



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Саша Ж. Васиљевић

**АНАЛИЗА УТИЦАЈНИХ ФАКТОРА НА
ЕМИСИЈУ ЧЕСТИЦА НАСТАЛИХ
ХАБАЊЕМ КОЧНИЦА ВОЗИЛА**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2023.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

Saša Ž. Vasiljević

**ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING
THE EMISSION OF PARTICLES CAUSED
BY VEHICLE BRAKE WEAR**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2023

Аутор
Име и презиме: Саша Васиљевић
Датум и место рођења: 10.03.1993. године, Јагодина
Садашње запослење: Асистент, Академија струковних студија Шумадија, Одсек Крагујевац
Докторска дисертација
Наслов: Анализа утицајних фактора на емисију честица насталих хабањем кочница возила
Број страница: 206
Број слика: 154
Број библиографских података: 406
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК): 629.331:62-592:620.193.95
Ментор: Др Јасна Глишовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Оцена и одбрана
Датум пријаве теме: 02.03.2022.
Број одлуке и датум прихватања теме докторске/уметничке дисертације: IV-04-518/13 од 12.07.2022.
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:
<ol style="list-style-type: none"> 1 Др Јасна Глишовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2 Др Јованка Лукић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 3 Др Данијела Милорадовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 4 Др Блажа Стојановић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 5 Др Јован Дорић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.
Комисија за оцену и одбрану докторске/уметничке дисертације:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Јованка Лукић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2. Др Данијела Милорадовић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 3. Др Блажа Стојановић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 4. Др Иван Грујић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 5. Др Јован Дорић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.
Датум одбране дисертације:

Свим добрим људима
...знам да и даље постоје, само не могу доћи до изражаја
у овом свету где има мање срца него што има људи...

ЗАХВАЛНИЦА

Желим прво да се захвалим ментору, а пре свега особи која је стварно прави човек, а то је професорка *др Јасна Глишовић*. Најискреније сам захвалан на свој подршци и заједничком раду на изради докторске дисертације и на свакој референци, сваком раду који смо заједнички објавили. Желим да се захвалим на подршци коју ми је пружила од првог дана мог уписа на докторске студије до последњег написаног слова у докторској дисертацији, јер смо кроз све од почетка прошли заједно. Без њене подршке не бих ово постигао, а ова докторска дисертација је резултат наше вишегодишње сарадње. Желим да јој се захвалим што је увек била ту да ми да добар савет и усмери ме у мом раду. Искрено, могу написати књигу захвалности и то би било мало да покажем колико сам професорки захвалан на свему, јер не постоје речи којима бих то рекао. Волео бих да на овом свету има више људи као што је она, јер би онда овај свет био много боље место.

Желим да се захвалим свим професорима и асистентима на Катедри за моторна возила и моторе и свом особљу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу на коректној сарадњи и односу који смо имали у току свих нивоа студија. Професорки *др Јованки Лукић* и *др Данијели Милорадовић* желим да се захвалим на подршци коју су ми увек пружале, а посебно при реализацији експерименталног дела докторске дисертације, и на свакој речи подршке јер некада то значи много. *Др Надици Стојановић* и *др Ивану Грујићу* желим да се захвалим на саветима који су ми дали у једном делу мојих студија и хвала на сарадњи у том периоду. *Др Драгану Тарановићу* желим да се захвалим на подршци и помоћи у изради софтвера за покретање инерцијалног кочног динамометра.

Најискреније се захваљујем свом наставном и ненаставном особљу Академије струковних студија Шумадија, Одсек у Крагујевцу, који су ми пружили подршку и бодрили увек. Посебно желим да се захвалим професорима *др Милосаву Ђорђевићу*, *др Браниславу Александровићу*, *др Марку Маслаћу* и *др Драгану Рајковићу* на подршци.

Др Милосаву Ђорђевићу и *др Браниславу Александровићу* се захваљујем што су ме увели у свет науке и што су ми омогућили да започнем своју научну каријеру.

Професору *др Браниславу Александровићу* се искрено захваљујем на свој подршци коју ми је пружио и понуди за помоћ у сваком тренутку, саветима које ми је дао када је било најтеже и без кога не бих ни започео своју каријеру и студије.

Желим да се захвалим на великој подршци свим пријатељима и родбини који су веровали у мој рад и труд.

На крају, али не и мање важно, желим да се захвалим својој породици која је са мном делила све лепе и тешке тренутке у току мог школовања. Желим да се захвалим својој *мајци Весни*, *оцу Жељку*, *брату Боби*, *деди Јовану* и *нани Милици*. Хвала *мајци Весни* која је подржала сво моје школовање и која ми је била велика подршка у току школовања. Хвала мом *оцу Жељку* који је увек био ту да ми пружи помоћ када је то било потребно и био моја подршка. Хвала мом *брату Боби* који је био моја велика подршка и помогао колико је год могао. Постхумно се захваљујем *прабаки Драгици* и *прадеди Милану* који су ми омогућили школовање и без којих се не бих ни могао школовати до овог нивоа.

РЕЗИМЕ

Честице данас представљају један од загађивача ваздуха који могу имати значајан утицај на здравље људи и животну средину. Честице се најчешће деле према својој величини на честице PM_{10} (пречника мањег од $10 \mu m$) и $PM_{2.5}$ (пречника мањег од $2,5 \mu m$). Возило је један од извора честица и емитује их на два основна начина и то сагоревањем у мотору и хабањем елемената који су у међусобном контакту. Емисија која не настаје сагоревањем у мотору, већ хабањем елемената који су у међусобном контакту се на енглеском назива *non-exhaust emission*. Један од извора честица јесу кочнице, код којих долази до хабања фрикционих парова кочница. У овој докторској дисертацији анализиран је утицај различитих фактора кочења на емисију честица применом инерцијалног кочног динамометра. За анализу добијених резултата примењене су различите статистичке методе да би се дошло до одговарајућих резултата о емисији честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. У истраживању су примењене четири различите кочне плочице и једна врста диска. Показало се да у свим случајевима брзина и оптерећење имају највећи утицај на концентрацију честица. Кочни притисак у хидрауличкој инсталацији доводи до одређених варијација у насталој емисији честица. Температура кочних плочица и кинетичка енергија су показале значајан утицај на насталу концентрацију генерисаних честица. Време кочења се показало као још један фактор који има утицај на концентрацију честица. У зависности од кочне плочице, утицај могу имати: влажност ваздуха, амбијентална температура и коефицијент трења. Кочне плочице које садрже еколошки прихватљиве материјале емитују већу концентрацију честица, али су мање штетне због својих еколошких карактеристика. Значај познавања утицаја појединих фактора је важан за развој кочних система и мере које треба предузети да би се смањила настала и ослобођена количина честица.

Кључне речи: возило, концентрација, честице, кочнице, хабање, инерцијални кочни динамометар, утицајни фактори.

ABSTRACT

Today, particles represent one of the air pollutants that can have a significant impact on human health and the environment. Particles are usually divided according to their size into PM₁₀ (diameter less than 10 μm) and PM_{2.5} (diameter less than 2.5 μm). The vehicle is one of the sources of particles and emits them in two basic ways, namely combustion in the engine and wear of elements that are in contact with each other. Emission that is not caused by combustion in the engine, but by the wear of elements that are in contact with each other, are called non-exhaust emission in English. One source of particles is the brakes, where the friction pairs of the brakes wear out. In this doctoral dissertation, the influence of different braking factors on particle emissions was analyzed using an inertial brake dynamometer. Different statistical methods were used to analyze the obtained results in order to arrive at appropriate results on the emission of PM₁₀ and PM_{2.5} particles. Four different brake pads and one type of disc were used in the research. It was shown that in all cases speed and load have the greatest influence on particle concentration. The brake pressure in the hydraulic installation leads to certain variations in the resulting particle emission. The temperature of the brake pads and the kinetic energy showed a significant influence on the resulting concentration of the particles. Braking time has been shown to be another factor that has an effect on the particle concentration. Depending on the brake pad, air humidity, ambient temperature and friction coefficient can have an influence. Brake pads containing environmentally friendly materials give a higher concentration of particles, but are less harmful due to their environmental characteristics. The importance of knowing the influence of individual factors is important for the development of brake systems and the measures that should be taken to reduce the amount of particles created and released.

Key words: vehicle, concentration, particles, brakes, wear, inertial brake dynamometer, influencing factors.

САДРЖАЈ

1	УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	1
1.1	Извршни органи система за кочење на моторном возилу.....	2
1.2	Фрикциони парови диск кочнице	5
1.2.1	Кочне плочице	5
1.2.2	Кочни диск	6
1.3	Мотивација за истраживање	7
1.4	Предмет и циљ истраживања	8
1.5	Основне хипотезе докторске дисертације.....	8
1.6	Очекивани резултати докторске дисертације.....	9
1.7	Садржај докторске дисертације	9
2	ЕМИСИЈА ЧЕСТИЦА КОЈЕ НИСУ РЕЗУЛТАТ САГОРЕВАЊА У МОТОРУ, ВЕЋ ХАБАЊА У КОНТАКТНОМ ПАРУ КОЧНЕ ПЛОЧИЦЕ-ДИСК.....	11
2.1	Појам честица.....	11
2.1.1	Карактеристике честица	12
2.1.1.1	Величина честица.....	12
2.1.1.2	Састав честица.....	15
2.1.2	Утицај честица на здравље људи и животну средину	17
2.1.3	Извори честица	20
2.2	Честице чији је извор возило	22
2.3	Систем за кочење као извор честица.....	27
2.4	Механизам хабања фрикционих парова кочница	29
2.4.1	Макро анализа хабања фрикционих парова и настанка честица.....	32
2.4.2	Микроскопска анализа настанка честица	34
2.4.3	Механизам ослобађања честица	35
2.5	Састав честица које су продукт хабања кочница	36
2.6	Подела материјала у кочним плочицама (фрикционим облогама)	38
2.6.1	Типови кочних плочица на основу састава	40
2.6.1.1	Полуметалне фрикционе облоге	43
2.6.1.2	Органске фрикционе облоге.....	43
2.6.1.3	Керамичке фрикционе облоге	44
2.6.2	Примена алтернативних материјала у циљу смањења штетности утицаја честица.....	45
2.6.3	Еколошке ознаке на кочним плочицама везане за садржај метала у њиховом саставу	46
2.7	Типови дискова кочнице према врсти коришћеног материјала	48
3	ПРЕГЛЕД ПРЕТХОДНИХ ИСТРАЖИВАЊА	52

3.1	Методологије примењене у истраживањима.....	52
3.1.1	Трибометарска истраживања	52
3.1.2	Инерцијални кочни динамометар	53
3.1.3	Путна испитивања	55
3.1.4	Симулационе методе истраживања	56
3.2	Модификације уређаја у циљу истраживањима емисије честица хабања фрикционих парова кочница	57
3.2.1	Динамометри са ваљцима.....	57
3.2.2	Инерцијални кочни динамометри.....	59
3.2.3	Трибометарска решења.....	62
3.3	Возни циклуси и тестови у истраживању емисије честица	63
3.4	Анализа утицајних фактора на емисију честица.....	71
3.4.1	Утицај температуре фрикционих парова	71
3.4.2	Утицај брзине (возила, диска, клизања).....	72
3.4.3	Утицај вертикалног оптерећења возила.....	74
3.4.4	Утицај притиска (у систему за кочење, у контакту између фрикционих парова)	75
3.4.5	Утицај примењених материјала у фрикционим паровима	75
3.4.6	Утицај успорења (возила, диска)	77
3.4.7	Утицај влажности амбијенталног ваздуха	78
3.5	Пројекти који су имали за циљ смањење емисије честица насталих хабањем кочница.....	79
3.5.1	REBRAKE пројекат.....	79
3.5.2	LOWBRASYS пројекат.....	82
3.5.3	SOBRA пројекат.....	84
4	МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА	85
4.1	Инерцијални кочни динамометар	85
4.1.1	Систем за кочење на инерцијалном кочном динамометру	87
4.1.2	Примењени мерни давачи на инерцијалном кочном динамометру	89
4.1.3	Прорачун брзине кретања возила	92
4.1.4	Управљање инерцијалним кочним динамометром.....	93
4.2	Модификације на инерцијалном кочном динамометру у циљу испитивања концентрације честица и примењени уређаји	98
4.2.1	Уређај за мерење концентрације честица	100
4.2.2	Уређај за мерење релативне влажности ваздуха и амбијенталне температуре	101
4.3	Примењени тест и начин мерења	102
4.3.1	Утицајни фактори и њихова подела	102

4.3.2	Вредности улазних фактора и примењени тест	103
4.3.3	Поступак мерења	105
4.4	Објекат мерења	106
4.5	Оцена резултата	108
4.5.1	Упоредне дијаграмске анализе	108
4.5.2	Тагучи анализа и анализа варијансе (ANOVA)	109
4.5.3	Корелациона анализа	111
4.5.3.1	Пирсонов коефицијент корелације	112
4.5.3.2	Спирманов коефицијент корелације	113
4.5.4	Неуронске мреже	113
4.5.4.1	Техника обучавања неуронских мрежа	116
4.5.4.2	Примењена архитектура неуронских мрежа	117
5	СТАТИСТИЧКА ОБРАДА И АНАЛИЗА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА	120
5.1	Графичко-аналитичка анализа података	120
5.1.1	Анализа просечних вредности концентрација честица	120
5.1.2	Анализа просечних вредности концентрације честица у зависности од типа кочних плочица	127
5.1.3	Анализа просечних вредности концентрације честица у зависности од типа кочних плочица и поређење утицајних фактора	134
5.2	Тагучи анализа добијених резултата	141
5.3	Корелациона анализа добијених података	146
5.3.1	Примена Пирсоновог коефицијента у циљу корелационе анализе	147
5.3.3	Примена Спирмановог коефицијента у циљу корелационе анализе	152
5.4	Примена неуронских мрежа у циљу формирања модела превиђања концентрације честица	158
5.4.1	Неуронске мреже са два скривена слоја	160
5.4.2	Неуронске мреже са три скривена слоја	162
5.4.3	Неуронске мреже са четири скривена слоја	163
5.4.4	Усвајање архитектура неуронских мрежа	164
6	МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ЕМИСИЈЕ ЧЕСТИЦА И ОТКЛАЊАЊА ЊИХОВЕ ШТЕТНОСТИ	166
6.1	Уређаји и системи за сакупљање насталих честица	167
6.1.1	Системи за сакупљање честица	168
6.1.2	Филтери – модули за сакупљање честица	171
6.2	Систем регенеративног кочења	173
6.3	Увођење законских прописа и норматива	175
6.4	Развој материјала и технологија производње фриксионих парова	175
6.5	Обука возача	176

6.6	Регулисање и планирање саобраћаја	176
7	ЗАКЉУЧАК.....	177
7.1	Допринос аутора.....	179
7.2	Анализа постављених хипотеза	180
7.3	Правци даљих истраживања.....	181
	ЛИТЕРАТУРА.....	183

1 УВОДНА РАЗМАТРАЊА

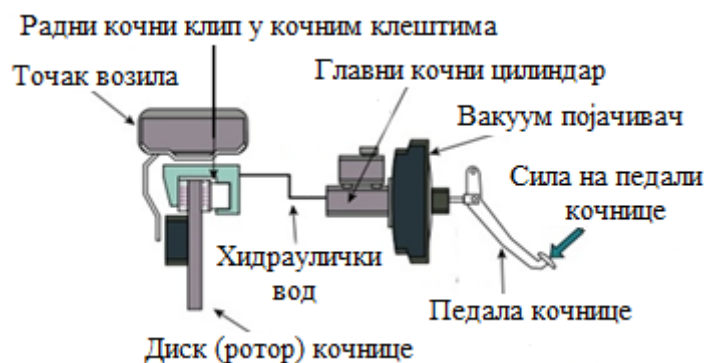
Загађење животне средине се може дефинисати као уношење загађивача који изазивају штетне промене у животној средини [1]. На основу [2], изворе загађења можемо поделити у неколико категорија: мобилни извори загађења, стационарни извори загађења, извори везани за одређена подручја-области и природни извори загађења. У мобилне изворе загађења се могу сврстати: путничка возила, теретна возила, аутобуси, возови, авиони, итд. Стационарни извори загађења се односе углавном на индустријска постројења попут: рафинерије нафте, електране, фабрике, ... Извори везани за подручја-области се односе углавном на изворе који емитују загађиваче на одређеном простору, као што су градови, села, пољопривредна подручја, итд. Поред претходно наведених извора загађења, постоје и извори загађења који се односе на природне појаве попут: пожара, вулкана, прашине коју носи ветар и других. Загађења су многобројна, али њихов састав и врста загађења зависи од емитера. Најчешће материје које се емитују према [3,4] су: честице (енгл. *Particulate Matter – PM*), сумпор диоксид (SO_2), оксиди азота (NO_x), амонијак (NH_3), испарљива органска једињења (VOC), метан (CH_4), озон (O_3), угљен моноксид (CO) и угљен диоксид (CO_2). Проблем са материјама које загађују животну средину јесте и тај што се оне у природи могу мењати у зависности од хемијских реакција које се могу десити у окружењу [5]. Тако се може рећи да постоје примарне и секундарне загађујуће материје. Примарни загађивачи су они који се испуштају у животну средину, а који услед хемијских реакција у природи могу променити свој састав или структуру и на тај начин постају секундарне загађујуће материје, чиме се може повећати штетност почетних загађујућих материја.

У овој докторској дисертацији биће анализирани честице које су један од наведених загађивача животне средине. Честице се разликују према саставу, величини, али и утицају на животну средину и на здравље човека. Возило је један од извора честица које настају приликом експлоатације истог. На основу [6], возило може емитовати честице на два главна начина. Први начин је сагоревањем горива у мотору са унутрашњим сагоревањем (у даљем тексту МСУС), па се та емисија назива емисија услед сагоревања-издувна емисија (енгл. *exhaust emission*). Други начин је емитовање честица које настају хабањем контактних површина два или више елемената на возилу, па се таква емисија назива емисија честица које нису резултат сагоревања у МСУС (енгл. *non-exhaust emission*). Емисија честица које нису резултат сагоревања може настати у различитим процесима који се везују за возила, односно за друмски саобраћај, тј. ови процеси укључују абразију, корозију и турбуленцију (што доводи до подизања, односно ослобађања честица у атмосферу). Процеси који доводе до стварања честица обухватају: хабање пнеуматика, хабање кочница (фрикционих парова кочница), хабање елемената спојнице, хабање површине пута, корозију компоненти возила, корозију елемената пута и заштитних ограда, као и поновно подизање честица са пута (енгл. *dust resuspension*) [7].

Кочни систем и кочнице као извршни орган, представљају један од најзначајнијих система на друмским моторним и прикључним возилима. Улога кочница у активној безбедности саобраћаја се огледа у избегавању настанка саобраћајних незгода, смањивању брзине кретања или заустављању возила. Приликом активирања система за кочење долази до успорења возила, односно до стварања кочног момента на точку, тако што долази до контакта између елемената фрикционих парова. Управо приликом кочења, односно контакта између елемената фрикционих парова, долази до њиховог међусобног хабања чиме се ослобађају честице које су продукт овог процеса.

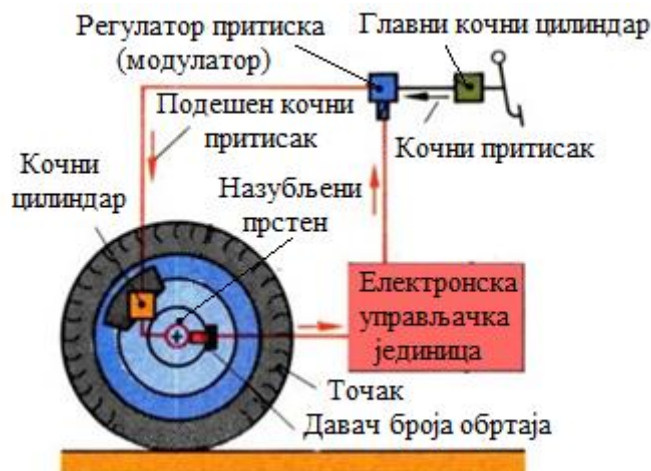
1.1 Извршни органи система за кочење на моторном возилу

Систем за кочење је веома сложен скуп елемената који раде по принципима механике и хидраулике, односно пнеуматике, данас и електронике. Он има за циљ да кинетичку енергију возила претвори у топлотну енергију како би се смањила брзина возила, односно зауставило возило. Састоји се из неколико механизма: командног, преносног и извршног подсистема [8]. Преко командног механизма возач остварује побуду којом се активира кочница. Преносни механизам има улогу да побуду задату преко командног механизма пренесе на извршне органе (кочнице), али и да вишеструко повећа силу која се преноси на кочнице, да би се омогућила довољна сила кочења. Извршни механизми, односно кочнице су уједно и извршни органи који у међусобном контакту својих фрикционих парова стварају довољну силу отпора (силу кочења) да би се возило успорило, односно зауставило. Систем за кочење, као што је речено, састоји се од низа различитих елемената, у зависности од тога да ли је преносни механизам механички, хидраулички или пнеуматички. Тема докторске дисертације је везана за путничка возила, па су на слици 1.1 приказани конструкција и саставни елементи хидрауличког система за кочење.



Слика 1.1 Хидраулички систем кочења на путничким возилима [9]

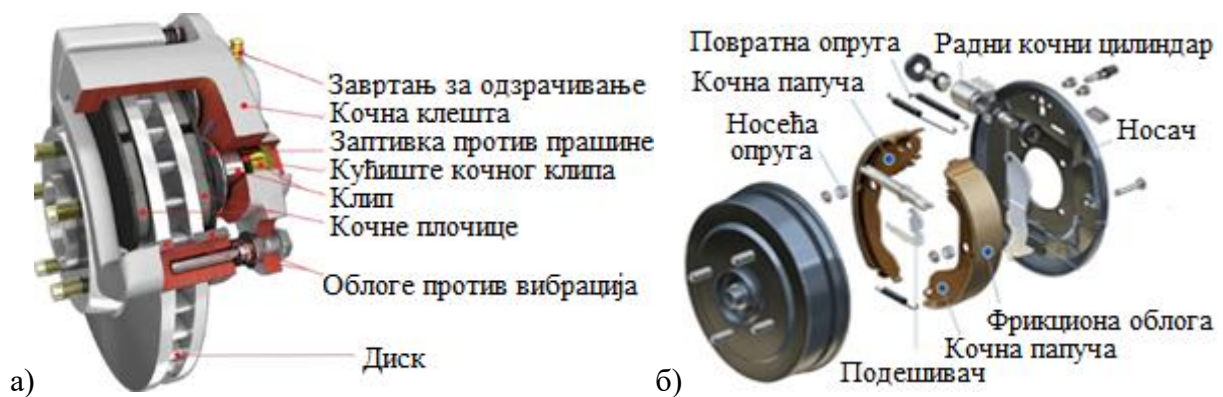
Данас се на већини возила користе и електронски системи кочења, који имају улогу да регулишу рад система за кочење и сам процес кочења. Један такав систем јесте систем против блокирања точкова (енгл. *Anti-lock Braking System - ABS*). Овај електронски (мехатронички) систем се састоји од елемената који омогућавају праћење параметара кочења, чиме спречавају блокирање точкова и омогућавају управљивост возила у процесу кочења. На слици 1.2 је приказана шема компонената система против блокирања точкова.



Слика 1.2 Шематски приказ елемената система против блокирања точкова [10]

Као извршни органи данас се најчешће користе диск и добош кочнице. Код новопроизведених путничких возила се највише примењују диск кочнице на предњој и задњој осовини, где се на предњој осовини користе вентилирајући дискови, а на задњој невенгилирајући дискови. Свакако, још увек има возила са уграђеним добош кочницама на задњим точковима, што зависи од произвођача, категорије и намене возила [11].

Основна разлика између диск и добош кочница јесте у њиховој конструкцији која је приказана на слици 1.3. Добош кочница у односу на диск кочницу има нешто сложенију конструкцију и више елемената. За разлику од диск кочнице, код добош кочница, кочне папуче се налазе унутар добоша, што доводи до тежег хлађења фрикционих материјала. Диск кочница је такве конструкције да је отворена, што значи да преко кочних плочица и диска кочнице може прострујавати ваздух, што доводи до лакшег хлађења у односу на добош кочницу.



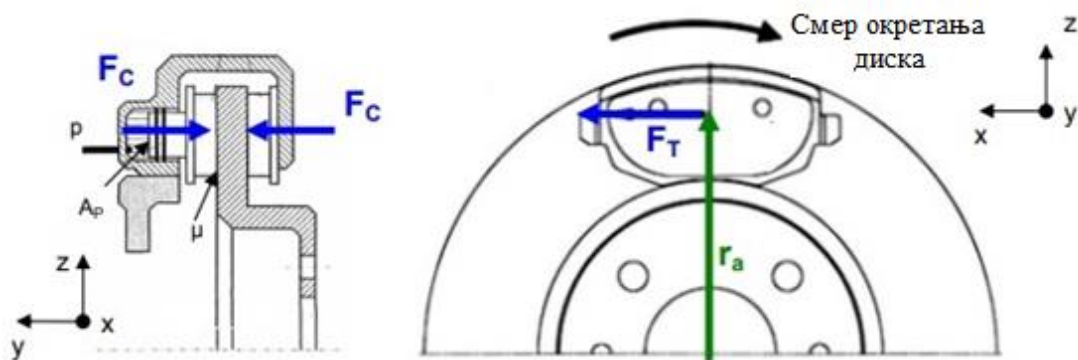
Слика 1.3 Извршни кочни механизми: а) диск кочница, б) добош кочница [11, 12]

Поред претходно наведених конструктивних разлика диск и добош кочнице, постоји разлика и у начину остваривања силе кочења, односно кочног момента. Оба типа кочница остварују кочни момент трењем фрикционих парова. На слици 1.4 је приказан принцип остваривања контакта између фрикционих парова диск и добош кочнице. Са слике 1.4а се може закључити да код диск кочнице, кочне плочице притискају диск који је везан са погонским вратилом возила и на тај начин се остварује кочни момент, што доводи до успоравања пре свега вратила и точка, а самим тим и возила. Код добош кочница, кочни момент се остварује тако што кочне папуче притискају добош са унутрашње стране, слика 1.4б. Добош, односно диск, су повезани директно са погонским вратилом точкова, па је брзина точка и диска/добоша иста. Када дође до контакта диск/кочне плочице, односно добош/фрикционе папуче, долази до стварања кочног момента, што се преноси на точкове и возило се успорава, односно зауставља.



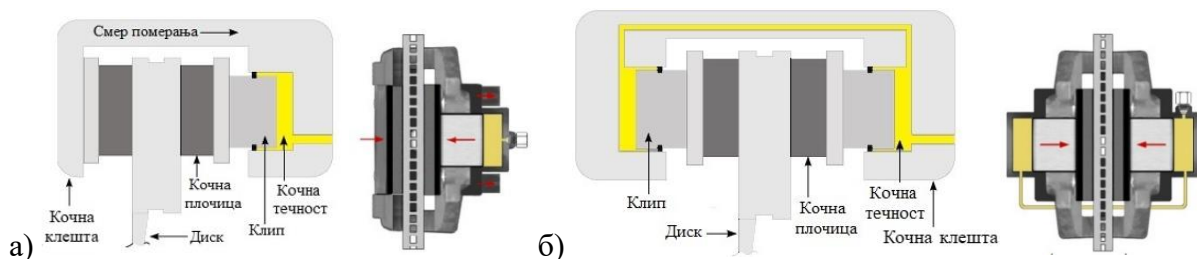
Слика 1.4 Принцип остваривања кочног момента: а) диск кочница, б) добош кочница [13]

Према [14], уколико се посматра рад диск кочнице и контакт између фрикционих парова, приликом кочења делују различите силе које доводе до кочења, а које су приказане на слици 1.5. Активирање диск кочнице, односно аксијално померање кочног клипа се остварује помоћу хидрауличког притиска (p) који делује на површину клипа (A_p). На овај начин настају силе притиска на фрикционим плочицама (F_c) које потискују фрикционе плочице ка диску. Приликом потискивања фрикционих плочица ка диску у тренутку успостављања контакта настају тангенцијалне силе (F_T) на површини трења између контактних површина диска и фрикционих плочица. Тангенцијалне силе које делују на растојању (радијусу трења), r_a , формирају кочни момент. Ефикасност и интензитет тангенцијалних сила зависе првенствено од коефицијента трења (μ) између фрикционих површина диска и кочних плочица. Коефицијент трења треба да има што већу вредност. Ако се кочни момент, као мерило функционалних својстава или перформанси кочнице, подели са динамичким радијусом пнеуматика, добија се сила кочења у контакту пнеуматика и подлоге, која доводи до успорења, односно заустављања возила.



Слика 1.5 Силе које делују у процесу кочења диск кочнице [14]

Потребно је напоменути да се остваривање контакта између фрикционих плочица и диска може постићи на више начина, што зависи од конструктивног извођења. На слици 1.6 су приказана два најчешћа извођења диск кочница. На слици 1.6а је приказана диск кочница у којој су плочице постављене унутар пливајућих кочних клешта. Унутар оваквог конструктивног извођења постоји један клип који се хидраулички активира; он притиска једну од кочних плочица ка диску. При дејству клипа долази и до аксијалног померања кочних клешта у супротном смеру од кретања клипа. У делу кочних клешта који се помера налази се друга фрикциона плочица која затим долази у контакт са диском кочнице приликом померања кочних клешта. По престанку дејства система за кочење долази до враћања радног клипа у положај када није активирана кочница, па се и кочна клешта враћају у првобитни положај пре активирања кочнице. У другом случају, који је приказан на слици 1.6б, дат је пример фиксних кочних клешта где постоје два кочна клипа која се покрећу хидрауличким путем. На овај начин, обе кочне плочице се потискују ка диску преко клипова, док су кочна клешта увек у фиксном положају.



Слика 1.6 Типови диск кочница у односу на принцип рада: а) диск кочница са пливајућим кочним клештима, б) диск кочница са фиксним кочним клештима [15,16]

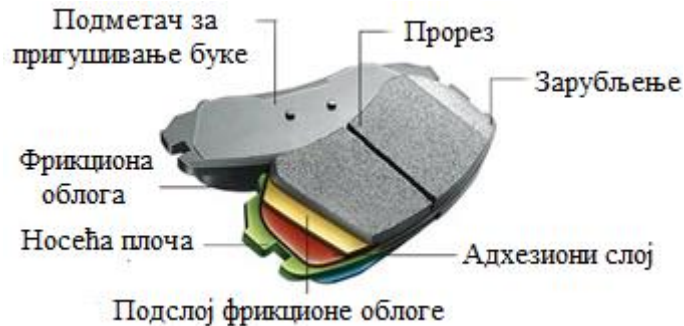
1.2 Фрикциони парови диск кочнице

Елементи фрикционог пара код диск кочнице су диск и фрикционе плочице. Њихова конструкција и састав се данас разликује у зависности од произвођача, али и од возила на којима се примењују. Познавајући фрикционе карактеристике, али и специфичности услова под којима фрикциони материјали, тј. склоп кочнице обављају своју функцију, потребно је пажљиво одабрати материјале који се примењују. Постоји више аспеката који се морају узети у обзир приликом избора материјале за елементе кочног система. Избор фрикционих материјала мора да обезбеди одговарајуће перформансе кочног система. Перформансе кочења су карактеристике које говоре о ефикасности кочења, која се обезбеђује применом фрикционих материјала са довољно високим коефицијентом трења. Једна од карактеристика је и дуготрајан век кочница, тј. да нема велике брзине хабања примењених материјала. Материјали фрикционог пара не смеју мењати своја својства и перформансе при промени радних и атмосферских услова. Отежани радни услови подразумевају рад при високим температурама, високим притисцима, увећаној влажности ваздуха, итд. Материјали морају пружити и висок степен комфора у смислу да не производе својим међусобним контактом буку, да нема генерисаних вибрација приликом вожње, поготово при већим брзинама, као и друге могуће нелагодности које би возач осетио приликом кочења. Фрикциони материјали морају бити израђени од компоненти које не стварају штетне материје, односно, уколико их стварају, да то буде у веома малој концентрацији и да имају што мањи садржај штетних материја у себи. Са друге стране, важно је да фрикциони материјали имају што нижу цену, како би били доступни произвођачима кочница и имали што ширу примену.

1.2.1 Кочне плочице

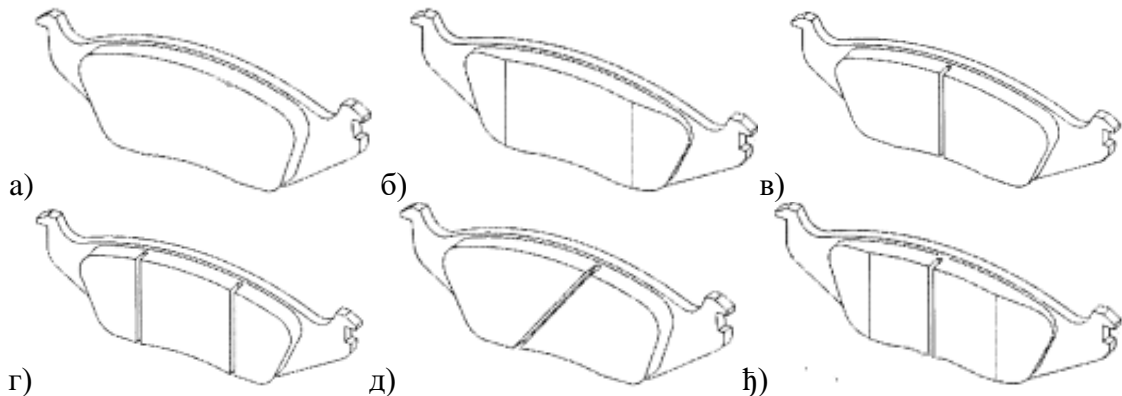
Кочне плочице су један од елемената диск кочница помоћу кога се остварује кочна сила тако што фрикциона површина плочице клиза по металној површини диска. Два основна услова које морају да задовоље кочне плочица су: висок коефицијент трења и ниска брзина хабања [17].

На основу [18], може се закључити да се кочне плочице састоје од неколико елемената који су приказани на слици 1.7. Фрикциона облога је најзначајнији елемент кочне плочице, јер су фрикционе облоге елемент који долази у контакт са површином диска. Фрикциона облога се може представити као хетерогени скуп различитих материјала који формирају фрикциони материјал, док горњи слој који долази у контакт са диском представља фрикциони слој, односно фрикциону површину [19, 20]. Фрикциони материјал облоге се састоји од различитих материјала који имају своју улогу. Подслој фрикционе плочице представља слој који се налази између носећег слоја и фрикционе облоге и има улогу да смањи пренос топлоте са фрикционе облоге на остале делове фрикционе плочице, али и на систем за кочење [18]. Носећа плоча кочне плочице има улогу да обезбеди контакт са кочним клештима, али је уједно и носећа конструкција свих елемената кочне плочице. Она има задатак и да расподели силу којом клип делује преко целе контактне површине. Адхезиони слој има улогу да обезбеди чврсту везу између носеће плоче и фрикционе облоге. Чврста веза између носеће плоче и фрикционе облоге се може обезбедити применом различитих врста лепкова или применом механичке везе за задржавање (фрикциона облога се утискује на носећој плочи) [21]. Подметач за пригушивање буке има улогу да спречи пренос буке и вибрација које настају приликом кочења.



Слика 1.7 Елементи кочне плочице [22]

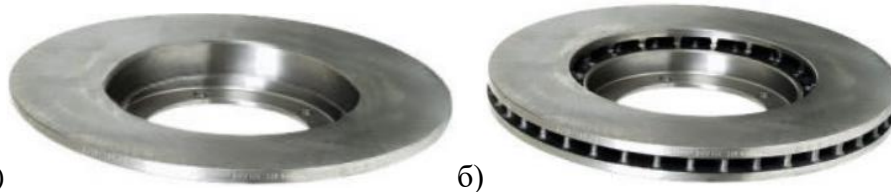
Конструктивно решење фрикционих плочица дефинише произвођач зависно од намене возила на које се уграђује. Носећа плоча фрикционе плочице зависи од решења конструкције кочних клешта на која се поставља. Постоји велики број решења фрикционих облога и неки од примера су дати на слици 1.8. Конструкција фрикционих плочица има утицаја на насталу буку и вибрације [23], али према истраживању [24] дошло се до закључка да конструкција фрикционих плочица утиче и на кочни момент, коефицијент трења и на брзину хабања. Фрикционе облоге се, када је у питању конструкција, разликују углавном према томе да ли су ивице зарубљене и да ли имају прорез по својој површини. Наравно, могуће је да решење буде такво да постоји комбинација зарубљених ивица и прореза по површини, али је могуће и да површина буде потпуно равна, без зарубљења и прореза.



Слика 1.8 Примери решења фрикционих облога диск кочница: а) фрикциона облога без зарубљења и прореза, б) фрикциона облога са зарубљеним бочним ивицама, в) фрикциона облога са прорезом по средини, г) фрикциона облога са паралелним прорезима, д) фрикциона облога са дијагоналним прорезом, ж) фрикциона облога са комбинацијом зарубљених ивица и прорезом [25]

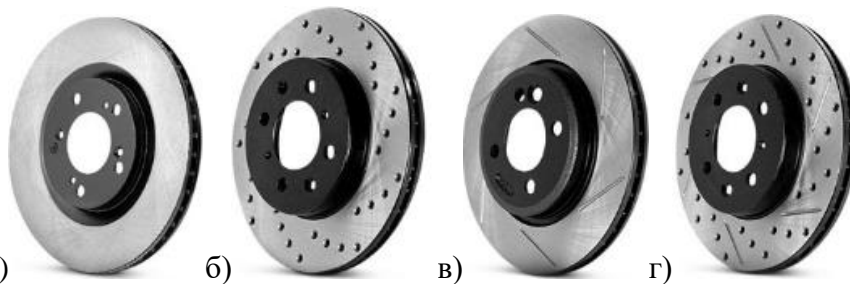
1.2.2 Кочни диск

Кочни диск је један од два елемента, поред фрикционих плочица, које називамо фрикционим паром диск кочница. Кочни диск се може у литератури пронаћи и под називом ротор диск кочнице и то је елемент који ротира заједно са точком. Диск се мора израдити од материјала који има високу топлотну издржљивост, тако да не дође до деформације при високим температурама и да се остваре стабилан коефицијент трења и ниска брзина хабања. Дискови се израђују као невентилирани (слика 1.9а), и као вентилирани дискови (слика 1.9б).



а) б)
Слика 1.9 Конструктивна извођења кочних дискова: а) невентилирани кочни диск, б) вентилирани кочни диск [26]

Поред различитог конструктивног извођења самих дискова, постоји разлика и у изради фрикционе површине дискова (слика 1.10). Фрикциона површина може бити попуно равна, пробушена, изрезана и комбиновано пробушена и изрезана. На основу извора [27] може се закључити да извођење фрикционе површине диска зависи пре свега од намене дискова и да свако извођење има своје предности и недостатке. Предности и недостаци се углавном уочавају у ефикасности хлађења, преносу топлоте, брзини хабања и брзини сушења фрикционе површине у условима када долази до квашења фрикционе површине. Дискови са пробушеном и изрезаном фрикционом површином остварују брже расипање топлоте током кочења, имају високу отпорност на термичко напрезање, пружају стабилан осећај при кочењу на свим температурама, имају ниску брзину хабања и континуално хлађење површине кочења за постизање оптималних перформанси [28].



а) б) в) г)
Слика 1.10 Конструктивно извођење фрикционе површине диска кочнице: а) глатка фрикциона површина диска, б) пробушена фрикциона површина диска, в) фрикциона површина диска са прорезима, г) пробушена фрикциона површина са прорезима [29]

1.3 Мотивација за истраживање

Фрикциони парови кочница на моторним и прикључним возилима, у зависности од стила војње и интензитета кочења, морају се периодично мењати. Разлог замене фрикционих парова јесте њихова похабаност и недовољна ефикасност у процесу кочења. Према извору [30], процењује се да просечно моторно возило годишње похаба око 0,5 kg фрикционог материјала кочница. Похабани фрикциони материјал са елемената кочница се ослобађа у ваздух у виду честица различитих величина и касније се таложи у животној средини. Мотивација за рад је проистекла из свега претходно реченог, па је докторска дисертација обухватила истраживање фактора који утичу на хабање и настанак честица различитих величина и одређене концентрације при кочењу возила. Истраживање указује и на то како, поред конструктивних карактеристика возила и кочница, понашање, односно стил војње возача, као и комбинација материјала примењених фрикционих парова, утичу на брзину хабања, тј. насталу емисију честица чији је извор систем за кочење. Применом резултата анализе утицајних фактора на насталу емисију честица могли би се развити системи за сакупљање честица и дефинисати њихова стратегија рада. Поред тога, анализом и извођењем закључка који су то најзначајнији фактори који утичу на насталу емисију честица могао би се развити и усавршити рад савремених мехатроничких система кочења који електронским путем регулишу кочни процес.

1.4 Предмет и циљ истраживања

Проучавањем кочница као извора респирабилних честица, закључује се да је настанак честица резултат процеса хабања елемената фриксионог пара кочнице. Код диск кочница које су предмет истраживања, то су: диск и кочне плочице. После одређеног броја кочења, потребна је промена кочних плочица услед похабаности фриксионих облога, али је у мањој мери присутно и хабање диска. Ова појава доводи до тога да је некада потребна и замена диска кочнице у зависности од његове похабаности и препоруке произвођача. Сав похабани материјал кочница се приликом кретања возила ослобађа, пре свега, у ваздух, у облику честица различитих величина. Предмет ове докторске дисертације представља проучавање емисије, односно концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ које настају хабањем фриксионих парова диск кочнице у процесу кочења.

