притисне чврстоће угљева са подручја Сједињених Америчких Држава. Такође је важно приметити да се према уделу фиксног угљеника у сагорљивој маси минимум кривих линија са слике 1 из [44] поклапа са максималним вредностима коефицијента мељивости на слици 1 из [38] у Поглављу 5.

Поред анализе резултата испитивања у публикацији [43] на дијаграму са слике 2 дате су две зависности притисне чврстоће угља у функцији од брзине утискивања узорка током испитивања. Аутори констатују да трендови имају исти карактер, односно, да притисна чврстоћа монотонно расте са порастом брзине утискивања али да није могуће извести општи израз који би био применљив на ширу групу угљева различитог квалитета, петрографског састава и геолошке старости. Оно што се такође може закључити са овог дијаграма је да ова зависност за брзине утискивања мање од 1,5 km/s асимптотски тежи одређеној вредности која је вероватно једнака притисној чврстоћи узорка за довољно мале брзине утискивања.

У раду [44] вршена су испитивања притисне чврстоће агломерата састављеног од угља и стене и то за узорке са различитим процентним уделом једне или друге компоненте у њему. Гранични случајеви коришћених узорка представљали су чисту стену или чисту масу угља. Коришћени узорци потичу из Јунхе (енг. *Yunhe*) рудника угља који се налази у Ђининг (енг. *Jining*), Шандонг (енг. *Shandong*) провинције у НРК. Приликом испитивања узорка састављеног од чисте угљене масе („*pure coal*“ са слике 4 у [44]) потврђен је линеарни карактер зависности притисне чврстоће од деформације узорка.

Са слике је такође уочљиво да се предметни узорка практично пластично не деформише пре његове дисолуције. Ови закључци су у складу са констатацијама наведеним у раду [43] у коме су сличним испитивањима подвргнути комади угља добијених експлоатацијом са различитих локација у НРК. Овим се потврђује униформност понашања угља у испитивањима притисне чврстоће без обзира на његово порекло или локацију ископавања.

Резултати испитивања утицаја апсорпције влаге и раствори соли на притисну чврстоћу угља приказани су у раду [45]. Испитивања су вршена у циљу оптимизације процеса подземне експлоатације угља као и процес гасификације угља. Узорци који су испитивани потичу из Хазелвуд (енг. *Hazelwood*) рудника у Морвелу (енг. *Morvel*) – котлина Латробе (енг. *Latrobe*) у југоисточном делу Викторије, Аустралија. Аутори наводе да је угаљ је важан енергетски извор у Аустралији и према наводима аутора учествује са 32,2 % у укупној потрошњи примарне енергије (што га по значају ставља на друго место примарних извора енергије) док количина гаса произведена из угља учествује са приближно 18 % у укупној производњи гаса. Угаљ се према подацима у табели 1 из [45] може класификовати као лигнит са малим садржајем минералних материја и високим уделом влаге у радној маси. Ову класификацију потврђују резултати испитивања удела влаге за 3 узорка у лабораторијским условима приказани у табели 2 из [45].

За потребе испитивања притисне чврстоће припремљене су 3 групе узорака. Прва група се састоји од узорака са влагом у радној маси (са тзв. приспелом влагом). Другој групи припадају узорци са сушени на ваздуху. У трећој групи налазе се узорци засићени влагом. Свака од ових група састоји се од по 3 узорка. Сви узорци су приближно једнаке почетне масе (пре сушења) цилиндричног облика пречника 25 mm и висине 50 mm.

Узорци сушени на ваздуху су третирани у пећи на температури од 30 °C до стабилизације њихове масе. У табели 3 у [45] приказане су масе узорка сушених на овај начин при чему је наведено да је у угљу остао необично висок ниво влаге (од 45,2%). Ови узорци класификовани су као сушени (енг. *Low moisture specimen*). Приликом сушења услед смањивања удела влаге у узорцима дошло је до појаве иницијалних пукотина као што је приказано на слици 1 из [45] иако је угаљ сушен релативно ниским интензитетом, односно, на ниској температури у пећи.

За потребе израде узорка засићених влагом претходно геометријски припремљени узорци потапани су у дексикатор са дејонизованом водом у период од 24 часа. Након тога њихова маса је измерена накончега су поново третирани у дексикатору у период 24 часа све док се њихова маса није стабилизovala. Они су у раду [45] класификовани као узорци засићени влагом (енг. *Water-saturated specimen*). Узорци са влагом у радној маси названи су узорцима незасићеним влагом (енг. *Unsaturated specimen*).

За потребе процене утицаја апсорпције раствора соли на механичке особине предметног угља посебни узорци (по 3 у групи) су третирани са раствором NaCl и то у концентрацијама од 5%, 15% и 25%. Третирање је извршено такође у дексикатору по процедури по којој су третирани узорци засићени влагом. Резултати испитивања у виду притисне чврстоће и модула еластичности свих третираних узорка дати су у табели 5 из [45] и графички приказани на сликама 2а и 2б из [45].