Циљ докторске дисертације је анализа различитих утицајних фактора на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ које се генеришу у процесу кочења диск кочнице у лабораторијским условима, на инерцијалном кочном динамометру. Применом замајне масе и варирањем угаоне брзине исте, симулира се кинетичка енергија која одговара кинетичкој енергији четвртине масе возила, зависно од почетне брзине возила при кочењу и оптерећења. Циљ је идентификација и квантификација утицајних фактора (брзина возила, притисак у кочном систему, температуре елемената фриксионог пара, односно фриксионе плочице, оптерећења коченог точка, и др.) на настанак и емисију честица.

Поред поменутих утицајних фактора у процесу кочења, истраживање је било усмерено и на анализу утицаја различитих карактеристика кочних плочица (конструкција/облик, материјал, стање) на емисију честица. Коришћене су кочне плочице различитих произвођача намењене истом моделу путничког возила. Самим тим, постојала је разлика у њиховом саставу, али и детаљима геометрије. Анализиране кочне плочице су комерцијално доступне на тржишту у Републици Србији. Сви добијени резултати мерења емисије честица су обрађени статистичким методама како би се идентификовали утицајни параметри (фактори) на емисију честица, али и да би се извео закључак да ли радни фактори имају идентичан утицај на емисију честица и приликом примене различитих кочних плочица.

1.5 Основне хипотезе докторске дисертације

Узимајући у обзир досадашња истраживања у области емисије честица насталих хабањем диск кочница, као и постављеног предмета и циљева предложене докторске дисертације, полази се од следећих хипотеза:

- Применом инерцијалног кочног динамометра се може успешно измерити концентрација честица која настаје при кочењу диск кочнице оптерећене тежином која одговара једној четвртини возила.
- Промена параметара у процесу кочења има утицаја на укупну концентрацију честица које настају хабањем фриксионих парова диск кочнице.
- Однос концентрација честица различитих величина које настају хабањем фриксионих парова диск кочнице зависи од параметара кочења.
- Радни параметри кочења (почетна брзина кочења, притисак у кочном систему и оптерећење једне четвртине возила) увек имају идентичан утицај на измерену концентрацију честица без обзира на примењене кочне плочице (материјал и геометрија).

1.6 Очекивани резултати докторске дисертације

Очекивани допринос и резултати докторске дисертације су:

- идентификација утицаја различитих параметара (фактора) процеса кочења на насталу емисију честица,
- идентификација утицаја различитих конструктивних облика кочних плочица и примењених материјала на насталу емисију честица,
- идентификација утицаја различитих кочних параметара (фактора) на концентрацију емитованих честица PM_{10} и $PM_{2,5}$ понаособ,
- развој методе за мерење емисије честица настале хабањем диск кочница на инерцијалном кочном динамометру, као једне од лабораторијских метода која је најприближнија мерењима у путним условима,
- формирање значајне основе за даља истраживања у области заштите животне средине од утицаја саобраћаја и увођење законских мера за смањење емисије честица и њихове штетности.

1.7 Садржај докторске дисертације

Докторска дисертација се састоји из осам поглавља и то:

1. Уводна разматрања
2. Емисија честица које нису резултат сагоревања у мотору и хабање у контактном пару кочне плочице-диск
3. Преглед претходних истраживања
4. Методологија истраживања
5. Статистичка обрада и анализа добијених резултата
6. Мере за смањење емисије честица и отклањања њихове штетности
7. Закључак
8. Литература

У првом поглављу су представљена уводна разматрања везана за предмет и циљ докторске дисертације. Хабање фриксионих парова, односно диска и кочних плочица, веома је значајно за емисију насталих честица. Како је докторска дисертација везана за диск кочнице, у овом поглављу су приказани и анализирани елементи фриксионог пара диск кочнице, као и сам систем за кочење.

Друго поглавље докторске дисертације обухвата проблем штетног утицаја честица на здравље људи, биљни и животињски свет, извори настанка честица и њихове основне карактеристике. Предмет докторске дисертације је емисија честице које настају хабањем фриксионих парова диск кочница, а оне спадају у емисију честица чији је извор возило и које настају трењем елемената који су у међусобном контакту. У овом поглављу је анализирано процентуално учешће овог извора честица у односу на друге изворе, објашњен механизам настанка честица у контакту диск – кочне плочице, анализиран састав честица у погледу порекла материјала од кочних плочица и диска, као и начин на који се настале честице ослобађају.

Треће поглавље приказује добијене резултате других аутора који су вршили испитивања у области настанка честица хабањем фриксионих парова кочница и фактора који могу утицати на концентрацију и величину честица, али и састав честица које настају у процесу кочења. У овом поглављу су критички анализирани методологије и тестови који

су примењени од стране других аутора у области хабања фрикционих парова и емисије честица.

У четвртном поглављу је представљена методологија спроведених истраживања, објашњене примењене фрикционе плочице и дискови, као и тестове, односно улазни фактори мерења у тестовима који су спроведени у експерименталном делу докторске дисертације. У овом поглављу су описане модификације, односно надоградња инерцијалног динамометра, које су омогућиле мерење емисије честица које настају приликом кочења. Такође су описане статистичке методе које су примењене у обради резултата мерења.

Добијени резултати експерименталног истраживања су дати у петом поглављу докторске дисертације. Резултати су анализирани статистичким методама описаним у четвртном поглављу. На основу добијених резултата статистичке анализе утврђени су фактори који утичу на емисију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ насталих у процесу кочења.

Шесто поглавље се бави методама, односно технологијама и системима на возилима који би имали примену у циљу смањења емисије честица које настају хабањем кочница. У овом поглављу су представљени елементи законске регулативе која се може применити у Републици Србији, а на основу искустава других земаља, да би се смањила штетност насталих честица.

У седмом поглављу представљена су закључна разматрања, извршена дискусија постављених хипотеза, истакнут допринос дисертације и дати правци будућих истраживања.

Осмо поглавље обухвата целокупну литературу која је коришћена у изради докторске дисертације.

2 ЕМИСИЈА ЧЕСТИЦА КОЈЕ НИСУ РЕЗУЛТАТ САГОРЕВАЊА У МОТОРУ, ВЕЋ ХАБАЊА У КОНТАКТНОМ ПАРУ КОЧНЕ ПЛОЧИЦЕ-ДИСК

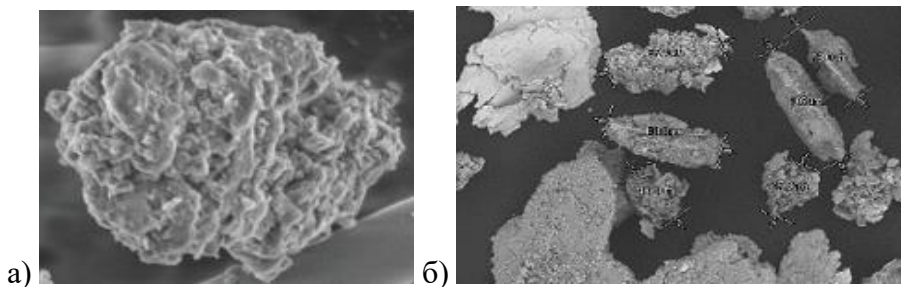
Честице које настају хабањем кочница представљају један од продуката процеса кочења, тако да је у овом поглављу извршена макро и микроанализа настанка честица различитих величина. Штетност честица се, поред величине, огледа и у њиховом саставу. Имајући на уму да састав честица зависи од извора из којих потичу, анализиран је и састав фриксионих парова, односно материјали који се примењују за њихову израду. У неким земљама је већ уведена законска регулатива којом се ограничава примена одређених материјала у саставу фриксионих парова да би се смањила штетност по здравље. У циљу смањења штетног утицаја честица на здравље људи и окружење, покренути су и пројекти који су имали циљ да смање концентрацију честица, а тиме и штетност, применом савремених технологија производње и променом састава материјала коришћених за израду кочних плочица и дискова.

2.1 Појам честица

Данас постоји велики број извора загађења ваздуха који имају негативни утицај на здравље човека, а међу њима су и они који емитују честице које су познатије под скраћеницом РМ. Честице могу представљати велику опасност у погледу смањења квалитета ваздуха, чиме настаје велики проблем који може имати утицај на здравље људи, али и животиња и биљака. Услед врло сложеног састава и поделе, честице се називају различитим именима:

- суспендоване честице,
- укупне суспендоване честице/партикуле,
- црни дим,
- лебдеће честице, итд. [31].

Честице представљају мешавину чврстих честица и капљица у ваздуху, која се састоји од различитих компоненти као што су: органска једињења, метали, киселине, земља и прашина [32]. Према извору [33] и према *NIST*-у (*National Institute of Standards and Technology*) [34], оне се могу дефинисати као тродимензионални дисконтинуитет кондензоване фазе у диспергованом систему. Према [33], честице представљају чврсте, течне или комбиноване материје које су ослобођене у ваздух, односно животну средину, а које су различитих величина, састава и порекла. Према извору [34], дефинисан је појам аеросола, па се наводи да су аеросоли суспендовани (распршени) у ваздуху. Зато се често примењује и појам суспендоване честице. На основу извора [35], честице представљају све честице у чврстом и течном облику које се ослобађају у ваздух, од којих су многе опасне по здравље човека и животну средину. Честице утичу на животну средину, климу и здравље људи и постале су један од најважнијих загађивача који утичу на квалитет ваздуха [36]. Честице могу садржати фракције различитих материја које су штетне и опасне [37], па управо због таквих фракција и састава честица, као и њихове величине која зависи од извора честица, оне имају различит утицај на човека и животну средину [38]. У зависности од извора, честице могу имати различит изглед. Честице имају микроскопску величину, па се морају увеличати да би се виделе и за то се користе различити електронски микроскопи. На слици 2.1 је приказан пример честица чађи и честица које су настале хабањем кочних плочица.



Слика 2.1 Изглед микроскопски увеличаних честица: а) честица чађи, б) честице настале услед хабања кочних плочица [39,40]

2.1.1 Карактеристике честица

Класификација честица се најчешће врши према три основна критеријума, на основу:

- величине честица,
- састава честица и
- извора честица.

Чињеница је, да се, ипак, најчешће наилази на поделу честица према њиховој величини. Са друге стране, постоји чврста веза између њихове величине и масе, али и веза између масе и њиховог састава. У зависности од извора настанка честица зависи и њихов састав. У неким случајевима честице, у зависности од извора настанка, могу садржати веома штетне материје, док, са друге стране, честице могу имати мање штетни ефекат уколико је извор такав да користи или емитује мање опасне материје у свом саставу.

2.1.1.1 Величина честица

Једна од најчешћих подела честица је према њиховој величини. Различите честице могу имати одређене ознаке којима се оне описују према свом пречнику. Честице се обележавају ознаком PM_x , где x представља величину честица, било да се ради о маси или концентрацији честица. Тако x најчешће има вредности $x=10, 2.5, 0.1$ које представљају величине честица у μm [41]. Тако се приказ концентрације честица или масе честица раздваја и даје у зависности од величине честица. Према својој величини, честице које се најчешће посматрају су:

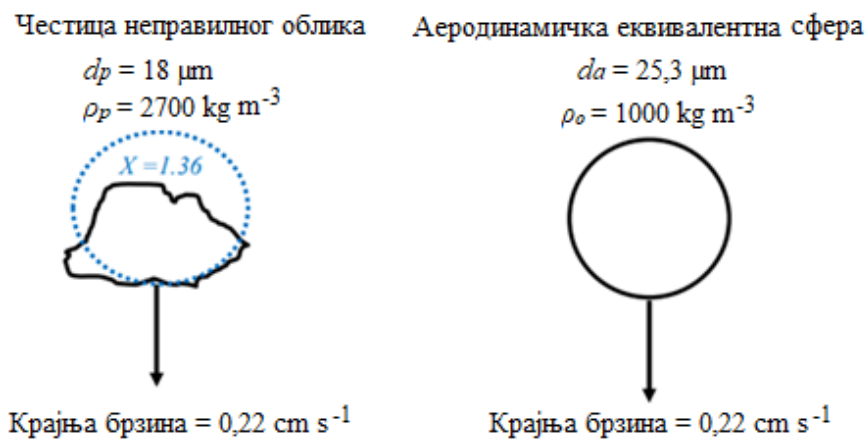
- *Потпуно суспендоване честице* (енгл. *Total Suspended Particles*) које су мање од $50 \mu m$ односно $100 \mu m$,
- PM_{10} су честице величине веће од $2,5 \mu m$, а мање од $10 \mu m$ (ове честице су познатије као грубе честице),
- $PM_{2.5}$ су честице величине веће од $0,1 \mu m$, а мање од $2,5 \mu m$ (ове честице носе назив *фине честице*) и
- $PM_{0.1}$ су честице мање од $0,1 \mu m$ и познате су као *ултрафине честице* [42-44].

Честице углавном имају неправилан облик тако да се и такве морају класификовати и извршити апроксимација њихове величине. Пример такве апроксимације, односно евалуације честица према њиховој величини, је приказан на слици 2.2 [45]. Тако се у односу на реалну честицу формира еквивалентна аеродинамичка сфера којом се може описати величина честица као што је приказано на слици 2.2. На основу формиране еквивалентне сфере која одговара честици се одређује пречник и самим тим се категоризује у одређену групу (грубе, фине и ултрафине) према величини. Честице неправилног облика се, као што је приказано на слици 2.2, трансформишу у

аеродинамичку еквивалентну сферу, па се применом једначине (2.1) прорачунава пречник трансформисане честице [45, 46]. Аеродинамички пречник се дефинише као пречник сфере стандардне густине (1000 kg/m^3 - густина капљице воде) која се креће истом крајњом брзином као честица која се трансформише (честица неправилног облика). Крајња брзина је највећа брзина коју тело (у овом случају честица) може достићи док пада кроз ваздух услед дејства силе (нпр. силе гравитације) или због центрифугалног кретања [45].

$$d_a = d_p \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_o \cdot X} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

где су: d_a - еквивалентни аеродинамички пречник (μm), ρ_o - стандардна густина честица (1000 kg/m^3), X - фактор динамичког облика (усваја се према табели приказаној у [46]), d_p - пречник честице неправилног облика (μm) и ρ_p - густина честице (kg/m^3).



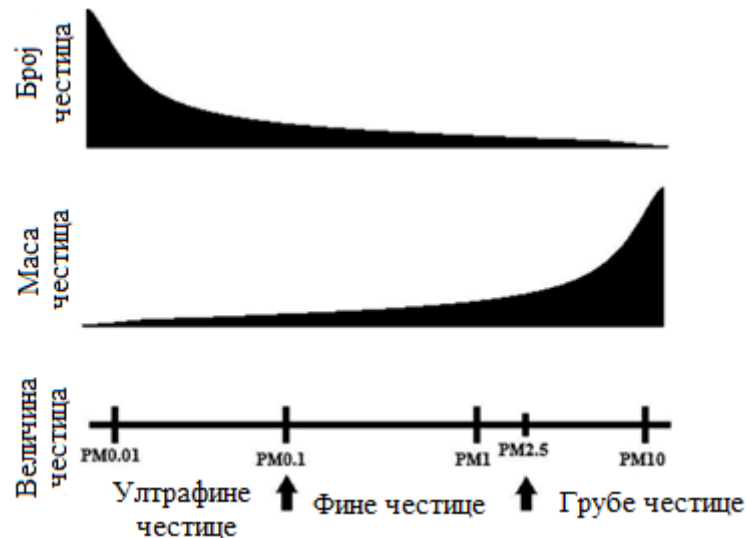
Слика 2.2 Еквивалентни пречници честица у односу на стварну величину према свом пречнику [45]

На слици 2.3 су приказане упоредне величине честица према претходно наведеним класификацијама и величинама. Разлике у површини честица и њиховој величини могу касније довести до здравствених проблема. Честице мањих димензија имају пуно мању површину у односу на грубе честице уколико се узме у обзир величина по маси једне честице. Посматрајући грубе честице и њихову масу, број потребних финих и ултрафиних честица за једну грубу честицу је вишеструк, односно у зависности од величине, потребан број честица за масу једне грубе честице мери се десетинама, односно милионима.

	10 μm (Грубе)	2,5 μm (Фине)	0,1 μm (Ултрафине)
Укупна маса	1	1	1
Број честица	1	64	100000
Површина по честици	1	0,0625	0,0001
Укупна површина по маси	1	4	100

Слика 2.3 Упоредни приказ карактеристика честица различитих величина [47]

Поред претходно приказане поделе по величини, честице се могу и графички приказати на начин који је приказан на слици 2.4. Код финих честица, односно код честица мањих пречника, потребан је већи број честица да би се повећала укупна маса честица. Код мањих честица већи број честица има мању масу од масе грубих честица и супротно. Количина честица се може исказати преко масене концентрације честица (енгл. *Particle mass (PM)*) и броја честица (енгл. *Particle number (PN)*) одређене величине.



Слика 2.4 Упоредни приказ масе и броја честица у односу на њихову величину [33, 43]

На слици 2.5 дат је приказ и извршено поређење различитих величина суспендованих честица везано за неке познате појаве у природи, али и познате загађиваче у природи који свакако утичу на квалитет ваздуха. Поменути извори и појаве у природи се могу сврстати према различитим величинама суспендованих честица које су споменуте у претходном тексту [48]. Неке материје или појаве у природи дају честице пречника који је сличан оним које настају при хабању или сагоревању у мотору. Међутим, такве честице које нису природног порекла могу бити знатно штетније у односу на честице које настају природним путем због свог састава, али је свакако добро познавати ред величине честица као што је приказано на слици 2.5.



Слика 2.5 Опсег величина честица различитих појава и загађивача у природи [48]

2.1.1.2 Састав честица

Састав честица зависи првенствено од извора од ког честице потичу, али се може разликовати по регионима у свету, у зависности од примењених материјала који се користе. У неким регионима, иако извори могу бити исти, састав се може разликовати услед примењених законских регулатива. У просеку, на европском континенту главни састојци суспендованих честица су сулфатна једињења и разна органска једињења. Ове компоненте су присутне како у PM_{10} категорији, тако и у $PM_{2.5}$ категорији. Уз ове компоненте присутна је и прашина минералног порекла, посебно у близини путева. Међутим када је загађење од саобраћаја велико и када концентрација суспендованих честица пређе вредност од $50 \mu g/m^3$, и нитратна једињења постају значајна компонента у суспендованим честицама. Коначно, у суспендоване честице се убраја и чађ која често чини 5% до 10% од укупног садржаја фино суспендованих честица ($PM_{2.5}$), мада концентрација чађи поред путева достиже и 15% до 20% од укупног садржаја фино суспендованих честица [49].

Хемијски састав честица представља једну од њихових битних карактеристика јер од хемијског састава зависи њихов негативни утицај, као и процена истог. Хемијски састав честица зависи од много фактора, пре свега од извора из којих потичу ове честице, као и од атмосферских услова. Уобичајено идентификоване компоненте у овим честицама су различити сулфати, нитрати, органски угљеник, елементарни или црни угљеник, морска со, земљани или коштани материјал и специфични елементи који могу бити веома штетни, као што је олово. Изложеност човека свакој од ових компоненти није још довољно проучена, па самим тим утицај на здравље може бити велики. Честице се разликују по свом хемијском саставу у зависности од порекла. На основу састава, честице могу садржати следеће елементе:

- соли у облику нитрата, сулфата, карбоната, хлорида, итд.,
- једињења органског угљеника (оксиди, кондензујућа органска једињења, итд.) која се називају и "органски угљеник",
- елементи у траговима, као што су тешки метали, итд.,
- црни угљеник [48].

Грубе суспендоване честице настају током рада мотора и хемијских реакција које се одигравају у атмосфери непосредно при изласку димних гасова из индустријских димњака. Фине суспендоване честице се састоје од чврсте и течне фазе које лебде у ваздуху. По хемијском саставу и оне могу бити углавном соли сулфата или нитрата, органска једињења или минерали из земљишта. Ове честице су врло покретљиве и доспевају дубље у плућа од грубих суспендованих честица. То су најчешће: аеросоли, дим, загушљива испарења, пепео, полен и др [50].

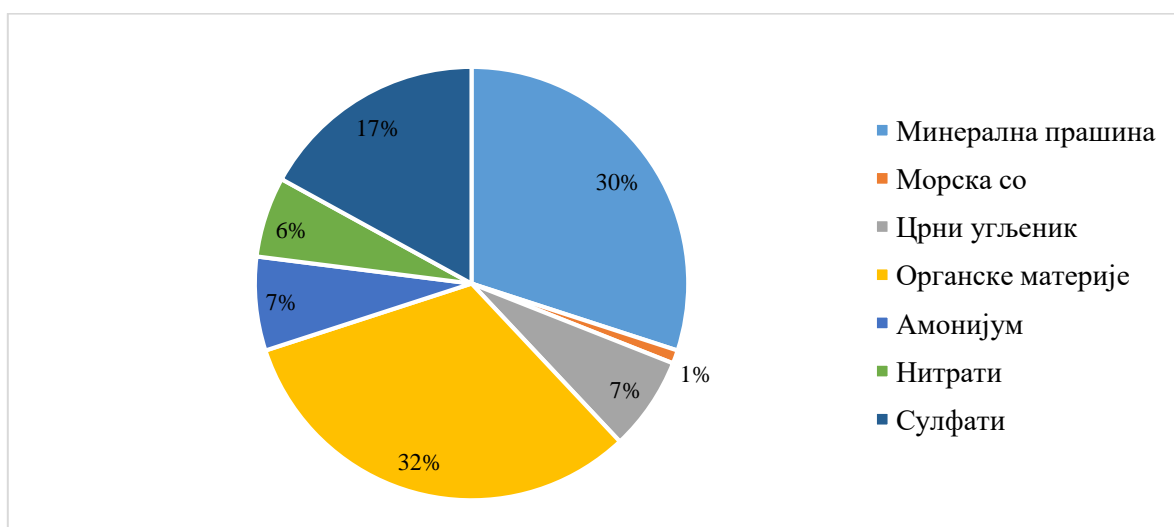
Извори настанка ових честица могу се поделити на више категорија, међутим основна подела јесте на примарне и секундарне изворе честица [31]. У примарне изворе, који се још могу назвати *директни извори*, спадају природни извори и антропогени извори. У природне изворе честица могу се уврстити вулкани, пожари, итд., док се у антропогене изворе могу сврстати извори попут возила, термоелектрана, итд. Секундарни извори честица представљају изворе код којих се подстиче настанак честица реакцијама у атмосфери. Приликом сагоревања битно је напоменути да прво настају $PM_{2.5}$, док касније настају PM_{10} честице. Међутим, свакако битан утицај приликом сагоревања и у вези са настанком ових честица имају климатски, односно атмосферски услови. Сагоревање фосилних горива, али и биогорива, представља један од највећих загађивача који спада

у ред антропогених извора [48]. Све честице се могу поделити у три категорије према начину на који могу доспети у ваздуху или се могу поново наћи у ваздуху:

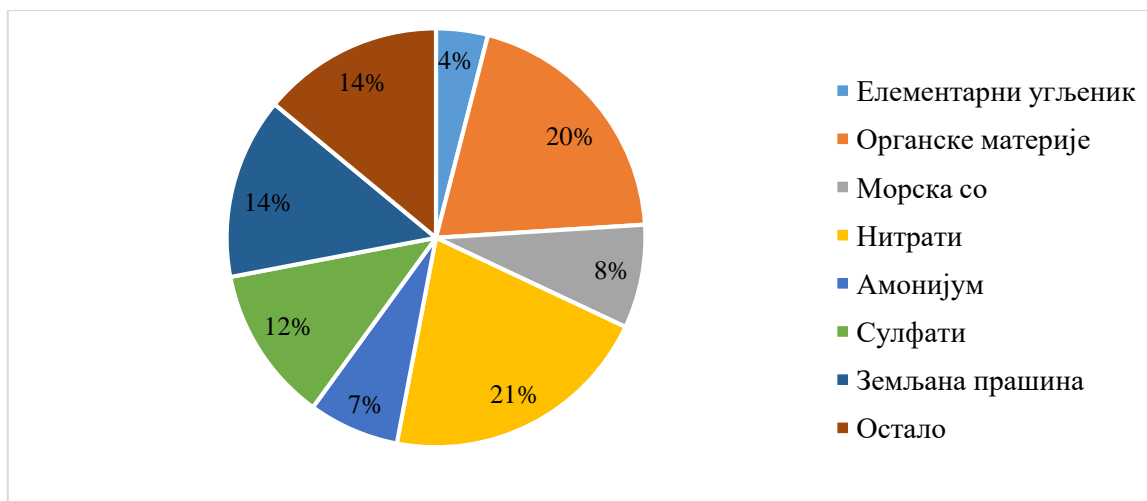
- примарне честичне материје - директно се испуштају у атмосферу од стране великог броја извора од људских активности и природних извора,
- секундарне честичне материје - формиране физичким и хемијским реакцијама других загађивача,
- поново суспендоване честичне материје - након што се депонују, честице се могу вратити у ваздух путем дејства ветра или поремећаја у друмском саобраћају у урбаним подручјима [48].

На основу извора [51] истражен је глобални састав честица $PM_{2.5}$ (слика 2.6). Утврђено је да су најдоминантније материје у честицама органског порекла које учествују са 32% у укупној маси честица $PM_{2.5}$. Следећа материја јесте минерална прашина која учествује са укупно 30%, а затим следе сулфати са уделом од 17% у укупном саставу честица. Морска со, од свих материја обухваћених овом студијом, има најмањи удео од 1%.

Састав честица PM_{10} приказан је и анализиран у студијама [52, 53], чији су резултати дати на слици 2.7. Хемијски састав честица показује висок степен варијабилности и зависи од близине извора емисије и од трансформација којима би честице могле бити подложне у атмосфери. Студија СЕМКАР PM_{10} је показала да се „просечан“ хемијски састав PM_{10} честица у Фландрији састоји од 40% секундарних неорганских јона као што су нитрати, сулфати и амонијак. Ове секундарне неорганске честице су углавном узроковане емисијама које потичу из пољопривредног, индустријског и транспортног сектора. Органска маса (диоксини, алкани, ...), која чини 20% укупне масе честица, је сложена група која се састоји од примарне и секундарне материје. Претпоставља се да процеси сагоревања, између осталог, играју важну улогу у формирању ове органске фракције. Удео земљане прашине (14%) потиче, како само име каже, од усковитлане земљане прашине. Ово се може десити, на пример, орањем њива, али може бити и улична прашина коју поново суспендује саобраћај. Углавном је то грубља фракција PM_{10} о којој се овде говори. Морска со (8%) настаје испаравањем узлетелих капљица морске воде и има састав сличан морској води. Елементарни угљеник (4%) је мера за чађ ослобођену сагоревањем фосилних горива и биомасе. Претпоставља се да је најважнији извор ове компоненте (на бази дизела) друмски саобраћај. Постоји више индиција да је ова фракција честица једна од најштетнијих за људско здравље.



Слика 2.6 Глобални хемијски састав честица $PM_{2.5}$ [51]



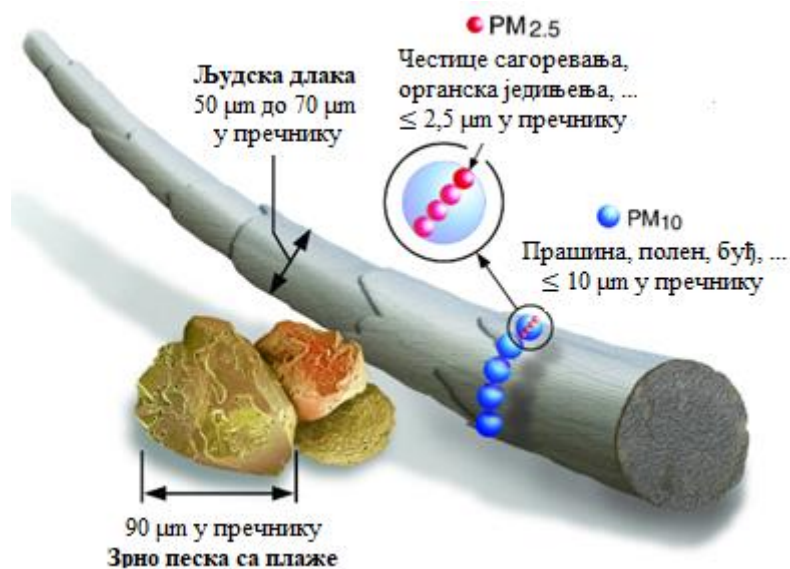
Слика 2.7 Хемијски састав честица PM_{10} [52, 53]

2.1.2 Утицај честица на здравље људи и животну средину

Честице могу бити састављене од разних компоненти, укључујући нитрате, сулфате, органске хемикалије, метале, честице земље или прашине и алергене (као што су фрагменти или споре). Загађење честицама углавном долази из моторних возила, домаћинства и индустрије. Приликом пожара или пешчаних олуја, загађење честицама може достићи екстремно високе концентрације.

На основу података [54], честице представљају један од главних узрочника загађења животне средине са којима се данас сусреће екологија. Према [55], загађење ваздуха је 2017. године класификовано у један од пет главних ризика за смрт људи и повезано је са смрћу приближно око 5 милиона људи у свету, а главни је узрок нарушавања здравља око 137 милина људи. Према Светској здравственој организацији (енгл. *World Health Organization - WHO*), честице представљају један од најштетнијих загађивача по човеково здравље [56] и утврђено је да 9 од 10 људи удише загађен ваздух и да су све чешће болести респираторних органа [57]. Према извору [58], загађење ваздуха честицама у источној Европи представља велики проблем и узрок је смрти једне од пет особа. Корелација која повезује загађење ваздуха и утицај на здравље посебно је јака када су у питању честице [59]. У прилог претходној тврдњи говори и извештај Европске агенције за животну средину из 2019. године, у коме је закључено да земље Источне Европе имају највеће загађење честицама PM_{10} и $PM_{2.5}$ [60]. Светска здравствена организација процењује да је у 2012. години загађење ваздуха узрочник преране смрти око седам милиона људи, а удео смрти услед загађења ваздуха на отвореном укључује: болести срца са 40%, мождани удар са 40%, хроничне опструктивне плућне болести са 11%, карцином плућа са 6% и акутне респираторне инфекције доњих дисајних путева код деце са 3% [61]. Међународна агенција за истраживање рака (енгл. *International Agency for Research on Cancer - IARC*) класификовала је честице у прву категорију узрочника за настанак карцинома [62].

Чињеница је да честице веома малих пречника лако могу доспети у организам човека удисањем или неким другим путем. На слици 2.8. је дат приказ величине различитих честица у поређењу са људском длаком. Људска длака у пречнику има 50 μm до 70 μm , а PM_{10} је мања од 10 μm , односно посматрана у односу на људску длаку је 5 до 7 пута мања. $PM_{2.5}$ је мања од 2,5 μm , што је у односу на PM_{10} , 4 пута мање, а у поређењу са људском длаком је 20 до 28 пута мање [49, 63, 64].

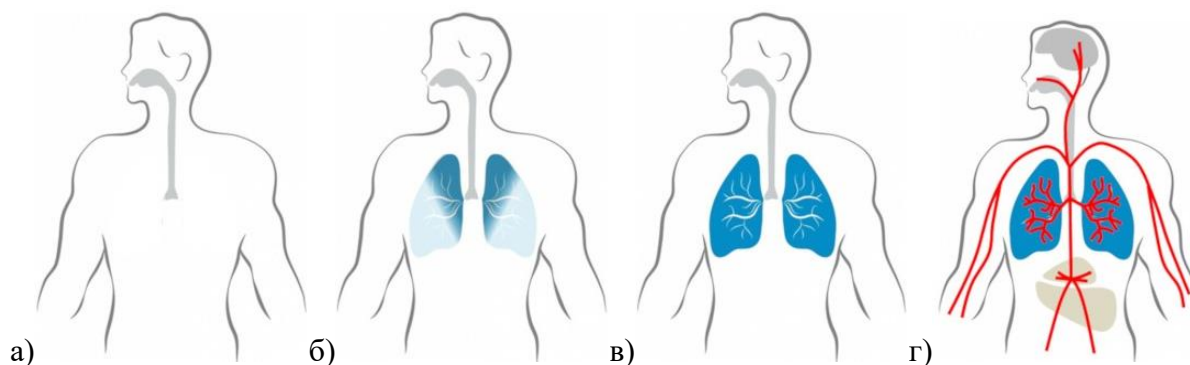


Слика 2.8 Поређење величине различитих суспендованих честица са људском длаком и зрном песка са плаже [63]

Величина честица је директно повезана са њиховим потенцијалом за изазивање здравствених проблема. Бројне научне студије показале су везу између излагања загађењу честицама са различитим здравственим проблемима:

- прерана смрт код особа са срчаним или плућним болестима,
- нефатални срчани удари,
- неправилан рад срца,
- погоршана астма,
- смањена функција плућа,
- појачани респираторни симптоми, као што су: иритација дисајних путева, кашаљ или отежано дисање [64].

На слици 2.9, а према [65,66], је приказана дубина продирања честица у људски организам у зависности од њиховог пречника. Грубе честице доспевају само у горње дисајне путеве, а са смањењем њихове величине, честице дубље продиру у организам. Ультрафине честице, које имају најмањи пречник, могу dospети у крвоток човека, па тако могу стићи и до различитих органа, нпр. продрети дубоко у плућа.

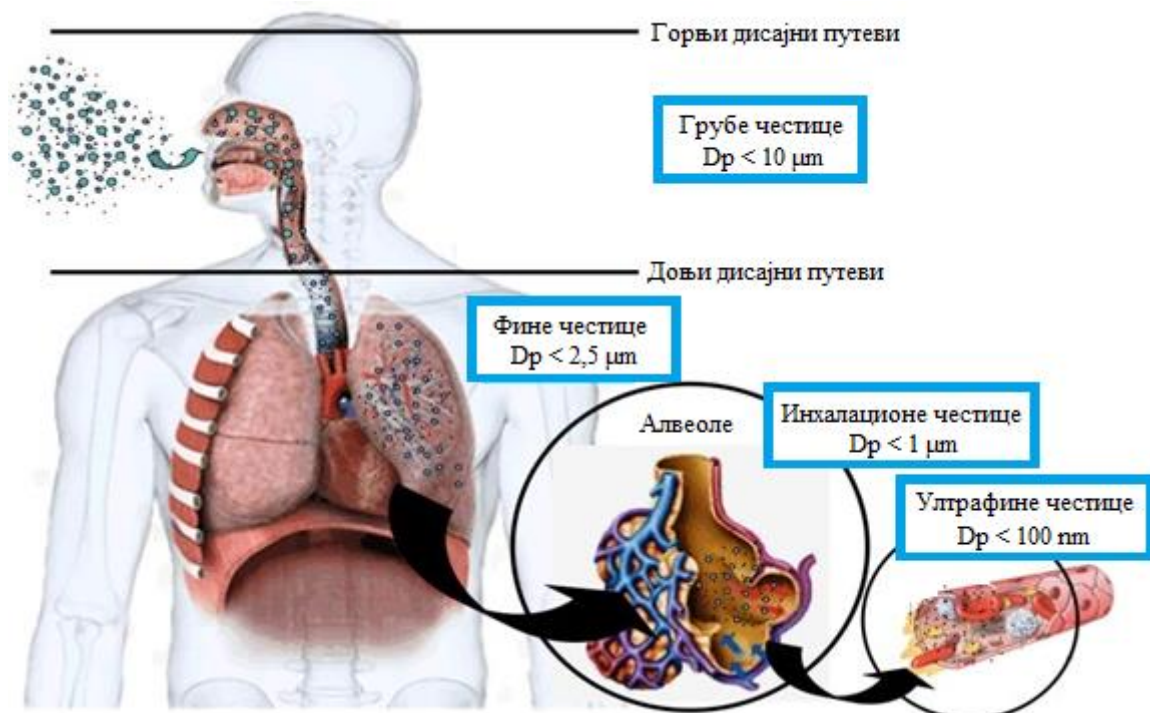


Слика 2.9 Дубина продирања честица у зависности од величине: а) PM_{10} , б) $PM_{2.5}$, в) PM_1 , г) $PM_{0.1}$ [65]

Све честице које су мање од $10 \mu m$ се сматрају опасним по човека, односно по дисајне органе. Тако, мале честице имају тенденцију да се депонују у алвеолама, слика 2.9 и

слика 2.10 . Када се удахну, те честица ће остати у респираторном тракту и дубина до које ће продриети пре него се депонују зависи од њихове величине, као најзначајнијег фактора који одређује опасност од удисања честица. Уколико доспеју до плућа, честице успоравају размену кисеоника и угљендиоксида, скраћујући дах. То доводи до већег напрезања срца, које је у условима повећаног напора како би компензовало смањени унос кисеоника. Обично, људи који су најосетљивији на овакве отежане услове, оболевају од респираторних болести као што су: емфизем, бронхитис, астма и срчани проблеми. Честице као и материје у виду течности и гасова које се уносе заједно са честицама на којима се апсорбују, ако се удахну, а отровне су, могу допринети и оштећењу органа као, на пример, бубрега и јетре. Слика 2.10 приказује и неке од органа у телу човека до којих најчешће ове честице могу доспети [67]. Око 99% честица у ваздуху које се удахну, елиминишу се из организма моментално током издаха, јер се углавном задрже у горњим деловима респираторног тракта. Преосталих 1% честица се задржава у организму, долазе до душника и даље све до плућа.

Поред тога што нарушавају здравље, PM_{10} честице умањују и видљивост током дана, јер стварају ефекте који су карактеристични за измаглицу, која се често препознаје као смог. Честице PM_{10} су међу најопаснијим загађивачима ваздуха, јер приликом удисања нападају респираторни систем човека, утичу на његов имунитет и депонују се у најдубљим деловима плућа. Здравствени проблеми отпочињу када организам почне да се брани од ових страних тела (честица). Иако PM_{10} нападају целокупну људску популацију, осетљиве категорије, као што су деца, труднице, стари и болесни, су посебно угрожене [49].



Слика 2.10 Суспендоване честице и њихов начин доспећа до различитих органа [67]

Студије спроведене у Сједињеним Америчким Државама (САД) су показале да, код дуготрајне изложености финим честицама, пораст концентрације $PM_{2.5}$ за $10 \mu g/m^3$ доводи до повећања ризика свих врста здравствених проблема за 6%, кардиопулмолошких за 9% и од појаве карцинома плућа за 14% [49]. Научници у Канади и САД открили су да дуготрајна изложеност $PM_{2.5}$ значајно повећава не само шансе за

појаву кардиопулмолошких проблема, већ и смртност од карцинома плућа. Студија проведена током седам година (од 2000. до 2007. године) у САД показала је да је просечан животни век продужен за 0,35 година на сваких $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ смањења $\text{PM}_{2.5}$ [68].

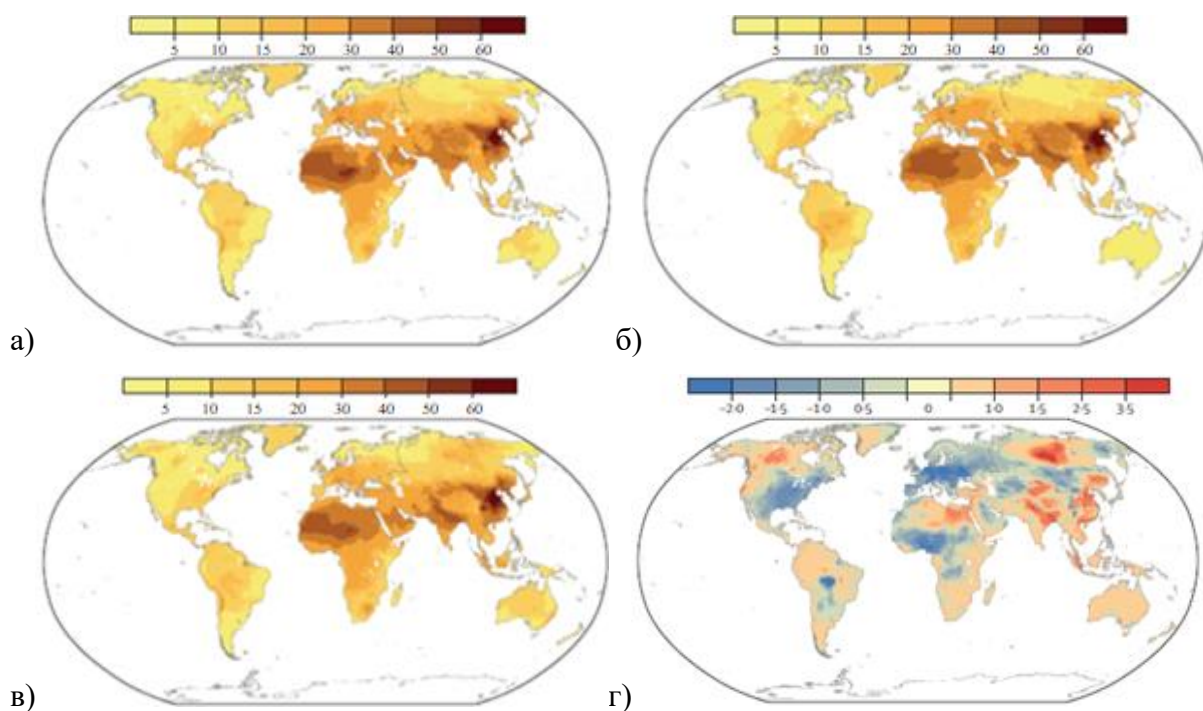
Врло битан утицај на људско здравље имају честице чији је пречник $\leq 2,5 \mu\text{m}$. Последице великог уношења ових честица у плућа обично завршавају хоспитализацијом, а у екстремним случајевима и смрћу. Људи са астмом, срчаним проблемима или плућним болестима први су на удару. Ове честице могу да изазову негативне ефекте на здравље и при краткотрајним излагањима, на пример, само један дан, а посебно при дугим излагањима, годину и више дана [69]. Ултрафине честице изазивају васкуларну и системску упалу, оштећење митохондрија и рану атеросклерозу. Фине честице могу изазвати алвеоларну упалу и згрушавање крви. Према извору [70], честице имају велики утицај на кардиоваскуларни систем, јер могу да доведу до повећања вискозности крвне плазме која утиче на кардиоваскуларни систем. Често излагање високој концентрацији $\text{PM}_{2.5}$ је директно повезано са појавом инфаркта миокарда.