Анализом резултата може се закључити да присуство влаге негативно утиче на притисну чврстоћу угља. Притисна чврстоћа за узорке сушене на ваздуху (средња вредност - 1,25 МПа) је 11% већа од сирових приспелих узорака са влагом у радној маси (средња вредност - 1,13 МПа) и 26% веће од узорка који су засићени влагом (средња вредност - 0,84 МПа). Према ауторима утицај промена удела влаге на притисну чврстоћу и модул еластичности је очекиван. Аутори овакав тренд објашњавају следећим: влага као реактивни адсорбент најпре доспева у поре које се налазе у поларизованим зонама формирајући кластере који су међусобно повезани водоничним везама. Тако распоређена влага у порама угља може изазвати промену полимерне структуре услед реакција са чврстом фазом. То доводи до смањење површинске енергије угљене масе што резултује механичким слабљењем унутрашње структуре угља. Такође, корозивно дејство воде има за последицу деградацију механичких особина угља. Поред тога, одређена количина минералних материја се раствара у води чинећи ову структуру слабијом у смислу механичке чврстоће. Промена структуре услед присуства влаге приметна је на фотографијама са слика 3а и 3б [45]. Слика 3а приказује унутрашњу структуру угљене масе за узорке са влагом у радној маси док се слика 3б односи на узорке који су засићени влагом. На слици 3а су углавном присутне веће поре са глатким унутрашњим површинама док слика 3б показује да структуру узорка засићеним влагом има мање поре и изразито храпаву унутрашњу површину угљене масе.

Анализом резултата приказаних у табели 5 из [45] као и трендова у дијаграмима напон-деформација са слика 2а и 2б из [45] може се закључити да повећањем удела влаге у угљу опада вредност Јунговог модула еластичности. Аутори ово објашњавају чињеницом да се при адсорпцији влаге дешава бубрење узорка што поспешује промену структуре и побољшава дуктилна својства угљене масе. Поларитет воде додатно усложњава везу између влаге и чврсте фазе и између самих мацерала у угљу и минералних

материја. Приликом адсорпције воде храпавост површина пора се повећава што може довести до побољшаног транспорта нормалних напона по кливажама узорка па се дешава да при истом спољашњем оптерећењу угаљ показује веће деформације. Такође, присуство воде у угљу може на узорак имати дејство клизишта при чему се за исто спољашње оптерећење дешава интензивније клизање уз смањени интензитет трења између равни унутар структуре угљене масе што се на макро нивоу манифестује већим деформацијама испитног узорка.

Узимајући у обзир све наведене закључке у овом поглављу може се констатovati да су испитивања коефицијента мељивости различите врсте угља различитог порекла показала да удео влаге има значајан утицај на његову вредност. Карактер тог утицаја се значајно разликује у зависности од геолошке старости угља, његове топлотне моћи и петрографског састава. С тим у вези неопходно је да се при моделирању процеса дисолуције овај тренд засебно испита за сваки коришћени тип угља.

Удео влаге утиче такође на притисну чврстоћу угља. У цитираним радовима показано је да се сушењем угља добијају чвршћи и кртији комади који су теже мељиви. Међутим, по аналогiji са различитим трендовима промене вредности коефицијента мељивости у функцији од удела влаге сврсисходно је испитати засебно утицај удела влаге на вредности притисне чврстоће за сваки анализирани тип угља.

Моделирање процеса млевења честица са прорачуном њиховог кретања у млину без моделирања њихове унутрашње структуре

Сложеност поступка дисолуције честице ударом приликом њеног кретања у струји флуида разлог је постојања релативно малог број публикација у којима је анализиран овај процес. У раду [46] приказан је један од првих покушаја моделирања млевења честица уз апроксимацију њиховог кретања у ротирајућем млину са куглама. У овој публикацији аутори анализирају рад **SAG** (енг. *Semi-autogenous*) млина чија је унутрашња површина перфорирана у циљу лакшег подизања материјала који се меље и кугли којима се врши млевења при мањим угаоним брзинама млина. И у овој публикацији, као и претходнима, аутори најпре истичу значај **DEM** приступа за потребе моделирања оваквих процеса. Такође наводе да је модел „меке сфере“ довољно детаљан за описивање интеракције (колизије) између кугли којима врши механичко дејство и материјала који се уситњава у млину.

За потребе оптимизације рачунарских ресурса за спровођење симулација најпре је извршена анализа кретања честица у реалном **SAG** млину без ефекта њиховог уситњавања. Затим, резултати овог прорачуна упоређени су са случајем када је симулиран процес млевења у редукованој запремини млина цилиндричног облика мање коначне дужине (енг. *slice model*). Констатовано је да се карактер кретања честица у попречном пресеку не разликује у значајној мери иако овакав приступ није погодан за анализу кретања честица у аксијалном правцу. Упоредни графички приказ распореда честица за ова два случаја дат је на слици 2 у [46].

На слици 5 из [46] дат је графички приказ анализе енергетског спектра за рад сила у нормалном и тангентном правцу у току колизије између свих честица у млину као и између честица и унутрашње површине млина. Констатовано је да је рад релативно мали за фреквентне колизије између учесника у процесу при чему се рад повећава приликом смањења фреквенце контаката. Уочљиво је такође да је фреквенца судара материјала који се меље са унутрашњом површи млина као и кугли са том површи мања у односу на друге врсте контаката (слике 5д и 5ф из [46]).