Ултрафине честице, односно честица $\text{PM}_{0.1}$, могу имати висок степен негативног утицаја на здравље људи [71]. Као што је напоменуто, што су честице мањег пречника, оне су штетније по здравље човека [43]. Тако, честице $\text{PM}_{0.1}$ могу продрети до крвотока и лоше деловати на кардиоваскуларни, респираторни, нервни и цереброваскуларни систем. Према [71], негативан утицај се огледа у томе што ове честице доводе до различитих поремећаја. Када честице садрже метале, оне могу изазвати кашаљ, па чак и упалу плућа. Ако честице $\text{PM}_{0.1}$ доспеју у крвоток, могу довести до промене коагулације, што може изазвати кардиоваскуларне тегобе и хипертензију. Могу утицати на нервни систем и довести до церебралне и аутономне дисфункције. Честице $\text{PM}_{0.1}$ се могу повезати и са настанком дијабетеса и карцинома.

2.1.3 Извори честица

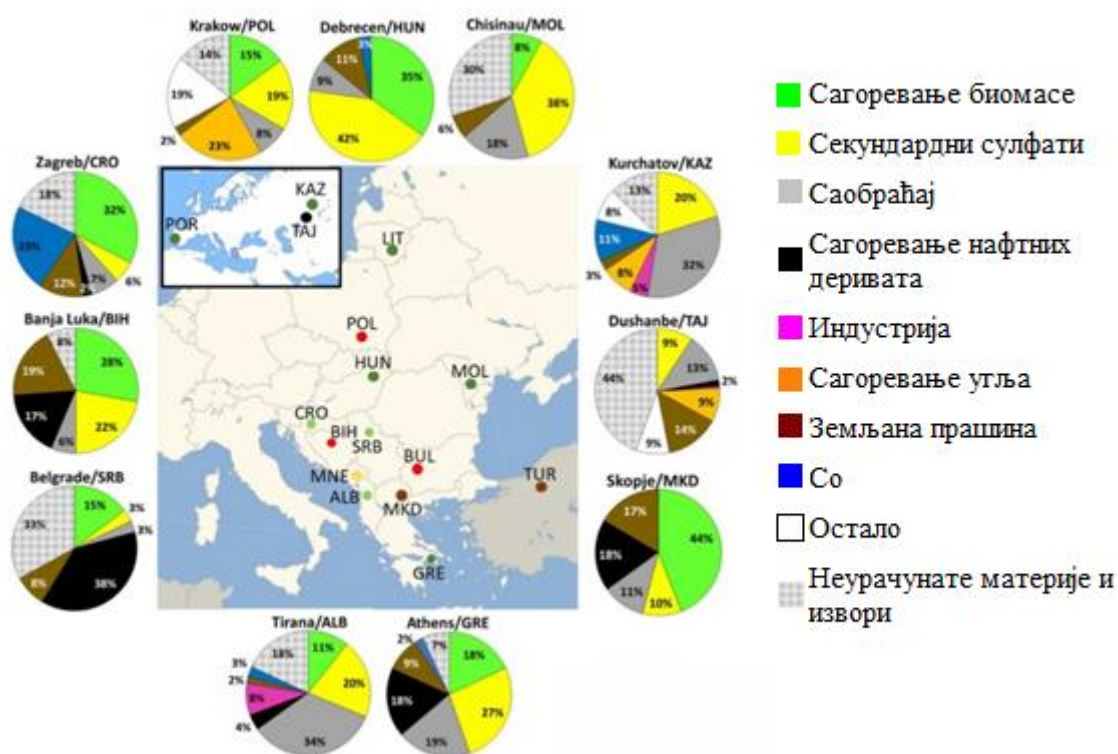
Сви извори честица се могу поделити у две категорије и то на: стационарне и нестационарне изворе. Стационарни извори су они који су увек на истом месту и загађују једну зону или регију, а са друге стране, нестационарни извори су извори који се крећу и мењају територију коју загађују. С друге стране, извори се могу поделити и на оне који емитују честице сагоревањем и оне које емитују честице без сагоревања, нпр. трењем и хабањем. У категорију нестационарних извора сврставају се и возила, односно саобраћај. Стационарни извори који емитују суспендоване честице сагоревањем су: домаћинства, индустрија, сагоревање отпада, депоније, постројења за сагоревање фосилних горива, итд.

На основу [72], могуће је анализирати глобалне промене средње годишње концентрације честица $\text{PM}_{2.5}$ у одређеном временском периоду. На слици 2.11 су дате глобалне мапе средње годишње концентрације честица $\text{PM}_{2.5}$ за 2000., 2010. и 2019. годину. На основу ових мапа могуће је увидети промене које су се дешавале у дужем временском периоду. Такође је на слици 2.11 приказана промена концентрације честица $\text{PM}_{2.5}$ за деценију 2000–2019. Према оваквом приказу може се закључити да је у неким регионима света дошло до пада средње годишње концентрације честица, док је у неким дошло до пораста концентрације честица. До пада концентрације честица у неким регионима света је дошло услед примене савремених технологија, као и доношења строжих законских прописа које су довеле до таквог смањења.



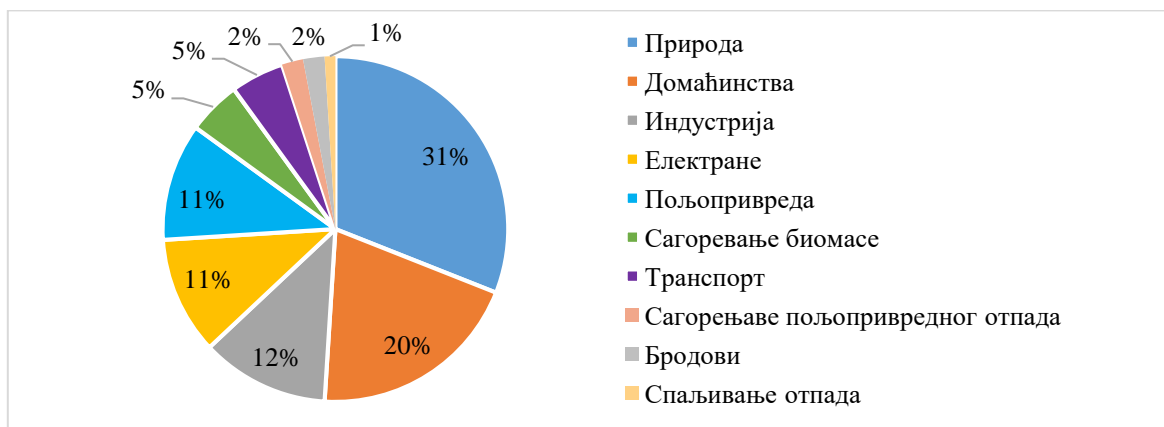
Слика 2.11 Глобална промена концентрације честица $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$): а) Мапа средње годишње концентрације $PM_{2.5}$ у 2000. год., б) Мапа средње годишње концентрације $PM_{2.5}$ у 2010. год., в) Мапа средње годишње концентрације $PM_{2.5}$ у 2019. год., г) Промена средње годишње концентрације $PM_{2.5}$ за деценију 2010-2019 [72]

У истраживању [73] је извршена анализа извора честица у градовима са већим бројем становника у 11 земаља Европе и Азије. Извори честица и њихова доминација разликују се између градова и држава. Добијени резултати истраживања су приказани на слици 2.12.



Слика 2.12 Извори честица $PM_{2.5}$ у једанаест градова Европе и Азије [73]

Посматрајући глобални удео различитих извора честица у укупној емисији, према извору [74] може се закључити да неки извори честица $PM_{2.5}$ имају сличан удео, слика 2.13. Транспорт тј. саобраћај учествује са 5%, што је мање у поређењу са електранама (производња енергије), домаћинствима, индустријом, итд.



Слика 2.13 Глобално учешће извора у емисији честица $PM_{2.5}$ [74]

2.2 Честице чији је извор возило

Емисија честица из друмског транспорта настаје на више различитих начина: као директна емисија из издувних гасова возила, хабањем пнеуматика и кочница и поновним подизањем честица са пута [75]. У урбаним подручјима, сматра се да је емисија из друмског транспорта главни извор честица PM_{10} . Уопштено говорећи, возила са дизел моторима испуштају већу масу честица по возилу него возила са бензинским моторима. На основу [76], моторна возила могу емитовати честице на два начина и то:

- сагоревањем у мотору што је познато под називом емисија издувних гасова и
- хабањем различитих елемената на возилу који су у међусобном контакту, па се таква емисија може назвати емисијом честица која не настаје сагоревањем у мотору.

На слици 2.14 су приказани загађивачи животне средине на возилу који ослобађају различите материје, укључујући честице. Ако се посматрају само честице (на слици ознака PM), извори честица су: мотор, односно издувни систем, процес хабања пнеуматика, кочница, односно фрикционих парова кочница, спојница, процес хабања пута, као и поновно подизање честица прашине (честица) са пута. Настале честице се разликују у погледу извора настанка и величине честица. На основу овога, у даљем раду је анализирано процентуално учешће сваког извора у укупној емисији честица.

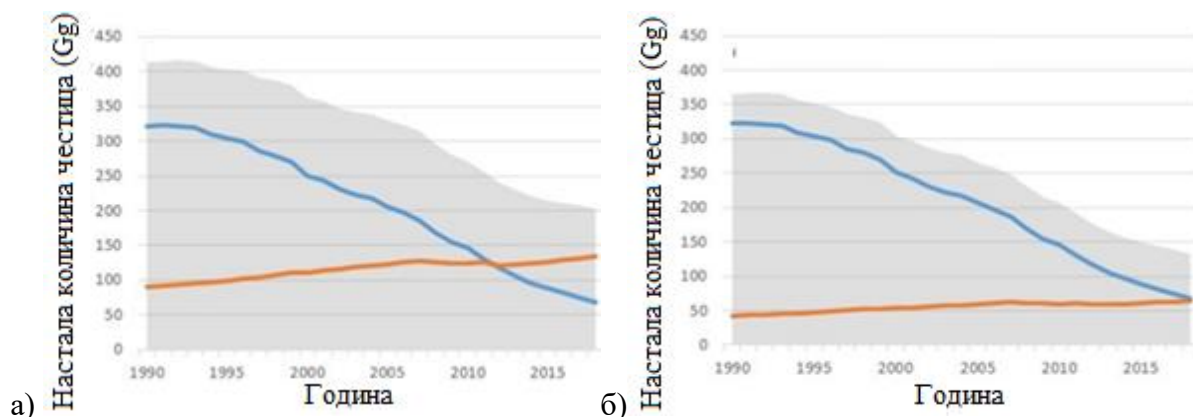


Слика 2.14 Извори честица на возилу [77]

Уколико се посматрају само извори који емитују честице хабањем, тј. они где честице не настају сагоревањем у мотору, може се извршити подела према извору настанка [6]:

- директна емисија
 - хабањем кочница - честице настају међусобним хабањем фриксионих парова кочница, при чему се око половине честица директно емитује у ваздух,
 - хабањем пута - честице настају хабањем површине пута, при чему се честице директно емитују у ваздух,
 - хабањем пнеуматика - честице настају хабањем пнеуматика, при чему се честице директно емитују у ваздух,
- поновно подизање прашине са пута - честице на (асфалтираним) површинама пута које се поновно подижу у ваздух због кретања возила и струјања ваздуха при кретању. Поновно подигнута прашина са пута се може састојати од честица кочница, пнеуматика и пута које су се таложиле на путу, као и честица које су мигрирале на пут из других извора.

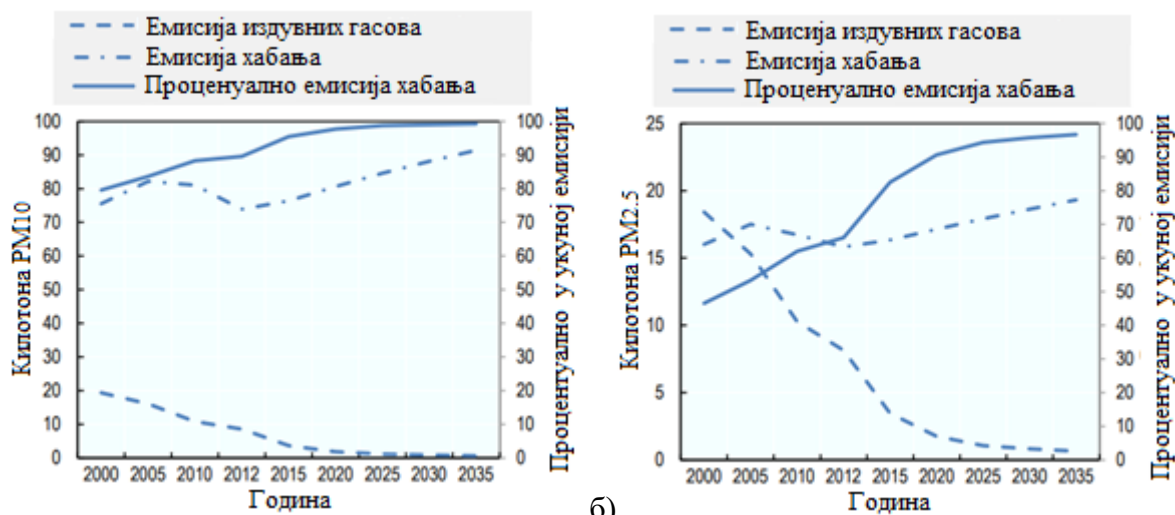
Према [78] постоји тренд пораста количине честица које емитују извори честица које не настају сагоревањем у мотору у периоду од 1990. године до 2018. године. Емисија честица које не настају сагоревањем у мотору знатно се повећала, па чак и прелази у доминантнији извор честица у односу на емисију честица које настају сагоревањем горива, што је приказано на слици 2.15.



Слика 2.15 Количина укупно створене емисије честица у периоду од 1990. године до 2018. године: а) PM_{10} , б) $PM_{2.5}$, сиво-укупна емисија честица, плаво-емисија издувних гасова, наранџасто-емисија честица које не настају сагоревањем [78]

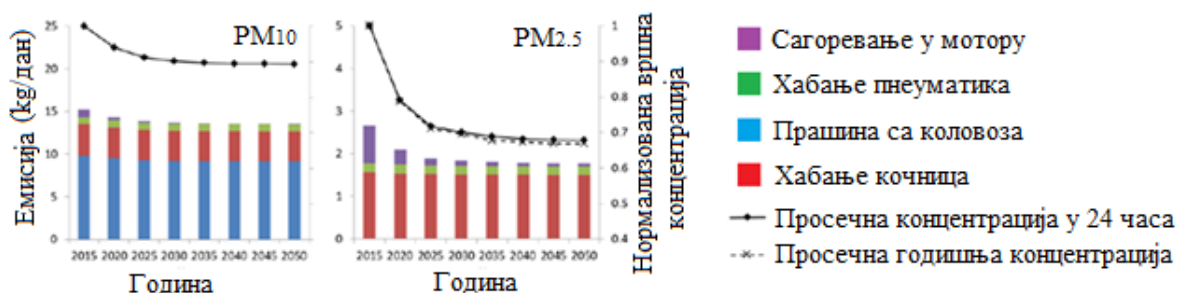
Уколико се посматрају подаци везани за емисију честица PM_{10} за период 1990. до 2015. године може се закључити да је још пре скоро једне деценије, емисија честица које настају хабањем постала доминантнија у односу на емисију честица чији је извор сагоревање у МСУС, односно емисију издувних гасова. На основу података за земље EU 15+¹, где су укључене још и Швајцарска и Норвешка, уочено је да ће доћи до тога да емисија хабања постаје већа од емисије сагоревања у МСУС [79]. Данас са напретком технологије, емисија хабања постаје све доминантнија, о чему говоре и подаци који су приказани на слици 2.16. Подаци предвиђања трендова показују да ће водећи извори честица PM_{10} (слика 2.16а) и $PM_{2.5}$ (слика 2.16б) на возилу бити они извори који емитују честице хабањем [6].

¹ EU15 чине следећих 15 земаља: Аустрија, Белгија, Данска, Финска, Француска, Немачка, Грчка, Ирска, Италија, Луксембург, Холандија, Португал, Шпанија, Шведска, Велика Британија.



а) б) *Слика 2.16 Емисија честица у зависности од начина настанка на возилу: а) приказ за честице PM₁₀, б) приказ за честице PM_{2.5} [6]*

Проблем загађења, како сада, тако и у будућности, је анализиран од стране Калифорнијске агенције за заштиту животне средине и на основу модела је извршена анализа стварања честица од различитих извора на возилу. Подаци се заснивају на моделу за праћење стопе емисије загађења од стране возила у Калифорнији на основу базе *EMFAC* (енгл. *The EMISSION FACTOR*) и на основу података *CARB*-а (енгл. *California Air Resources Board*). Разлог коришћења две базе података је тај што *EMFAC* не укључује податке о прадини са пута. Резултати су приказани на слици 2.17. Према овој студији, концентрација честица опада са годинама. Са друге стране, уколико се посматрају честице као извор загађења, концентрација честица које настају од кочница зависи од величине честица. Тако, главни извор честица PM₁₀ нису кочнице, већ прашина и честице које се налазе на коловозу и које се поново подижу у ваздух, док главни извор честица PM_{2.5} су кочнице и њихово хабање.



Слика 2.17 Концентрација честица од различитих извора на возилу [80]

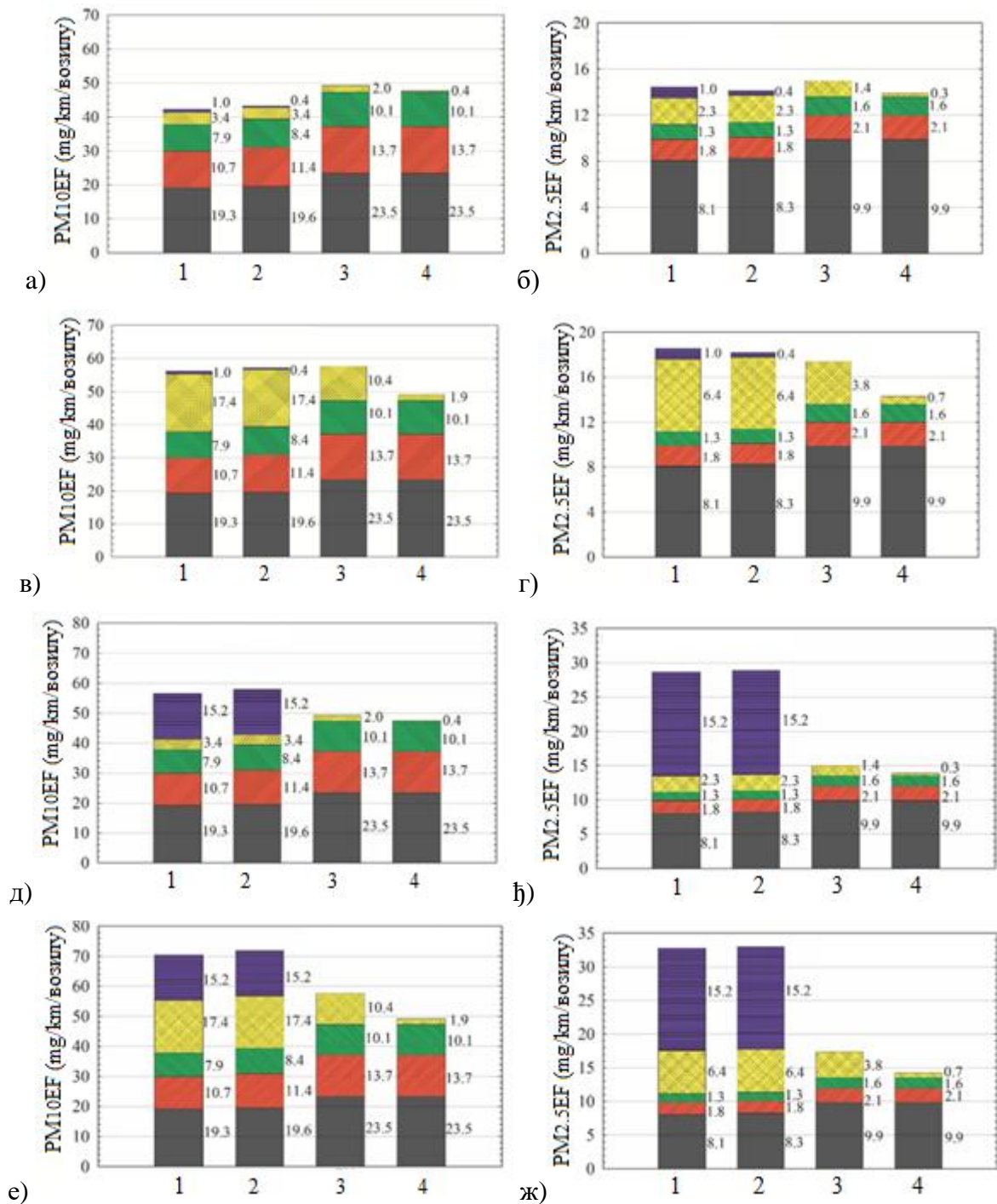
Систем за регенеративно кочење може свакако бити један користан систем на возилу, јер се помоћу регенеративног кочења пуне батерије возила, али се очекује и смањење емисије честица. У претходним анализама се није узимало у обзир регенеративно кочење, а овакав начин кочења је веома битан, јер се у наредним годинама предвиђа све већа примена ове технологије и возила која ову технологију користе. Калифорнијска комисија за енергију (енгл. *California Energy Commission - CEC*) предвиђа да ће до 2050. године до 17% камиона у укупном возном парку и до 30% лаких доставних возила бити са електричним или хибридним погоном. Када је реч о хибридним и електричним возилима, према извору [81], у поређењу са возилима са МСУС, закључено је да таква возила немају емисију честица насталу сагоревањем, али, генерално, због своје масе

стварају занемарљиво малу емисију честица у односу на возила са МСУС. Одговарајући подаци су приказани у табели 2.1. Регенеративно кочење доводи до смањења емисије честица при кочењу и веома је ефикасно при малим брзинама кретања, када није потребно активирање фрикционих кочница на возилу. При кретању ван урбане средине, нпр. на аутопуту, где се возила крећу већим брзинама и потребне су веће силе кочења, долази до активирања фрикционих кочница да би се остварила потребна сила кочења, смањила брзина кретања или зауставило возило. У тим случајевима возила такође емитују честице услед хабања кочница, иако поседују систем регенеративног кочења, као и возила без овог система.

Табела 2.1 Упоредна анализа емисионих фактора за честице чији су извори електрична и возила са МСУС [81]

Честице PM ₁₀						
	Сагоревање у мотору (mg/vkm)	Хабање пнеуматика (mg/vkm)	Хабање кочница (mg/vkm)	Хабање пута (mg/vkm)	Поновно подизање постојећих честица (mg/vkm)	Укупно (mg/vkm)
Електрична возила	0	7,2	0	8,9	49,6	65,7
Возила са ото мотором	3,1	6,1	9,3	7,5	40	66,0
Возила са дизел мотором	2,4	6,1	9,3	7,5	40	65,3
Честице PM _{2.5}						
Електрична возила	0	3,7	0	3,8	14,9	22,4
Возила са ото мотором	3,0	2,9	2,2	3,1	12,0	23,2
Возила са дизел мотором	2,4	2,9	2,2	3,1	12,0	22,6

Међутим, студије [82, 83] показале су да код возила са електромотором и МСУС нема велике разлике у емисији суспендованих честица PM₁₀ и PM_{2.5}. Напоменуто је да секундарне честице настају после одређеног времена када се ослободе у атмосферу услед хемијских реакција. Студија [82] је упоредила резултате извора честица које настају хабањем и сагоревањем у мотору на возилима са МСУС као и на електричним возилима (ЕВ) са различитим процентом активације система регенеративног кочења. Резултати емисионих фактора (ЕФ) на основу којих се може упоредити и емисија честица које настају је приказана на слици 2.18. Према овим изворима, са повећањем масе возила повећава се и концентрација честица PM₁₀ која настаје из различитих извора, према пређеном километру једног возила. На возилима је примењено два типа кочних плочица, Са применом нових технологија на возилу примарна емисија честица које настају сагоревањем у мотору је смањена па доминантнији су извори честица које настају хабањем кочница, код возила са МСУС. Док су код ЕВ вредности емисије већи у случају извора који емитују честице хабањем, чак су те вредности веће него код возила са МСУС (дизел и бензински МСУС) Када се упореде примарне настале честице и секундарне честице сагоревањем у МСУС онда је уочљиво да је емисија и ЕФ значајне већи него у случају само примарних насталих честица али је секундарна емисија значајно већа у односу на изворе честица које настају хабањем.



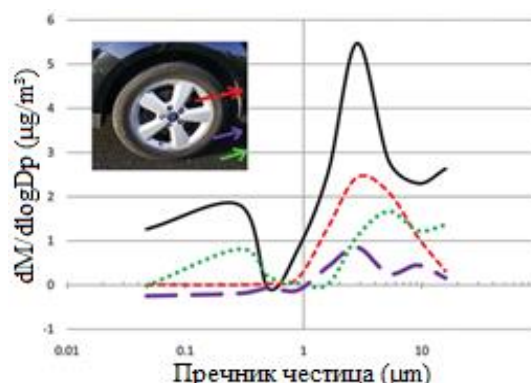
Слика 2.18 Упоредна анализа емисионих фактора честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у зависности од врсте погона возила: 1) возило са бензинским мотором, 2) возило са дизел мотором, 3) електрично возило са 50% интензитета регенеративног кочења, 3) електрично возило са 90% интензитета регенеративног кочења, сиво) поновно подизање честица са пута, црвено) хабање пута, жуто) хабање кочница, зелено) хабање пнеуматика, љубичасто) емисија сагоревања у мотору, а и б) органске кочне плочице, само примарна емисија сагоревања, в и г) полуметалне кочне плочице, само примарна емисија сагоревања, д и ђ) органске кочне плочице, примарна и секундарна емисија сагоревања, е и ж) полуметалне кочне плочице, примарна и секундарна емисија сагоревања [82]

2.3 Систем за кочење као извор честица

Хабање фрикционих парова кочница је узрок настанка честица које се ослобађају. Данас се реализује велики број истраживања која се везују за емисију кочница. У прилог томе говори и чињеница да се планира да нови Euro 7 стандард буде први европски емисиони стандард који би прописао ограничења везана за емисију кочница [84]. На основу претходно наведеног, закључује се да би то био први стандард који би регулисао насталу емисију, а не као досадашњи прописи који се углавном односе на забрану или ограничења примене одређених материјала у кочним плочицама.

Према [81], емисија честица које настају у саобраћају, а које су продукт хабања различитих елемената на возилу у укупној емисији честица PM_{10} учествује са преко 90%, док у укупној емисији честица $PM_{2.5}$ учествује са преко 85%. На основу [85], хабање кочница учествује од 16% до 55% у генерисању укупне масе честица PM_{10} у саобраћају, а које не настају сагоревањем у мотору. Са друге стране, када је у питању емисија честица $PM_{2.5}$ које не настају сагоревањем у мотору, а чији је извор саобраћај, хабање кочница учествује од 39% до 63% у укупној емисији. На ауто-путу се масена емисија честица смањује за приближно 3%, због смањеног броја кочења који се остварује на овој категорији пута [86]. У зависности од величине честица које настају хабањем кочница, 86% (PM_{10}) и 63% ($PM_{2.5}$) се директно ослобађа у атмосферу (истраживање рађено на динамометру) [87]. Према [88], 50% створених честица се директно ослобађа у атмосферу, док од свих ослобођених честица, 80% честица су PM_{10} .

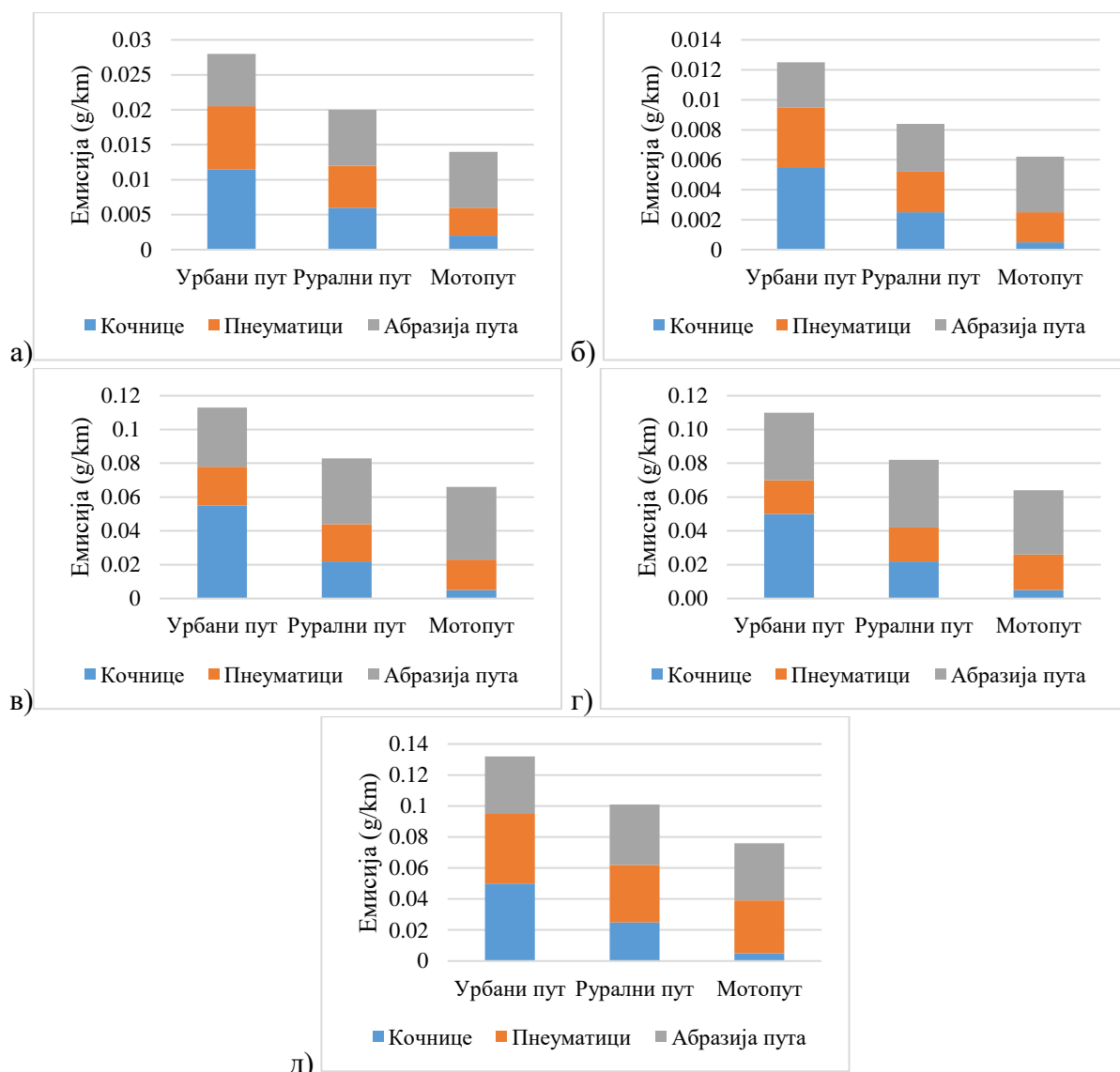
У истраживању [86] је приказано да кочнице спадају у један од главних извора честица, када је у питању саобраћај у урбаним срединама за све категорије возила. Честице које настају хабањем кочница су пречника у опсегу од 2 μm до 6 μm . Диск кочнице су данас доминанти тип кочница када је у питању примена на возилима. Диск кочнице имају отворену конструкцију, па се честице могу лакше ослободити у односу на добош кочнице. У истраживању које је спроведено у Лондону [89] процењено је да, у укупној емисији честица, извори који не емитују честице сагоревањем имају процентуално учешће такво да поновно подигнута прашина учествује са $38,1\% \pm 9,7\%$, емисија кочница са $55,3\% \pm 7,0\%$ и емисија пнеуматика са $10,7\% \pm 2,3\%$. На слици 2.19 је приказана расподела масене концентрације честица према њиховој величини ($dm/d\log(D_p)$). Систем за кочење генерише највећу концентрацију честица величине од 1 μm до 10 μm .



Слика 2.19 Расподела масене концентрације честица према њиховој величини: зелено - емисија хабања пута, црвено - емисија хабања кочница, љубичасто - емисија хабања пнеуматика, црно - укупна емисија честица [89]

Утицај сваког извора честица се може посматрати према категорији пута на којој се возило креће и категорији возила. На основу извора [90] извршен је приказ учешћа три

извора честица које се емитују хабањем: пнеуматика, кочница и хабања пута. Када је у питању хабање кочница, оне највише честица емитују приликом кретања возила у убраним срединама где се кочнице највише и користе, а самим тим и хабају. У условима где се остварује мањи број кочења, мања је емисија насталих честица, па је, самим тим, најмања емисија на ауто-путевима. Ако се на све то дода и анализа категорија возила, добија се исти закључак, с тим да је емисија честица израженија са порастом масе возила, односно са порастом категорије возила. Код већих категорија возила, већа је и емисија честица које настају хабањем кочница при кретању на градским саобраћајницама, али са смањењем категорије возила, смањује се емисија честица у тим подручјима. Резултати су приказани на слици 2.20. Уколико се посматрају и остала два извора честица, долази се до закључка да, када је у питању категорија возила, при промени категорије пута, долази до највећих промена код кочница као извора честица. Кочење возила може утицати на хабање пнеуматика и пута тако да може доћи и до повећања концентрације честица које настају поменутиим начинима. Промена категорије возила има већи утицај на насталу концентрацију честица у односу на категорију пута, барем када су у питању пнеуматици и хабање пута.



Слика 2.20 Емисија честица у зависности од извора и категорије пута: а) путничка возила и лака теретна возила, б) мотоцикли, в) аутобуси, г) тешка теретна возила, д) тешка теретна возила (тегљачи и прикључна возила) [90]

Студија из 2013. године која је реализована у Институту „Пол Шерер“ (*Paul Scherrer*) открила је да повећање масе возила од 280 kg резултира повећањем фактора емисије честица PM_{10} за 1,1 mg/vkm код емисије пнеуматика; 1,1 mg/vkm за емисију кочница и 1,4 mg/vkm за емисију хабања пута. За честице $PM_{2.5}$, вредности за емисију пнеуматика, кочница и пута су 0,8 mg/vkm, 0,5 mg/vkm и 0,7 mg/vkm [82]. У истраживању [6] дошло се до закључка да електрична возила имају већу масу у односу на возила са класичним МСУС и да повећање масе може имати утицај на емисију честица које не настају сагоревањем [91]. Међутим, систем регенеративног кочења данас има само одређени проценат ефикасности, па, да би се достигла максимална сила кочења, морају се активирати фрикционе кочнице и на тај начин ипак долази до стварања честица које настају хабањем фрикционих парова. Истраживањем [92] дошло се до закључка да се остваривањем 68% регенеративног кочења може значајно смањити емисија честица које настају приликом кочења. Према истраживању [93], применом регенеративног кочења може се смањити емисија финих и ултрафиних честица за 89,9%.

2.4 Механизам хабања фрикционих парова кочница

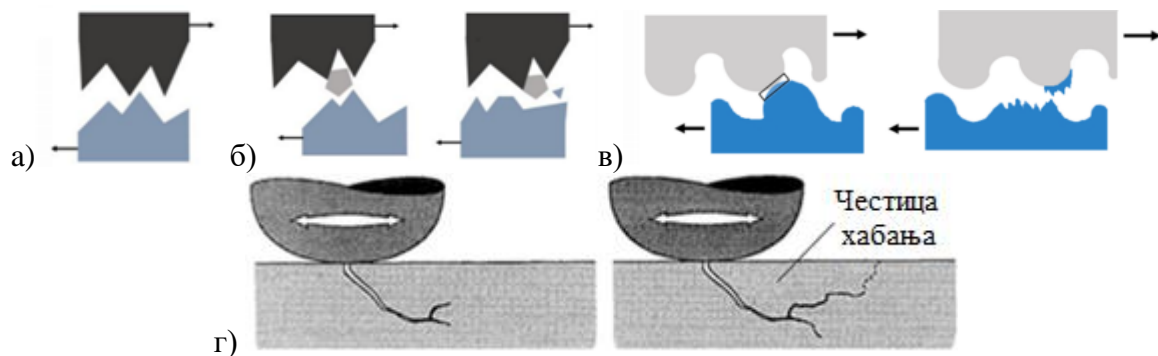
Процес хабања фрикционих плочица, али уједно и диска кочнице, је најлакше објаснити праћењем слике 2.21 на којој је представљен упрошћен кочни механизам, односно процес кочења и контакт диска и фрикционе плочице. Може се приметити да честице настају како хабањем диска, тако и хабањем фрикционих плочица када је возило у процесу кочења. Микроскопским испитивањима видљиво је да површина материјала елемената у контакту груба и увек постоје делови који се међусобно „ломе“, па на тај начин настају честице као продукти хабања, односно трења између два елемента. Веома је важно истраживање и разумевање процеса хабања фрикционих парова, јер је хабање узрок настанка честица и ослобађања у ваздух.



Слика 2.21 Процес кочења и хабања кочница [94]

Хабање фрикционих парова кочница се може дефинисати као губитак фрикционог материјала, односно фрикционе површине кочних елемената који су у међусобном контакту приликом кочења [95]. Последица хабања, поред губитка материјала, је и појава честица јер се похабани фрикциони материјал ослобађа у облику честица. Може се идентификовати да постоји низ различитих начина настанка хабања између два материјала тј. тела, али код кочница и хабања фрикционих материјала приликом кочења доминантни начини хабања су: абразивно хабање, адхезионо хабање и хабање услед замора [96]. Абразивно хабање је врста хабања при коме долази до задирања материјала веће тврдоће у површину тела или површине са мањом тврдоћом, при чему се настале честице могу понашати као трећа тела. Могуће је разликовати хабање у којој учествују

два или три тела - пример је приказан на сликама 2.22а и 2.22б [97, 98]. Адхезионо хабање настаје због раскида фрикционих веза у зони контакта чврстих тела и преноса материјала са једне на другу површину (слика 2.22в). Конкретно, овај тип хабања настаје када у контакт дођу неравнине једног материјала са неравнинама другог материјала, па долази до кидања тих неравнина [97]. Идентификација оваквог вида хабања је могућа тако што се могу увидети карактеристични жлебови по површини фрикционог диска и добоша који се протежу у смеру клизања кочних плочица по диску. Заморна хабања настају као последица замора материјала услед излагања контактних површина динамичким оптерећењима у дужем временском периоду, што је приказано на слици 2.22г [97]. Постоји више различитих типова хабања услед замора. Када су у питању кочнице, најчешћи облик хабања услед замора доводи до пукотина и удубљења на фрикционом површинама и оваква појава назива се питинг (енгл. *pitting*) [96-99].

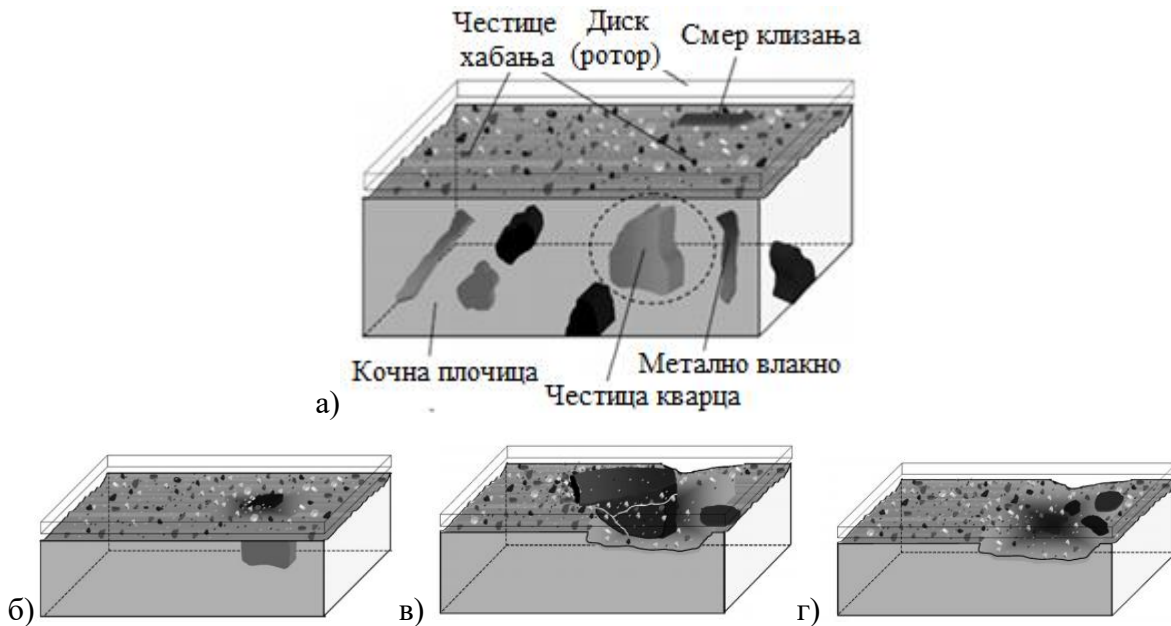


Слика 2.22 Најчешћи типови хабања код фрикционих парова кочница: а) абразивно хабање са два тела, б) абразивно хабање са три тела в) адхезионо хабање, г) хабање услед замора [100, 101]

Студија [102] је показала да температура у контакту фрикционих парова има значајан утицај на механизам хабања диск кочница. Када је температура ниска, механизми хабања су абразивно хабање и хабање услед замора. Када је температура висока, механизам хабања је адхезионо хабање. Термичко пуцање, термичка оксидација, карбонизација и циклизација органских супстанци могу повећати хабање фрикционих облога и оставити поре или пукотине на фрикционој површини током трења, што води појави пукотина на површинама и, коначно, хабању услед замора [102].