У даљој анализи извршена је апроксимација нормалних и тангенцијалних напона на унутрашњу површ млина. Дати су дијаграми расподеле напона у ова два правца.

Ови подаци могу бити корисни за потребе анализе потенцијалних оштећења млинске унутрашњости услед удара честице односно абразије контактних површина. Графички приказ резултата приказан је на слици 6 из [46].

У циљу валидације кретања честица у току процеса млевења аутори наводе да спровођење анализе није вршена додатна предикција граничне вредности оптерећења честица при којима настаје њихова дисолуција као ни њихова расподела након лома. Специфична површинска енергија материјала који се меље је намерно смањена испод очекиваних вредности у циљу симулирања лома честица као и анализе кретања фрагмената у току ротације млина. Са оваквим приступом извршена је упоредна анализа кретања материјала у млину приликом његовог рада. Резултати су приказани на слици 11 из [46].

Са слике 11 у [46] је уочљиво да је карактер кретања у реалном млину и у прорачунском моделу врло сличан. Аутори на основу тога закључују да је приступ моделирању процеса млевења у овој врсти млина коришћењем **DEM** методе адекватан и применљив у реалном времену са рачунарским ресурсима из периода када је истраживање обављено. На основу тога аутори предлажу даљи развој приступа укључивањем реалних механичких особина материјала који се меље у циљу постизања тачнијих предикција финоће млевења честица на крају процеса млевења.

Резултати истраживања приказаним у раду [47] представљају наставак истраживања из [28] с тим да је математички модел прорачуна кретања двофазне мешавине проширен додавањем модела лома честице у случају додира са чврстом површи под одређеним условима. Алгоритам прорачуна целокупног математичког модела приказан дат је графички на слици 3 у [47]. Овај модел подразумева да се у случају додира честице са чврстом површи пре свега прорачунава „ударни напон“ према Херцовој теорији судара (једначина 5 на слици 3 у [47]). Ова вредност упоређује се са вредношћу напона при којој се очекује иницијални лом честице (једначина 1 на слици 55 [47]). Уколико је ударни напон већи од напона чврстоће честице онда се врши прорачун фрагмената који се генеришу након насталог лома на локацији додира честице са чврстом површи. Прорачун нових фрагмената, односно, расподеле димензије честица након лома врши се применом степене функције лома и дата је изразом (6) у [47].

На основу ове функције изведен је израз (11) у [47] за прорачун броја честица одређеног пречника након лома и он гласи. Минимални пречник честице након лома у претходном изразу дефинисан је тако да је његов запремински удео у фрагментима након лома $B = 0,01$. Параметар по ком се рачуна ширина расподеле фрагмената дат је изразом (15) у [47]. Овај параметар зависи од ударне брзине тако да када се она повећава параметар a се смањује при чему се повећава ширина расподеле фрагмената након лома. Из овога следи да се при већим ударним брзинама честица иницијалног пречника распада на већи број честица са мањим медијалним пречником. Насупрот томе, у случају судара са мањом ударном брзином честица се распада на мањи број фрагмената већег медијалног пречника. Ова теза је потпуно у корелацији са до сада анализираним зависношћу расподеле честица након судара од уложене ударне енергије.

Визуелни приказ примене описаног модела дат је на слици 7 из [47]. У почетним тренуцима ($t = 1,7 \text{ ms}$) може се приметити да честице пречника $500 \text{ }\mu\text{m}$ улазе у прорачунски домен и да се крећу вертикално надолу приближавајући се ударном чекићу у близини доње изводнице домена. С следећем временском тренутку ($t = 5,0 \text{ ms}$) уочљива је већа концентрација честица по обиму домена што је последица њиховог кретања услед ударних дејства чекића али и притисно-брзинског поља околног флуида. Поред честица иницијалног пречника од $500 \text{ }\mu\text{m}$ присутне су и честице мањег пречника што означава да се десила интеракција чврсте фазе са границама домена тако да су остварени довољни и потребни услови да се деси њихово уситњавање. Тренд повећавања

концентрације чврсте фазе пречника мањег од иницијалног по обиму домена у близини спољашњег пречника млина се наставља и може се уочити упоредним анализама слика у пратећим временским тренуцима (од $t = 8,3 \text{ ms}$ до $t = 15,0 \text{ ms}$). Са приказа у доњем десном углу слике 7 из [47] дат је увећани приказ домена са различитих позиција (а, б, ц и д) у млинском простору. Слика са позиције а одговара локацији у прорачунском домену која је геометријски најближа месту где се чврста фаза уводи у домен. На њој се могу приметити честице иницијалног пречника уз одређени удео мањих честица због чега се може закључити да је чак у почетним тренуцима боравка чврсте фазе у прорачунском домену десило иницијално уситњавање честица. Након тога на сликама од б до д приметан је тренд смањења броја честица пречника блиског иницијалном и повећања честица финих фракција. Ова појава последица је све дужег боравка честица у млински простор са ротирајућим радним колом, односно, све већег броја судара које честице имају са чекићима радног кола и конвексно-конкавним површинама у заколу приликом кретања кроз прорачунски домен. Аналитичком обрадом података у погледу броја и пречника честица у различитим временским тренуцима може се формирати зависност кумулативног удела броја и масеног удела пречника одређеног пречника у функцији од времена које је чврста фаза провела у прорачунском домену. Графички приказ ове зависности приказан је на сликама 12 и 15 из [47]. Црвеном бојом на слици 12 из [47] приказана је зависност кумулативног удела броја честица у функцији од пречника за иницијалне честице које се у почетном тренутку убацују у прорачунски домен. Свака следећа крива одговара једном од наредних анализираних временских тренутака. Временски тренуци појединих кривих одговарају тренуцима приказа домена са слике 11.