У саставу фрикционих парова често се могу наћи чврсти материјали, па је тако на основу [103] идентификован начин хабања и настанак честица уколико се у плочици налазе чврсти материјали. На слици 2.23 је приказана ситуација током процеса кочења и изглед фрикционих парова. Уколико се узме у обзир да се у фрикционом пару налази чврста материја, односно честице чврсте материје (нпр. честице кварца) (слика 2.23а), долази до тога да се она хаба, али исто тако она потискује мекше материје у фрикциони елемент. Долази и до локалног повећања температуре, па тако долази до топлјења тј. хабања материјала око чврсте честице (слика 2.23б). Због тога се јавља пукотина и брже хабање материјала око чврсте честице, па ће у неком тренутку остати доста простора око чврстог материјала, па се и тај материјал откида у облику ситних честица (слика 2.23в и слика 2.23г) [103].

На хабање фрикционих парова, а самим тим на настанак честица, утиче низ фактора попут: температуре између фрикционих парова, брзина возила, па самим тим брзина окретања диска кочнице, састав фрикционих парова, геометрија кочница, амбијентални и атмосферски услови (влажност ваздуха), кинетичка енергија и други [104-106].



Слика 2.23 Процес хабања кочне плочице [103]

На слици 2.24 су графички приказани фактори који утичу на настанак честица. На основу [107], утврђено је да на емисију честица утичу фактори који карактеришу кочни процес, па чак и они који нису директно везани за кочни процес.



Слика 2.24 Утицајни фактори на процес кочења и хабања кочница [106]

Rudnytskyj [108] је анализирао утицајне факторе на емисију честица које настају при хабању фрикционих материјала и навео да на хабање кочница утичу брзина клизања, пренос и утицај преосталих честица из претходног процеса кочења, оптерећење, контактна површина између фрикционих парова и температура. Ако се анализирају референце [106, 109], фактори који утичу на настанка честица могу се груписати у следеће категорије:

- карактеристике фрикционих материјала: физичка, хемијска и механичка својства фрикционих материјала и материјала примењених у изради фрикционих парова (органски, метални, угљенични - познати и као карбонски, ...),
- услови кочења: притисак у систему за кочење и између фрикционих површина, почетна брзина кочења (брзина окретања диска), време кочења, оптерећење возила, пораст температуре при кочењу, успорење,
- услови околине: амбијентална температура, влажност ваздуха и фрикционих парова, проток - струјање ваздуха,

- површинске карактеристике фрикционих парова: хрпавост површине, својство контакта,
- конструкција кочног механизма: пливајућа или фиксна кочна клешта, један или више клипова, невентилирани или вентилирани диск,
- структурни (геометријски) параметри: облик, величина и контактни модалитет фрикционих парова.

Фактори који утичу на емисију честица насталих хабањем фрикционих парова кочница су класификовани и приказани у табели 2.2 [6]. Према овом извору, од свих утицајних фактора, они који се везују за услове пута имају 10 % утицаја на насталу емисију честица. Са друге стране, карактеристике возила, као и стил вожње (карактеристике вожње), утичу са укупно 90 % на укупну насталу емисију честица.

Табела 2.2 Приказ утицајних фактора на емисију честица које настају хабањем фрикционих парова кочница [6]

Утицајни фактор	Начин деловања
<i>Карактеристике возила</i>	
Температура диска	Повећава емисију
Величина возила	Повећава емисију
Процентуално учешће метала у кочним облогама	Повећава емисију
Тежина возила	Повећава емисију
Број пређених километара	Непознат утицај
<i>Карактеристике пута</i>	
Дозвољена максимална брзина	Повећава емисију
Дозвољено максимално оптерећење возила	Повећава емисију
Угао бочног клизања	Непознат утицај
<i>Карактеристике вожње</i>	
Агресиван стил вожње	Повећава емисију
Брзина возила	Повећава емисију
Успорјење/убрзање	Повећава емисију
<i>Атмосферски утицаји</i>	
Температура	Непознат утицај
Влажност ваздуха	Непознат утицај
Падавине	Непознат утицај

2.4.1 Макро анализа хабања фрикционих парова и настанка честица

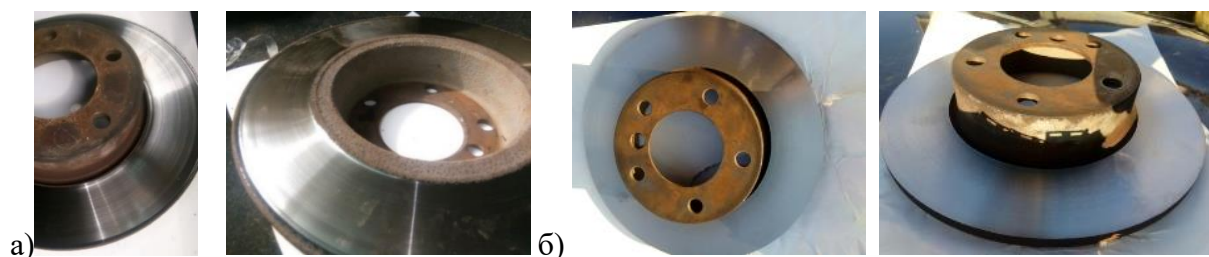
У процесу хабања кочница, фрикциони материјали имају у себи различите материјале који сами по себи могу бити јако опасни, а често се ради о металима. Ситне честице метала доспевају не само у природу, већ и у човеков организам и могу утицати на све органе. На слици 2.25 је дат приказ фрикционих плочица које су тек произведене и похабаних фрикционих плочица после неколико хиљада километара које је возило провело у вожњи. На слици 2.25а је дат приказ површине коришћених фрикционих плочица. На слици 2.25б је дат упоредни приказ нових фрикционих плочица и фрикционих плочица које су биле у експлоатацији, односно које су биле коришћене и које су се похабале. Јасна разлика између ове две плочице је у количини фрикционог материјала.



Слика 2.25 Фрикционе плочице: а) површина похабаних плочица б) упоредни приказ коришћених фрикционих плочица и нових фрикционих плочица

Хабање фрикционих плочица је дуготрајан процес, односно, потребно је да возило буде у процесу експлоатације у коме је неизоставно да има кочења било дуготрајних, било краткотрајних. Хабање свакако зависи и од примењених материјала коришћених приликом израде самих плочица, као и приликом израде диска кочнице. Важан захтев при формирању фрикционих материјала је остваривање великих вредности коефицијента трења како би кочење било ефикасно, што је неминовно праћено процесом хабања. Правилним избором материјала, хабање ће се манифестовати споро, односно фрикционе плочице ће имати дужи век трајања, али свакако ће доћи до хабања приликом сваког процеса кочења. Управо тај спорији процес хабања доводи до тога да се стварају ситне честице које доспевају у животну средину. Возило на коме су биле коришћене похабане кочне плочице је било експлоатисано неколико десетина хиљада километара, међутим проблем је што се измерених 4,6 mm дебљине фрикционог материјала који је био похабан нашло у природи и то у облику најситнијих честица, јер похабани материјал не остаје на месту где је дошло до хабања, већ се ослобађа у природу. Проблем је још сложенији када се узме у обзир број возила на улицама широм света, поготово у урбаним срединама, где у сваком тренутку постоји јако велики број кочења, па самим тим долази до ослобађања великог броја честица.

Поред претходно описаног проблема хабања фрикционих плочица, велики проблем представља и хабање диска кочнице. Диск кочнице је углавном израђен од материјала који мора имати отпорност на напрезања и јако високе температуре, али свакако и мале деформације. Међутим, са друге стране, потребно је да буде довољно трења у додиру са фрикционим облогама да би се кочење остварило. Код диска је проблем што се приликом његовог хабања стварају честице које садрже високу концентрацију метала. На слици 2.26а је дат приказ диска кочнице који је био експлоатисан, док је на слици 2.26б приказан диск после обраде површина и поравнања места која су била у великој мери похабана. На тај начин је могуће и увидети који су најкритичнији делови диска, тј. у ком делу диска се јавља највеће хабање.



Слика 2.26 Диск кочнице: а) похабана фрикциона површина диска, б) фрикциона површина диска после обраде

Са аспекта макро анализе, може се закључити да приликом кочења долази до хабања фрикционе површине како диска кочнице, тако и кочних плочица. Хабањем фрикционе површине долази до хабања материјала фрикционих парова који се ослобађају у атмосферу и животну средину у облику честица.

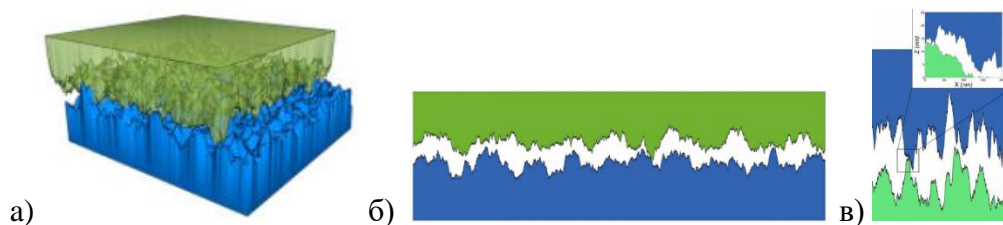
2.4.2 Микроскопска анализа настанка честица

Преглед контактних површина голим оком указује само да су фрикционе површине похабане, међутим не даје тачну слику зашто и како је дошло до хабања. Зато су микроскопске анализе значајне за дубљу анализу и разумевање хабања фрикционих површина. Самим прегледом контактних површина нових фрикционих парова (слика 2.27) може се утврдити да и после производње, површине нису потпуно глатке, већ постоје неравнине и оне међусобним контактом доводе до пуцања врхова, па самим тим долази до хабања и настанка честица.



Слика 2.27 Процес кочења и хабања кочница [110]

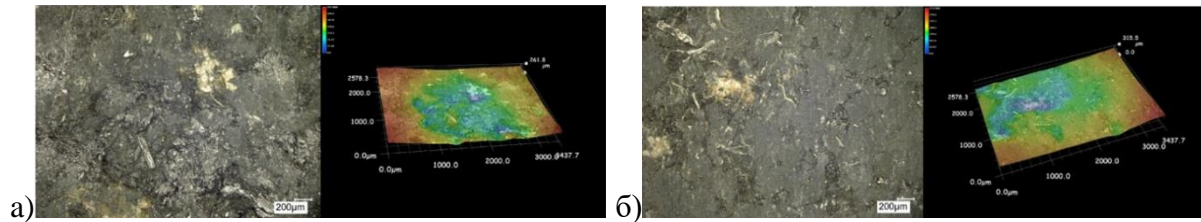
Претходно наведене неравнине фрикционих површина се могу графички приказати као на слици 2.28а. Неравнине и врхови се протежу преко целе површине. У попречном пресеку фрикционог пара види се изглед неравнина приказан на слици 2.28б. Како врхови, односно неравнине долазе у међусобни контакт, долази до пуцања неравнина на елементима фрикционог пара кочница. До хабања долази једним од механизма који су представљени у првом поглављу рада. Уколико се са још већим увећањем посматрају неравнине или врхови неравнина на фрикционим паровима кочница, као што је приказано на слици 2.28в, може се закључити да се на тим неравнинама уочавају још ситније неравнине које долазе у контакт са неравнинама другог материјала. Тако долази до хабања и тих неравнина, па самим тим долази и до стварања још ситнијих честица. То је разлог зашто се могу детектовати честице различитих величина које се могу кретати у границама од неколико микрона до неколико десетина микрона.



Слика 2.28 Анализа фрикционих површина кочних парова и неравнине на фрикционим површинама: а) микронеравнине на фрикционим површинама, б) однос микронеравнина фрикционих површина, в) контакт између микронеравнина [111]

Посматрањем реалног случаја фрикционе површине кочне плочице, могуће је заиста увидети разлике у промени микроструктуре површине пре и после кочења. На слици 2.29а је приказан микроскопски изглед структуре кочне плочице и симулације неравнина

на тој површини (битно је напоменути да се ради о некоришћеној кочној плочици). На слици 2.29б приказана је структура кочне плочице после коришћења на инерцијалној динамометарској кочници. Уочава се промена изгледа и структуре фрикционог слоја плочице, а преко тродимензионалног модела се може јасно утврдити да долази до промене површине и њеног хабања.



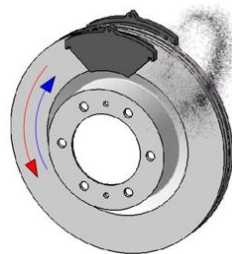
Слика 2.29 Анализа фрикционих површина кочних парова и неравнине на фрикционим површинама: а) фрикциона површина пре кочења, б) фрикциона површина после кочења [112]

2.4.3 Механизам ослобађања честица

У процесу настанка честица долази до хабања оба фрикциона елемента кочнице и ослобађања ситних честица. Ослобађање честица се може остварити на више начина. Не ослобађају се све честице директно у ваздух услед хабања фрикционих парова приликом кочења. Према [113], 50% до 70% честица се директно ослобађа при кочењу, док према [87], тај проценат је у просеку 35%. У истраживању начина на који се ослобађају честице [114] дошло се до закључка да постоје три основна начина:

- ослобађање честица приликом кочења,
- ослобађање честица приликом поновног убрзања возила,
- ослобађање честица у стању мировања возила – одлепљивање честица са фрикционих површина.

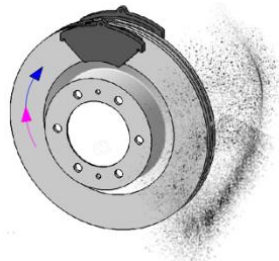
Први начин ослобађања честица приликом кочења јавља се управо током процеса кочења. У овом процесу долази до хабања фрикционих парова и до ослобађања честица. Честице се ослобађају услед успоравања диска и док постоји притисак кочења између фрикционих парова, када долази до хабања фрикционих парова. На слици 2.30 је графички приказан начин ослобађања честица у процесу кочења. Црвеном стрелицом је приказан смер дејства кочног момента, док је плавом стрелицом приказан смер окретања диска кочнице.



Слика 2.30 Ослобађање честица приликом кочења возила

Други начин на који се могу ослободити честице је у процесу поновног убрзавања. Ова појава је приказана у истраживању [115], али се до сличних резултата дошло и у истраживању [116]. У овом случају, долази до ослобађања честица које су настале у претходном процесу кочења, јер приликом поновног убрзавања возила, услед дејства сила, долази до њиховог ослобађања са фрикционих површина. Разлог овакве појаве је

тај што се неке од насталих честица задржавају на фрикционим површинама, па се услед струјања ваздуха оне ослобађају. Сликавит приказ ослобађања честица у току процеса убрзавања диска је дат на слици 2.31, где је плавом бојом означен смер окретања диска, док је розе бојом приказан смер дејства момента убрзања диска. Честице које се ослобађају у процесу убрзања су оне које су остале заробљене или залепљене у микроскопским неравнинама на фрикционим површинама. На основу [117], честице које остају заробљене у микронеравнинама, у следећем процесу кочења, приликом појаве притиска између фрикционих парова, могу се сабити на површини и постати део стабилног слоја трења.



Слика 2.31 Ослобађање честица приликом поновног убрзавања возила

Трећи случај ослобађања честица јесте ослобађање у стању мировања возила. У овом случају долази до тога да се честице ослобађају са фрикционе површине и падају са фрикционих површина на земљу услед дејства атмосферских утицаја попут силе ветра. Графички приказ је дат на слици 2.32, где је приказан пример ослобађања честица са фрикционе површине на земљу. Овде нема притиска између фрикционих парова и угаона брзина окретања диска је једнака нули, али, услед дејства природних и климатских сила, честице се ослобађају и падају са фрикционе површине фрикционих парова.



Слика 2.32 Ослобађање честица приликом кочења возила

2.5 Састав честица које су продукт хабања кочница

Велики број истраживача се фокусирао на анализу састава честица које настају као продукт хабања фрикционих парова кочница. Анализа материјала са циљем утврђивања доминантних материјала у честицама је спроведена од стране различитих аутора приликом испитивања честица које су последица хабања кочних плочица и диска. На значај оваквих испитивања указано је и у [118], где се истиче да се фрикциони материјали кочница састоје од низа различитих елемената који приликом хабања улазе у састав честица.

Кочне плочице у свом саставу имају различите материјале [86] и веома је значајно утврдити материјале који су најприсутнији и утврдити какву улогу имају у саставу плочице. У Републици Србији, за сада је регулисана само примена азбеста, односно забрањена је примена азбеста у саставу фрикционих материјала кочних облога [119]. На основу референце [120] долази се до података о материјалима у честицама који се могу

повезати са саставом фрикционих материјала. Неки материјали који се према овој референци могу повезати са хабањем фрикционих парова су гвожђе (Fe), баријум (Ba), олово (Pb) и бакар (Cu). *Huskote* и др. су у свом истраживању [121] извршили анализу састава 65 кочних плочица и 15 дискова и добијени резултати су приказани у табели 2.3 и репрезентативни су за европско тржиште. У табели су приказане минималне, максималне и просечне процентуалне вредности масе одређеног материјала у маси фрикционе облоге (%m/m). Према овом истраживању, најприсутнији метали у кочним плочицама су гвожђе (Fe) и бакар (Cu), али су присутни и калај (Sn), цинк (Zn) и антимон (Sb). Утврђено је да од 80% до 90% метала у кочним плочицама чине Fe, Zn, Cu и Sn. Ово је јако важно у циљу даљег утврђивања састава честица које настају приликом кочења, јер материјали који се садрже у фрикционим облогама су управо они који се могу идентификовати у честицама.

Табела 2.3 Анализа састава материјала у кочним плочицама и дисковима [121]

Материјал	Јединица мере	Максимална вредност	Минимална вредност	Просечна вредност	Број узорака
Материјали примењени у кочним плочицама					
Гвожђе (Fe)	%m/m	44,7	8,4	22,7	65
Бакар (Cu)	%m/m	17,8	0,11	11,2	65
Цинк (Zn)	%m/m	18,0	0,09	4,7	65
Калај (Sn)	%m/m	8,9	0,01	3,3	65
Алуминијум (Al)	%m/m	5,2	0,42	1,7	65
Силицијум (Si)	%m/m	5,2	0,05	1,8	65
Цирконијум (Zr)	%m/m	7,1	0,00	1,2	57
Титанијум (Ti)	%m/m	12,1	0,02	0,9	65
Антимон (Sb)	%m/m	8,3	0,01	2,7	29
Хром (Cr)	%m/m	2,1	0,04	0,8	65
Молибден (Mo)	%m/m	4,0	0,00	0,8	50
Манган (Mn)	%m/m	2,4	0,10	0,3	65
Ванадијум (V)	%m/m	1,7	0,01	0,3	62
Никл (Ni)	%m/m	0,4	0,05	0,1	38
Бизмут (Bi)	mg/kg	10,949	0,00	2060	65
Волфрам (W)	mg/kg	9863	0,00	1825	65
Фосфор (P)	mg/kg	8750	0,00	1225	65
Олово (Pb)	mg/kg	53,681	0,16	1305	65
Кобалт (Co)	mg/kg	4564	0,00	196	65
Материјали примењени у диску					
Гвожђе (Fe)	%m/m	93,7	92,0	92,9	15
Алуминијум (Al)	%m/m	0,9	0,5	0,6	15
Силицијум (Si)	%m/m	2,4	1,7	2,0	15
Цинк (Zn)	%m/m	0,01	0,003	0,004	3
Хром (Cr)	%m/m	0,3	0,1	0,2	15
Молибден (Mo)	%m/m	0,2	0,005	0,031	15
Манган (Mn)	%m/m	0,8	0,5	0,6	15
Никл (Ni)	%m/m	0,1	0,1	0,1	4
Бизмут (Bi)	mg/kg	9,6	0,1	5,2	15
Волфрам (W)	mg/kg	9,2	0,1	4,4	15
Фосфор (P)	mg/kg	578,5	0,2	73,7	15
Олово (Pb)	mg/kg	9,6	0,0	4,8	15
Кобалт (Co)	mg/kg	8,3	0,9	4,7	15

У истраживању [122] извршена је анализа материјала који су карактеристични за састав честица које настају приликом хабања кочница и утврђено је да се најчешће у честицама могу пронаћи елементи који указују на хабање кочних плочица. Анализом података различитих аутора који су покушали да анализирају састав честица које настају приликом хабања дошло се до закључка да су најзаступљенији елементи Cu, Pb, Ti, Zr, Ba, Mo, Cr, Fe и Sb (табела 2.4). Истраживање [123] је показало да се састав и најприсутнији материјали у кочним плочицама разликују у зависности од подручја које се посматра. Тако, према овом истраживању, кочне плочице у Индији (Азија) најбогатије су елементима Ti, Sb и Cu, а кочне плочице у Великој Британији (Европа) богате су елементима Ba и Sb [123].

Табела 2.4 Карактеристични материјали у емисији честица које настају при хабању кочних фриксионих парова

Референца	Материјали
<i>Hulskotte</i> и др. [121]	Fe, Cu, Zn и Sn
<i>Mosleh</i> и др. [122]	Al, Mg, Sb, Si, S и Cu
<i>Lawrence</i> и др. [124]	Ba, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb
<i>Jadhav</i> и <i>Sawant</i> [125]	Fe, Cu, Si, Ba, K, T
<i>Bukowiecki</i> и др. [126]	Cu, Fe, Mo, Sb, Sn, Zn, Zr
<i>Adamiec</i> и др. [127]	Ti, Cr и Cu
<i>Buadi</i> и <i>Celement</i> [128]	Cu, Zr, Sb и Pb
<i>Apeagyei</i> и др. [129]	Cu, Ba, Fe, Mo, Ti, Zr
<i>Duong</i> и <i>Lee</i> [130]	Cu, Ni
<i>Yan</i> и др. [131]	Sb
<i>Alves</i> и др. [132]	Ba, Cu
<i>Adachi</i> и <i>Tainosho</i> [133]	Ba, Ce, Cu, Fe, La, Sb, Ti, Y, Zr
<i>Song</i> и <i>Gao</i> [134]	Sb, Cu, Fe, Pb
<i>Hagino</i> и др. [135]	Fe, Cu, Ba и Sb
<i>Valotto</i> и др. [136]	Fe, Cr, Sb и Mo

2.6 Подела материјала у кочним плочицама (фриксионим облогама)

Познавајући специфичност трења, али и услова под којима фриксиони материјали и склопови кочница обављају своју функцију, потребно је пажљиво одабрати материјале који се примењују. У основи постоји два типа материјала који се примењују у фриксионим облогама. То су потпуно различити материјали гледано са аспекта њихових карактеристика и услова у којима обављају функцију, тј. то су материјали који се примењују у сувим условима, односно суви фриксиони материјали и мокри фриксиони материјали. Суви фриксиони материјали се најчешће примењују на возилима и они у односу на мокре фриксионе материјале увек обављају функцију у сувим условима, осим када дође до ненамерног квашења, рецимо услед кише. У циљу повезивања са могућим саставом честица које се ослобађају хабањем, анализирани су само суви фриксиони материјали. Веома је тешко дати тачне саставе фриксионих материјала зато што произвођачи нису у обавези да открију састав фриксионих материјала.

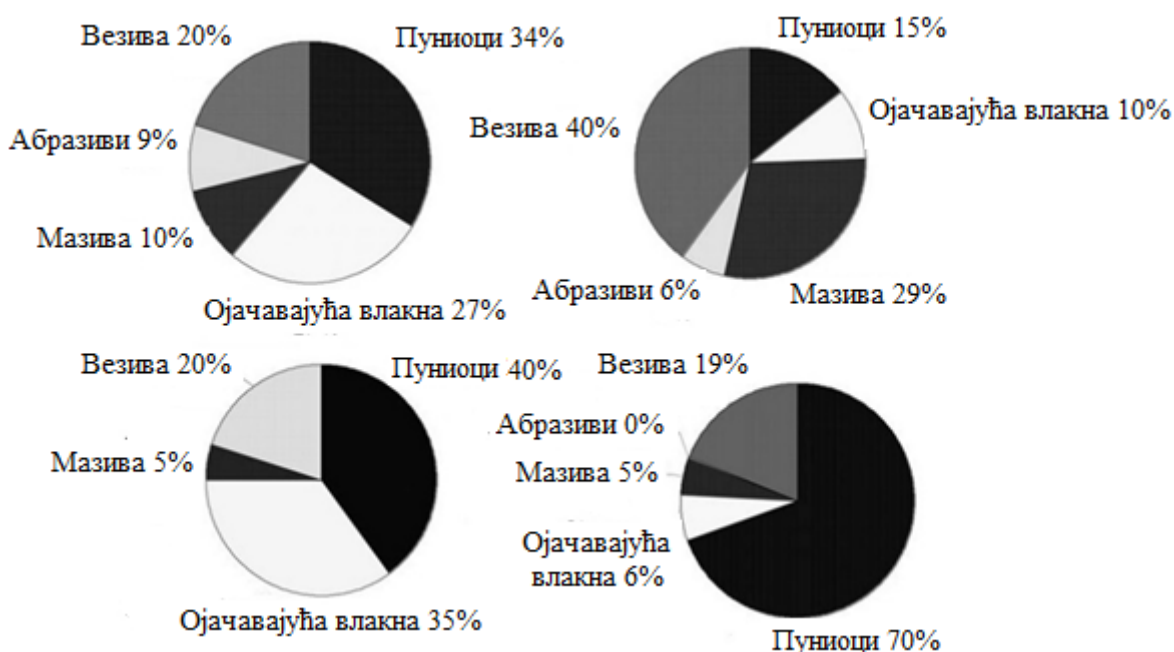
На основу [137], могуће је идентификовати типове материјала који се примењују у фриксионим плочицама, односно саставне елементе фриксионог материјала. Да би се добиле одговарајуће перформансе фриксионих плочица, битно је применити различите материјале као једну „смешу“. Фриксионе облоге садрже следеће подкомпоненте:

- фрикционе адитиве, који одређују фрикционе особине кочних плочица и садрже мешавину абразива и мазива,
- пунила, која смањују трошкове и побољшавају производност кочних облога,
- везивне материјале, који држе заједно компоненте кочне плочице и
- ојачавајућа влакна, која имају улогу да обезбеђују механичку чврстоћу.

У примени је више од 2000 супстанци, а само произвођач фрикционих облога зна тачан састав одређене фрикционе облоге коју производи и нема обавезу да потрошачима укаже на састав фрикционих материјала који се примењују [138]. У овом истраживању је извршена другачија класификација фрикционих материја и сврстава их у пет различитих група:

- везивни материјали (везива),
- абразивни материјали,
- материјали за одржавање и побољшање перформанси фрикционих облога, који су укључени у прецизним количинама за побољшање одређених карактеристика кочења, укључујући и специфична мазива која омогућавају да фрикционе облоге издрже високе температуре,
- пуниоци и
- структурни материјали који помажу да подлога одржава правилан облик током употребе.

Према извору [137], приказане су четири смеше фрикционих материјала које су патентиране од стране Сједињених Америчких Држава и њихов састав је приказан на слици 2.33.



Слика 2.33 Примери састава смеша фрикционих материјала у зависности од количине типа материјала [137]

Фрикциони адитиви имају улогу да прилагоде својства трења и контролишу понашање фрикционих облога у смислу њиховог хабања. Генерално, адитиви се могу, према својој улози, сврстати у два типа и то су мазива и абразивни материјали. Мазиво се увек користи за смањење хабања материјала. Абразиви у фрикционом материјалу повећавају

коэффициент трења, док истовремено повећавају брзину хабања површине материјала другог фрикционог елемента. Међутим, фрикциони материјали са већим садржајем абразива показују већу варијацију коефицијента трења, што доводи до нестабилности кочног момента.

Пунила се користе за побољшање могућности обраде фрикционих плочица и смањење трошкова фрикционог материјала. Постоје две групе пунилаца: органски и неоргански. Сви материјали који се користе имају високу специфичну тачку топљења. Избор пунилаца зависи од појединих компоненти у фрикционом материјалу, као и од типа фрикционог материјала.

Везиво има улогу да све компоненте заједно држи у облику термостабилног материјала. Сврха везива је одржавање структурног интегритета кочних плочица под механичким и термичким напрезањима. Оно мора да држи компоненте кочних плочица заједно и да спречи пуцање фрикционих облога, односно одвајање материјала који су део фрикционе облоге. Избор везива за кочне облоге је од великог значаја, јер ако се не одржи структура током кочења, остали састојци као што су ојачавајућа влакна или мазива ће се раздвојити и фрикциони материјал ће се распасти. Зато је неопходна висока отпорност на топлоту. Фенолна смола се често бира као везиво јер има одличну топлотну отпорност.

Улога ојачавајућих влакана је да обезбеде механичку чврстоћу фрикционом материјалу, односно да обезбеде „армирање“. Ова влакна имају задатак да побољшају перформансе и чврстоћу и обично се у ту сврху користе: метална (гвожђе, бакар, итд.), стаклена, угљенична и органска влакна (кевлар, памук, итд.) [109]. Недавна истраживања су показала да оптерећења која се јављају при кочењу узрокују да ојачавајућа влакна бивају истиснута, јер су доста тврђа у односу на остале материјале који се налазе у кочним плочицама. Из тог разлога долази до појаве неравнина у кочним плочицама, као и до неједнаких сила трења у контакту. Фрикциони материјали се израђују од мешавине различитих ојачавајућих влакана која имају различите особине. Ојачавајућа влакна су свакако значајан елемент у фрикционим елементима, јер имају мању брзину хабања у односу на све остале елементе у фрикционим материјалима, тако да би смањењем количине ојачавајућих влакана дошло до повећања хабања материјала [137].

2.6.1 Типови кочних плочица на основу састава

У састав кочних плочица улазе различити елементи, па се оне се могу према свом саставу поделити у неколико категорија. Једна од подела кочних плочица, која се може најчешће срести је према садржају металних материјала:

- металне кочне плочице,
- полуметалне кочне плочице,
- кочне плочице са ниским процентом метала,
- азбестне кочне плочице,
- кочне плочице без азбеста (органске),
- угљеничне кочне плочице,
- керамичке кочне плочице [139], ...

На основу [140], металне кочне плочице садрже углавном метале попут челика, бакра или сличне метале. Ове кочне плочице карактерише висока отпорност и топлотна проводљивост. Често у контакту са диском од ливеног гвожђа долази до дубоких

огреботина, а због карактеристика материјала, долази до стварања буке и појаве корозије. Металне кочне плочице најчешће садрже само метале елементе и графит као мазивни материјал [141].

На основу [140], полуметалне фриксионе плочице (енгл. *semi-metallic brake pads*) представљају комбинацију метала и органских материјала, што чини да имају задовољавајућу вредност коефицијента трења и високу топлотну проводљивост. Полуметалне фриксионе облоге представљају једну од најотпорнијих кочних плочица на хабање, па су самим тим и најдуготрајније. Овакве кочне плочице садрже метале који се комбинују са графитом и другим пунилима да би се задржала њихова отпорност на хабање, али и да би имале што мањи утицај на диск [142]. Према [120, 143, 144] оне садрже 30% до 70% метала.

Кочне плочице са ниским процентом метала (енгл. *low-metallic brake pads*) садрже 10% до 30% металних материјала [145].

Органске фриксионе облоге састоје се од материјала органског порекла, као што су: стакло, кевлар, смола или гума [143]. У органским безазбестним фриксионим облогама или *NAO* (енгл. *Non-Asbestos Organic brake pads*) азбест је замењен, јер има лош утицај на здравље. Ове фриксионе облоге садрже мање од 10% метала [18], а остатак фриксионог материјала потиче од влакана добијених из биљака, смола отпорних на високе температуре и других материјала. Према [144] органске фриксионе облоге или *NAO* садрже између 10% и 30% метала, а остатак фриксионог материјала такође потиче од влакана добијених из биљака, високо температурних смола и других материјала.

Може се закључити да проценат метала, па самим тим и класификација на органске кочне плочице или остале врсте плочица зависи од извора односно литературе. Свакако, што је проценат метала мањи у кочним плочицама, оне су еколошки прихватљивије. Оне су намењене за лака возила и умерене интензитете кочења [146,147]. На основу [140], безазбестне органске кочне плочице у себи садрже углавном органске материјале који су обично ојачани арамидним, стакленим или керамичким влакнима. Овакав састав кочних плочица обезбеђује високу издржљивост, отпорност на високе температуре, ниску брзину хабања, малу тежину и тих рад. Међутим, због сложености процеса производње, ова врста решења може бити веома скупа, а због велике тврдоће материјал може бити крт [140].

Керамичке фриксионе плочице су примарно произведене од керамике ојачане бакарним влакнима [143]. Фина бакарна влакна у керамичким фриксионим облогама се примењују како би се повећало трење и топлотна проводљивост [142]. Керамичке кочне плочице имају дужи век трајања и добру температурну стабилност [145], али имају најмању брзину хабања, имају повољан утицај на хабање диска и производе најмање буке [144].

Постоје и тзв. еколошке кочне плочице (енгл. *eco-friendly brake pads*) код којих су главни материјали биљног порекла [140]. Ови материјали су обично отпадни материјали добијени у производњи хране. Ове кочне плочице имају различите карактеристике и најчешће су повољне, као што су: мала маса, ниска цена, еколошки су неутралне, имају високу издржљивост и отпорност на трење [142].

Детаљни прегледни приказ састава неких од кочних плочица је дат у табели 2.5, у којој је, на основу података различитих аутора, формиран приказ састава кочних плочица.

Табела 2.5 Врсте кочних плочица и садржај метала у њима

Тип кочне плочице	Референца	Процент метала у кочним плочицама
Металне кочне плочице	Banait и др. [141]	Графит и метал
Полуметалне кочне плочице	Brigestone [142]	30% до 70%
	Grigoratos и Martini [120]	≤ 65%
	Bonfanti [18]	>50%
Кочне плочице са ниским процентом метала (енгл. <i>Low metal brake pads</i>)	Grigoratos и Martini [120]	10% до 30%
	Bonfanti [18]	10% до 50%
Органске кочне плочице (енгл. <i>Non-asbestos organic brake pads - NAO</i>)	Bonfanti [18]	<10%
	Ма и др. [147]	Не садрже метал или садрже веома мали проценат метала

У табели 2.6 су дате оцене неких од основних карактеристика одређених фрикционих облога које се користе на савременим возилима [148, 149]. Сваки од ових материјала има своје предности и недостатке, међутим, најсавременије фрикционе облоге које се користе на возилима су керамичке фрикционе плочице које предњаче по својим карактеристикама хабања и стварања емисије честица.

Табела 2.6 Фрикционе плочице које су у примени на савременим возилима и њихове карактеристике [148, 149]

Тип фрикционе плочице	Перформансе	Бука	Прашина (честице)	Цена	Радни век	Хабање плочица и утицај на кочни систем	Утицај на хабање диска
Керамичке	Средње	Низак ниво	Низак ниво	Висока	Висок	Висок ниво	Низак утицај
Полуметалне	Високе	Висок ниво	Висок ниво	Средња	Умерен	Низак ниво	Висок утицај
Органске	Ниске	Низак ниво	Умерен ниво	Ниска	Низак	Умерени ниво	Низак утицај

Примена одређене врсте фрикционе плочице зависи од категорије возила на којем се користи, услова у којима се возило креће и у којим условима фрикционе облоге морају обављати своју функцију. На путничким возилима, довољно добре перформансе се добијају применом органских фрикционих облога, али могу се употребити и полуметалне или чак керамичке фрикционе облоге. Код тешких теретних возила или возила за ванпутне услове, примењују се полуметалне фрикционе облоге. Код спортских возила најчешће се користе полуметалне и керамичке фрикционе облоге. У табели 2.7 су приказане неке од карактеристика кочних плочица које се данас примењују на моторним возилима.

Табела 2.7 Карактеристике неких од кочних плочица [150]

Тип	Карактеристика
Неметалне кочне плочице	Направљен од разних синтетичких композитних материјала, нпр. као целулоза, араמיד и синтеровано стакло Нису агресивне у односу на диск Кратак радни век
Полуметалне кочне плочице	Синтетички материјали помешани са металима Тврђе од неметалних кочних плочица Веће хабања диска, али већа снага кочења
Металне кочне плочице	Примењују се на тркачким возилима Производе већу буку и али имају дужи радни век Захтева више силе за успоравање од других материјала
Керамичке кочне плочице	Направљен од глине и порцелана везаних за бакарни материјал Добар компромис између металних и других кочних плочица

2.6.1.1 Полуметалне фрикционе облоге

У зависности од модела фрикционе облоге и произвођача, метали који се користе могу бити: бакар, месинг, челична вуна и други метали. Ови различити метали су комбиновани са графитним мазивом, као и са другим пунилима како би се смањило хабање фрикционих облога, али и диска [142, 151]. Постоје различите варијације у саставу и коришћеним материјалима, у зависности од услова вожње (од свакодневне вожње до тркачких услова) [151].

Највећи недостаци ових фрикционих облога су што стварају већу количину честица и могу стварати висок ниво буке. Наведени недостаци се надокнађују бољом укупном силом кочења и ефикасношћу у хладним климатским условима у поређењу са керамичким или органским плочицама. Састав материјала у полуметалним кочним плочицама обезбеђује дужи век експлоатације у односу на органске кочне плочице. Полуметалне фрикционе облоге се најчешће уграђују на: возила средње или више класе, теренска возила, камионе и доставна возила.

Полуметалне фрикционе облоге имају боље кочне перформансе од органских фрикционих облога, док им је цена у границама између керамичких и органских фрикционих облога [152]. Металне фрикционе плочице имају боље перформансе кочења у много ширем распону температура и радних услова у односу на друге типове фрикционих облога. Пошто су метали добар проводник топлоте, они имају тенденцију да издрже више температуре, док истовремено помажу кочном систему да се боље хлади. Они се не деформишу као органске фрикционе облоге, те је потребна мања сила на педали кочнице. Металне кочне облоге имају тенденцију да буду бучније од керамичких или органских кочних плочица и стварају већа оптерећења и вибрације у кочном систему, а тиме и већа напрезања и хабање диска кочнице [142, 150, 151].

2.6.1.2 Органске фрикционе облоге

Пре седамдесетих година 20. века, саставни материјал кочних плочице је био азбест. Дуготрајно излагање честицама овог материјала може изазвати рак, тако да је примена азбеста у кочним облогама, као и у другим областима индустрије забрањена [144, 153]. Облоге са азбестом добро апсорбују топлоту, остварују се добре перформансе кочења и имају мање је хабање. Овакве фрикционе облоге се временом хабају и тиме ослобађају

честице азбеста у ваздух. Произвођачи плочица су закључили да азбест није безбедно једињење које би се користило за производњу кочних система. Као резултат тога, направљене су органске кочне плочице или безазбестне кочне облоге као један нови вид фрикционих облога [150]. Према извору [143, 152], ове фрикционе облоге се састоје од материјала добијених из органских извора, као што су: стакло, кевлар, смола или гума. Ове фрикционе облоге су намењене за лака возила, кочења умереним успорењем у свакодневним условима вожње [146, 154]. Због њиховог својства да су мекане, органске фрикционе облоге су прилично тихе. Међутим, када се пореде са осталим фрикционим облогама, оне имају најмању издржљивост на хабање и имају тенденцију да створе велику количину честица. Органске фрикционе облоге стандардно се уграђују на око 67% нових возила продатих у САД [153]. Најскупљи материјал за израду ових облога је кевлар, али он елиминише многе проблеме у перформансама које имају други материјали. Већина органских облога остварује довољно добре перформансе кочења без потребе да се загрева на било који начин да би се генерисала довољна кочна сила, а и приступачне на тржишту [154].

Органске фрикционе облоге могу садржати и низак ниво метала у циљу повећања отпорности на топлоту, међутим проценат зависи од произвођача. Оне производе више штетних честица, стварају више буке и хабају се једнако брзо, као и обичне органске фрикционе облоге [152]. Органске фрикционе облоге производе мање честица од неких других типова кочних облога, као што су металне фрикционе облоге и доступније су са аспекта цене [143, 153]. Ове фрикционе облоге одлично функционишу у условима свакодневне вожње и имају највиши степен корисности када се користе у умереним климатским условима. Климатски услови са високом температуром могу проузроковати прегревање фрикционих облога и то брже од других типова облога. У условима повишених температура имају веома лоше перформансе, што значи да захтеју и брзо хлађење, а осим тога могу имати лоше карактеристике при честим кочењима. Због тога нису погодне за возила високих перформанси [154,155]. У хладнијим поднебљима може потрајати дуже да стигну до потпуног загревања, у односу на полуметалне фрикционе облоге [152]. За разлику од перформанси кочних плочица које се примарно користе на тешким возилима, органске кочне плочице стварају средњи ниво трења без стварања велике количине топлоте, што их чини погодним за возаче који користе своја возила за нормалну вожњу и путовање [156]. Због њихове композитне природе, органске фрикционе облоге се могу брже хапати, што значи да их је потребно чешће мењати. У зависности од примењеног материјала недостатак може бити тај што су природни материјали непостојани (могу да труле, распадају се, ...). Имају већи степен компресије, што значи да возач мора активирати кочницу већом силом да би се постигла одговарајућа сила кочења [151].

2.6.1.3 Керамичке фрикционе облоге

Керамичке фрикционе плочице су примарно произведене од керамичког материјала са бакарним ојачавајућим влакнима [143, 152]. Керамика која се примењује у овом случају је иста као и она која је широм позната за прављење плочица других намена, с тим да су пуно издржљивије у погледу отпорности на топлоту и хабање. Фина бакарна влакна у керамичким фрикционим облогама се примењују како би се повећало њихово трење и топлотна проводљивост [151]. Ове фрикционе облоге производе најмању буку, имају најмању брзину хабања, али имају веома мали проценат утицаја на хабање диска кочнице. Од када су развијене средином 1980-их, керамичке фрикционе облоге су нашле примену на различитим возилима и постале су веома популарне из више разлога.