Уочљиво је да се криве на оба дијаграма (слике 12 и 15 из [47]) у сваком наредном тренутку померају у лево, што означава да гранулација честица које бораве у млинском простору постаје финија, односно, да се медијални пречник свих честица у млину постепено смањује. Најинтензивније уситњавање дешава се у почетним тренуцима при чему интензитет у времену опада тако да се криве за последња два анализирана тренутка скоро поклапају. То означава да је за примењену ударну енергију извршено уситњавање честице до минималног могућег пречника након кога је потребно додатно улагање ударне енергије у односу на предметни млин да се процес уситњавања настави.

Криве приказане на сликама 12 и 15 у [47] формиране су анализом резултата прорачуна предложеног математичког модела у случају ротације радног кола константном, непромењеном угаоном брзином радног кола. На слици 16 из [47] приказана је зависност запреминског удела фрагмената одређеног пречника у функцији од димензије честице за различите обимне брзине чекића радног кола млина. Резултати прорачуна на овом дијаграму упоређени су са резултима извршених експеримената. Најпре може се видети да се запремински удео финијих честица повећава са убрзавањем угаоне брзине радног кола млина. Такође се може уочити да зависности добијене прорачуном у великој мери слажу са трендовима који се могу формирати на основу резултата извршених експеримената а који су приказани на слици 16 из [47] помоћу система тачака. Може се приметити и одређено расипање, односно, одступање резултата експеримената од резултата експеримената. Иако су куглице израђене од хомогеног материјала (стакла) очекивано је да механичка својства, нису идентична за два узорка истог пречника. На пример, приликом одређивања њихове притисне чврстоће примећено је одређено расипање резултата у случају лестица истог пречника. У циљу даљег смањивања разлика између измерених и срачунатих вредности описаног процеса млевења потребно је поред коришћене степене функције лома анализирати погодност примене другачијих зависности. Такође, поред оптимизације основне математичке функције за описивање функције лома (степен, логаритамска, експоненцијална, итд...) смањење грешке прорачуна у односу на резултате мерења могло би се постићи применом бимодалних зави-

ности као што је то показано у [17]. Иако у овом раду није анализирано млевење хетерогеног материјала ударом уз процес симултаног сушења, односно губитка масе уз одређену промену његове механичке чврстоће, примери, алгоритми и закључци дати у њему представљају добру основу за даљу доградњу модела у циљу описивања ударног млевења млина у вентилаторским млиновима за потребе припреме угљеног праха.

Такође, анализом врсте и квалитета података који прорачунски модел лома честице у млину може да пружи (фреквенца колизије честица – слика 5 у [46], анализа напона ударних елемената – слика 6 у [46]) може се доћи до закључка да је овај приступ моделирању млевења чврстих честица погодан за анализу овог процеса са предлагањем мера за побољшање геометрије млина у циљу оптимизације његовог рада.

Предмет ове докторске дисертације је формирање новог CFD-DPM математичког модела процеса симултаног кретања двофазне мешавине транспортног флуида и комада/честица горива са процесом њиховог уситњавања ударом у вентилаторским млиновима. У склопу математичког модела биће дефинисана функција лома којом би се у случају дисолуције честице вршио прорачун броја и димензија новонасталих фрагмената као и њихових почетних брзина кретања приликом њиховог настајања. Предикција резултата лома честице коришћењем функције лома биће заснована на поређењу прорачунске вредности напона у честици у тренутку судара са чврстом површи и прорачунске вредности њене притисне чврстоће. Математички модел треба да предвиди промену притисне чврстоће честице у функцији од њене димензије и удела влаге у тренутку судара са чврстом површи. Резултати прорачуна коришћењем новог модела биће упоређени са резултатима билансних мерења на више вентилаторских млинова у домаћим термоелектранама. Употребом новог модела прорачуна овог комплексног процеса било би могуће квалитативно оценити рад постојећих млинских постројења уз предлагање геометријских модификација као и промене радних параметара у циљу њиховог ефикаснијег рада.