Керамичке фрикционе плочице имају генерално мало мање трење од металних фрикционих плочица, па самим тим и ефикасност кочења, али ипак овакве фрикционе облоге имају знатно мањи утицај на животну средину од металних фрикционих облога [152]. Овај тип фрикционих облога у поређењу са органским кочним плочицама производи мању количину честица [151]. У поређењу са органским кочним плочицама, керамичке кочне плочице су поузданије у ширем распону температура и услова вожње [151]. Веома честа примена ових плочица је на спортским возилима, јер стварају велике кочне силе и имају дужи век трајања, као и идентичне перформансе у току целог свог животног циклуса [152, 153, 157]. Један од недостатака ових фрикционих облога је што имају већу цену у односу на остале типове због већих трошкова производње. То може проузроковати више хабања и оштећења других компоненти система за кочење. Керамичке кочне плочице се не сматрају најбољим избором за неке одређене услове вожње, као што су вожња у условима веома хладне климе или услови за трке [151, 152]. Овај тип фрикционих облога не сме се користити у комбинацији са угљенично-керамичким кочним системима, који се користе код спортских возила високих перформанси. Неки врхунски произвођачи спортских аутомобила нуде их као опциону опрему. Таква возила имају керамичке фрикционе облоге, али дискови су направљени од композитних материјала уместо од ливеног гвожђа [144, 153, 157].

2.6.2 Примена алтернативних материјала у циљу смањења штетности утицаја честица

Данас се све више истражују алтернативни материјали који би се могли користити у кочним плочицама. Низ аутора истражио је примену неких алтернативних материјала који би се могли наћи у примени као замена за неки дуги материјал који је штетнији [158]. Циљ је да такви нови материјали имају што мању штетност, односно да честице које настају немају штетан ефекат по човека [159]. Свакако се ови материјали морају прилагодити да задовоље и друге захтеве, попут: високе топлотне проводљивости, високе топлотне отпорности, мале масе, ниског нивоа буке, ниске цене, отпорности на корозију, и др. [160]. У табели 2.8 су приказани неки од природних материјала који би могли бити примењени у кочним плочицама. Препоручује се примена пољопривредног отпада или биљака јер је познато да такви материјали немају штетан утицај на животну средину [161].

Табела 2.8 Алтернативни материјали примењени у кочним плочицама

Референца	Алтернативни материјал
<i>Asohtah</i> и <i>Adeleke</i> [162]	Кукурузне љуске
<i>Olupona</i> и др. [163]	Љуске зрна какао
<i>Primaningtyas</i> и др. [164]	Љуска пиринча
<i>Idris</i> и др. [165]	Кора банане
<i>Pujari</i> и <i>Srikiran</i> [166]	Семе палме
<i>Bretotean</i> и др. [167]	Кокосова влакна
<i>Kholil</i> и др. [168]	Кокосова влакна, дрвени прах и кравља кост
<i>Singaravelu</i> и др. [169]	Прашак од љуске ракова
<i>Akincioğlu</i> и др. [170]	Љуска лешника и прах бора
<i>Ademoh</i> и <i>Adeyemi</i> [171]	Кукурузне љуске
<i>Akincioğlu</i> и др. [172]	Прашина од љуске ораха
<i>Olabisi</i> и др. [173]	Љуске палиног зрна, љуске какао зрна, љуске кукуруза
<i>Lagel</i> и др. [174]	Танин и фуранска смола

2.6.3 Еколошке ознаке на кочним плочицама везане за садржај метала у њиховом саставу

Много држава је по питању утицаја кочница на животну средину увидело опасност од загађења тешким металима и развило свест о опасности које са собом честице носе, како по питању животне средине, тако и по питању човековог здравља. Једна од земаља која је схватила проблем загађења животне средине честицама које настају хабањем кочница јесте Калифорнија. У 2017. години у Калифорнији је регистровано око 14860967 возила [175], док према подацима из [176], у првој половини 2018. године продато је око 10% нових возила које имају чистији погон возила (хибридна возила, електрична возила и *plug-in* возила). Како је код електричних и хибридних возила највећи извор честица управо систем за кочење, власти државе Калифорнија су одлучиле да уведу законску регулативу која је везана за састав фрикционих плочица. Таквом законском регулативом се дефинише дозвољена количина неких материја у фрикционим плочицама. Калифорнијски закон о фрикционим материјалима кочница на моторним возилима је ступио на снагу 1. јануара 2017. године [177]. У овој држави произвођач мора регистровати своје фрикционе материјале, односно материјале од којих се производи фрикциона облога и потребно је добити сертификат као одобрење. Акредитационо тело испитује фрикционе материјале применом методе и протокола SAE J2975:2013 или других алтернативних метода за одређивање процентуалног удела одређених материја у фрикционим материјалима. На основу добијених резултата мерења, *Одељење за контролу отровних материја у Калифорнији* на својој интернет страници објављује резултате испитивања и одређује ниво усаглашености са законском регулативом, односно оцену о утицају на животну средину. Како су и у Калифорнији дефинисане ознаке о еколошкој усаглашености према концентрацији одређених материја, у овом закону је дата и количина одређених материја за одређену ознаку, а која је приказана на слици 2.34. Када је у питању категорија В, материјали попут бакра и његових једињења не смеју прелазити 5% укупне масе фрикционог материјала након 1. јануара 2021. године, односно за категорију N, бакар и његова једињења у кочним плочицама не смеју да прелазе 0,5% укупне масе материјала након 1. јануара 2025. године [178]. На основу тога, у табели 2.9 су дате и граничне вредности одређених елемената да би се усвојио одређени ниво еколошке усаглашености.

Табела 2.9 Граничне вредности одређених елемената у фрикционим материјалима за одређене нивое еколошке усаглашености [179]

	Азбестна влакна	Кадмијум и његова једињења	Хром	Олово	Жива	Бакар
Ниво А	0,1%	0,01%	0,1%	0,1%	0,1%	-
Ниво В	0,1%	0,01%	0,1%	0,1%	0,1%	5%
Ниво N	0,1%	0,01%	0,1%	0,1%	0,1%	0,5%

Пре увођења Закона о фрикционим материјалима, 2010. године усвојен је Закон 346 (енгл. *Senate Bill No. 346*), који се односио на безбедност и здравље. Овај закон је са применом почео 2014. године и њиме је забрањена продаја било којих фрикционих материјала који се примењују на моторним возилима, а који садрже одређене састојке који прелазе одређене законске количине. Међутим, овај закон дозвољава, али и обавезује да до 31. децембра 2023. године, произвођачи и дистрибутери моторних возила и фрикционих материјала, као и трговци, морају да исцрпе своје залихе са елементима

који нису у складу са законом. Почев од 1. јануара 2021. године, закон забрањује примену фрикционих елемената кочница на моторним возилима који садрже више од 5,0% бакра у укупној маси, а од 1. јануара 2025. забрањује се примена фрикционих материјала који се користе за кочење (у кочном систему) на моторним возилима, а који садрже изнад 0,5% бакра по маси фрикционог материјала. Према овом закону, смеша кочних фрикционих материјала који се продају у Калифорнији не сме да садржи више од 0,01% кадмијума и његових једињења и 0,1% соли хрома по маси једне фрикционе плочице, али исто је забрањена употреба олова и његових једињења, живе и њених једињења и азбестних влакана [179]. У Калифорнији су ограничене количине бакра у кочним плочицама, међутим, произвођачима је дато довољно времена за развој нових материјала и технологија производње.

Бакар и други тешки материјали веома су опасни по животну средину и њиховим таложењем на путу и поновним подизањем у ваздух под утицајем ветра могу доспети до река или њива. Самим тим, имају утицај и на здравље човека, али и на рибе у рекама. До 2025. године, елиминацијом бакра у фрикционим облогама очекује се и елиминација бакра на путевима. Како би се и купци фрикционих облога кочница за своја возила упознали са еколошким карактеристикама купљених облога и са стандардима који важе у Вашингтону, прописано је да сваки производ од стране произвођача носи ознаку о испуњености стандарда [179]. На слици 2.34 постоје три класе фрикционих плочица и што знак има више затамњене површине то више фрикциона плочица задовољава стандарде, тј. еколошки је прихватљивија.



Слика 2.34 Ознаке фрикционих материјала за кочнице на моторним возилима према испуњености захтева о садржају законски прописаних материја: а) ниво А, б) ниво В, в) ниво N, г) примена ознаке на паковању кочних плочица [180]

Ознака приказана на слици 2.34а представља ознаку за фрикционе облоге нивоа А и таква ознака означава да су примена азбеста, кадмијума, хрома, олова и живе у границама законски дозвољених вредности. Ознака приказана на слици 2.34б представља ознаку нивоа В и означава да фрикциона плочица задовољава критеријуме као и фрикционе плочице нивоа А, с тим да је проценат бакра у укупној маси мањи од 5%. Ознака приказана на слици 2.34в представља ознаку фрикционих плочица нивоа N које испуњавају све захтеве као и ниво А, с тим да је проценат бакра у њиховој укупној маси мањи од 0,5% и оне представљају еколошки најприхватљивије фрикционе плочице за моторна возила [180]. На слици 2.34г је приказан пример ознаке на паковању кочних плочица.

У делу законске регулативе државе Вашингтон везане за безбедност и здравље (поглавље *Кочни фрикциони материјали*) прописане су вредности одређених материја у фрикционим облогама возила. Законодавац је узео у обзир да су одређени материјали за израду фрикционих облога веома битни и од значаја за безбедност транспорта и јавну безбедност уопште, али је узета у обзир и чињеница да су неки од тих материјала (нпр. бакар), јако штетни по здравље и животну средину [181]. Тако су законом предвиђени одређени услови продаје и производње фрикционих облога, као и одређена изузећа од

овог закона. Законом је предвиђено да ниједан произвођач, трговац на велико, трговац на мало или дистрибутер не може продавати или понудити у продају фрикционе облоге које садрже већу концентрацију одређених материја од прописане законом и то:

- азбестна влакна, у већој концентрацији од 0,1% у укупној маси облоге,
- кадмијум и његова једињења у већој концентрацији од 0,01% у укупној маси облоге,
- хром (VI) соли у већој концентрацији од 0,01% у укупној маси облоге,
- олово и његова једињења у већој концентрацији од 0,01% у укупној маси облоге,
- жива и њена једињења у већој концентрацији од 0,01% у укупној маси облоге,
- од 1. јануара 2021. године, ниједан произвођач, трговац на велико, трговац на мало или дистрибутер не може продати или понудити у продају фрикционе материјале који садржи више од 5% бакра и његових једињења,
- од 1. јануара 2025. године, ниједан произвођач, трговац на велико, трговац на мало или дистрибутер не може продати или понудити у продају кочне облоге које садрже више од 0,5% бакра и његових једињења по маси фрикционе облоге [181, 182].

2.7 Типови дискова кочнице према врсти коришћеног материјала

Постоји још један фрикциони елемент кочног пара који се хаба, а самим тим учествује у стварању честице које у себи садрже метале или друге штетне материје. Тај фрикциони елемент је диск кочнице, који је, углавном, израђен од неке врсте метала. У суштини, према извору [183] постоји шест различитих типова дискова према врсти материјала или легура који се користе за њихову израду, а то су:

- дискови од ливеног гвожђа,
- челични дискови,
- дискови израђени од вишеламираних челичних лимова,
- алуминијумски дискови,
- угљенични дискови и
- керамички дискови.

Сваки од претходно набројаних типова дискова има своје карактеристике по којима се издваја од осталих [183]. Дискови кочница од ливеног гвожђа су један од првих типова, али се и данас примењује на возилима. Ови дискови имају веома добре перформансе кочења и коректно функционисање. Међутим, недостатак је тај што имају већу масу, што утиче и на укупну масу возила.

Други тип диска кочнице је диск направљен од челика. Овај тип диска је пре свега примењен на спортским возилима, јер су челични дискови тањи, имају мању масу и добро провођење, односно одвођење топлоте. Негативна страна ових дискова је што могу бити склони деформацијама и бржем хабању. Деформације у смислу кривљења дискова су јако честе, што може изазвати већи ниво буке, али и пулсирајући осећај на педали кочнице.

Трећи тип дискова кочнице јесу дискови направљени од слојева челичних лимова. Они су јако отпорни на савијање и деформације, што их чини изузетно добрим за спортска возила, односно за она возила на којима је потребан дужи век трајања кочница под екстремним условима вожње. Примена ових дискова није уобичајена на путничким возилима - произвођачи их примењују само на спортским возилима.

Алуминијумски кочни дискови имају предност, јер се јако брзо хладе, али главни недостатак је тај што мењају своју структуру током загревања, односно имају нижу тачку топљења у односу на друге типове дискова. Веома често се користе на лаким возилима, а честу примену имају и на мотоциклима [183].

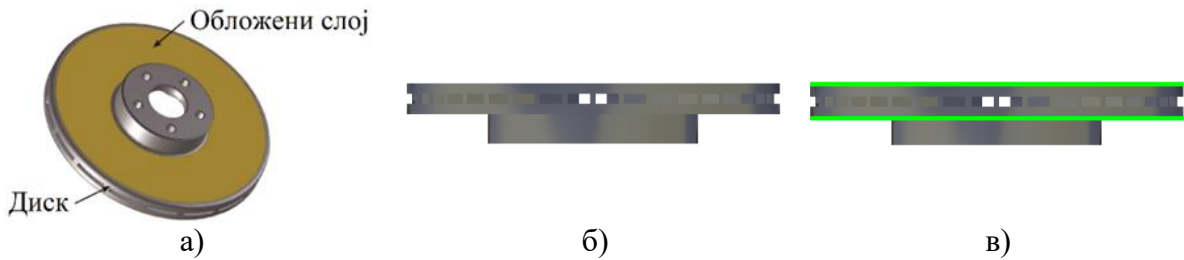
Угљенични дискови су дискови који су састављени од угљеника и гвожђа. Метални садржај у оквиру овог диска има улогу ојачавајућих влакана, односно да заштити диск од пуцања приликом великих термичких напрезања, али и смањи шум и вибрације кочница. У односу на остале, ови дискови имају већу цену [183].

Данас, један од најчешће примењиваних типова дискова кочница на спортским, али и на возилима високих класа, су керамички дискови. Они нуде јако добре перформансе у смислу одржања високе кочне силе, али могу издржати и високе притиске. У односу на друге дискове имају и већи топлотни капацитет [183].

Један од лидера у производњи кочних система на возилима *Brembo*, развио је угљенично-керамичке дискове кочница. Ови дискови имају добре кочне перформансе, а са друге стране малу масу. Ова компанија производи и развија овакве дискове још од 2002. године. Материјал високих перформанси, направљен од специјалне мешавине прашака, смоле и влакана у сложенем производном процесу, користи се од 1970-их година у кочним системима за примену у авиоиндустрији, а од 1980-их у мото-спорту. Године 2004. угљенично-керамички кочни систем је награђен наградом *Златни компас* од стране ADI (енгл. *Association for Industrial Design*). Угљенично-керамички дискови пружају значајне предности у погледу перформанси у мокрим и сувим условима, имају мању масу, обезбеђују удобност, отпорност на корозију и трајност [184]. Компанија *Brembo* нуди два типа ових диск кочница и то угљенично-керамичке дискове (енгл. *Carbon Ceramic Brakes – CCB*) и дискове од керамичко-композитних материјала (енгл. *Ceramic Composite Material – CCM*). Диск *CCB* је диск направљен тако да је језгро од керамичког материјала, ојачан је угљеничним влакнима и прекривен додатним слојем керамике да би се остварио ефекат трења који овај материјал има, а прекривене су обе стране диска по којима дејствују фрикционе облоге. Диск *CCM* је диск састављен од керамичког материјала, ојачаног угљеничним влакнима. У поређењу са *CCB*, код овог диска кочне површине нису покривене додатним слојем керамичког фрикционог материјала [185].

Данашње технологије израде дискова кочница омогућавају смањење хабања фрикционих површина, али тиме и смањење емисије честица које настају хабањем. У истраживању [186] је извршена анализа досадашњих истраживања у области облагања кочних површина и утицај на смањење емисије честица.

Примењује се облагање фрикционе површине диска кочнице другим материјалом и користе различите технологије наношења тог материјала на фрикциону површину диска [186, 187]. На слици 2.35 су приказани примери и графичко објашњење облагања фрикционих површина диска. На слици 2.35а је приказан диск који има слој за облагање, док је на слици 2.35б приказан профил диска који није обложен другим материјалом. На слици 2.35в приказан је профил диска који је обложен и материјал којим је диск обложен означен је зеленом бојом.



Слика 2.35 Облагање фрикционе површине диска: а) пример обложеног диска, б) необложена површина диска, в) обложена површина диска [186, 187]

Значај облагања фрикционих површина диска кочнице када је у питању смањење броја честица које настају приликом хабања је велики, што се може закључити на основу [188, 189], где је наведено да се емисија честица може смањити за 90%. Према [190, 191], облагање фрикционе површине диска доводи до смањења хабања диска до 75% и облагањем се продужава радни век диска за 30% у поређењу са диском без обложене фрикционе површине диска.

За облагање фрикционих површина диска се примењују различите методе, а у зависности од материјала и методе која се примењује, слој материјала који се наноси се може кретати од 0,1 μm до 1000 μm [192]. На основу [193], дебљина нанетог слоја на фрикционој површини диска се може кретати у опсегу од 10 μm до 21 μm . Материјали који се примењују за облагање фрикционе површине диска зависе, пре свега, од карактеристике која жели да се постигне тим облагањем.

На основу [194], различити материјали се могу применити за облагање, а који утичу на побољшање карактеристика као што су: отпорност на хабање (WC-, Ti- и Cr-C), отпорност на корозију (материјали на бази Co-), висока топлотна проводљивост (материјали на бази Al- и Cu-), високе максималне температуре (материјали на бази Ni-) и висока тврдоћа (материјали на бази Fe-). Веома често се за облагање фрикционих површина користе и комбинације различитих материјала и примена композитних материјала. Према [195], материјали који се користе за облагање кочних дискова могу се поделити у три групе: оксиди, карбиди и други алтернативни материјали који се могу користити за смањење хабања и формирања честица, али се свакако могу користити и у друге сврхе, као што су повећање отпорности на корозију, повећање коефицијента трења, итд. Керамичке превлаке ће постати један од главних праваца истраживања превлака кочних дискова због добрих триболошких карактеристика [196]. Карбиди су једињења угљеника са металима као што су волфрам, титанијум, тантал или нека комбинација, а примери ових материјала су: ZrC, HfC, VC, NbC, TaC, WC, W₂C, MoC и Mo₂C [197, 198]. Данас постоји низ различитих технологија које се примењују у циљу облагања, а према [199], за облагање се користе различити материјали и то: метали и легуре (челик, Cu-, Al- легуре, Ni-, M-Cr-Al-Y), карбиди (WC, TiC, Cr₃C₂), керамике (ZrO₂, Al₂O₃, оксиди Cr, Al₂O₃-TiO₂, MgO-CaO, TiO₂, CaF₂), кермети (Cr₃C₂ - (Ni-Cr), WC- Co, WC- (Co-Cr)) и композити (Al-Si + графит, Ni + графит, Al-Si + полиестер, CaF₂ и метални композити, Al-Si + полиамид, Al-Si + полиетилен).

За облагање дискова данас се могу применити различите методе. На основу [195, 200-202], формирана је табела 2.10, у којој су приказане методе које се могу применити за облагање дискова. Постоје у основи термичке и нетермичке методе облагања. Наравно, у примени су и друге методе, међутим, за облагање дискова кочница се најчешће примењују оне које су наведене у табели 2.10 [203].

Метода која ће се примењивати зависи од материјала који се користи за облагање и његових карактеристика. Свака од постојећих метода има своје карактеристике и представља специфични технолошки процес за облагање дискова [186]. *Kılıç* и *Mısırlı* су истраживали [204] утицај начина облагања диска од ливеног гвожђа са материјалом 20NiCrBSi-WC12Co и упоредили са необложеном диском. Дошли су до закључка да је „изгубљена маса“ обложеног диска (резултат хабања) смањена за 83%, док је изгубљена маса кочних плочица смањена за 37%.

Wahlström и др. [205] су применили четири различита диска од којих су два диска била обложена материјалом WC/CoCr, као и више кочних плочица. У односу на референтни диск од ливеног гвожђа, утврђено је да се облагањем може смањити емисија и до 50%. Конкретно у поређењу фриксионих парова, утврђено је да се облагањем број честица смањено за 43%.

Menarace и др. [206] су спровели истраживање на перлитно-ламеларном диску од сивог ливеног гвожђа који је био обложен са WC-CoCr (односно 86% WC/14%CoCr), где су резултати доказали да се код обложеног диска емисија честица смањује за приближно 25%.

Dizdar и др. [207] поредили су комерцијални диск од ливеног гвожђа и исти диск пресвучен Ni-WC, а коришћене су и две кочне плочице, са и без бакра у себи. Истраживање је показало да је концентрација грубих честица PM₁₀ смањена за око 30% ако је диск обложен, док је емисија финих честица PM_{2.5} била преполовљена.

Компаније *Bosch* и *Buderus Guss* су развиле диск који је обложен волфрам-карбидом (WC), при чему је емисија честица, према доступним подацима, смањена за 90% [208-210]. *Hesse* и др. [211] су испитали утицај облагања диска од сивог лива са истим материјалом (WC), при чему је утврђено да се смањује емисија честица PM₁₀ за 70%.

У истраживању [212] је истакнут значај материјала превлака којим се облаже диск на његово хабање. Утврђено је да је емисија честица већа код обложеног диска, али исто је порасла и брзина хабања диска (губитак масе обложеног диска је повећан за 81%).

Табела 2.10 Примењене методе у облагању диск кочница [193, 195, 199, 203]

Класификација	Техника наношења
Нетермичке методе облагања	Хромирање (енгл. <i>Chrome plating</i>)
	Плазма електролитичка оксидација (енгл. <i>Plasma electrolytic oxidation - PEO</i>)
	Ласерско наваривање (енгл. <i>Laser hardfacing</i>)
	Лук за пренос плазме (енгл. <i>Plasma transferred arc - PTA</i>)
Термичке методе облагања	Атмосферски плазма спреј (енгл. <i>Atmospheric plasma spraying - APS</i>)
	Суспендовани плазма спреј (енгл. <i>Suspension plasma spraying - SPS</i>)
	Метализација великим брзинама у струји продуката сагоревања (енгл. <i>High velocity oxygen fuel - HVOF spraying</i>)
	Метализација великим брзинама у струји ваздуха (енгл. <i>High velocity air fuel - HVOF spraying</i>)
	Прскање хладним гасом (енгл. <i>Cold gas spraying - CGS</i>)

3 ПРЕГЛЕД ПРЕТХОДНИХ ИСТРАЖИВАЊА

У овом делу докторске дисертације извршен је преглед методологија истраживања које су развијене од стране других аутора, као и примењених возних тестова/циклуса приликом истраживања утицајних фактора на концентрацију честица које настају приликом хабања кочница и посебно настанка честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Преглед претходно примењених методологија и возних тестова је био од круцијалног значаја за развој сопствене методологије коришћене у докторској дисертацији. Како је за истраживање примењен инерцијални кочни динамометар, било је потребно извршити преглед модификација динамометра које су спроведене да би се успешно могла мерити концентрација насталих честица које су производ хабања фриксионих парова кочница. Да би се извршила експериментална мерења и да би се дошло до ваљаних и корисних закључака, потребно је применити возне циклусе. На крају су дати закључци до којих су дошли различити аутори у својим истраживањима, а са циљем каснијег упоређивања резултата. Анализирани резултати су везани за утицајне факторе који су повезани са концентрацијом, односно емисијом насталих честица.

3.1 Методологије примењене у истраживањима

У истраживањима система за кочење су примењене различите методологије, међутим истраживања су веома осетљива, па нису све методологије погодне за истраживање хабања кочница и настанак честица. У овом потпоглављу су анализирани и описане методологије које се најчешће примењују у оваквим истраживањима:

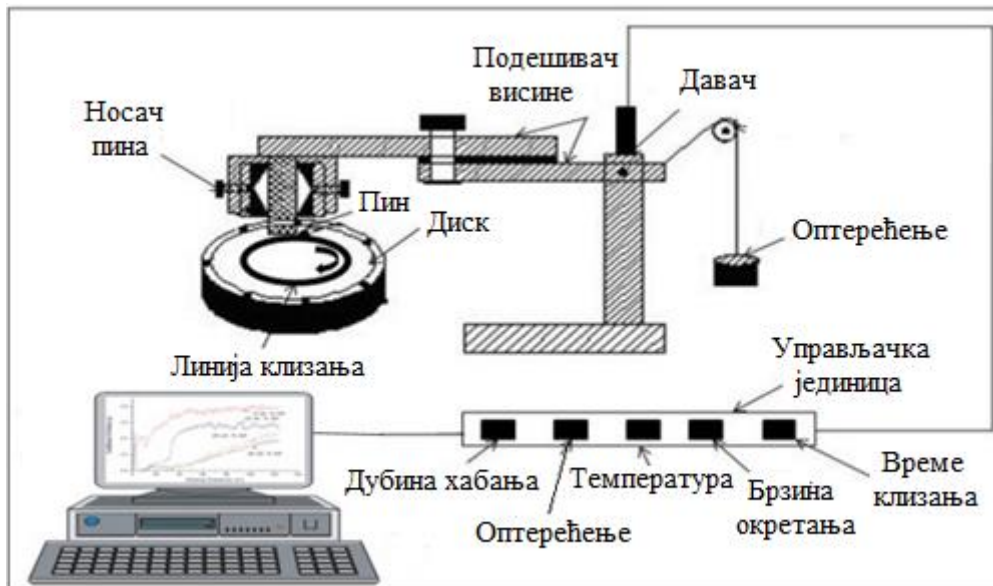
- трибометарска истраживања (примена трибометра),
- реална или путна испитивања која се спровode на возилу,
- симулационе методе, код којих се примењују рачунарске симулације и
- истраживања у којима се примењују инерцијални кочни динамометри или други кочни динамометри [213].

Сва поменута испитивања имају своје предности и недостатке који се могу огледати у цени коштања и прецизности, али и веродостојности података. Постоји велики број фактора који утичу на кретање и кочење возила на путу. Некада је неке од њих тешко идентификовати, па је лакше применити лабораторијска испитивања, у која спадају примена трибометра и инерцијалног кочног динамометра. Исто тако, приликом мерења емисије, односно концентрације честица на реалном путу или полигону, постоји могућност да се изврши мерење и других честица које нису настале хабањем фриксионих парова кочница. У циљу мерења само тих честица, у лабораторијским условима се често на уређаје додаје кућиште из кога се извлачи ваздух, а у коме се налази само кочница како би се сакупљале честице настале хабањем елемената кочнице. Путна испитивања се одвијају у условима који дају најтачније резултате, али је скоро немогуће у тим условима извршити раздвајање честица које настају хабањем кочница од честица које настају нпр. хабањем пнеуматика, подлоге пута или поновним подизањем честица са површине пута. У поређењу са лабораторијским испитивањима, путна испитивања су компликованија, јер је теже контролисати факторе који имају утицај на хабање и настанак честица.

3.1.1 Трибометарска истраживања

Једно од најчешће примењених трибометарских испитивања јесте испитивање које се спроводи на трибометру типа „пин на диску“ (енгл. *Pin-on-disc*). Ово је данас широко примењена метода која има за циљ испитивање триболошких карактеристика материјала

[213], па се често користи у испитивањима хабања материјала кочница и настанка честица [214]. Ова метода испитивања материјала се може користити за испитивање коефицијента трења између материјала, испитивање хабања материјала и других триболошких карактеристика [213, 215]. Један концепт оваквог трибометра је приказан на слици 3.1. Пин на диску се састоји од равне игле или кугле која се ослања и клизи по равном диску. Пин и плоча су израђени од материјала чије се триболошке карактеристике испитују. Пин је готово увек у фиксној тачки контакта и клиза изабраном брзином [216].



Слика 3.1 Пример „пин на диску“ типа трибометра [217]

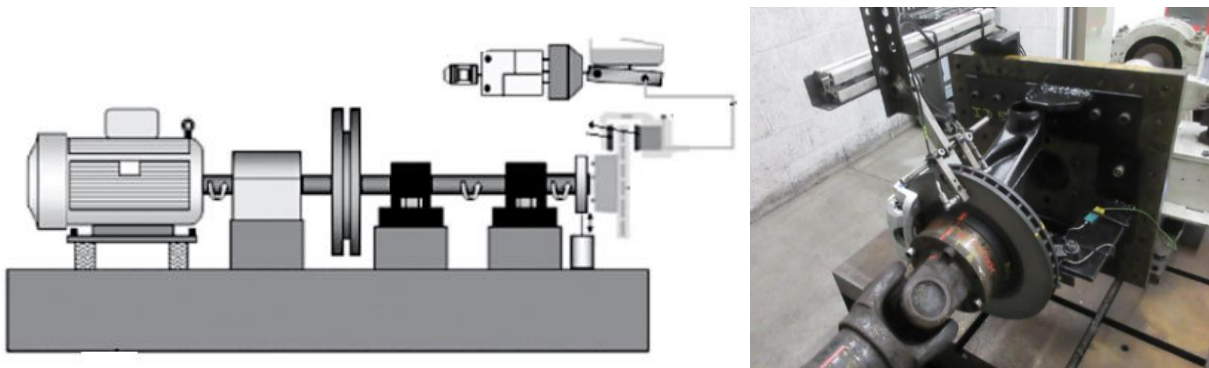
Ова метода спада у лабораторијско испитивање, где се испитивање врши у контролисаним условима који су слични до одређеног степена реалним [218]. Испитивањем хабања кочница овом методологијом, потребно је узети у обзир чињеницу да је ово поједностављен модел испитивања фрикционих парова и изводи се при условима константне брзине клизања и контактеног притиска између пина и диска. Према [107, 219], помоћу ове методе испитивања могуће је смањити трошкове и време испитивања, могуће је боље разумевање односа између трења и хабања, али исто тако је корисна и у развоју и примени нових материјала. У односу на друге методе испитивања фрикционих парова кочница, недостатак је тај што су димензије фрикционих парова мање него реалне кочнице, па је потребно водити рачуна о генерисаној топлоти између фрикционих парова која може бити већа него код реалних кочница [219]. Примена ове методе мође бити поуздана за процену хабања кочних плочица и њиховог трења при клизању пина од материјала кочне плочице по диску од сивог лива [220, 221].

3.1.2 Инерцијални кочни динамометар

Применом динамометра се могу добити резултати који су најприближнији резултатима реалних испитивања, из разлога што се на инерцијалном кочном динамометру користе делови кочног система као и на моторном возилу [219-222]. Како примена инерцијалног кочног динамометра, слика 3.2, представља лабораторијску методу, а примењују се реални делови кочница, предност се огледа и у томе што је у лабораторијским условима лако управљати условима и параметрима кочења [223]. Применом динамометра је могуће утврдити тачну емисију кочница у односу на путна испитивања, где се тешко може одвојити емисија хабања кочница од других емисија честица. Испитивање помоћу

кочног динамометра у лабораторији је брже и јефтиније, а погодно је за потврђивање карактеристика фрикционих материјала [224]. Пружа могућност симулације реалних ситуација, па чак и возних циклуса [135]. У односу на „пин на диск“ методу испитивања, предност инерцијалног динамометра је и та што се примењују реални делови кочнице који се примењују на возилу, па је могуће симулирати реалне кочне услове [219]. Испитивање помоћу кочног динамометра омогућава испитивања у контролисаним условима са чистим ваздухом, односно испитивања без других честица (које настају хабањем пута, пнеуматика, ...), већ само честица које настају хабањем кочница [225]. Недостатак оваквих уређаја за испитивање је у немогућности симулације климатских услова и промене брзина [107]. Како сви фрикциони механизми раде на принципу претварања кинетичке енергије у топлотну енергију, то омогућава и инерцијални кочни динамометар у лабораторијским условима.

Према изворима [6, 220, 226, 227], применом инерцијалног кочног динамометра се могу успешно одвојити и мерити само честице које настају хабањем фрикционих парова кочница од осталих честица које настају нпр. хабањем пнеуматика, па се примена инерцијалног кочног динамометра сматра најпогоднијом методом за испитивање настанка честица у лабораторијским условима, која може дати резултате који су најприближнијим оним у стварним условима кочења. Разлог је примена стварних елемената склопа кочнице, а уједно је могуће и у лабораторијским условима контролисати кочне факторе и симулирати оне у стварним условима.

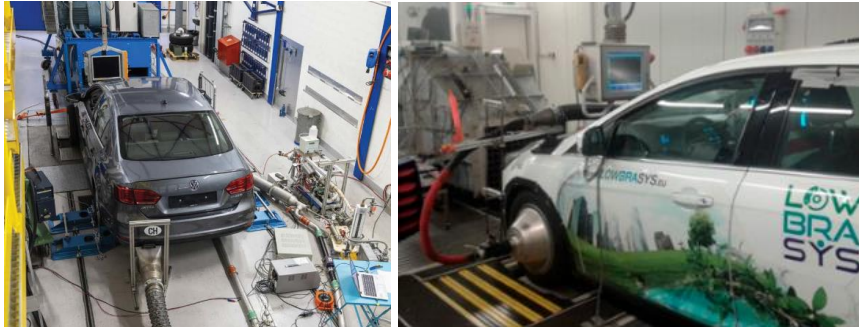


Слика 3.2 Инерцијални кочни динамометар [228, 229]

Иако је истраживање у докторској дисертацији базирано и спроведено применом инерцијалног кочног динамометра, важно је напоменути да постоје и друге врсте динамометара. Тако, у истраживањима [230, 231] је примењен динамометар са ваљцима на које се наводи возило, као што је приказано на слици 3.3. У овом случају се користи возило, али се мерења врше у лабораторијским условима. Да би се мерила емисија честица само од хабања елемената кочнице, извршена је доградња коморе за диск кочницу на динамометру.

Циљ тестирања кочнице помоћу инерцијалног динамометра је симулирање реалног процеса кочења на возилу, у коме се врши трансформација кинетичке у топлотну енергију уз смањење брзине замајних маса и расипање настале топлотне енергије у околину. Овај принцип се остварује помоћу великог броја замајаца за које је чврсто повезан диск кочнице помоћу вратила. Замајну масу убрзава мотор до задате брзине, а затим се кочницом она успорава до задате крајње ниже брзине или до потпуног заустављања [222].

Инерцијални динамометар је реалнији вид испитивања хабања кочница и настанка честица, у односу на „пин на диску“ методу. На динамометру се користе сви елементи система за кочење као на возилу (ротирајући диск, фрикционе плочице, кочна клешта, ...), док код методе „пин на диску“ то није случај. Динамометарским испитивањима могу се обезбедити услови испитивања слични реалним, што није случај са методом „пин на диску“, па она није меродавна метода за испитивање настанка честица. Последњих година, у радовима је више коришћено динамометарско испитивање настанка честица од система за кочење у односу на методу „пин на диску“ [232].



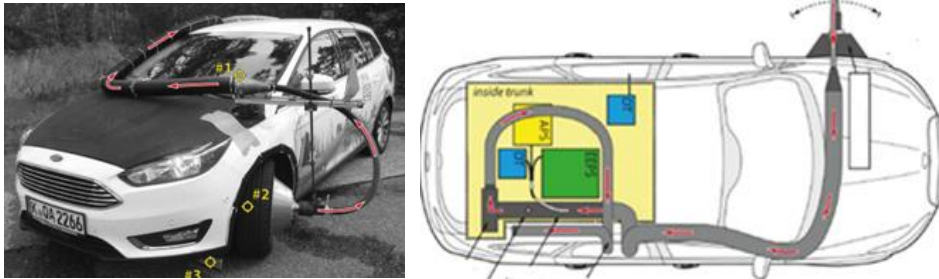
Слика 3.3 Динамометар са ваљцима [230, 231]

У претходном периоду се развијао стандарлизован начин за испитивање кочница са аспекта хабања и настанка честица и усвојено је испитивање помоћу кочног инерцијалног динамометра [233]. Према извору [234], могуће је доћи до корелација резултата мерења концентрације честица које настају хабањем фрикционих материјала кочница применом различитих уређаја и метода испитивања. Применом инерцијалног кочног динамометра могуће је извршити програмирање низа догађаја кочења којима се лако може управљати. Дакле, могуће је симулирати стварне параметре кочења, као што су стварне силе кочења које настају дејством кочних плочица на диск. За разлику од трибометара, динамометри су дизајнирани за „агресивне“ стандардне тестове (веће брзине, притиске кочења и успорења) [232, 235]. Приликом примене инерцијалног кочног динамометра, потребно је конструисати кућиште у коме би се налазила кочница, да би се мерила искључиво емисија честица које настају хабањем кочница и да не би дошло до мерења других честица које нису продукт хабања фрикционих парова.

3.1.3 Путна испитивања

Путна испитивања возила су скупа, дуготрајна, подложна утицају услова пута и променљивости временских прилика. Путна испитивања представљају најреалнији вид испитивања кочница, међутим то је најскупља и најсложенија метода испитивања хабања кочница и настанка честица. Проблем приликом путних мерења представља идентификација и раздвајање честица које настају од неких других извора и оних које настају хабањем система за кочење [236]. Проблем идентификације концентрације и количине честица које настају хабањем фрикционих елемената кочнице се најбоље може решити лабораторијским истраживањима. Код путних испитивања, потребно је водити рачуна и о начину постављања мерне инсталације. У истраживањима [237-239], испитиван је настанак честица кочница и мерење на две позиције на возилу, на предњој страни возила и у близини кочница. Овим испитивањем је утврђења јасна разлика у измереним концентрацијама честица у близини кочнице и на предњем делу аутомобила и утврђено је да су неки кочни догађаји директно повезани са повећањем концентрације честица. Прегледом резултата указано је да је концентрација измерених честица знатно већа у близини кочница, него она измерена на предњем делу возила. Кочнице имају

утицај на концентрацију насталих честица. Пример возила примењеног у путном испитивању концентрације насталих честица при хабању фрикционих парова је приказан на слици 3.4. На овом возилу је извршено мерење емисије честица које настају хабањем диск кочница на левој страни возила, тако је на точку постављено кућиште из кога се извлаче честице. Мерење и анализа честица је извршена помоћу уређаја са аеродинамичким анализатором величине честица *TSI 3321*, уређајем за мерење честица *TSI Dusttrak 8533* и уређајем за мерење честица из издувног система возила *TSI 3090*.

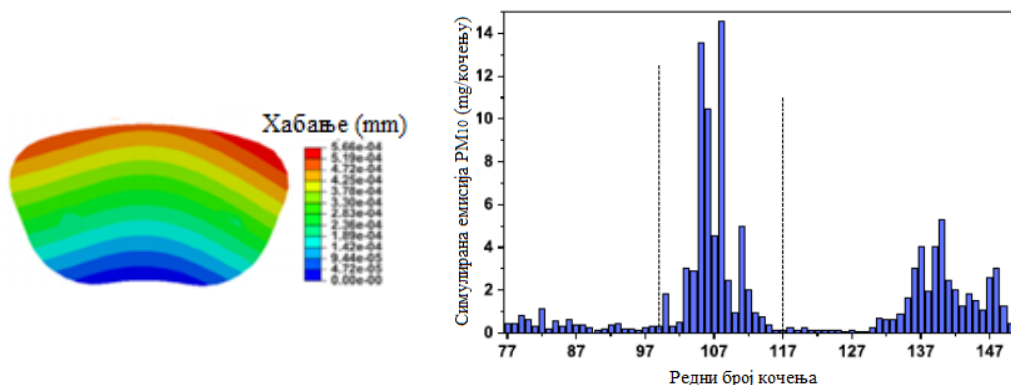


Слика 3.4 Возило примењено у путном испитивању емисије честица насталих хабањем фрикционих парова кочница [237]

3.1.4 Симулационе методе истраживања

Постоје и другачије методе испитивања настанка честица, а то је помоћу рачунарских симулација. Према истраживању [213], симулације не могу са великом прецизношћу симулирати количину насталих честица у поређењу са експериментално добијеним подацима. Грешка података добијених применом *FEA* симулације (енгл. *Finite Element Analysis*) је била 19% у односу на податке о количини насталих честица који су добијени експерименталним путем, лабораторијским мерењем помоћу инерцијалног динамометра [240].

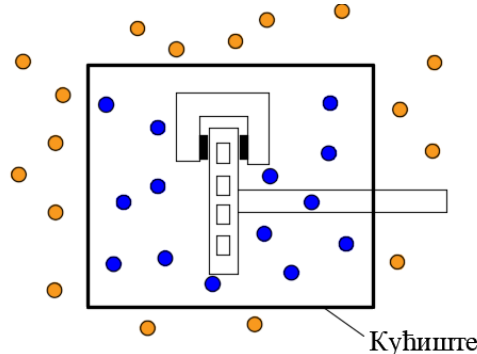
На слици 3.5 су приказани добијени резултати хабања кочне плочице, као и маса честица према редном броју симулације кочења приликом коришћења симулационих истраживања. У односу на друге методе истраживања, симулације представљају најјефтинији начин истраживања, при чему се могу у потпуности симулирати услови кочења, али исто тако се могу лако подешавати утицајни фактори. Свакако, у односу на друга истраживања, имају недостатак који се везује за потребу тачног математичког описивања и познавања природе хабања. Међутим, постоје неке појаве које софтвери не могу симулирати. За тачне и поуздане резултате потребно веома добро познавање: софтвера за симулацију, утицајних фактора и резултата лабораторијских испитивања.



Слика 3.5 Симулација хабања кочне плочице помоћу софтверског пакета (лево) и добијене масе честица PM_{10} по једном кочењу (десно) [241]

3.2 Модификације уређаја у циљу истраживањима емисије честица хабања фрикционих парова кочница

Примена било које методологије којом се врши мерење захтева, најчешће, одређене модификације на возилу или мерном уређају. Углавном, када су у питању инерцијални кочни динамометри и трибометри, израђују се специјално конструисана кућишта у којима се налази кочница, да би се раздвојила настала емисија честица од емисије која није продукт хабања кочница, као што је то графички представљено на слици 3.6. Кућишта се могу разликовати у зависности од примењеног уређаја, методологије, фактора и услова који се морају створити у кућишту.