Научни циљ истраживања је формирање новог CFD-DPM математичког модела процеса симултаног млевења и сушења угља у вентилаторским млиновима који се може представити кроз неколико карактеристичних целина:

- Критички преглед литературе у домену постојећих, развијених, модела за описивање процеса млевења чврстих честица ударом;
- Развој новог математичког модела за предикцију лома честице угља (лигнита) у вентилаторском млину кроз дефинисање критеријума лома и функције лома;
- Експеримантални рад кроз одређивање механичких карактеристика честица угља различитих димензија и удела влаге као и статистичка обрада истих;
- Експеримантални рад кроз учествовање у билансним мерењима на више млинских постројења у домаћим термоелектранама и статистичка обрада истих;
- Спровођење прорачуна применом новог математичког модела, анализа и статистичка обрада добијених резултата;
- Поређење резултата прорачуна применом новог математичког модела са резултатима извршених мерења на млинским постројењима у којима се обавља процес млевења домаћих лигнита.
- Анализа резултата и идентификација главних радних параметара симултаног процеса кретања, сушења и млевења честица угља (лигнита).

2.1 Релевантни библиографски извори

- [1] - Energy Institute 2024 Statistical Review of World Energy, 03.07.2024., *Energy Consumption*, Energy Institute, <https://www.columbia.edu/~mhs119/EnergyConsump/>;
- [2] - So, W., 20.01.2026., *Energy consumption worldwide from 1990 to 2020, with a forecast until 2050, by region*, Statista, <https://www.statista.com/statistics/268297/world-energy-consumption-outlook/?srsltid=AfmBOoqBCT46QMV8poarxQSS7B6kMfBNOGz8ys2RhDc4szzVN5c3VzBm>;
- [3] - Nalley S., LaRose A., 06.10.2021., *Energy consumption by sector*, International Energy Outlook 2021, slide 3, U. S. Energy Information Administration, https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2021_ReleasePresentation.pdf;
- [4] - Energy Information Administration, 26.10.2021, *World net electricity generation/World coal consumption and production*, Institute for Energy research, <https://www.instituteforenergyresearch.org/international-issues/eia-expects-energy-demand-to-increase-almost-50-percent-worldwide-by-2050/>;
- [5] - Министарство рударства и енергетике, 28.11.2024., *Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2040. године са пројекцијама до 2050. године*, Слике 11 и 15, <https://www.mre.gov.rs/extfile/sr/8472/STRATEGIJA%20RAZVOJA%20ENERGETIKE%20RS%20DO%202040%20SA%20PROJEKCIJAMA%20DO%202050%20USVOJENO%2027%2011%202024.pdf>;
- [6] - Бркић Љ., et al., *Парни котлови*, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2015;
- [7] - Гулич, М., et al., *Прорачун постројења за припрему угљеног праха*, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, СФРЈ, 1982;
- [8] - Живановић, Т., et al., *Прорачун постројења за припрему угљеног праха*, Vedes d.o.o., Београд, Србија, 2005;
- [9] - Effenberg H., *Dampferzeugung*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2000;
- [10] - Бркић Љ., et al., *Термички прорачун парних котлова*, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2012;
- [11] - Crowe T. C., Schwarzkop J. D., Sommerfeld M., Tsuji Y., *Multiphase flow with droplet and particles*, Second edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2012;
- [12] - Stamenković O., Stupar G., Tucaković D., Janković A., *Possibilities for increasing efficiency of milling plant operation for the purpose of optimizing combustion process within power steam boiler*, Thermal Science, Vol. 59, pp. 2125-2140, 2025, <https://doi.org/10.2298/TSCI230529255S>;
- [13] - Ступар Г., *Моделирање процеса у парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха*, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2016;
- [14] - Волковинский В. А., Роддатис К. Ф., Харламов А. А., *Мельницы вентиляторы*, Энергия, Москва, СССР, 1971;
- [15] - Campbell G. M., Webb C., *On predicting roller milling performance, Part I: the breakage equation*, Powder Technology, Vol. 115, pp. 234–242, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00348-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00348-X);
- [16] - Campbell G. M., Bunn P.J., Webb C., Hoo S.C.W., *On predicting roller milling performance, Part II. The breakage function*, Powder Technology, Vol. 115, pp. 243–255, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00349-1](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00349-1);

- [17] - Meier M., John E., Wieckhusen D., Wirth W., Peukert W., *Generally applicable breakage functions derived from single particle comminution data*, Powder Technology, Vol. 194, pp. 33–41, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.018>;
- [18] - Kwon J., Heechan C., Daeyang L., Kim R., *Investigation of breakage characteristics of low rank coals in laboratory hammer mill*, Powder Technology, Vol. 256, pp. 377-384, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.047>;
- [19] - Nikolov. S., *A performance model for impact crushers*, Minerals Engineering, Vol. 15, pp. 715-721, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00174-7);
- [20] - Wua S.Z., Chaua K.T., Yub T.X., *Crushing and fragmentation of brittle spheres under double impact test*, Powder Technology, Vol. 143–144, pp. 41– 55, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.04.028>;
- [21] - Sahoo R., Review: *An investigation of single particle breakage tests for coal handling system of the gladstone port*, Powder Technology, Vol. 161, pp. 158 – 167, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.09.001>;
- [22] - Potapov V. A., Campbell S.C., *Computer simulation of impact-induced particle breakage*, Powder Technology, Vol. 81, pp. 207-216, 1994, [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(94\)02907-5](https://doi.org/10.1016/0032-5910(94)02907-5);
- [23] - Potapov V. A., Campbell S.C., *Parametric dependence of particle breakage mechanisms*, Powder Technology, Vol. 120, pp. 164–174, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00272-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00272-8);
- [24] - Tong Z. B., Yang R.Y., Yu A.B., Adi S., Chan H. K., *Numerical modelling of the breakage of loose agglomerates of fine particles*, Powder Technology, Vol. 196, pp. 213–221, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.08.001>;
- [25] - Varun G., Sun X., Xu W., Sarv H., Farzan H., *A discrete element method-based approach to predict the breakage of coal*, Advanced Powder Technology, Vol. 28, pp. 2665–2677, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.07.019>;
- [26] - Moreno-Atanasio R., Ghadiri M., *Mechanistic analysis and computer simulation of impact breakage of agglomerates: Effect of surface energy*, Chemical Engineering Science, Vol. 61, pp. 2476 – 2481, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.11.019>;
- [27] - Chatzilamprou I. G., Youds M. W., Tierney M. J., Armstrong B., *Numerical investigation of a developmental pneumatically fed impact pulveriser*, Applied Mathematical Modelling, Vol. 30, pp. 1180–1195, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.02.002>;
- [28] - Takeuchi H., Nakamura H., Iwasaki T., Watano S., *Numerical modeling of fluid and particle behaviors in impact pulverizer*, Powder Technology, Vol. 217, pp. 148–156, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.021>;
- [29] - Fluent Inc., *FLUENT User's Guide*, Lebanon, NH, USA, 2009;
- [30] - Stamenković O., Stupar G., Tucaković D., et al., *Modelling Milling and Drying pocess of raw coal in fan mill – Part 1: Characterization of coal particle movement in fan mill impeller*, Book of Abstracts, ISSN: 2706-3690, pp. 329, 17th Conference of sustainable development of energy, water and enviromental systems, Phapos, Cyprus, 11/2022;
- [31] - Стаменковић О., et al., *Нумеричка симулација кретања честица угљеног праха приликом напуштања млинског сепаратора кроз канал аеросмеше*, Међународна конференција „Електране 2018“, Друштво термичара Србије, Златибор, Србија, 11/2022;

- [32] - Zhehong L., Wanmin K. , Genqiang S., Fujian Z. , Chaowei Z. , Feiyue K. and Yifan Z., *Investigation on Aerodynamic Performance of a Centrifugal Compressor with Leaned and Bowed 3D Blades*, Processes, Vol. 12, No. 875, 2024, <https://doi.org/10.3390/pr12050875>;
- [32] - Kozić M., Ristić S., Puharić M., Katavić B., Prvulović M., *Comparison of Numerical and Experimental Results for Multiphase Flow in Duct System of Thermal Power Plant*, Scientific Technical Review, Vol. 60, No.3-4, pp. 39-47, 2010;
- [34] - Shah K.V., Vuthaluru R., Vuthaluru H.B., *CFD based investigations into optimization of coal pulveriser performance: Effect of classifier vane settings*, Fuel Processing Technology, Vol. 90, pp. 1135–1141, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.009>;
- [35] - Stamenković O., Stupar G., Tucaković D., *Assessing the impact of specific weight of different-sized particles on operational performance of coal preparation plant*, Thermal Science, Vol. 27, pp. 103-119, 2023, <https://doi.org/10.2298/TSCI2301103S>;
- [36] - Животић Д., *Геологија угљева*, Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2018;
- [37] - Yilmaz S., *A new approach for the testing method of coal grindability*, Advanced Powder Technology, Vol. 30, pp. 1932–1940, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.06.012>;
- [38] - Lowry H. H., *Chemistry of coal utilization*, Volume I, John Wiley & Sons, New York, 1945;
- [39] - Новаковић Љ., *Угљена материја и њена мелјивост*, Рударски Институт, Београд, Србија, 1976;
- [40] - Yang Y., He Y., Bi X., Grace J. R., Wang H., Fotovat F., Xie W., Wang S., *Effect of moisture on energy-size reduction of lignite coal in Hardgrove mill*, Fuel, Vol. 270:117477, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117477>;
- [41] - Kitto J. B., Stultz S. C., *Steam its generation and use*, The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, 2005;
- [42] - Обрадовић М., *Истраживање и компарација утицаја карактеристика угљева ниске топлотне вредности на њихову мелјивост и параметре процеса млевења*, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2015;
- [43] - Pan J., Meng Z., Hou Q., Ju Y., Cao Y., *Coal strength and Young's modulus related to coal rank, compressional velocity and maceral composition*, Journal of Structural Geology, Vol. 54, pp.129-135, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.07.008>;
- [44] - Palmer, I., Moschovidis, Z., Cameron, J., *Coal failure and consequences for coal bed methane wells*. In: SPE96872 Presented at 2005 SPE Annual Tech. Conf. Exhib. Held in Dallas, TX, USA, 2005, <https://doi.org/10.2118/96872-MS>;
- [45] - Zhang X., Gamage R. P., Perera M. S. A., Ranathunga A. S., *Effects of Water and Brine Saturation on Mechanical Property Alterations of Brown Coal*, Energies, Vol. 11:1116, 2018, <https://doi.org/10.3390/en11051116>;
- [46] - Clearly P.W., *Recent advances in DEM modelling of tumbling mills*, Minerals Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 1295-1319, 2001, [https://doi.org/10.1016/S08926875\(01\)00145-5](https://doi.org/10.1016/S08926875(01)00145-5);
- [47] - Hirohisa T., Hideya N., Satoru W. *Numerical Simulation of Particle Breakage in Dry Impact Pulverizer*, Powder Technology, Wiley Online Library, Vol. 217, pp. 148–156, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.021>.