Слика 3.6 Раздвајање честица помоћу кућишта: жуто - честице које нису последица хабање фрикционих парова, плаво - честице које су последица хабања фрикционих парова

У наставку су приказана и анализирана решења кућишта која су примењена у различитим лабораторијским истраживањима [242]. Чест захтев који се поставља пред истраживачима јесте увлачење ваздуха из спољашње средине, где постоји могућност да у кућиште уђу честице из окружења. Да би се избегле такве појаве, често се на кућишта постављају *HEPA* филтери (енгл. *High Efficiency Particulate Air*) који омогућавају пречишћавање ваздуха из спољашње средине.

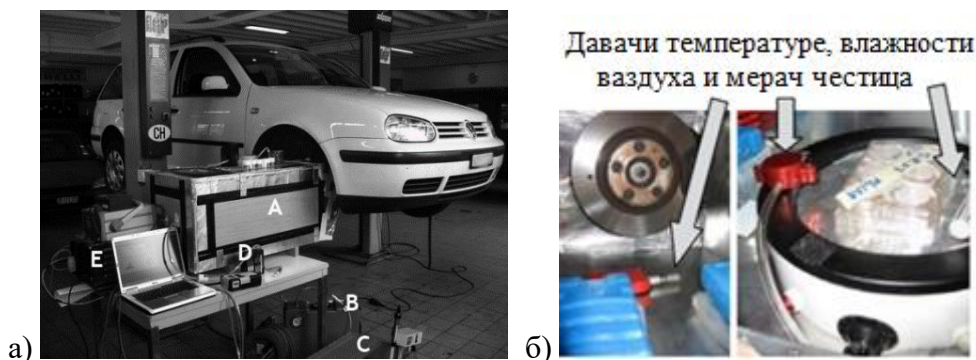
3.2.1 Динамометри са ваљцима

За испитивање које је спроведено на динамометру са ваљцима, при чему је коришћено реално возило, израђено је кућиште које је приказано на слици 3.7. Точак возила се окреће на ваљцима, те је кућиште је конструисано тако да га је могуће поставити на точак на возила, а да се кочница налази унутар кућишта. Из кућишта је извлачен ваздух са честицама да би се мерила настала емисија честица.



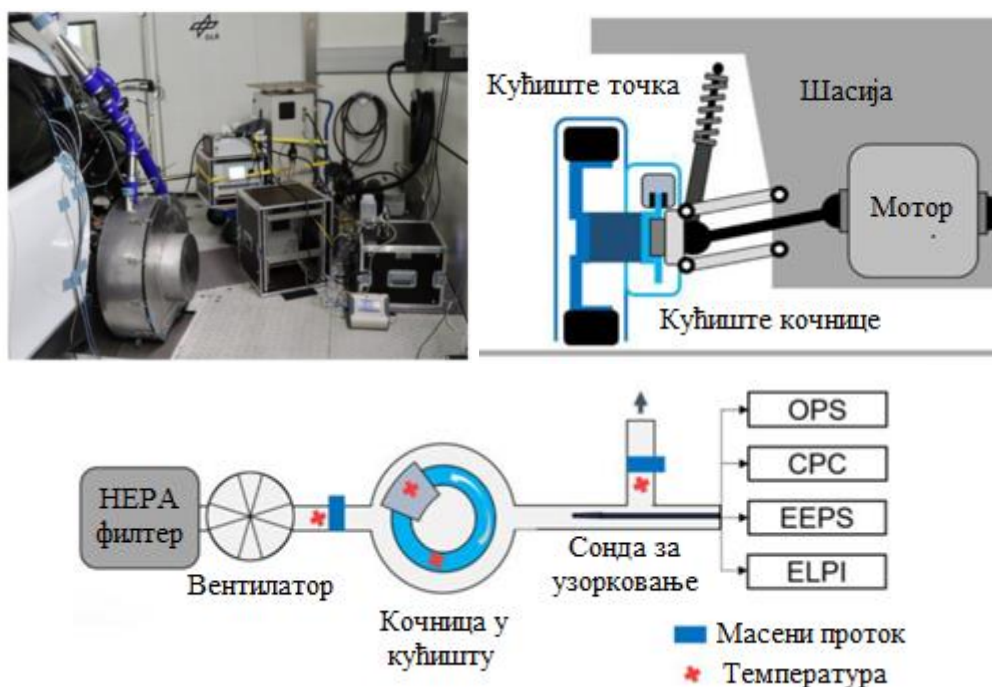
Слика 3.7 Дизајн кућишта која су примењена у истраживању [230]

Perrenoud и др. су извели истраживање применом динамометара са ваљцима [243]. У овом истраживању коришћено је 6 различитих возила, а приказ једног возила на коме је вршено мерење настанка честица је дат на слици 3.8а. На кочници, односно на возилу, постављено је кућиште у делу где се налази кочница. На овај начин омогућено је само хватање честица које настају хабањем кочница и нема уласка честица из окружења. Приказ неких делова исте мерне инсталације и решења постављања давача је дат на слици 3.8б [244]. Унутар кућишта налази се систем који омогућава увлачење честица, док је уређај за мерење концентрације ван њега. У кућишту се налазе и давачи за мерење влажности ваздуха. За одржавање стабилне температуре унутар кућишта примењен је водени систем хлађења.



Слика 3.8 Истраживање настанка честица на стварном возилу у лабораторијским условима: а) А - кућиште; В – НЕРА филтер и систем за извлачење ваздуха; С – пумпа за воду; D - пумпе за сакупљање на филтерима; Е – уређај за мерење величине и концентрације честица, б) делови мерне инсталације [243, 244]

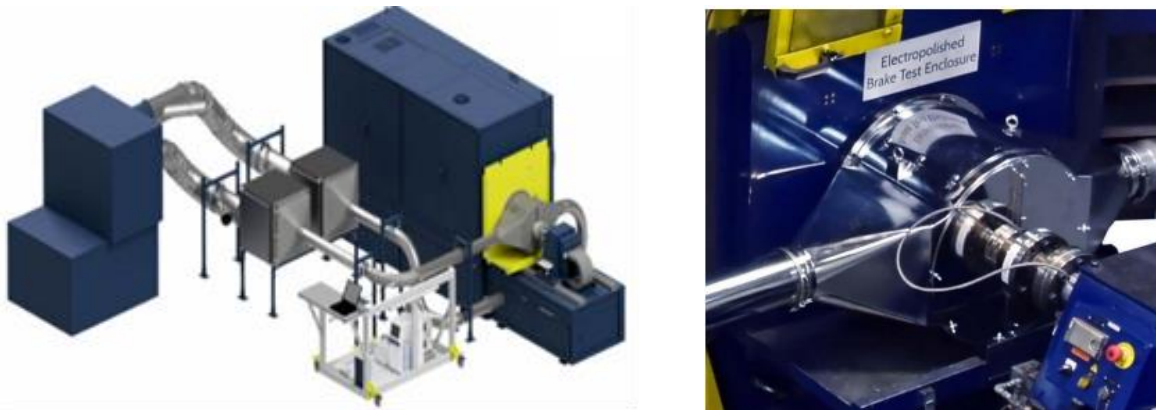
Примена возила у лабораторијским условима, односно на динамометарским ваљцима, је веома комплексна, у смислу раздвајања честица које настају хабањем кочница од честица из спољашње околине. Са циљем мерења концентрације честица, на слици 3.9 је приказано решење које је примењено у истраживању [93]. Кућиште у коме се налази кочница је одвојено од кућишта точка.



Слика 3.9 Конструкција кућишта за мерење концентрације насталих честица [93]

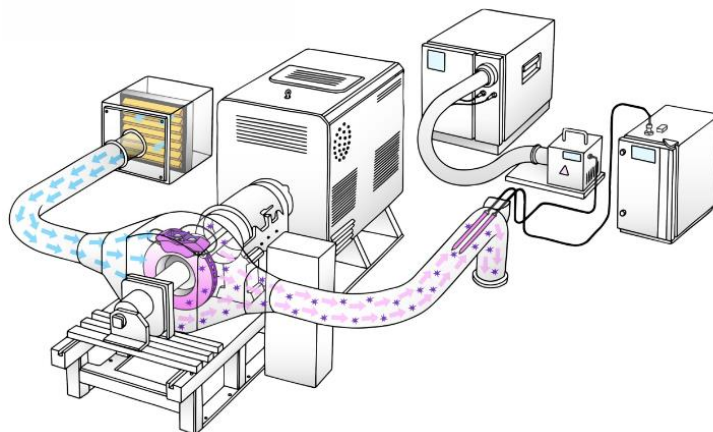
3.2.2 Инерцијални кочни динамометри

Једна од професионалних инсталација за мерење емисије честица од кочница компаније *LINK Engineering* је приказана на слици 3.10. Овакве инсталације имају широк дијапазон могућности испитивања. Оне могу да симулирају возне циклусе и омогућавају контролисање услова као што су влажност и температура ваздуха, хлађење кочница и др. На слици 3.10 је приказано и кућиште у којем је смештена диск кочница. Овај динамометар омогућава истраживачима да изврше низ различитих мерења и под различитим условима вожње који се успешно могу симулирати.



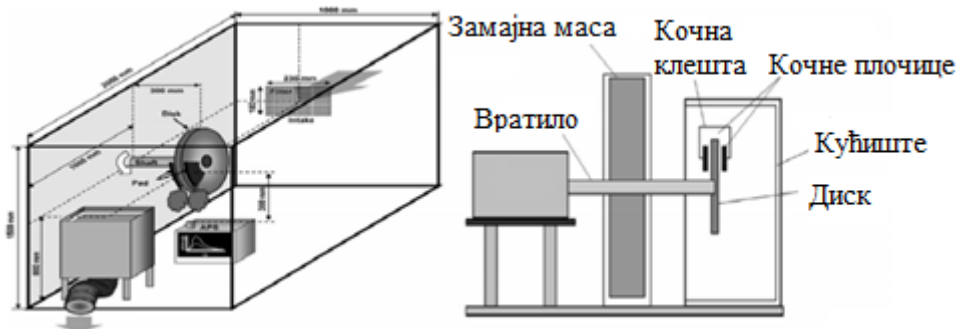
Слика 3.10 Инерцијални кочни динамометар компаније *LINK Engineering* за мерење емисије честица насталих при хабању кочница [245]

Један пример инерцијалног кочног динамометра, развијеног у истраживачком центру *IAV*, налази се у Гифхорну у Немачкој, а дат је на слици 3.11. Овај кочни динамометар омогућава мерење ултрафиних честица при различитим условима кочења. На слици 3.11 је приказан ток и начин увлачења честица, где се јасно види да ваздух који се увлачи пролази преко филтера и чисти се да би у кућиште ушао без честица. Ваздух пролази преко кочнице и извлаче се настале честице, а мере се: концентрација, број и маса честица.



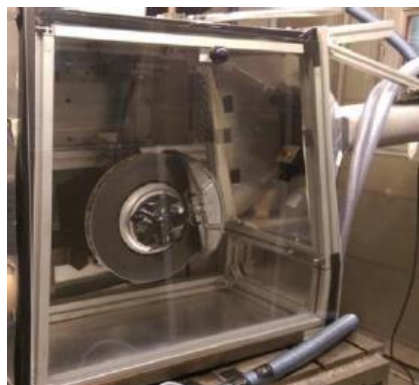
Слика 3.11 Инерцијални кочни динамометар истраживачког центра *IAV* [246]

У истраживањима [247, 248] коришћен је кочни динамометар приказан на слици 3.12. Сва опрема која је примењена се налази унутар кућишта, што је другачија концепција у односу на претходно анализирана решења. У овом случају долази само до пречишћавања ваздуха из кућишта и избацивања честица из претходног циклуса кочења и кућиште је већих димензија.



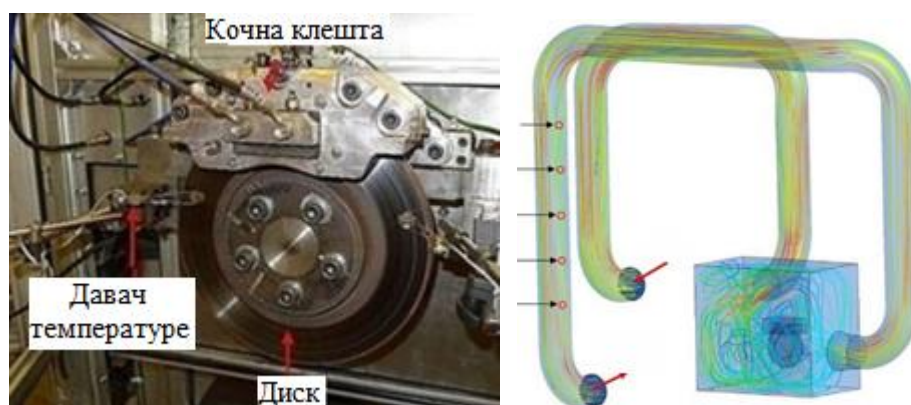
Слика 3.12 Кочни динамометар примењен у истраживању [120]

Пример кућишта за мерење концентрације честица које се налази на инерцијалном кочном динамометру је приказано на слици 3.13. Кућиште је конструисано од алуминијумских профила, док је са свих страна обложено плексигласом. Са предње стране кућишта се налази отвор кроз који се извлаче честице са ваздухом из кућишта. Ово је једноставна конструкција кућишта, лака за коришћење.



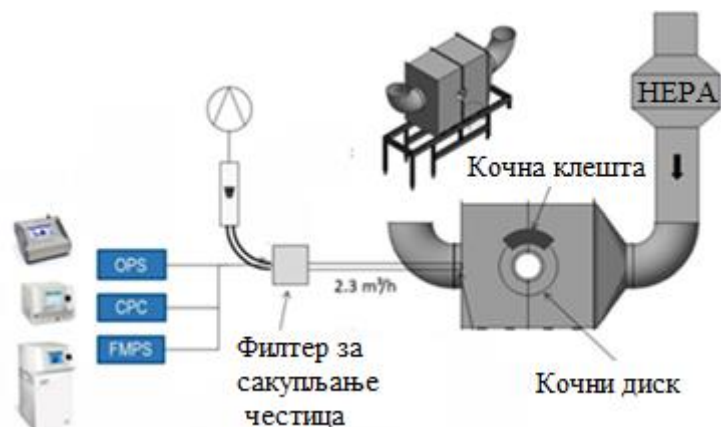
Слика 3.13 Кућиште примењено у истраживању [249]

На слици 3.14 је приказан пример диска унутар кућишта са опремом која је примењена у истраживању [250]. Овде је приказан и начин мерења температуре диска и фрикционих облога. На слици 3.14 десно приказан је ток уласка и изласка ваздуха из кућишта са кочница.



Слика 3.14 Опрема за мерење температуре диска и кућиште примењено у истраживању [250]

Инсталација за мерење насталих честица примењено у истраживању [251] је приказана на слици 3.15. У делу за извлачење ваздуха постављена је мерна опрема која омогућава мерење и анализу насталих честица, а са друге стране се налази филтер који спречава улазак честица које нису последица хабања фрикционих парова.



Слика 3.15 Опрема и кућиште за мерење настале емисије честица [251]

Могући начини сакупљања и увлачења честица су приказани и на слици 3.16. Као што је приказано на слици 3.16а, на кочним клештима постављен је уређај који омогућава директно сакупљање честица, што омогућава да не дође до распршивања честица. Са друге стране, на слици 3.16б приказан је пример додатка који има улогу да сакупља честице, а налази се унутар кућишта. Ово може бити значајно за ефикасније сакупљање честица, јер се налази у непосредној близини кочнице.

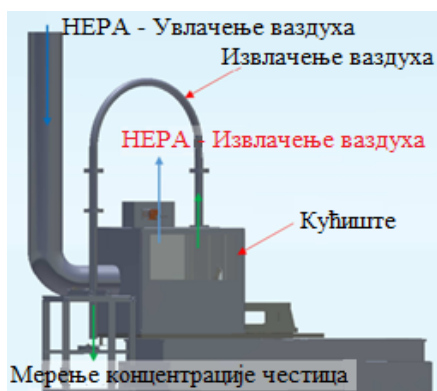


а)

б)

Слика 3.16 Додаци за сакупљање честица: а) додаток на кочници, б) додаток унутар кућишта [252, 253]

Инсталација за мерења емисије честица које настају хабањем кочница, примењена у истраживању [254], је приказана на слици 3.17. Овде је приказан је концепт решења за увлачење и извлачења честица из кућишта.



Слика 3.17 Мерна инсталација коришћена у истраживању [254]

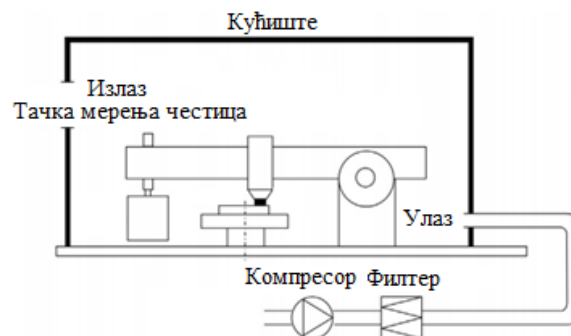
Пример кућишта које је коришћено на инерцијалном кочном динамометру је дато на слици 3.18. Кућиште је израђено од алуминијума, с тим да је дизајнирано тако да постоји ламинарно струјање и потпуно извлачење честица.



Слика 3.18 Кућиште за сакупљање честица [255]

3.2.3 Трибометарска решења

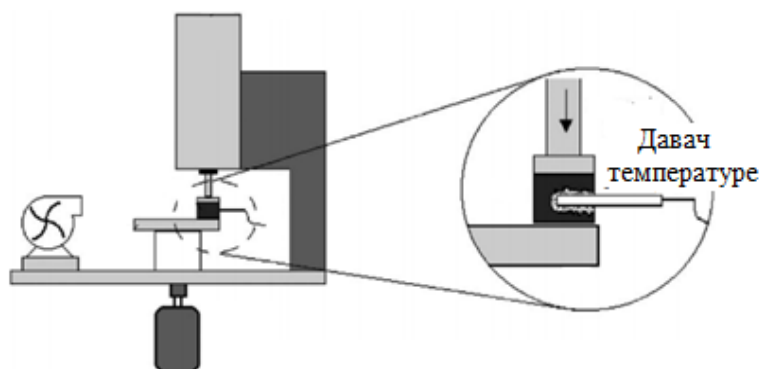
Wahlström и др. [256] су, у циљу испитивања хабања кочница и настанка честица, применили решење трибометра који је приказано на слици 3.19.



Слика 3.19 Трибометарско решење примењено у [256]

У овом случају, да би се сакупљале честице које настају хабањем пина по диску трибометра, оба елемента се налазе унутар кућишта и на тај начин се спречава мерење честица које нису настале хабањем. На месту убацивања ваздуха из спољне средине у кућиште постављен је *HEPA* филтер, као и компресор пре самог филтера, док је помоћу давача брзине ваздуха *TSI® 8455* мерен проток ваздуха. За мерење концентрације честица коришћено је три уређаја и то: електрични импактор ниског притиска *Dekati® (ELPI+)*, оптички мерач величине честица *TSI® 3330* и кондензациони бројач честица *TSI® 3772* [256].

На слици 3.20, је приказан трибометар коришћен за испитивање хабања кочница од стране *Sueva* [257]. Занимљивост у овој инсталацији је начин мерења температуре унутар кочних плочица, односно унутар пина. Давач је постављен унутар пина, па се мери температура у близини површине трења.



Слика 3.20 Мерење температуре пина на трибометру [257]

У истраживању [258], примењен је трибометар који је био повезан са уређајем за контролу влажности ваздуха, јер се испитивао утицај влажности ваздуха на емисију честица при кочењу. Овде је коришћено кућиште у којем су били смештени и пин и диск (слика 3.21).



Слика 3.21 Трибометар са контролом влажности ваздуха [258]

3.3 Возни циклуси и тестови у истраживању емисије честица

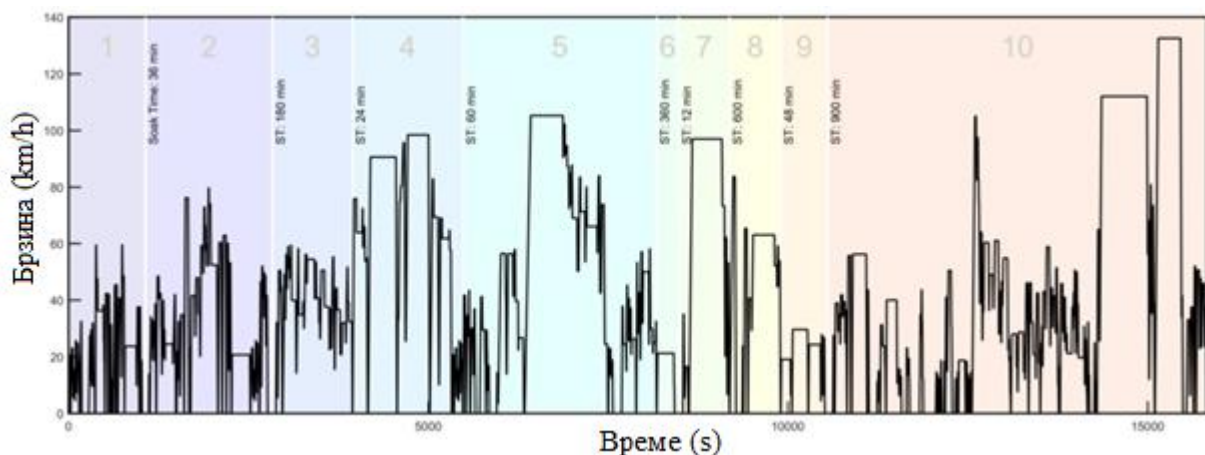
Када се користи инерцијални кочни динамометар за истраживања настанка честица услед хабања фрикционих парова кочница, примењују се различити возни циклуси или тестови који представљају дефинисане услове при којима долази до кочења. У возним циклусима постоји дефинисан редослед кочења, убрзања или кретања константном брзином и на тај начин се симулира кретање возила. Постоје тачно дефинисани услови при којима долази до кочења, нпр. дефинисана почетна брзина кочења, притисак кочења, успорење и слично. Дефинисање возних циклуса и тестова се врши на основу циља истраживања.

Још увек не постоје возни циклуси који су дефинисани за испитивање емисије која настаје хабањем кочница, али зато већина аутора користе возне циклусе кочења чија првенствена намена није испитивање емисије честица које настају при хабању, већ испитивање поузданости кочница или фрикционих парова. Тако су, на основу [259], приказани различити возни циклуси који се примењују у аутомобилској индустрији за

испитивање кочница чија примарна намена није испитивање хабања фрикционих парова, али и у различитим истраживањима у којима је анализиран настанак честица које су последица хабања кочница су примењени ти возни циклуси. Од стране различитих аутора су формиран сопствени тестови како би се извршила анализа и дошло до закључка о насталој емисији честица.

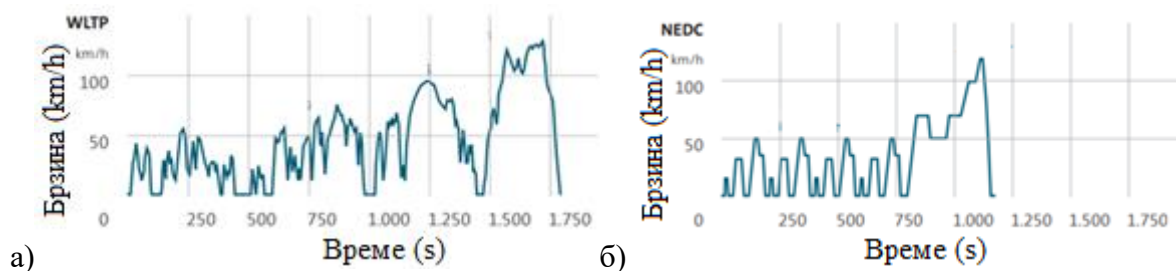
У овом потпоглављу извршена је анализа возних циклуса и тестова који су примењени у истраживањима везаних за емисију честица. Анализирани су и примењени фактори кочења на основу којих је формиран тест и дефинисани фактори кочења примењени у истраживању у дисертацији. Једна од оваквих анализа и прегледа је урађена пре самог експеримента и резултати истраживања су приказани у [260, 261], док су у наставку приказани тестови и возни циклуси који су примењени у другим истраживањима.

Један од возних циклуса који се често примењује у испитивању емисије честица кочница јесте *WLTP-Brake test driving cycle* (енгл. *Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*) [262, 263]. У раду [262] брзина је варирана од 40 km/h до 130 km/h, док је успорење варирано од 0,5 m/s² до 2 m/s². Тест обухвата 310 кочења, односно према [264] 303 кочења. У истраживању [265] примењен је *WLTP-Brake test driving cycle*, с тим да је према овој референци, минимална вредност успорења износи 0,9 m/s² док је максимална вредност успорења 2,2 m/s², просечна брзина износи 42 km/h, док је максимална брзина 132 km/h, изводи се укупно 303 кочења, а почетне температуре су амбијенталне за први циклус, док је за сва остала кочења остварена почетна температура од 40°C. На слици 3.22 је дат графички приказ и ток промене параметара у истраживању. У оквиру овог возног циклуса је прописано колико се циклуса кочења изводи и каква је варијација различитих фактора, као и када је потребно вршити кочење.



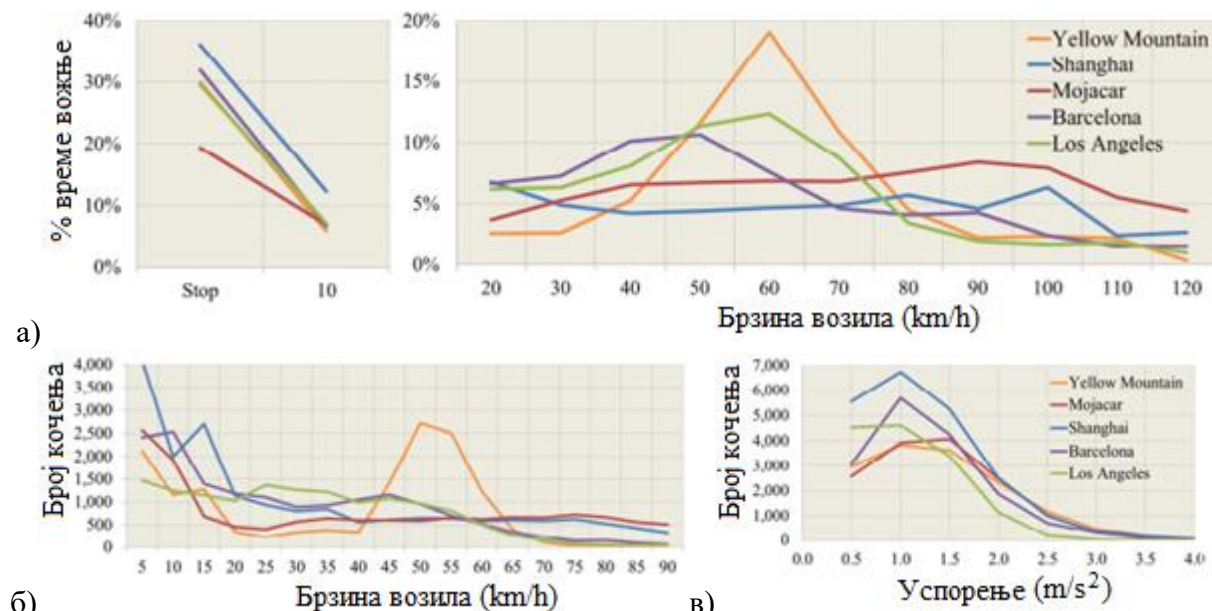
Слика 3.22 Примењени кочни циклус *WLTP-Brake test driving cycle* [262]

На слици 3.23 је дат упоредни приказ два теста који се често примењују у аутомобилској индустрији: *WLTP* и *NEDC* (енгл. *The New European Driving Cycle*). Ове две процедуре се разликују према примењеним брзинама, времену трајања циклуса и успорењима [265, 266]. Анализом *NEDC* возног циклуса може се закључити да максимална брзина износи 120 km/h, док је просечна брзина износи 34 km/h, док максимално успорење има вредност од 1,04 m/s², а просечно успорење је 0,5 m/s². Са друге стране, код *WLTP* возног циклуса, максимална брзина износи 131 km/h, минимално успорење 1,58 m/s², док је просечно успорење износи 0,39 m/s².



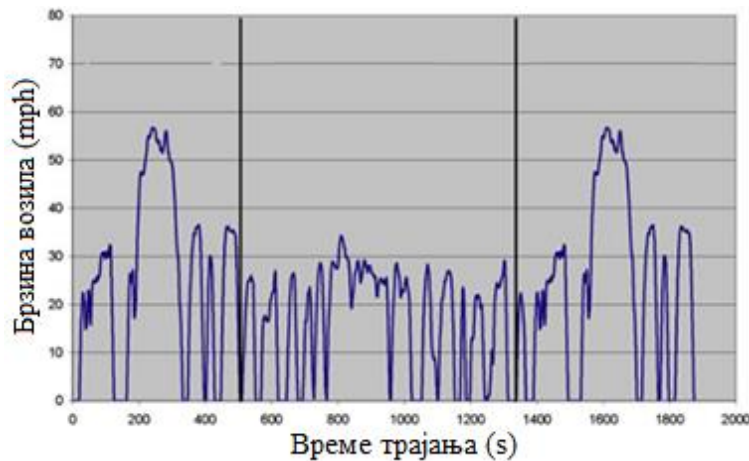
Слика 3.23 Примењени возни циклуси: а) WLTP, б) NEDC [267]

У истраживању [268] је извршена упоредна анализа различитих возних тестова који се користе широм света, попут оних који се изводе у Кини, Европи и САД. Тестови који се користе у Кини су *Yellow Mountain* и *Shanghai*, као европски тестови су приказани *Mojacar* и *Barcelona*, док је као тест у САД коришћен тест *Los Angeles*. На слици 3.24 су приказане вредности брзина, успорења и броја кочења приликом тестова, при чему је минимална брзина 20 km/h, док је максимална брзина 120 km/h, а у зависности од теста те вредности се разликују. Просечне брзине по тесту су: *Yellow Mountain* - 42 km/h, *Shanghai* - 42 km/h, *Mojacar* - 61 km/h, *Barcelona* - 39 km/h, *Los Angeles* - 39 km/h. Вредност успорења креће у интервалу од 0,5 m/s² до 4 m/s².



Слика 3.24 Упоредни приказ возних тестова: а) брзина возила у односу на време трајања теста, б) број кочења при одређеној брзини, в) успорење у односу на број кочења [268]

Возни циклус који је примењен у истраживању [269] је *FTP-75* (енгл. *Federal Test Procedure*) који спада у возни циклус САД. Графички приказ возног циклуса је дат на слици 3.25. На основу [270], средња брзина износи 34,12 km/h, дужина симулираног путовања износи 17,77 km, а дужина трајања возног циклуса износи 1877 s. Према [271], максимална брзина на овом возном циклусу износи 91,25 km/h. Неке од вредности вариране брзине су: 36,86 km/h, 49,57 km/h, 51,82 km/h, 76,44 km/h и 91,25 km/h.



Слика 3.25 Возни циклус Federal Test Procedure [269]

У истраживању [134] су коришћена два различита возна циклуса и то: *Urban Dynamometer Program - UDP*, а други возни циклус је симулација кочења према спортском магазину *Auto Motor und Sport - AMS*. За случај возног циклуса *UDP*, симулиране су различите почетне брзине кочења и успорења. Брзине које су примењене у овом истраживању имале су вредност у опсегу од 37 km/h до 89 km/h. Са друге стране, успорење је имало вредности у распону од $0,6 \text{ m/s}^2$ до $1,6 \text{ m/s}^2$. Почетна температура кочних плочица зависила је од категорије возила које се испитује, али за путничка возила, вредност почетне температуре кочних парова је износила од 54°C до 177°C . Било је тачно 24 различите варијације фактора кочења са 41 понављањем сваке комбинације фактора. *AMS* тест има укупно 10 понављања кочења са успорењем од 0,8 g, док је брзина на почетку кочења била 100 km/h.

У истраживању [272] је коришћено возило са кочницом која има момент инерције од $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Кочење је извршено од почетне брзине 60 km/h до крајње брзине 0 (потпуно заустављање возила). У истраживању је остварено 500 кочења у 5 циклуса. Током испитивања је варирана почетна температура кочења. У првом циклусу кочења почетна температура износила је 100°C , другом 200°C , трећем 300°C , четвртном 400°C и петом поново 100°C . Успорење је било 2 m/s^2 . Понављање последње температуре је урађено у циљу провере да ли је хабање исто након излагања високим температурама.

Perricone и др. [273] су у свом возном циклусу варирали следеће факторе: почетну брзину, успорење и почетну температуру. Возни циклус је подељен у неколико различитих фаза за неколико различитих путних услова. У табели 3.1 су приказани праћени параметри у истраживању односно током возних циклуса.

Табела 3.1 Варирани фактори у кочном циклусу [273]

Назив теста	Почетна брзина (km/h)	Крајња брзина (km/h)	Почетна температура диска кочнице ($^\circ\text{C}$)	Успорење (g)	Број кочења
Уходавање	50	4	100	0,25	100
Тест урбаног путева 1	50	4	150	0,25	20
Тест руралног пута 1	80	4	200	0,35	20
Тест руралног пута 2	100	4	125	0,4	20
Тест урбаног путева 2	50	4	150	0,25	20
Тест руралног пута 3	100	4	125	0,4	20

Возни циклус према стандарду *SAE J2707*, метода *B*, познат под називом *Block Wear Evaluation* примењен је у истраживању [274]. У табели 3.2 приказани су фактори кочења који су праћени. У овом случају примењене су брзине: 50 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 150 km/h и 180 km/h. Слична методологија коришћена је и у истраживању [275], где су примењени исти фактори, с тим да је примењен мањи број кочења.

Табела 3.2 Циклус примењен у истраживању [274]

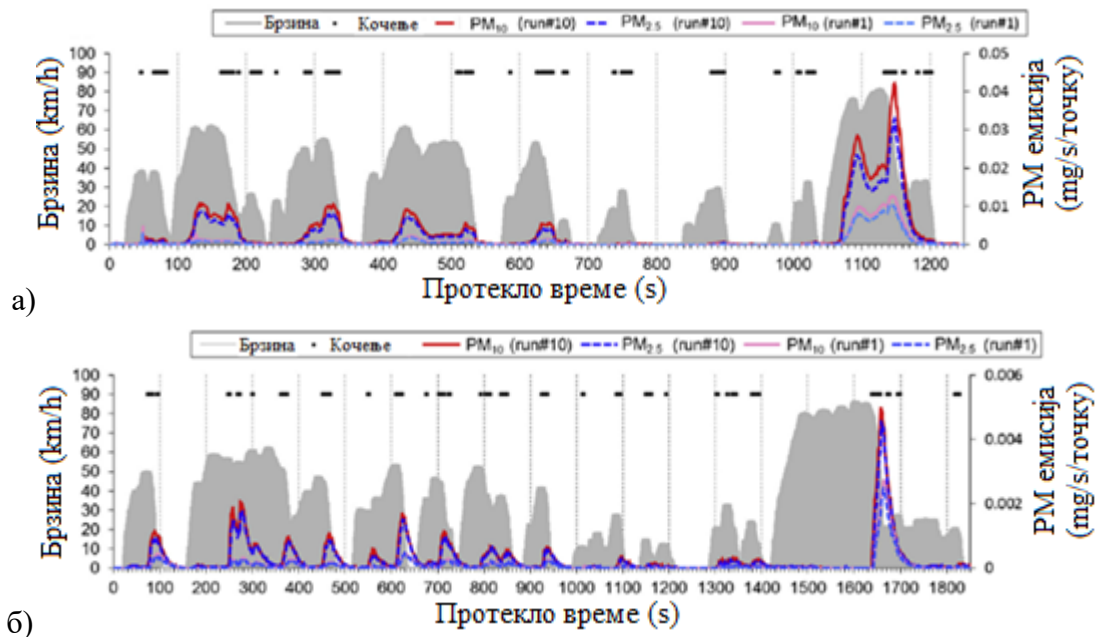
Назив блока теста	Почетна брзина (km/h)	Крајња брзина (km/h)	Почетна температура диска (°C)	Успорјење (g)	Број кочења
Уходавање	50	4	100	0,25	50
Градски блок кочења 1	50	4	150	0,25	20
Блок кочења на ауто-путу 1	150	80	150	0,4	10
Блок кочења на сеоском путу 1	80	4	200	0,35	20
Блок кочења на сеоском путу 2	100	4	125	0,4	20
Блок кочења на ауто-путу 2	180	80	100	0,5	5
Градски блок кочења 2	50	4	150	0,25	20
Блок кочења на сеоском путу 3	100	4	125	0,4	20
Спуштање на низбрдици	80	4	350	0,35	5

У истраживањима [276, 277], примењен је тзв. *AK-Master* тест, који се спроводи на основу стандарда *SAE J2522* [278]. Стандардом су прописни различити тестови [276-278], међутим, у истраживањима која су везана за хабање кочница користе се тестови „брзина/притисак“ и то серије од 6.4.1 до 6.4.5. Применом ових делова стандарда варирају се почетне и крајње брзине и притисци у кочном систему. У табели 3.3 су приказане примењене вредности почетних и крајњих брзина, док је за сваки тест у референци [277] вариран притисак од 10 bar до 80 bar.

Табела 3.3 Карактеристике теста кочења *AK-Master* [276-278]

Назив теста	Почетна брзина (km/h)	Крајња брзина (km/h)	Кочни притисак (bar)
4.1	40	5	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
4.2	80	40	
4.3	120	80	
4.4	160	130	
4.5	200	70	

У [135] коришћени су јапански тестови *JC05* и *JE08*. Јапански тест *JC05* се примењује за испитивање емисије издувних гасова путничких возила, док се тест *JC08* користи за емисију гасова теретних возила на дизел погон. Максимална брзина која се примењује у тесту *JC08* износи 81,6 km/h, док код теста *JE05* максимална брзина износи 87,6 km/h. На основу [279], просечна брзина која је примењена у возном циклусу *JE05* износи 26,94 km/h. Истраживање је реализовано на две кочнице путничких возила и једној за лако теретно возило, при чему је урађено укупно 50 мерења по једној кочници. На слици 3.26 су графички приказани примењени возни тестови и њихов ток.



Слика 3.26 Кочни циклуси: а) JC08, б) JE05 [135]

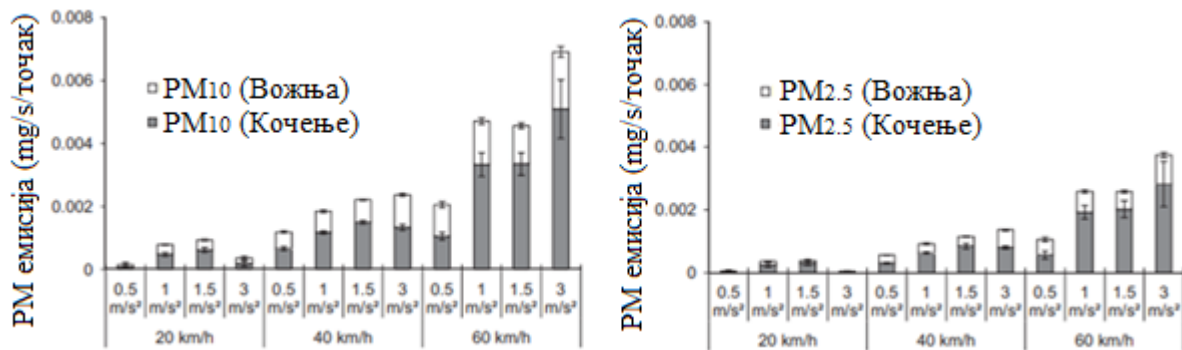
У истраживању [280, 281] примењен је кочни циклус који је примењен за испитивање настанка хабања кочница. У табели 3.4 су приказани параметри који су варирани и праћени у овом кочном циклусу. Вредност успорења је варирана у распону од $0,16 \text{ m/s}^2$ до $0,31 \text{ m/s}^2$, а вредности брзине су биле: 36 km/h , 52 km/h , 57 km/h , 70 km/h и 79 km/h .

Табела 3.4 Варирани фактори кочења у истраживању [280, 281]

Специфична енергија кочења (J/kg)	Почетна брзина (km/h)	Крајња брзина (km/h)	Почетна температура диска ($^{\circ}\text{C}$)	Успорење (g)	Број кочења
25	36	26	70	0,16	2
	36	26	90	0,16	18
	36	26	110	0,16	83
	36	26	130	0,16	56
	36	26	150	0,16	24
	36	26	170	0,16	8
75	52	28	70	0,23	5
	52	28	90	0,23	16
	52	28	110	0,23	22
	52	28	130	0,23	25
	52	28	150	0,23	12
	52	28	170	0,23	8
125	57	5	70	0,25	2
	57	5	90	0,25	3
	57	5	110	0,25	6
	57	5	130	0,25	8
	57	5	150	0,25	1
175	70	17	110	0,31	1
	70	17	130	0,31	2
	70	17	170	0,31	1
225	79	20	110	0,24	1

Још један од циклуса који је коришћен при истраживању настанка честица при хабању кочница је *3h-LACT* тест (енгл. *Los Angeles City Traffic*), а примењен је у истраживању [267]. Ово је један од тестова намењен за возила са америчког тржишта [282], и коришћен је у пројекту *LOWBRASYS*, али је примењена верзија возног циклуса трајала краће [283]. Максимална брзина која се постиже на овом тесту је 154,33 km/h, док је минимална 16,90 km/h и средња вредност брзине 53,79 km/h. Извршено је укупно 217 кочења, док је притисак у кочном систему увек био 15 bar при кочењу [284].

На слици 3.27 су приказани резултати добијени при мерењу емисије честица које је спроведено од стране *Hagino* и др. [115]. Поред резултата, приказани су и фактори према којима је вршено мерење. Мерење насталих тј. ослобођених честица вршено је приликом кочења и приликом поновног убрзавања возила. У односу на истраживање [135], у овом случају није коришћен кочни циклус, већ су варирани само одређени фактори кочења. Брзине које су вариране имале су вредности од 20 km/h, 40 km/h, и 60 km/h, док су успорења имала вредности 0,5 m/s², 1,0 m/s², 1,5 m/s², и 3,0 m/s². Успорење од 3,0 m/s² није примењено за теретно возило, због оптерећења.



Слика 3.27 Пример варијације брзине и успорењу возила [115]

У истраживању [285] вариран је притисак у систему за кочење и брзина возила. Примењене брзине износиле су 80 km/h и 100 km/h. Притисак у систему за кочење износио је 5 bar и 10 bar. За случај брзине од 100 km/h су вариране обе вредности притиска, док је за случај брзине од 80 km/h примењен само притисак од 10 bar.

У истраживању [286] дефинисане су и вариране вредности притисака у систему за кочење и почетне и крајње брзине возила. Број активирања износи 200 до 1000 пута, у зависности од теста. Почетне температуре кочница износиле су 150°C, за различите вредности притиска које су се кретале од 10 bar до 50 bar. Почетне брзине износиле су од 60 km/h до 180 km/h. У табели 3.5 приказане су вредности фактори кочења.

У истраживању [287] вариран је притисак у систему за кочење, а вредности су износиле од 10 bar до 80 bara. Коришћене вредности притиска у систему за кочење у [288] су: 0,25 МРа, 0,50 МРа, 1 МРа и 1,5 МРа. У [289] је вариран само притисак у систему за кочење и он је имао следеће вредности: 5 bar, 10 bar и 15 bar.

Табела 3.5 Примењени фактори у истраживању [286]

Број теста	Број кочења	Почетна брзина (km/h)	Крајна брзина (km/h)	Притисак (bar)
1.	1000	60	3	10, 20, 30, 40 и 50
2.	1000	80	53	
3.	1000	100	80	
4.	500	120	104	
5.	500	140	126	
6.	500	160	148	
7.	200	180	170	

Iijima и др. [247] су варирали брзине и успорења. У овом истраживању, коришћено је више кочних плочица, па се број варијација фактора разликовао у зависности од кочне плочице. У табели 3.6 су приказане вредности варираних фактора. Дефинисане брзине су износиле 40 km/h, 50 km/h и 60 km/h, док су успорења била 1,0 m/s², 2,0 m/s² и 3,0 m/s². У другом истраживању [290] истих аутора, за анализу настанка честица при хабању кочница примењене су брзине од 50 km/h и 60 km/h, док је успорење за обе брзине износило 3,0 m/s².

Табела 3.6 Карактеристике примењеног теста у оквиру истраживања [264]

Кочна плочица	Број кочења	Почетна брзина (km/h)	Успорење (m/s ²)
1	15	60	3,0
1	15	60	2,0
1	15	60	1,0
1	20	50	3,0
1	20	50	2,0
1	20	50	1,0
1	30	40	3,0
1	30	40	2,0
1	30	40	1,0
2	15	60	2,0
2	20	50	2,0
2	30	40	2,0
3	15	60	2,0
3	20	50	2,0
3	30	40	2,0

Истраживање [291] је обухватило два различита теста, у оквиру којих су вариране дефинисане почетне брзине кочнице и притисак између контактних површина фриксионих парова. Приликом теста, притисак је увек био 2,44 N/mm² (24,4 bar), док су вредности брзине износиле 19,8 km/h (извршено је 136 кочења), 62,6 km/h (извршено је 44 кочења) и 153,4 km/h (извршено је 18 кочења). Приликом теста, почетна брзина диска, односно дефинисана брзина возила је износила 62,6 km/h. Вариране вредности притиска између фриксионих парова износиле су 0,54 N/mm² (5,4 bar) и 2,44 N/mm² (24,4 bar), а извршено је укупно 44 кочења.

Од стране Економске комисије ОУН за Европу предложена је методологија лабораторијског мерења честица за лака теретна возила [292]. Усвајањем овог предлога би се прописала прва стандардна методологија, тј. регулатива за мерење честица које настају хабањем кочница. Методологија се односи на примену кочног инерцијалног динамометра, тако да су у предлогу [292] прописани сви почетни услови, карактеристике

инерцијалног кочног динамометра, као и возни циклус који би се примењивао. У будућим истраживањима би се могла применити управо предложена методологија и извршити поређење резултата мерења приказаних у овој докторској дисертацији.

За разлику од Европе, у Јапану већ постоји регулатива која прописује методологију за мерење емисије честица које настају хабањем кочница путничких возила. Ова регулатива, под ознаком *JASO C470*, прописује методологију мерења применом инерцијалног кочног динамометра [293], а прописана је још 2020. године.

3.4 Анализа утицајних фактора на емисију честица

У овом потпоглављу приказани су неки од резултата анализе фактора који могу имати утицаја на насталу емисију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ због хабања фрикционих елемената

3.4.1 Утицај температуре фрикционих парова

Men и др. [294] су применом динамометра извршили истраживање различитих фактора који утичу на емисију честица. Утврђено је да се емисија честица предњих и задњих склопова кочница не поклапају, а узрок може бити дистрибуција кочног притиска између фрикционих парова, разлика у температурама, као и коефицијенту трења. Утврђено је да смањење брзине доводи до повећања емисије честица. Примећено је да у распону температуре од 170 °C до 270 °C долази до драстичног повећања наночестица, што се може повезати са испаравањем органских материја у фрикционим плочицама.

Niemann и др. [251] су користили динамометар за испитивање утицаја температуре на настанак грубих, финих и ултрафиних честица. Коришћене су кочне плочице са органским и неорганским везивним материјалима у контакту са диском од кованог гвожђа. Утврђено је да температура фрикционих парова кочница има утицај на емисију честица. Критична температура за настанак ултрафиних честица при примени органског везивног материјала је око 180 °C, за случај неорганског везивног материјала критична температура има вредност од око 240 °C.

Paulus и *Kloda* [295] су применом инерцијалног кочног динамометра испитивали утицај различитих кочних циклуса и кочне енергије на насталу емисију честица. Емисија честица се може разликовати у зависности од кочног циклуса који се примењује, што указује на чињеницу да генерисана количина честица зависи од услова вожње. Максимална кинетичка енергија и максималне температуре имају највећи утицај на емисију насталих честица.

Öztürk и др. [296] дошли су до закључка да се са повећањем температуре, применом органских кочних плочица, повећава брзина хабања плочица, а температура до које је мерење вршено је 350 °C. Супротно органским кочним плочицама, *Chen* и др. [297] су приказали да се брзина хабања металних кочних плочица смањује са порастом температуре до 400 °C у контактної зони, а затим се брзина хабања повећава.

Aleman и др. [298] су применом трибометра истражили утицај различитих фактора на емисију честица, а применили су кочне плочице са ниским процентом метала и диск од ливеног гвожђа. Утврђено је да је контактна температура између фрикционих парова један од битних фактора који утичу на емисију честица, иако она не зависи од параметара система.

До закључка да и температура на контактної површини има утицај на настанак честица дошло се у истраживању *Aleman* и др. [299]. У овом истраживању коришћено је шест различитих фриксионих плочица (пет полуметалних и једна без азбеста) и диск од ливеног гвожђа. Повећањем температуре од 100 °C до 300 °C, емисија најфинијих честица се повећава, док се емисија грубих честица смањује. Критична температура је у опсегу од 165 °C до 190 °C и то је опсег када је проценат ултрафиних честица готово стопроцентан у укупном броју насталих честица. На температури испод критичне температуре, у укупном уделу насталих честица превладавају честице PM_{2.5}. Расподела честица је таква да укупна концентрација честица има максимуме на величинама честица 0,19 μm, 0,9 μm, и 1,7 μm, а у подручју критичне температуре настаје још један пик на величинама честица 0,011 μm до 0,034 μm (домен честица PM_{1.0}), док са повећањем температуре пик се са 0,19 μm помера на око 0,29 μm.

Mathissen и др. [231] су користили динамометар са ваљцима да би утврдили емисију честица које настају при кочењу. Утврђено је да емисија честица зависи од температуре елемената кочнице, односно да загревање елемената фриксионих парова доводи до повећања концентрације насталих честица. Доказано је да се део PM₁₀ честица и то око 30% ослобађа у догађајима као што је убрзавање возила.

Farwick zum Hagen и др. [237] су реализовали путна испитивања за анализу емисије честица које настају при возњи. Коришћена су два различита кочна пара, при чему је утврђено да једне кочне плочице емитују 18% мање честица. Емисија ултрафиних честица се повећава при температурама диска вишим од 170 °C. У уобичајеним возним условима, референтна температура не прелази 153 °C, тако да се у таквим условима не очекује емисија ултрафиних честица.

Nosko и *Olofsson* [300] су испитивањима на трибометру дошли се до закључка да применом органских фриксионих кочница и диска од ливеног гвожђа, при температури испод 200 °C, емисија ултрафиних честица је мања од емисије честица PM₁₀, док при температурама већим од 200 °C, емисија ултрафиних честица је много већа.

3.4.2 Утицај брзине (возила, диска, клизања)

Aleman и др. [299] су дошли до закључка да на емисију финих честица утиче и брзина клизања између фриксионих парова, па тако, са смањењем контактнoг притиска повећава се емисија ових фракција.

Candeo и др. [301] су применом инерцијалног кочног динамометра истражили утицај притиска кочења и инерцијалне брзине возила при кочењу на емисију честица. У свом истраживању су користили два типа кочних плочица и пратили утицај поменутих фактора на кочне плочице са ниским процентом метала и *NAO* кочне плочице. Утврђено је да је у оба случаја брзина имала значајнији утицај од притиска кочења. Хабање кочних плочица са ниским процентом метала је значајно зависило од брзине, док је за *NAO* кочне плочице утврђен мањи утицај брзине, док је утицај притиска био занемарљив. У поређењу ове две кочне плочице, *NAO* су имале мању емисију честица.

Hagino и др. у студији [115] су за испитивање емисије честица кочница применили инерцијални кочни динамометар, при чему су користили сопствени кочни тест, варирањем почетне брзине при кочењу и успорења возила. Дошли су до резултата да са

повећањем иницијалне брзине кочења возила и успорења долази до повећања концентрације насталих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$.

Gramstat и др. [302] су применом инерцијалног кочног динамометра истражили емисију честица које настају хабањем два типа кочних плочица: са ниским процентом метала и *NAO* кочних плочица, у контакту са диском од сивог лива. Пре свега, утврђено је да кочне плочице које нису уходане, односно није створен стабилан коефицијент трења, емитују много више честица. Примећено је да *NAO* кочне плочице имају другачије температурне карактеристике у односу на кочне плочице са ниским процентом метала, али се не може утврдити корелација са емисијом, већ она зависи од састава кочних плочица и триболошких механизма. Утврђено је да се са повећањем момента инерције, повећава и емисија насталих честица. Приказано је да се морају прећи одређени прагови брзине и температуре диска да би се могла утврдити емисија честица које настају при кочењу.

Chasapidis и др. [116] су у свом истраживању настанка честица применили динамометар са ваљцима. Примећено је шест различитих тестова, при којима су варирале амбијенталне температуре, почетне брзине кочења и успорења којима се возило зауставља. Дошло се до закључка да се са променом брзине кочења ослобађа више честица. Конкретно, кочење при брзини 50 km/h изазива повећање концентрације честица од 40% до 100% у односу на брзину од 30 km/h. Процентуално повећање зависи од успорења, али свакако је приметно да долази до повећања броја честица услед повећања брзине. У овом случају, амбијентална температура има занемарљив утицај на насталу емисију честица.

Истраживањем [303], током којег су примењени диск од ливеног гвожђа и фрикционе плочице са ниским процентом метала, дошло се до закључка да, са повећањем брзине клизања и притиска између фрикционих парова, долази до смањења брзине хабања честица. Међутим, до овакве појаве долази само док се не достигне температура од 200 °C после те температуре долази до повећања брзине хабања и настанка честица.

Olofsson и др. [304] су испитивање емисије честица при кочењу вршили помоћу трибометра. Пин и диск су израђени од истог материјала, а то је 100Cr6. Дошли су до закључка да се са повећањем брзине клизања и кочног притиска, повећава и количина насталих честица, тј. брзина хабања. Примењени су различити притисци у контакту материјала (776 МПа, 977 МПа, 1231 МПа, 1552 МПа и 2106 МПа) и различите брзине клизања (0,4 m/s, 0,8 m/s и 1,30 m/s). Идентификована су три значајна пика концентрације честица величине од 0,08 μm , 0,35 μm и између вредности величине честица од 2 μm или 4 μm .

Испитивањем контакта две врсте алуминијумских композитних дискова кочнице (Al-B4C и Al-SiC) и фрикционих кочних плочица са фенолном смолом, *Shorowordi* и др. [305], дошли су до закључка да се са повећањем брзине клизања смањује брзина хабања фрикционих материјала, али се смањује и коефицијент трења. Тако, може се закључити да брзина клизања има утицај на хабање фрикционих материјала, али интензитет утицаја зависи од врсте материјала.

Lawrence [306] је у свом истраживању дошао до закључка да брзина ротације диска при кочењу има утицај и када су у питању алуминијумски композитни материјали који се примењују за израду диска кочнице. Повећањем брзине ротације диска од 250 o/min до 1000 o/min, повећава се и брзина хабања диска кочнице.

Han и др. [307] су употребили више фрикционих кочних плочица са металним композитима бакра и дошли су до закључка да се брзина хабања повећава нагло при брзини диска од 500 o/min, док се после тога бележе мањи скокови и падови брзине хабања кочница.

Deng и др. [308] су испитивањем органских кочних плочица дошли до закључка да се са повећањем иницијалне брзине кочница, повећава и брзина хабања материјала. Разлог ових појава је што се са повећањем брзине повећава и температура у контактної површини, па се самим тим повећава и брзина хабања кочних плочица. На основу *Li* и др. [309], дошло се до закључака се са повећањем почетне брзине, применом диска и кочних плочица од материјала C/C–SiC, повећава се и брзина хабања.

3.4.3 Утицај вертикалног оптерећења возила

Songkitti и др. [310] су у условима путних испитивања извршили анализу утицаја оптерећења на емисију честица које настају при кочењу возила. У овом случају коришћено је хибридно електрично возило. Мерене су емисије честица $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ и PM_{10} и утврђено је да се са повећањем оптерећења, повећава и емисија насталих честица и то линеарно. При повећању оптерећења за само 60 kg до 70 kg, количина насталих честица се повећава за 25%. Посматрањем честица PM_{1} , долази до повећања настале концентрације све до оптерећења од 130 kg, али после тога, односно при већим оптерећењима од тога, не долази до повећања концентрације насталих честица.

У истраживању [311] анализиран је утицај различитих параметара на емисију честица, примењене су две врсте теста и дошло се до закључка да је 84% укупно емитованих честица, чији је извор возило, величине $PM_{1.0}$. Повећањем оптерећења возила, повећава се емисија честица. Када је реч о температури, примећено је да долази до знатног повећања емисије честица при температури од 130 °C.

Ahmad и др. [312] су истраживали утицај алуминијума и легура алуминијума у диску кочнице, па се дошло до закључка да се са повећањем оптерећења од 25 N до 100 N повећава хабање диска од легуре алуминијума 242 ојачаног са 30% честица алуминијума и ливеног гвожђа.

Oroumijeh и *Zhu* [313] су испитивали настанак честица од кочница и пнеуматика у условима путних испитивања. У истраживању су коришћена три возила различитих тежина. Испитивана је концентрација честица које настају при различитим оптерећењима возила и интензитету кочења. Показало се да је оптерећење значајан фактор који утиче на концентрацију честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Највећа концентрација је била код најтежег возила, док је најмања концентрација за ове врсте честица била у случају најлакшег возила. Интензитет кочења један од снажних предиктора који утичу на концентрацију честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} чији је извор систем за кочење.

Gawande и др. [314] дошли су до резултата да се са повећањем оптерећења повећава и хабање свих типова кочних плочица (металне, полуметалне, азбестне и керамичке), с тим да металне кочне плочице имају највећу брзину хабања.

3.4.4 Утицај притиска (у систему за кочење, у контакту између фрикционих парова)

Mamakos и др. [315] су у свом истраживању користили кочни динамометар у циљу испитивања неких фактора који утичу на емисију честица при више режима кочења. У различитим режимима кочења варирани су притисци кочења, као и почетне и крајње брзине кочења и број кочења. Утврђено је да се при вишим кочним притисцима повећава емисија тј. број честица. Испарљиве честице су уочене током узастопних оштрих кочења, када су фрикциони елементи кочнице доведени до повишених температура, што потврђује значај температуре при настанку честица.

На основу испитивања [123] дошло се до закључка да на концентрацију и величину насталих честица значајан утицај има кочни притисак између фрикционих парова. У овом случају, примењене су брзине клизања од 0,275 m/s и 5 m/s. Примењени притисци за брзине клизања од 5 m/s су: 0,125 МПа, 0,375 МПа, и 0,625 МПа. За тест брзином од 0,275 m/s, вредности притисака износиле су: 0,75 МПа, 1,0 МПа и 1,25 МПа.

Perrenoud и др. [243] су у свом истраживању користили шест различитих возила на којима су вршена испитивања и упоређивања емисије честица. Возила су се разликовала према својим карактеристикама и кочним плочицама. Испитивања су рађена за три режима кочења и то: потпуно заустављање (интензивно кочење), умерено успоравање и режим без кочења. Постојала је значајна разлика у концентрацијама честица које су биле створене, а које су аутори приписали типу возила и сили кочења, али и саставу кочних плочица. Кочнице ослобађају велику количину финих и ултрафиних честица и значајно је велика концентрација честица при интензивном кочењу, које у себи садрже метале.

Vao и др. [316] су истраживали утицај пораста притиска на брзину хабања за случај органских фрикционих материјала. У истраживању је брзина диска износила 7,5 m/s, док су вредности притиска износиле: 0,58 МПа, 0,78 МПа, 0,98 МПа, 1,18 МПа, 1,38 МПа и 1,58 МПа. Резултати истраживања показали су да брзина хабања до вредности притиска од 0,98 МПа има благи пораст са променом притиска. Даљим порастом притиска до 1,58 МПа, хабање је интензивно. Испитивањем металних кочних плочица у истраживању аутора *Yu* и др. [317] показано је да је брзина хабања овог типа кочних плочица приближно линеарна са порастом притиска.

3.4.5 Утицај примењених материјала у фрикционим паровима

У истраживањима [318, 319] је применом инерцијалног кочног динамометра праћен утицај различитих кочних плочица (примењене су по две *NAO* и кочне плочице са ниским процентом метала), као и диска од сивог лива и једног диска обложеног са *WC*-. Резултати указују на чињеницу да фрикциони материјали који се примењују могу имати значајан утицај на емисију честица. Једна кочна плочица у тесту може имати релативно малу емисију према броју честица, а високу према маси честица. Од материјала који је примењен зависи дистрибуција честица према величини.

Sanders и др. [113] су утврдили да хабањем *NAO* кочних плочица настаје три до четири пута мања концентрација и маса честица у односу на кочне плочице са ниским процентом метала. *Wahlström* и др. [320] су дошли до закључка да плочице са ниским процентом метала имају већи коефицијент трења у односу на *NAO* кочне плочице, па се тиме повећава хабање диска кочнице, па је и концентрација емитованих честица већа. *Kukutschová* и др. [321] су утврдили да се полуметалне фрикционе плочице хабају мање

у односу на *NAO*, али су и ослобођене честице мање. Према *Bonfanti* [18], најмањи утицај на хабање диска имају *NAO* кочне плочице, док полуметалне и поготово плочице са ниским процентом метала доводе до веће брзине хабања диска кочнице.

Matejka и др. [322] су применили инерцијални кочни динамометар да би испитивали полуметалне кочне плочице и диск од сивог лива применом редукованог *Los Angeles City Traffic (LACT)* возног циклуса. Нове кочне плочице производе знатно више честица PM_{10} од оних које се дуже користе, јер се понављањем мерења емисија смањивала. Утврђено је да су температура и дужина кочења најзначајнији фактори на емисију честица, али да зависе и од почетне и крајње брзине, као и успорења.

Perricone и др. [192] су применили више различитих метода за истраживање настанка честица, као и више различитих смеша у материјалу фриксионих плочица са циљем утврђивања утицаја на насталу емисију честица. Примењени су трибометар, динамометар, као и рачунарска симулација. За испитивање је коришћено шест различитих материјала, односно шест различитих смеша материјала кочних плочица. У овом случају, утврђено је да се променом састава кочних плочица, мења и концентрација насталих честица. Примењени материјали и технологија израде, као и обрада кочних плочица имају утицај на концентрацију честица. Примена биосмоле уместо комерцијално примењене смоле у кочним плочицама је могућа, али када је у питању хабање, брзина хабања зависи од процента биосмоле у укупном саставу материјала кочних плочица [174].

Lui и др. [323] су испитивали утицај бакра у кочним плочицама на насталу концентрацију честица хабањем кочница тако што је испитивана кочна плочица без бакра и једна са бакром, применом „пин на диску“ трибометра. Резултати су показали да кочне плочице које не садрже бакар стварају значајно више честица у односу на оне које садрже бакар.

Barros и др. [324] испитивали су утицај бакра у укупној маси кочне плочице (0%, 10% и 30% бакра у маси једне кочне плочице) на хабање кочних плочица и диска. Вишак или недостатак бакра у фриксионим плочицама доводи до повећања брзине хабања. Повећање почетне температуре диска доводи до повећања брзине хабања без обзира да ли се у кочним плочицама налази бакар или не, с тим да, када нема бакра или када је већи проценат бакра, долази до значајнијег повећања брзине хабања. Када је у питању диск, већи проценат бакра у кочним плочицама доводи до смањења брзине хабања диска на ниским температурама (100 °C). На већим температурама (200 °C и 300 °C), брзина хабања диска није показала зависност од процента бакра у кочним плочицама.

Hesse и др. [211] су применом инерцијалног кочног динамометра и *WLTP* теста истражили утицај материјала диска кочнице и температуре на емисију честица. Коришћени су дискови различитих димензија и то: од сивог лива, диск обложен тврдом металом (пресвучен WC-) и диск од угљенично-керамичког материјала (CC). Применом диска који је обложен WC- и диска од угљенично-керамичког композитног материјала може се постићи смањење емисија честица PM_{10} до 70%. У зависности од материјала диска, температура има различит утицај на насталу емисију честица. Значај облагања дискова у циљу смањења емисије насталих честица у процесу кочења и смањења брзине хабања је утврђен и у [325]. У овом истраживању је приказано да се могу користити различити материјали за облагање површине кочних дискова, као и технологије којима се може смањити брзина хабања кочница и емисија честица.

Agudelo и др. [326] су применом различитих возних циклуса истраживали утицај тестова на емисију честица за кочне плочице *NAO* и кочне плочице са ниским процентом метала. Утврђено је да тест има утицаја, али исто тако да постоји гранична температура после које се повећава емисија насталих честица. Кочнице које имају ниски проценат метала у себи стварају већу количину честица, односно емисију кочница. Претходно наведено указује на значај врсте коришћених материјала у кочним плочицама.

Ria и др. [327] су применили кочни динамометар и испитивање на путу, при чему је праћен утицај састава фриксионих плочица на њене карактеристике. Примењено је десет различитих смеша материјала. Испитиване су различите карактеристике, као и губитак масе плочице на крају испитивања. Утврђено је да састав фриксионих плочица има утицај на губитак масе на крају испитивања. Ово се може довести у везу и са насталом емисијом честица, у оквиру које се похабани материјал ослобађа у облику честица.

Према *Joо* и др. [328], на хабање фриксионих кочних плочица утиче и распадање везивног материјала, што је директно везано за температуру. Према овом извору, највећа концентрација честица $PM_{2.5}$ настаје при температурама већим од температуре разлагања везивне смоле и да је управо тада највећа густина честица. Мора се водити рачуна и о примењеним везивним материјалима у кочним плочицама, односно везивни материјали морају имати већу топлотну отпорност да би се смањила емисије честица.

Ma и др. [329], истраживали су угљенично-керамичке дискове и кочне плочице помоћу инерцијалног кочног динамометра. У овом случају коришћен је *C/C-SiC* диск (означен са *SD*), *C/C-SiC* кочне плочице (означене са *SP*) и кочне плочице од *C/C-SiC* које су модификоване тј. садржале су $FeSi_2$ (означене са *FP*). Испитивана су два кочна пара, односно две комбинације фриксионих парова и то *SD-SP* и *SD-FP*. Комбинација фриксионих парова *SD-FP* у односу на *SD-SP* има мању брзину хабања диска у различитим условима кочења (различите брзине и кочни притисци), посебно у ситуацијама када је енергија кочења била велика.

Li и *Yan* [330] су упоредили триболошке карактеристике металне кочне плочице са кочним плочицама од *C/C* и *C/C-SiC*. У свим случајевима је примењен диск од *C/C-SiC*. Кочна плочица од *C/C-SiC* показала је веома добру отпорност на хабање при веома великим брзина. Металне кочне плочице су се показале као најпогодније ако је брзина испод 49 km/h, због своје ниске брзине хабања.

3.4.6 Утицај успорења (возила, диска)

Hagino и др. [135] су применом инерцијалног динамометра, а коришћењем јапанских возних циклуса *JC08* и *JE05*, утврдили да се са променом успорења мења и концентрација насталих честица. При различитим брзинама мења се и расподела насталих честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Исти аутори су у истраживању [115] утврдили да се са повећањем успорења возила, повећава и концентрација насталих честица.

Kwak и др. [331], на основу комбинованог испитивања (путног испитивања и симулатора путног испитивања), дошли су до закључка да се у процесу успоравања тј. кочења знатно повећава концентрација честица (PM_{total} , PM_{10} , и $PM_{2.5}$), али исто тако и концентрације гвожђа у честицама. Према овом испитивању, величина честица које настају хабањем кочница су у распону од 1 μm – 10 μm , али нису веће од 10 μm .

Применом статичког теста возила и шест најчешће коришћених возила, у студији [247, 248], дошло се до закључка да емисија честица зависи од типа возила и од начина кочења. У овој студији се дошло до закључка да, поред утицаја типа возила на настанак ултрафиних честица, значајан утицај има и начин кочења. Највећа концентрација наночестица добија при интензивном кочењу (висока успорења) у односу на умерено кочење и вожњу без кочења. Честице које настају хабањем ослобађају се, највећим делом, после кочења тј. поновним убрзавањем возила. Процент финих честица је био заступљенији у односу на проценат грубих честица.

3.4.7 Утицај влажности амбијенталног ваздуха

Ozcan и *Filip* [332] су у свом истраживању испитали утицај влажности ваздуха на емисију честица. Испитивањем утицаја влажности ваздуха на плочице са C/C, дошло се до резултата да је влажност ваздуха значајан фактор који утиче на коефицијент трења, али и на брзину хабања. Повећањем влажности ваздуха смањује се брзина хабања фрикционих елемената.

Када је у питању емисија честица и утицај влажности ваздуха, *Lui* и др. [333] су закључили, применом три фрикциона материјала и трибометра, да се са повећањем релативне влажности ваздуха смањује брзина хабања и емисија честица. Код неких фрикционих материјала, пораст релативне влажности ваздуха, поред смањења емисије насталих честица, не мора да доведе до смањења трења, али опет постоји могућност да дође до смањења и трења.

У истраживању *Mirzababaei* и *Filip* [258], у коме је коришћен трибометар са уређајем за повећање влажности ваздуха, показано је да се са повећањем влажности ваздуха смањује хабање полуметалних и органских кочних плочица. Дошло се и до резултата да сваки тип плочица има своји критични ниво влажности ваздуха при којој долази до смањења хабања материјала.

Abdul Mokti и др. [334] су применом инерцијалног кочног динамометра испитивали утицај влажности ваздуха на брзину хабања кочних плочица. У истраживању су коришћена два типа кочних плочица, односно керамичке кочне плочице и оригиналне кочне плочице за прву уградњу. Примењено је више тестова и то са варирањем притиска и брзине. У тестовима су примењени услови потпуне влажности, делимичне влажности и суви услови. Утврђено је да је брзина хабања у случајевима потпуне и делимичне влажности ваздуха има мање вредности у односу на потпуно суве услове и то за обе кочне плочице.

Djafri и др. [335] су применом трибометра испитивали различите материјале који се користе као дискови кочнице, а при различитим вредностима влажности ваздуха. Закључили су да се водени филм може у контакту фрикционих парова понашати као мазиво. Брзина хабања је у овом случају је обрнуто пропорционална релативној влажности ваздуха.

Blau PJ и *McLaughlin* [336] су дошли до резултата да се са повећањем влажности ваздуха повећава и брзина хабања, тако да је потребно водити рачуна о материјалима који се користе као фрикциони елементи у различитим условима експлоатације возила.

3.5 Пројекти који су имали за циљ смањење емисије честица насталих хабањем кочница

У циљу смањења емисије честица или ублажавања штетности честица које настају при хабању фриксионих парова кочница, развијени су и покренути различити пројекти [337]. У овом потпоглављу приказани су неки од европских пројеката који су имали управо претходно наведене циљеве.

3.5.1 REBRAKE пројекат

На основу истраживања која се односе на настанак честица које настају хабањем кочница, дошло се до закључака да је кочница међу три најзначајнија извора честица које не настају сагоревањем у мотору. Многи светски произвођачи кочних система или елемената кочница су свесни ове проблематике, па развијају различите пројекте везане за испитивање утицаја кочница и стварања честица на животну средину. Један од тих пројеката је и *REBRAKE* пројекат у који је укључен и један од највећих произвођача кочних система - *Brembo*. Овај пројекат је активан од 2014. године и има два основна циља и то:

- смањење укупне количине честица PM_{10} коју производе кочнице за најмање 50% у складу са стратегијом *EU2020* чији је циљ смањење укупних честица за 47% до 2020. године,
- дубље разумевање физичких и хемијских појава које леже у основи процеса хабања кочница, укључујући веће разумевање и анализу карактеристика грубих, финих и ултрафиних честица [338].

Пројекат је био конципиран у четири фазе које су у међусобној корелацији и биле су значајне за коначан резултат пројекта:

- прва фаза јесте фаза у којој се раде експериментални тестови кочења и формира методологија прикупљања честица које настају хабањем кочница,
- друга фаза пројекта је везана за идентификовање утицаја прикупљених честица на здравље људи. Наравно, честице које се прикупљају су везане за конвенционалне и новопроизведене материјале који се користе у систему за кочење. Прикупљене честице се могу окарактерисати како према хемијском саставу, тако и у морфолошком смислу, па се тако окарактерисане честице лако могу упоредити са литературом која је везана за утицај честица на здравље људи,
- трећа фаза је везана за моделирање процеса хабања кочница. Механизам хабања се ставља у корелацију са кочним системима који се испитују,
- четврта фаза пројекта је једна од кључних за смањење емисије честица које настају хабањем кочница. У овој фази на основу истраживања у претходне три фазе, потребно је развити нове кочне системе како би се смањила емисија честица која настаје хабањем кочница за 50%.

Претходно наведене фазе се могу графички приказати на слици 3.28. Као што се види, постоји шест фаза. Додатне две фазе које су приказане на слици 3.28 су менаџмент (*WP1*) и шеста фаза (*WP6*) која је везана за даље подизање свести о овој емисији честица и настанку исте.



Слика 3.28 Графички приказ фаза REBRAKE пројекта [339]

Овај пројекат имао је, поред својих главних циљева, и различите социо-економске користи, али и обезбеђење могуће даље примене у развоју кочних система. Како је испитивање утицаја кочница на стварање честица прилично неистражена област, овај пројекат је омогућио да се карактеришу честице које настају од различитих елемената у кочном систему. Омогућен и развој знања која се односе на усавршавање кочног система да би се умањио број честица које настају од кочница као система у коме се стварају честице које не настају сагоревањем у мотору. Овим пројектом се може увести и стандардна методологија којом би се могло испитивати хабање кочница и стварање честица различитих величина. Према извешају намењеном Европској комисији (CORDIS), знање које се добија овим пројектом и таквом стандардизацијом методологије за испитивање настанка честица би подстакло свест произвођачима како кочница, тако и других производа, па би се, самим тим, подстакло даље индустријско истраживање за развој и сопствених методологија [340].

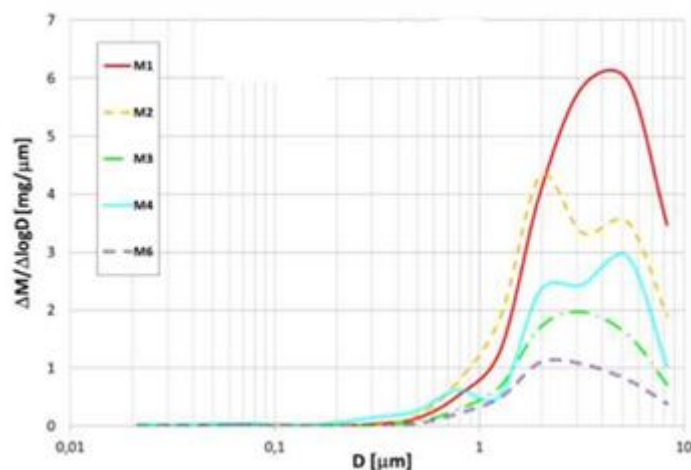
Како је један од примарних циљева пројекта REBRAKE смањење емисије ових честица за 50%, дошло би се до нивоа да би се овај проценат честица од стране кочница изједначио са настанком честица од стране мотора. Од 2014. године, истраживачи који учествују у пројекту REBRAKE-а учествују и у *Програму мерења честица* (енгл. *Particle Measurement Program - PMP*), којим управља UNECE, и у оквиру кога стручњаци за емисију честица учествују у истраживањима која су везана за развој ECE стандарда који је везан за емисију честица које настају од стране кочница [340]. Један од главних циљева овог пројекта је увидети могућности смањења емисије честица које настају приликом кочења, чиме би се смањио настанак честица у Европи од стране возила за 4% до 14%.

Према извору [192], приказани су неки од резултата који се односе на пројекат REBRAKE. Приказани су резултати испитивања неколико различитих врста фриксионих плочица од различитих материјала који су приказани у табели 3.7 и који су означени са ознакама M₁, M₂, M₃, M₄ и M₆. Фриксиона плочица M₃ је веома честа на европском тржишту, па је из тог разлога M₃ узета као референтна кочна плочица [192].

Табела 3.7 Састав испитиваних кочних плочица [192]

Материјал	Ознака материјала	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₆
Цинк	Zn	14,31	9,68	5,61	18,19	5,08
Графит	C	39,28	26,51	33,00	35,69	31,98
Бакар	Cu	11,16	16,03	35,93	11,45	9,00
Силикати	(K,Na)(Mg;Fe) (AlSi ₃ O ₁₀) (OH) ₂	6,93	1,17	1,50	1,65	9,42
Калијум титанијум оксид	K ₂ Ti ₆ O ₁₃	0,75	11,07	0,00	2,04	8,37
Барит	BaSO ₄	0,00	7,85	8,08	0,00	22,88
Баделејит Цирконијум-диоксид	ZrO ₂	0,00	23,16	0,64	2,50	9,85
Гвожђе	Fe	3,52	3,67	4,60	7,56	0,93
Моисанит	SiC	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Хромит	(Fe,Mg)Cr ₂ O ₄	5,61	0,00	1,45	2,51	0,00
Цинк-оксид	ZnO	2,25	0,15	0,00	0,00	0,00
Калај (IV) сулфид	SnS ₂	2,46	0,00	0,77	1,80	1,13
Магнезијум оксид	MgO	5,89	0,00	3,17	12,76	0,00
Сфалерит	(Zn,Fe)S	1,71	0,45	0,00	1,31	0,00
Корунд	Al ₂ O ₃	4,33	0,26	2,76	2,53	1,36
Антимон трисулфид	Sb ₂ S ₃	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00

На слици 3.29 приказане су криве емисије честица за материјале приказане у табели 3.7. Ови резултати показују да постоје значајне разлике у емисији честица (величина 1 μm до 10 μm) за фрикционе плочице од различитих материјала. Испоставило да, у поређењу са M₃ (референтни фрикциони материјал), M₁, M₂ и M₄ показују већу емисију честица у целом опсегу величине честица које су произведене хабањем. С друге стране, значајно смањење је постигнуто применом фрикционих плочица M₆ (NAO кочна плочица), чија се крива емисије налази испод криве плочица M₃, што указује на смањење укупне количине емитованих честица у ваздуху [192].



Слика 3.29 Количина створених честица и њихов пречник у зависности од фрикционих облога [192]

У табели 3.8 је дат приказ измерених вредности хабања фрикционих плочица, али и диска кочнице за свих пет типова фрикционих плочица, с тим да је термички обрађен диск коришћен за кочне плочице M₃ и M₆.

Табела 3.8 Резултати динамометарског теста хабања кочница и диска кочнице [192]

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₆	M ₃ Термички обрађен диск	M ₆ Термички обрађен диск
Триболошке карактеристике							
Средња вредност коефицијента трења	0,42	0,38	0,37	0,39	0,34	0,39	0,34
Губитак масе диска [g]	8,3	3,8	3	5,8	0,4	2,8	0,4
Губитак масе фрикционе плочице [g]	6,6	11,6	4	6,94	4,54	3,9	3,3
Укупан губитак масе [g]	14,9	15,4	7	12,8	4,9	6,7	3,7
Параметри емисије честица							
Укупна маса честица PM ₁₀ [g]	9,27	7,2	3,3	6,7	1,8	2,26	1,17
Емисиони фактор за PM ₁₀ [mg заустављање ⁻¹ кочница ⁻¹]	46	36	16,5	33,5	9	11,3	5,8

Ово испитивање је показало да се термичком обрадом диска кочнице за фрикционе плочице M₃, емисија честица PM₁₀ смањила за 32% у односу на испитивање за исту фрикциону плочицу без термички обрађеног диска кочнице. Слично је и са фрикционим плочицама M₆, које имају мању емисију честица PM₁₀ у односу на плочице M₃, док је емисија још и мања код термички обрађених дискова и то за око 65% у односу на плочице M₃. Разлика је у триболошким карактеристикама из разлога што је изгубљена маса фрикционих плочица мања када се примењује кочна плочица M₃, али је већа маса хабања диска само при употреби необрађеног диска кочнице. На основу добијених резултата у овом истраживању, могуће је доћи до смањења емисије честица PM₁₀ које настају од стране система за кочење на возилу. Термичком обрадом диска и променом састава фрикционих плочица у односу на стандардне примењене саставе, може се смањити емисија честица за 65% од укупне количине насталих честица у поређењу са најдоступнијим фрикционим плочицама на тржишту у Европи. Међутим, поставља се питање везано за термичку обраду кочнице тј. да ли је могуће да индустрија пропрати те захтеве и начин на који је потребно сваки диск кочнице обрадити. Приказани резултати се односе на диск од ливеног грожђа који је у овом истраживању примењен и ефекти термичке обраде на дискове од других материјала нису познати.

3.5.2 LOWBRASYS пројекат

Ослањајући се на *REBRAKE* пројекат, развијен је пројекат који је носио назив *LOWBRASYS* (енгл. *LOW environmental impact BRAke SYStem*), а који укључује и савремене технологије, односно примену давача у циљу смањења емисије честица. Овај систем омогућава упозорење возача на количину створених честица [192, 341].

LOWBRASYS пројекат је имао за циљ да развије нову генерацију технологија које се користе у друмском саобраћају, чиме се подстиче развој иновација ка чистијем и ефикаснијем друмском транспорту, што би довело до побољшања квалитета ваздуха. У исто време, *LOWBRASYS* одговара захтеву да се поштује будућа строжа законска регулатива, како за емисију честица које настаје сагоревањем у мотору, тако и оних који не настају сагоревањем у мотору, већ хабањем неких елемената (у овом случају кочница) и квалитет ваздуха у Европи [341]. Поред тога, циљ је био развој новог система кочења који ће смањити емисију микро и наночестица за најмање 50% [342, 343]. Мерење и разумевање микрометарских и ултрафиних честица и њиховог утицаја на здравље и

животну средину ће бити побољшани уз пружање препорука организацијама да формирају прописе и стандарде у овој области. Овим пројектом је постављено пет основних циљева којима је овај пројекат тежио:

- развој нових и савремених материјала од којих би се производиле фрикционе плочице,
- развој еколошки прихватљивих начина, односно стратегија кочења на возилима (примена система контроле) који имају утицај на смањење емисије честица,
- развој савремених технологија којима се могу сакупљати честице у близини извора честица у циљу драстичног смањења честица које настају од тог извора (у овом пројекту то су кочнице),
- интеграција фрикционих плочица, као и других компоненти у кочном систему са системима управљања на возилима,
- побољшање метода мерења и боље разумевање утицаја које честице имају на здравље и животну средину [341, 342].