3. Полазне хипотезе

У поглављу „Предмет и циљеви истраживања“ дат је кратак осврт на досадашње резултате истраживања који ће бити искоришћен за успостављање полазних хипотеза за потребе моделирања симултаног процеса сушења и млевења угља у вентилаторским млиновима. Ове хипотезе могу бити дефинисане на следећи начин:

- Досадашња истраживања показују да је за описивање струјања двофазне мешавине у затвореним запреминама адекватна примена постојећих нумеричких прорачуна на бази CFD-DPM модела. Њиховом применом се може изучавати карактер кретања полидисперзне чврсте фазе у струји флуида укључујући размену масе, импулса и енергије између фаза као и интеракцију чврсте фазе са границама струјног простора.
- За потребе спровођења прорачуна струјања двофазне мешавине са ротацијом радног кола млина у затвореној заремини погодна је примена квази-стационарног „клизајућег“ модела ротације домена у прорачунском простору - СММ (енг. SMM - *Sliding Mesh Model*) модел [29].
- Поступак уситњавања честица ударом, у најширим границама, зависи од:
 - Пројекције интензитета релативне брзине на правац нормале чврсте површи са којом се честица судара. Повећањем ове компоненте брзине у тренутку контакта снижава се медијални пречник новонасталих фрагмената, односно, повећава „степен лома“ честице иницијалног пречника;
 - Иницијалног пречника и удела влаге у честици угља;
 - Чврстоће саме честице (уколико се сударна површ сматра недеформабилном);
- Напон који се саопштава честици може се квантификовати Херцовим изразом;
- Угаљ је хетерогени земљани материјал који се приликом оптерећења на притисак понаша као крт уз изразиту линеарност у дијаграму напон-деформација.
- Притисна чврстоћа угља се мења у функцији од димензија утискиваног узорка и удела влаге у њој.
- Примена степеног закона при моделирању функције лома релативно кртих материјала показала се одговарајућом уважавајући мала одступања у резултатима прорачуна у односу на извршене експерименте.

Уважавајући успостављене полазне хипотезе у дисертацији ће бити дефинисана функција лома честице угља којом се на довољно прецизан начин може сагледати свеукупни рад вентилаторских млинова у раду са домаћим угљевима.

4. Научне методе истраживања

Научне методе које ће се применити односе се на:

1. Критички осврт на постојеће методе прорачуна млинских постројења;
2. Математичко моделирање ефекта лома честице при удару о чврсту површ;
3. Експериментални рад, који ће обухватати:
 - Развој опреме за испитивање механичких особина угља;
 - Испитивање механичких особина угља;
 - Извођење билансних мерења на млинским постројењима;
 - Обрада експерименталних резултата ће се спровести методама статистичке анализе (метод најмањих квадрата, итд.).
 - Поређење резултата мерења са резултатима прорачуна применом новог, предложеног, математичког модела;

5. Очекивани научни допринос

Научни допринос би се остварио реализовањем поменутих научних циљева кроз експериментални рад и формирање новог прорачунског модела којим би било могуће симулирати рад вентилаторских млинова са ефектима симултаног сушења и лома честица. Очекује се да се применом новог прорачунског модела кроз имплементацију функције лома путем сопственог кода у постојеће алгоритме за прорачун двофазног струјања добију резултати симулација који одговарају радним параметрима реалног система за припрему угљеног праха са ударним млиновима у погону.

Нови прорачунски модел подразумева коришћење CFD-DPM алгоритма којим се спроводи сукцесивно решавање претходно дефинисаног система једначина струјања стишљивог флуида са полидисперзном чврстом фазом за све прорачунске тачке струјног простора. Надоградњом овог алгоритма имплементирањем функције лома честица било би могуће поред прорачуна билансних параметара млинског постројења на његовим проточним геометријским границама извршити пуну визуелизацију динамике процеса млевења и сушења угља у струјном простору млинског постројења. Тиме би, на пример, било могуће извршити анализу локалних брзина гасне и чврсте фазе, расподеле концентрације чврсте фазе у струјном простору, идентификацију зона са висим, односно, нижим вредностима овог параметра, услове под којима честице интересагују са границама струјног простора као и интензитет њиховог сушења пратећи њихове трајекторије, што у многоме превазилази могућности постојећих полуемпиријских модела прорачуна.