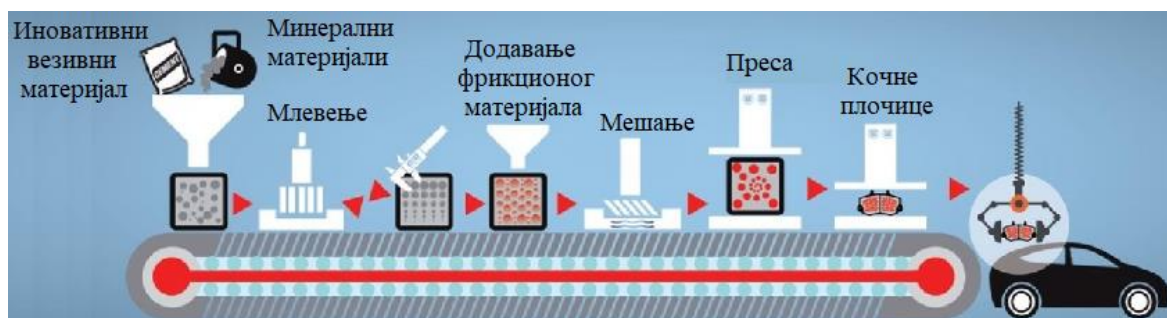
На слици 3.30 су дефинисане основне фазе и циљеви који су очекивани да ће бити постигнути овим пројектом [343]. У овај пројекат је било укључено више светских компанија и универзитета који су познати као највећи произвођачи или истраживачки центри везани за моторна возила или друге стручне области које могу имати утицаја на развој возила тј. компоненти на возилима (*Brembo, Continental, FEDER-MOGUL motorparts, Ford, Flame Spray, Universita Degli Studi Di Trento - Dipartimento di ingegneria industriale, European Commission, KTH Vetenskap och Konst, Istituto di ricerche farmacologiche Mario Negri, Nanotechnology centre VSB-TUO Ostrava*). Свака од ових компанија имала је своју улогу у овом пројекту и њен задатак истраживања и испитивања. Тако, компаније *Brembo, Flame Spray* и *Continental* имале су за циљ и задатак да развију нове технологије израде дискова кочнице са сензорима обртног момента диска. *FEDER-MOGUL* у сарадњи са *Nanotechnology centre VSB-TUO Ostrava* имали су задатак да развију фрикционе плочице које су направљене од нових материјала, односно од композитних материјала другачијег састава у односу на постојеће материјале. Овај пројекат се базирао на савременим системима на возилима, па су тако компаније *Brembo* и *Continental* у сарадњи биле задужене за дизајн, односно писање савремених ИТ кочних алгоритама, као и за развој апликације која би упозорила возача на створену емисију честица. *KTH Vetenskap och Konst* у сарадњи са *Brembo* имали су за циљ да испитају и утврде везу између диска кочнице и фрикционих плочица, али и да развију систем, односно технологију за сакупљање честица које настају хабањем кочница. *Istituto di ricerche farmacologiche Mario Negri* имао је улогу у пројекту да испитује утицај честица на организме који постоје у природи, што значи да не испитају само утицај на човека, већ и на друге живе организме. *Universita Degli Studi Di Trento (Dipartimento di ingegneria industriale)* имао је задатак да испита нове примењене материјале, али и састав новонасталих честица од тих савремених материјала који могу наћи примену на возилима, односно на систему за кочење. *Ford*, као једна од већих светских компанија која се баве производњом возила, имао је улогу у овом пројекту да савремене системе кочења који смањују емисију честица интегрише у новопроизведена возила. *Ford* је у сарадњи са *European Commission* проучавао, односно тестирао ефикасност и еколошку безбедност возила са таквим интегрисаним системом [344]. Примена таквог система на возилима представљала је коначан циљ овог пројекта, јер управо испуњењем тог циља би се постигло смањење емисије честица, али свакако и применом савремених материјала у производњи дискова кочница и фрикционих плочица. Као што се види са слике 3.30, циљеви и стратегија пројекта се огледају кроз превенцију настанка честица, сакупљање честица и смањење концентрације честица, односно броја честица.



Слика 3.30 Циљеви пројекта LOWBRASYS приказани кроз фазе [343]

3.5.3 COBRA пројекат

Још један од европских пројеката у пољу кочних система и очувања животне средине јесте *COBRA* пројекат. Овај пројекат је био активан у периоду од четири године, и то од 2014. године до 2018. године. Циљ овог пројекта био је да се применом савремених технологија обезбеди производња фрикционих плочица. Требало је да се развије потпуно нова технологија производње кочних плочица која ће се заснивати на иновативним хидро-везивним материјалима који су саставни елементи кочних плочица. Такав материјал се може примењивати уместо фенолних смола као везивног средства. Наравно, уз то не сме да дође до промена перформанси кочења, а резултат су сличне карактеристике кочења. Осим тога, применом савремених технологија производње фрикционих плочица могуће је смањити емисију аеросола и секундарних ултрафиних честица ($PM_{0.1}$) које настају приликом кочења код традиционално израђених фрикционих плочица које су направљене применом фенолних смола као везивног средства. Будући да кочне облоге садрже 1% – 14% бабра, ово чини хабање кочница возила доминантним извором бабра када је у питању амбијентални ваздух у Западној Европи [345, 346]. На слици 3.31 је дат шематски приказ овог пројекта, односно начин израде и испитивања фрикционих плочица које су у изради према овом пројекту [345, 346].



Слика 3.31 Процес производње иновативних фрикционих плочица развијених током COBRA пројекта [346]

4 МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Постоји велики број различитих метода и начина мерења емисије честица које настају хабањем кочница. У овом поглављу описана је методологија која је примењена у докторској дисертацији. Примена инерцијалног кочног динамометра показала се као једна од метода која даје најприближније резултате истраживања оним који би били спроведени у путним условима. Самим тим, у докторској дисертацији је примењен инерцијални кочни динамометар. У циљу успешног мерења честица конструисано је кућиште које је постављено на инерцијални кочни динамометар да би се мерила само концентрација честица које настају при хабању кочних парова. Представљен је тест који је коришћен и примењене кочне плочице и диск. Тест је формиран на основу критичке анализе резултата досадашњих истраживања. Са циљем прецизне анализе и доношења исправних закључака о утицају различитих параметара кочења, примењено је више различитих статистичких анализа. У овом поглављу су представљене статистичке методе које су примењене у анализи добијених резултата. Применом неуронских мрежа може се предвидети концентрација генерисаних честица, па је представљена и методологија формирања, обучавања и примене неуронских мрежа.

4.1 Инерцијални кочни динамометар

У циљу испитивања концентрације честица које настају хабањем кочница, у овом истраживању, је примењен инерцијални кочни динамометар развијен у Лабораторији за моторна возила Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, слика 4.1, који је претходно био намењен за истраживања термичких напрезања диск кочница [347]. Иницијална конструкција динамометра је модификована како би се могла мерити концентрација честица насталих хабањем кочних парова.



Слика 4.1 Инерцијални кочни динамометар на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Шематски приказ мерног стола за испитивање кочнице и емисије честица је дат на слици 4.2. Електромотор номиналне снаге 18,5 kW покреће замајну масу. Веза између замајне масе и електромотора је остварена путем електромагнетне спојнице која је једним крајем повезана за прирубницу која се налази на вратилу замајне масе, док вратило електромотора пролази кроз саму спојницу. Радом електромотора може се управљати помоћу рачунара и специјализованог софтвера, али и ручним путем. Под управљањем се подразумева: покретање, искључивање и подешавање броја обртаја електромотора. Подешавање и задавање броја обртаја електромотора се остварује помоћу фреквентног регулатора. Путем рачунара се управља и укључивањем и искључивањем електромагнетне спојнице.

На другом крају инерцијалног кочног динамометра се налази кочница. Активирање кочнице, односно главног кочног цилиндра и радног кочног цилиндра, врши се путем пнеуматичког дела кочне инсталације, која уједно симулира притисак на педалу кочнице. Пнеуматички део кочне инсталације активира даље хидраулички део кочне инсталације, која затим активира кочна клешта да би се остварило кочење и заустављање диска и замајне масе. Активирање кочнице се врши путем рачунара и софтвера. Пнеуматички део кочне инсталације се напаја ваздухом из компресора.

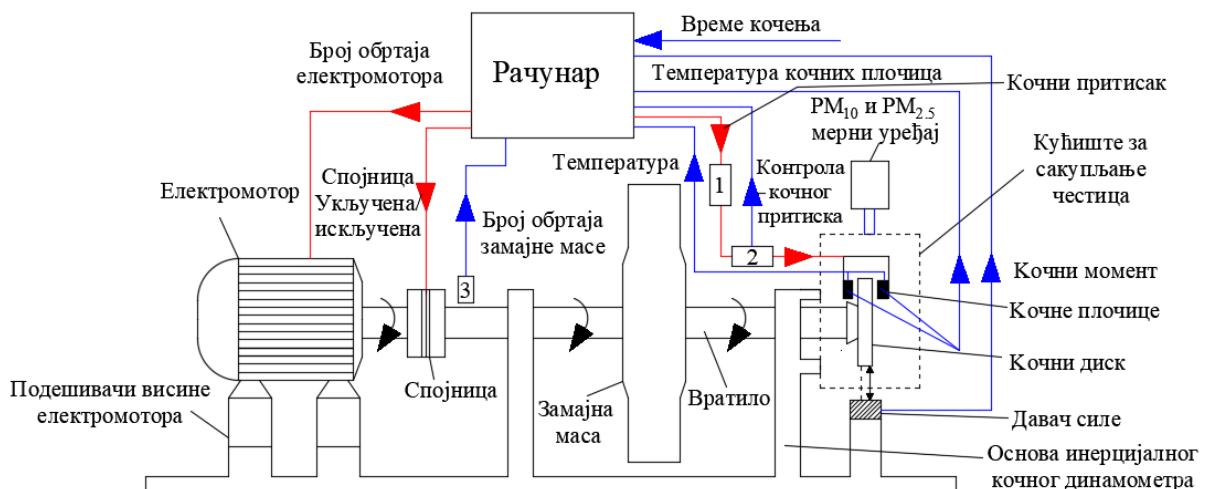
Мерна инсталација инерцијалног кочног динамометра садржи даваче који омогућавају мерење различитих физичких величина. Подаци се могу директно мерити или добити додатним прерачунавањем, а потом и сачувати. Мерне величине које су директно мерене су:

- угаона брзина диска,
- број обртаја диска,
- време кочења,
- кочни притисак, односно притисак у кочној инсталацији, како у хидрауличком, тако и пнеуматичком делу кочне инсталације,
- кочни момент,
- температура кочних плочица,
- амбијентална температура,
- влажност ваздуха,
- концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} .

Величине које се одређују прерачунавањем су:

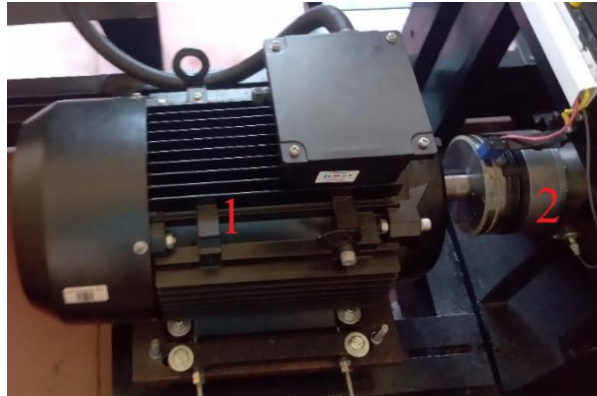
- дефинисана почетна брзина возила,
- кинетичка енергија,
- успорење,
- коефицијент трења између фрикционих парова.

На инерцијалном кочном динамометру је постављено и кућиште за сакупљање честица у коме се налази и окреће диск. Његова улога је и да елиминише утицај околине у смислу емисије честица које нису производ хабања кочница. На кућиште је постављен и уређај за мерење концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} , тј. уређај *Trotec PC220*.



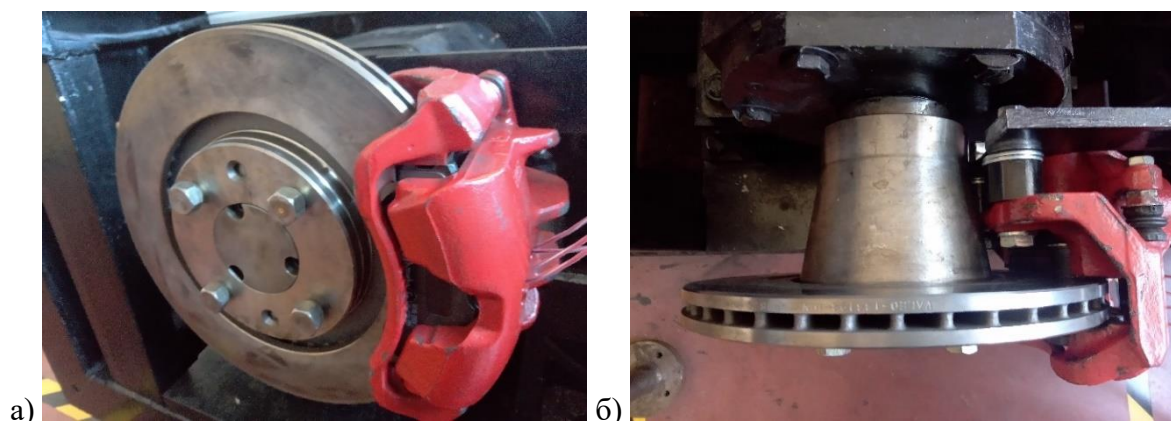
Слика 4.2 Шематски приказ инерцијалног кочног динамометра: 1 - пнеуматички део кочне инсталације, 2 - хидраулички део кочне инсталације, 3 - давач броја обртаја, црвене линије - улазни подаци, плаве линије - излазни подаци

Као што је већ речено, замајна маса се покреће електромотором, а електромагнетна спојница је постављена да би се остварила веза између вратила електромотора и вратила замајне масе. Приликом покретања замајне масе спојница је укључена, да би се пренео обртни момент са вратила електромотора на вратило замајне масе. У тренутку кочења долази до аутоматског искључивања спојнице, што раздваја електромотор од осталог дела инсталације, односно вратила, замајне масе и кочнице. Изглед електромотора и спојнице је приказан на слици 4.3. Уколико дође до преоптерећења, односно напрезања електромотора, долази до аутоматског искључивања спојнице и електромотора помоћу фреквентног регулатора, преко кога се и управља електромотором.



Слика 4.3 Веза између електромотора и електромагнетне спојнице: 1 - електромотор, 2 - електромагнетна спојница

Са друге стране инерцијалног кочног динамометра се налази кочница, односно постављен је диск на посебно конструисаној главчини и кочна клешта. На слици 4.4 је приказан начин постављања диска и кочних клешта. Кочна клешта су монтирана на посебном носачу који је у зглобној вези са рамом инерцијалног кочног динамометра. Са друге стране, носач се ослања на давач силе који мери силу кочења. Давач силе је у чврстој вези са основом. На основу познатих димензија крака момента, рачуна се момент силе.



Слика 4.4 Диск кочница и веза са инерцијалним кочним динамометром: а) диск и кочна клешта, б) веза диска и кочних клешта са инерцијалним кочним динамометром

4.1.1 Систем за кочење на инерцијалном кочном динамометру

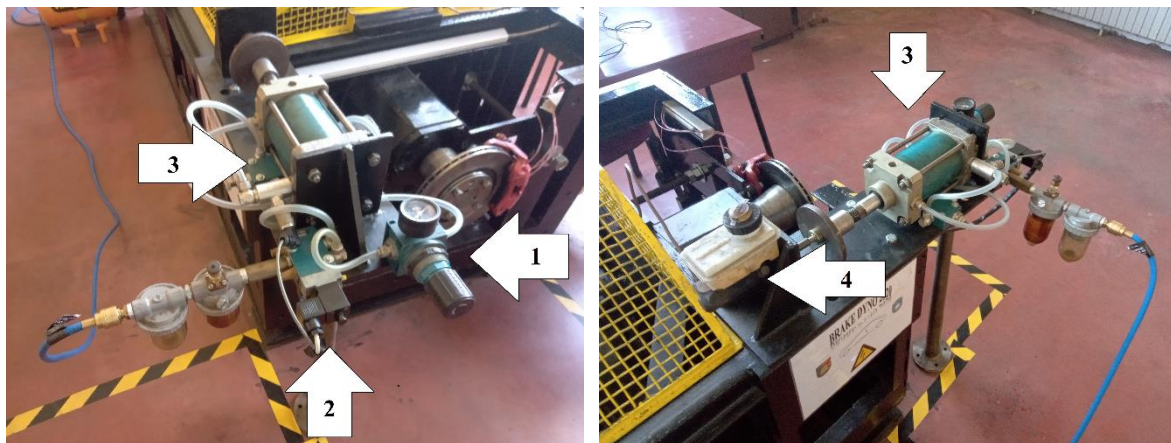
Процес активирања система за кочење се врши применом софтвера који у жељеном тренутку активира пнеуматички део кочне инсталације. Преко њега се активира хидраулички део кочне инсталације и потом долази до кочења, када се активирају цилиндри у кочним клештима.

На слици 4.5 су приказани хидраулички и пнеуматички делови кочне инсталације. Пнеуматички део се напаја ваздухом под притиском од компресора. Применом рачунара, односно софтвера, се активира пнеуматички део који симулира притисак возача на педалу кочнице. Затим се активира главни кочни цилиндар који се налази у хидрауличком делу инсталације и повећава се притисак у хидрауличком делу инсталације. Порастом хидрауличног притиска долази до активирања система за кочење, односно започиње процес кочења.



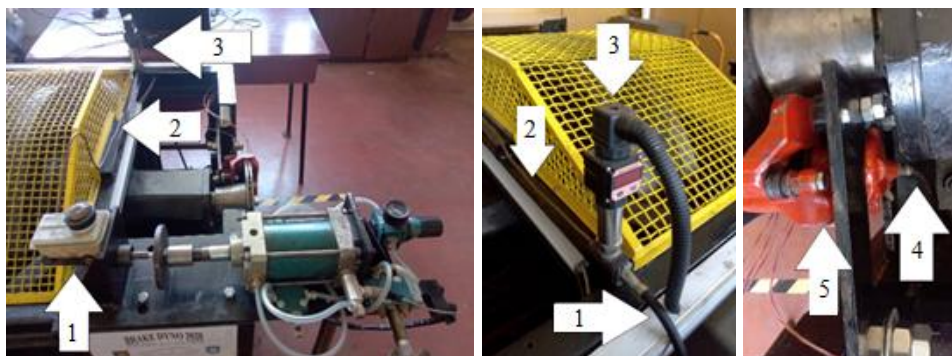
Слика 4.5 Приказ кочне инсталације: 1 - компресор за снабдевање ваздухом, црвено - пнеуматички део хидрауличке инсталације, зелено - хидраулички део инсталације

Пнеуматички део кочне инсталације је приказан на слици 4.6. Овај део се састоји од пнеуматичког цилиндра, давача притиска и регулатора притиска. У овом делу се подешава одговарајући притисак у хидрауличком делу кочне инсталације. Подаци са давача притиска се бележе путем софтвера.



Слика 4.6 Пнеуматички део кочне инсталације: 1 - регулатор притиска, 2 - давач притиска, 3 - пнеуматички цилиндар, 4 - главни кочни цилиндар

Хидраулички део кочне инсталације је приказан на слици 4.7. Посредно, преко пнеуматичког дела, потискује се главни кочни цилиндар који подиже притисак у хидрауличком делу (активира га). Између главног кочног цилиндра и кочних клешта налази се давач притиска који мери притисак у систему и шаље податке рачунару. Кочни притисак се даље преноси унутар кочних клешта где се активирају радни клипови и долази до кочења.



Слика 4.7 Хидраулички део кочне инсталације: 1 - главни кочни цилиндар, 2 - водови за уље од главног кочног цилиндра до давача притиска, 3 - давач притиска, 4 - вод за уље од давача притиска до радног кочног цилиндра (кочна клеишта), 5 - кочна клеишта

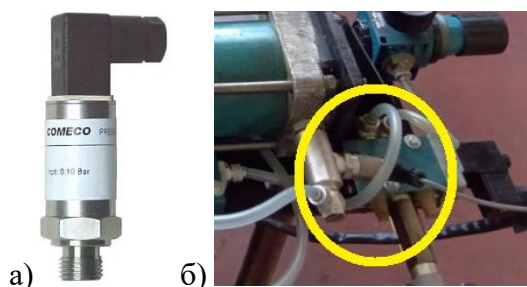
4.1.2 Примењени мерни давачи на инерцијалном кочном динамометру

На инерцијалном кочном динамометру примењени су следећи давачи који имају улогу да мере различите физичке величине:

- давач притиска у пнеуматичком делу кочне инсталације,
- давач притиска у хидрауличком делу кочне инсталације,
- давач силе,
- давач броја обртаја,
- давач за мерење температуре кочних плочица.

Калибрисање давача је вршено периодично при свакој промени типа кочних плочица, а начин калибрације и калибрационе криве примењених давача су приказане у докторској дисертацији [347].

Да би се подесио притисак у хидрауличком делу кочне инсталације потребно је подесити притисак у пнеуматичком делу кочне инсталације применом регулатора притиска. За мерење притиска у пнеуматичком делу кочне инсталације примењен је давач притиска компаније COMECO, чији је мерни опсег од 0 bar до 10 bar. Подаци које сакупља овај давач се бележе на рачунару, међутим како овај део инсталације има само за циљ да створи одговарајући притисак у хидрауличном делу кочне инсталације, ови подаци нису коришћени у анализи података. Приказ давача и његове позиције на инерцијалном кочном динамометру је приказан на слици 4.8.

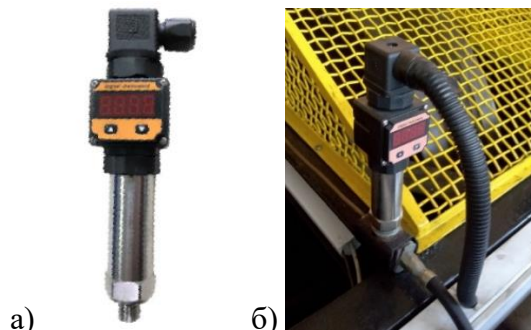


Слика 4.8 Давач притиска COMECO: а) изглед давача, б) позиција давача и на инерцијалном кочном динамометру

За мерење притиска у хидрауличком делу кочне инсталације коришћен је давач притиска WPM-131D BP-01. Притисак у хидрауличком делу кочне инсталације је у ствари притисак у систему за кочење, па су подаци добијени од овог давача примењени у даљој анализи. У табели 4.1 су приказане карактеристике овог давача. На слици 4.9 је приказана позиција давача и приказ давача.

Табела 4.1 Карактеристике хидрауличног давача WPM-131D BP-01

Карактеристика	Вредност
Максимална грешка	0,2%
Мерни опсег	0 МПа до 25 МПа
Излаз	4 mA до 20 mA
Напајање	12 VDC до 36 VDC

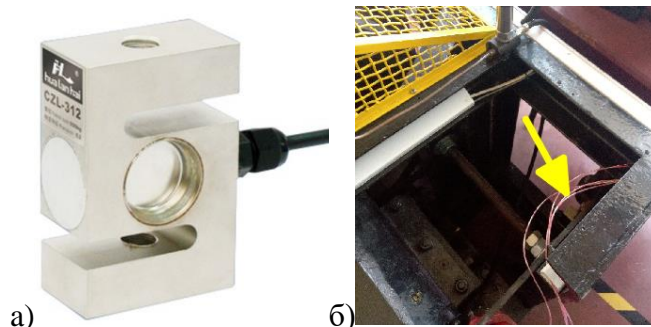


Слика 4.9 Давач притиска WPM-131D BP-01: а) изглед давача, б) позиција давача и на инерцијалном кочном динамометру

За мерење кочног момента примењен је давач силе CZL312 5t. На основу измерене величине силе рачунао се кочни момент. Давач је у вези са кочним клештима преко носача. Са једне стране носача постављен је давач, док су на другој страни носача постављена кочна клешта. Приликом кочења долази до оптерећења давача реактивном силом, па се мерењем силе и познавањем растојања зглоба носача од давача, врши прорачун кочног момента. У табели 4.2 су приказане основне карактеристике давача силе, док је на слици 4.10 приказан изглед и позиција давача на инерцијалном кочном динамометру.

Табела 4.2 Карактеристике давача силе CZL312 5t

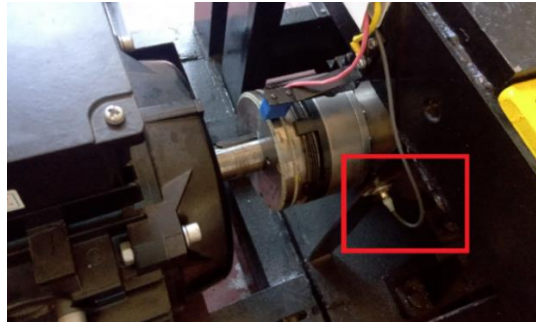
Карактеристика	Вредност
Максимална грешка	0,03%
Излаз	2 mV/V \pm 0,005 mV/V
Напајање	9 VDC ~12VDC
Дозвољено преоптерећење	120% мерног опсега



Слика 4.10 Давач силе CZL312 5t: а) изглед давача, б) позиција давача и на инерцијалном кочном динамометру

За мерење угаоне брзине замајне масе и диска кочнице коришћен је индуктивни давач, слика 4.11. Како би се на динамометру симулирала брзина реалног возила, било је потребно задати и пратити број обртаја замајне масе тј. диска. На тај начин симулира се кинетичка енергија која одговара приближно једној четвртини масе возила. Приликом покретања електромотора, вредност броја обртаја се задаје, али је приликом окретања

замајне масе потребно да се мери и стварни број обртаја у сваком тренутку. Из претходно наведеног разлога, у близини замајне масе и спојнице, постављен је индуктивни давач броја обртаја који је приказан на слици 4.11, док су у табели 4.3 приказане основне карактеристике давача. У овом случају примењен је давач OMRON серије E2A. Прорачуном се на основу момента инерције замајне масе и измереног броја обртаја добија промена брзине возила током кочења, што се бележи у управљачком рачунару и ти подаци се користе у анализама утицаја брзине на концентрацију насталих честица.



Слика 4.11 Давач броја обртаја

Табела 4.3 Карактеристике индуктивног давача броја обртаја

Карактеристика	Вредност
Напајање	12 VDC до 24 VDC
Удаљеност постављања давача од мерног објекта	0 mm до 6,4 mm
Највећа дозвољена удаљеност мерења	8 mm \pm 10%
Материјал од кога се израђује идентификациони елемент	Необојени метал
Амбијентална радна температура	-40 °C до 70 °C
Утицај температуре	\pm 15%

За мерење температуре кочних плочица су примењени термопарови високе прецизности WZP PT100. Четири давача су постављена унутар кочне плочице, као што је приказано на слици 4.12. Давачи су постављени на 2 mm од контактне површине и дубина рупе за постављање давача износила је 30 mm. У овом случају, коришћена су по два давача температуре по једној кочној плочици, у којој је направљен отвор у који су постављени давачи, као што је приказано на слици 4.12. Овај давач има могућност мерења температуре до 250 °C. У табели 4.4 су приказане карактеристике примењеног давача.



Слика 4.12 Постављени давачи температуре у кочним плочицама

Табела 4.4 Карактеристике давача температуре WZP PT100

Карактеристика	Вредност
Мерни опсег	< 250 °C
Пречник сонде	3 mm
Дужина сонде	25 mm

4.1.3 Прорачун брзине кретања возила

Услед ротационог кретања тела, инерција зависи од масе тела, полупречника ротације, облика тела и положаја осе ротације [348, 349]. Кинетичка енергија транслаторног кретања тела зависи од брзине кретања возила (v) и његове масе (m) и може се изразити преко једначине (4.1), [350].

$$E_{\text{Kineticika trans.}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2, \quad (4.1)$$

Кинетичка енергија ротирајућег кретања тела зависи од угаоне брзине (ω) тела и момента инерције тела (J), и у овом случају кинетичка енергија се може изразити изразом (4.2) [351].

$$E_{\text{Kineticika rot.}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2. \quad (4.2)$$

Симулацију кинетичке енергије возила је могуће извршити применом инерцијалног кочног динамометра. Да би се дефинисала кинетичка енергија возила која одговара приближно једној четвртини возила, јер се истраживање врши на једној предњој кочници, потребно је израчунати број обртаја замајне масе. У циљу постизања исте кинетичке енергије које би возило имало приликом транслаторног кретања и дејства инерцијалне силе на тело и при ротационом кретању замајне масе, изједначавају се кинетичке енергије услед транслаторног кретања и кинетичке енергије услед ротационог кретања тела [352, 353]:

$$\frac{1}{2} \cdot m_s \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2, \quad (4.3)$$

где су: m_s – маса тела које се симулира (kg), v - брзина коју би тело имало при транслаторном кретању (m/s), J - момент инерције замајне масе која ротира (kgm²), ω - угаона брзина замајне масе (rad/s).

Услед ротације тела, оно се окреће одређеном угаоном брзином (ω), па је могуће одредити из израза (4.3) угаону брзину којом би се тело требало окретати да би симулирало инерцију тела у току транслаторног кретања. Начин прорачуна је приказан изразом (4.4):

$$\omega = \sqrt{\frac{m_s \cdot v^2}{J}}. \quad (4.4)$$

Познавајући везу између угаоне брзине и броја обртаја тела (n), израз (4.5):

$$\omega = \frac{n \cdot \pi}{30}, \quad (4.5)$$

где су: n - број обртаја (o/min), π - Архимедова константа, могуће је у израз (4.4) уврстити израз (4.5), одакле следи израз (4.6):

$$\frac{n \cdot \pi}{30} = \sqrt{\frac{m_s \cdot v^2}{J}}. \quad (4.6)$$

Како је за истраживање потребно познавати одговарајући број обртаја замајне масе у циљу симулације кретања возила одређеном брзином (v), из израза (4.6) могуће је извести потребан израз за број обртаја, израз (4.7):

$$n = \frac{30 \cdot v \cdot \sqrt{\frac{m_s}{J}}}{\pi}. \quad (4.7)$$

У овом случају, а ослањајући се на податке [347], момент инерције замајне масе износи

27,55 kg·m². На основу овог прорачуна може се израчунати број обртаја диска кочнице, а на основу жељене брзине возила, као и масе четвртине возила које жели да се симулира.

4.1.4 Управљање инерцијалним кочним динамометром

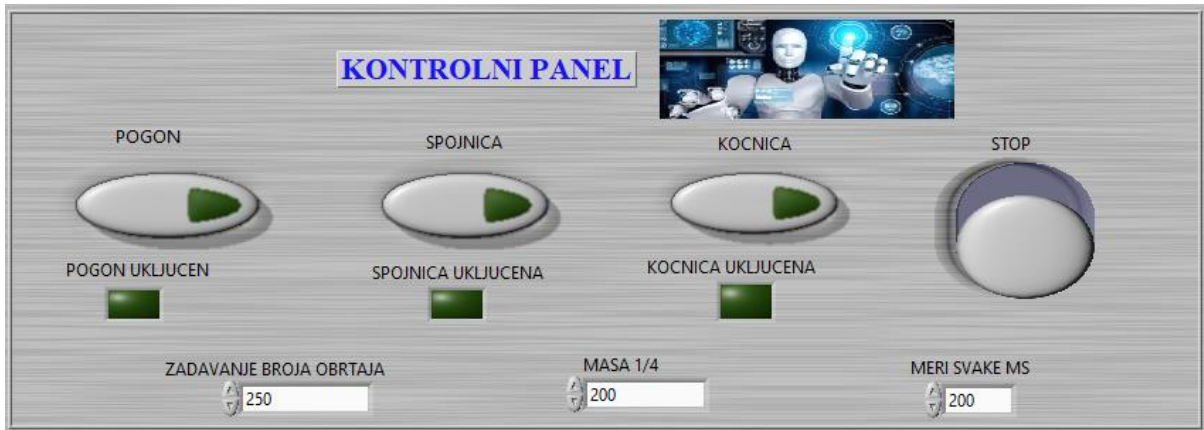
За покретање инерцијалног кочног динамометра је примењен софтверски пакет *LabView 2021*, тј. управљање радом динамометра се остварује рачунаром. На слици 4.13 је приказан изглед интерфејса софтвера за покретање мерног стола. Софтвер се састоји од три основна панела и то:

- контролног панела,
- панела параметара и
- прорачунског панела.



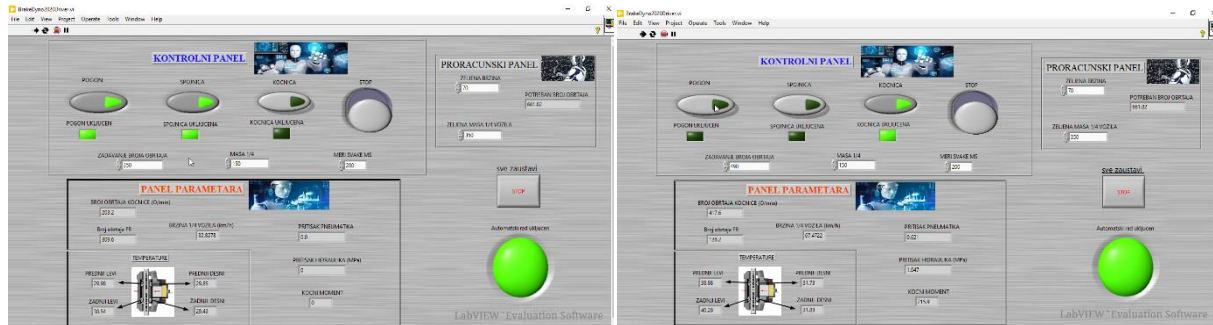
Слика 4.13 Интерфејс софтвера за управљање инерцијалним кочним динамометром

Преко контролног панела, који је приказан на слици 4.14, управља се функцијама програма, односно управља се радом динамометра. Применом овог панела могуће је укључити електромотор, спојницу и кочницу или зауставити рад сва три наведена елемента. У овом делу постоји и опција за *ZADAVANJE BROJA OBRTAJA*, *MASA 1/4* и *MERI SVAKE MS*. Применом опције *ZADAVANJE BROJA OBRTAJA* задаје се број обртаја којим се окреће замајна маса, тј. диск кочнице. Могуће је пратити број обртаја у панелу параметара (*BROJ OBRTAJA KOCNICE* (o/min)) јер је некада потребно повећати број обртаја који се задаје да би се постигао стварни број обртаја којим оператер жели да се окреће замајна маса. Применом опције *MASA 1/4* задаје се $\frac{1}{4}$ масе возила чија се кочница испитује, а ово је битно за панел параметара, јер постоји параметар *BRZINA 1/4 VOZILA* (km/h), где се приказује дефинисана почетна брзина возила на динамометру која зависи од $\frac{1}{4}$ масе возила и броја обртаја динамометра и добија се прерачунавањем. *MERI SVAKE MS* је параметар који описује на колико милисекунди софтвер врши мерење и бележи податке. Битно је напоменути да се на овај начин утиче на брзину узорковања, а овде је увек коришћена вредност од 200 ms (брзина узорковања 5 Hz), због мале брзине промена проучаваних величина и процеса у овом испитивању.



Слика 4.14 Контролни панел на интерфејсу за управљање инерцијалном кочним динамометром

Како је претходно наведено, применом контролног панела могуће је активирати елементе на инерцијалном кочном динамометру, односно могуће је укључити електромотор, спојницу и кочницу. На слици 4.15а је приказан случај када је активиран електромотор (на слици погон) и спојница, што је назначено зеленим индикатором. Када се активира кочница, као што је приказано на слици 4.15б, долази до аутоматског деактивирања електромотора и спојнице и остаје укључена и активирана само кочница. Све док је активирана кочница, није могуће активирати електромотор и спојницу. Приликом активирања команде *STOP* није могуће покренути, односно активирати ни једну другу команду, а уколико је било која била укључена, активирањем команде *STOP* све се аутоматски деактивирају.

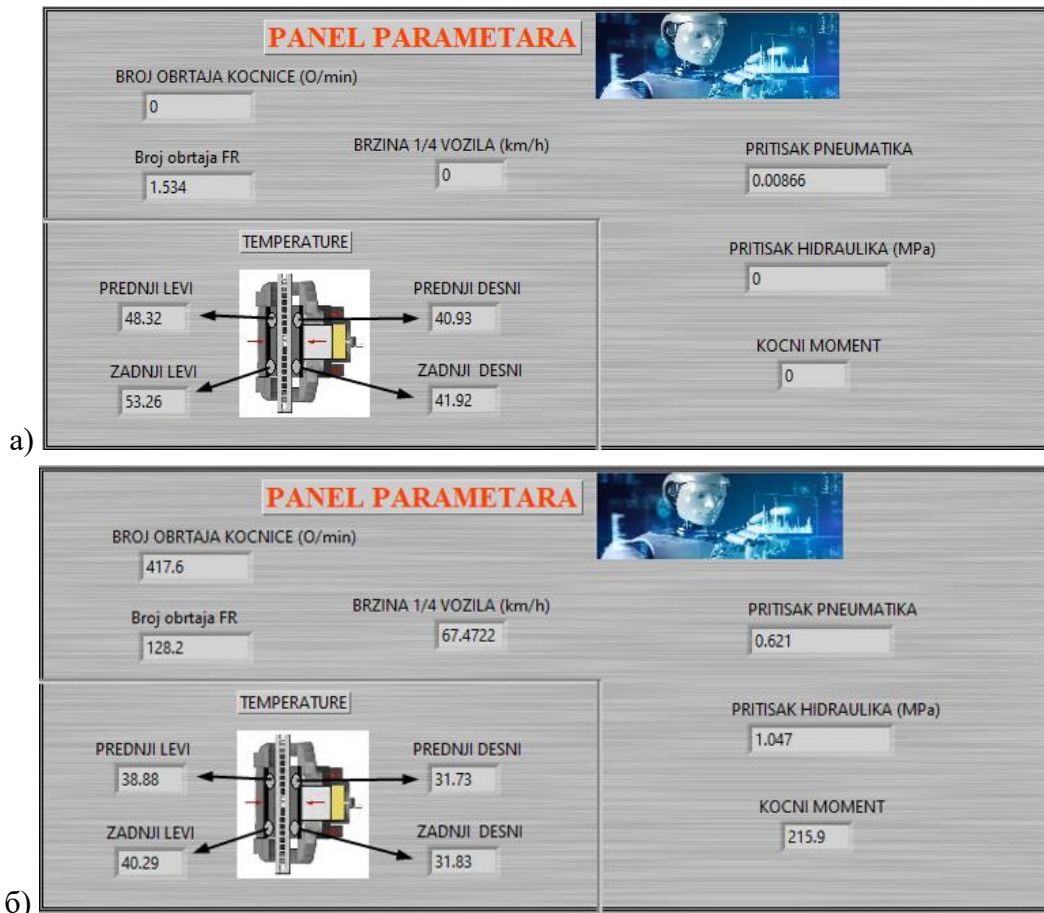


а)

б)

Слика 4.15 Активирање различитих команди путем контролног панела: а) случај када је активиран електромотор и спојница, б) случај када је активирана кочница

Панел параметара омогућава да се прате параметри у реалном времену, односно прикажу вредности које очитавају давачи на динамометру и чувају на рачунару. Могу се пратити стварни број обртаја обртања кочнице или замајне масе, температуре у кочним плочицама, притисци у хидрауличком и пнеуматичком делу мерне инсталације, кочни момент, као и приказ дефинисане брзине возила на основу тренутне вредности броја обртаја и задатог оптерећења. Пример изгледа овог панела је дат на слици 4.16. У делу *TEMPERATURE* приказују се тренутне температуре у зависности од позиција давача на кочним плочицама које су сликовито приказане на слици 4.16.



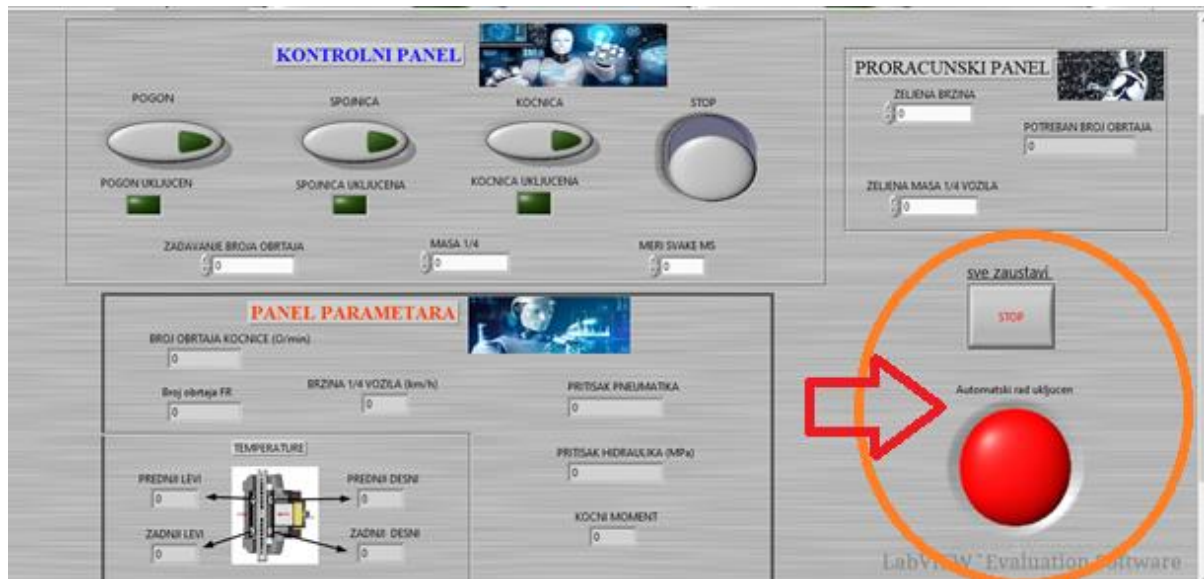
Слика 4.16 Панел параметара на интерфејсу за управљање инерцијалним кочним динамометром: а) случај када је кочница није активирана, б) случај када је кочница активирана

Прорачунски панел служи да би се прорачунао потребан број обртаја који би требало да достигне кочница и замајна маса да би се симулирала кинетичка енергија коју би имала $\frac{1}{4}$ возила. За ово је потребно задати жељену брзину и масу $\frac{1}{4}$ возила, а прорачунским путем, за случај примењене замајне масе, добија се потребан број обртаја. На слици 4.17 је приказан пример прорачуна. Брзина се задаје у km/h, док се маса $\frac{1}{4}$ испитиваног возила задаје у kg. У овом примеру за брзину од 50 km/h и $\frac{1}{4}$ масе возила од 150 kg, потребно је да се постигне 309,474 o/min да би се симулирала кинетичка енергија и услови кретања возила које корисник жели.



Слика 4.17 Прорачунски панел на интерфејсу за управљање инерцијалним кочним динамометром