Имајући у виду наведене предности новог прорачунског модела његовом применом биће омогућена процена утицаја промене радних параметара на укупни рад млинских постројења као што су на пр. промена квалитета и гранулације угља на улазу у млин, промена термичких карактеристика сушећег флуида, промена положаја регулационих клапни у инерцијалном сепаратору и промена угаоне брзине радног кола млина.

Применом новог прорачунског модела посебно би било могуће вршити анализу утицаја промене појединих геометријских карактеристика вентилаторског млина и инерцијалног сепаратора у циљу постизања ефикаснијег рада система за припрему чврстог горива у термоенергетским постројењима (на пр. промена гемоетрије сепарационог простора инерцијалних сепаратора, анализа потенцијалних локација у простору спирале млина за допунско млевење честица, оптимизација зона струјног простора са израженим депоновањем чврсте фазе у њему, итд.).

Формирањем новог прорачунског модела млевења нехомогених честица ударом била би успостављена квалитативна основа за даљу анализу применљивости овог приступа за потребе прорачуна процеса млевења ударом других нехомогених материјала у процесној индустрији и рударству.

Стручни допринос би се огледао у потенцијалу да се применом новог математичког модела допуне постојеће аналитичке методе за прорачун млинских постројења које се у великом обиму користе у свакодневној инжењерској пракси.

6. План истраживања

План истраживања ове докторске дисертације приказан је кроз досадашње остварене резултате рада, као и кроз очекиване исходе у наставку израде дисертације:

- 1) Детаљан преглед и критичка анализа доступне научно-стручне литературе у домену млевења чврстих честица ударом;

- 2) Лабораторијски рад – Развој опреме за испитивање механичких особина честица угља;
- 3) Лабораторијски рад – Извођење билансних мерења на млинским постројењима домаћих термоелектрана уз узорковање сировог угља са дозатора;
- 4) Лабораторијски рад – Припрема комада угља за испитивање његових механичких особина;
- 5) Лабораторијски рад – Испитивање механичких особина припремљених комада узоркованог угља током извођења билансних мерења на млинским постројењима;
- 6) Анализа и статистичка обрада резултата испитивања механичких особина угља уз формирање аналитичких израза за одређивање ових особина у функцији од димензије честице и удела влаге у њој;
- 7) Израда КЕД модела вентилаторских млинова са инерцијалним сепараторима за потребе генерисања нумеричког модела прорачуна струјања двофазне мешавине;
- 8) Спровођење прорачуна постројења за припрему угљеног праха према постојећим математичким моделима у циљу допуне граничних услова за извођење нумеричких симулација струјања двофазне мешавине;
- 9) Израда сопственог компјутерског кода функције којом се дефинишу параметри дисолуције честица угља при њиховим контактима са границама струјног простора у циљу инкорпорирања ефекта лома чврсте фазе у прорачунски софтвер FLUENT;
- 10) Спровођење прорачуна процеса млевења и сушења угља помоћу CFD-DPM модела у FLUENT прорачунском софтверу са моделом лома честице;
- 11) Анализа и статистичка обрада прорачунских података. Валидација прорачунских података са резултатима извршених мерења на млинским постројењима;
- 12) Извођење закључака са детекцијом главних утицајних параметара на анализирани процес;
- 13) Допуна постојећих инжењерских аналитичких израза за прорачун млинских постројења.

Предвиђено је да **структура докторске дисертације** обухвата следеће целине:

- 1) Уводна разматрања;
- 2) Преглед доступне литературе и досадашњих релевантних истраживања;
- 3) Приказ постојећих математичких модела;
- 4) Технички опис анализираних млинских постројења;
- 5) Технички опис лабораторијске инсталације за одређивање механичких особина уља;
- 6) Приказ и анализа резултата билансних мерења извршених на млинским постројењима;
- 7) Предлог аналитичког записа математичког модела млевења честице ударом;
- 8) Приказ резултата извршених нумеричких прорачуна са ефектом лома честице;
- 9) Анализа добијених резултата и поређење експерименталних резултата са моделом;
- 10) Закључци изведени из добијених резултата и дискусија, са нагласком на научном доприносу докторске дисертације.
- 11) Литература.

7. Закључак и предлог

На основу анализе пријаве теме докторске дисертације кандидата архивираних под бројем 581/1 од 19.03.2026. године и уз сагласност Катедре за термотехнику под бројем 581/2 од 08.04.2026. године, Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације сматра да је кандидат испунио све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације, као и да је способан да реализује наведене предвиђене циљеве истраживања. Предложена тема докторске дисертације је актуелна и погодна за израду докторске дисертације, те се њеним изучавањем може остварити значајан научни и стручни допринос. Имајући у виду све наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да се

Огњену С. Стаменковића, магист. инж. маш.

одобри израду докторске дисертације под називом

„Моделирање процеса млевења и сушења угља у млинском постројењу са вентилаторским млином“

која припада научној области машинство, ужој научној области термотехника, а за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

За ментора током израде предлаже се **др Горан Ступар**, редовни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета.

Београд, 11.05.2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Драган Туцаковић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
др Горан Ступар, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
др Драгана Животић, редовни професор
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет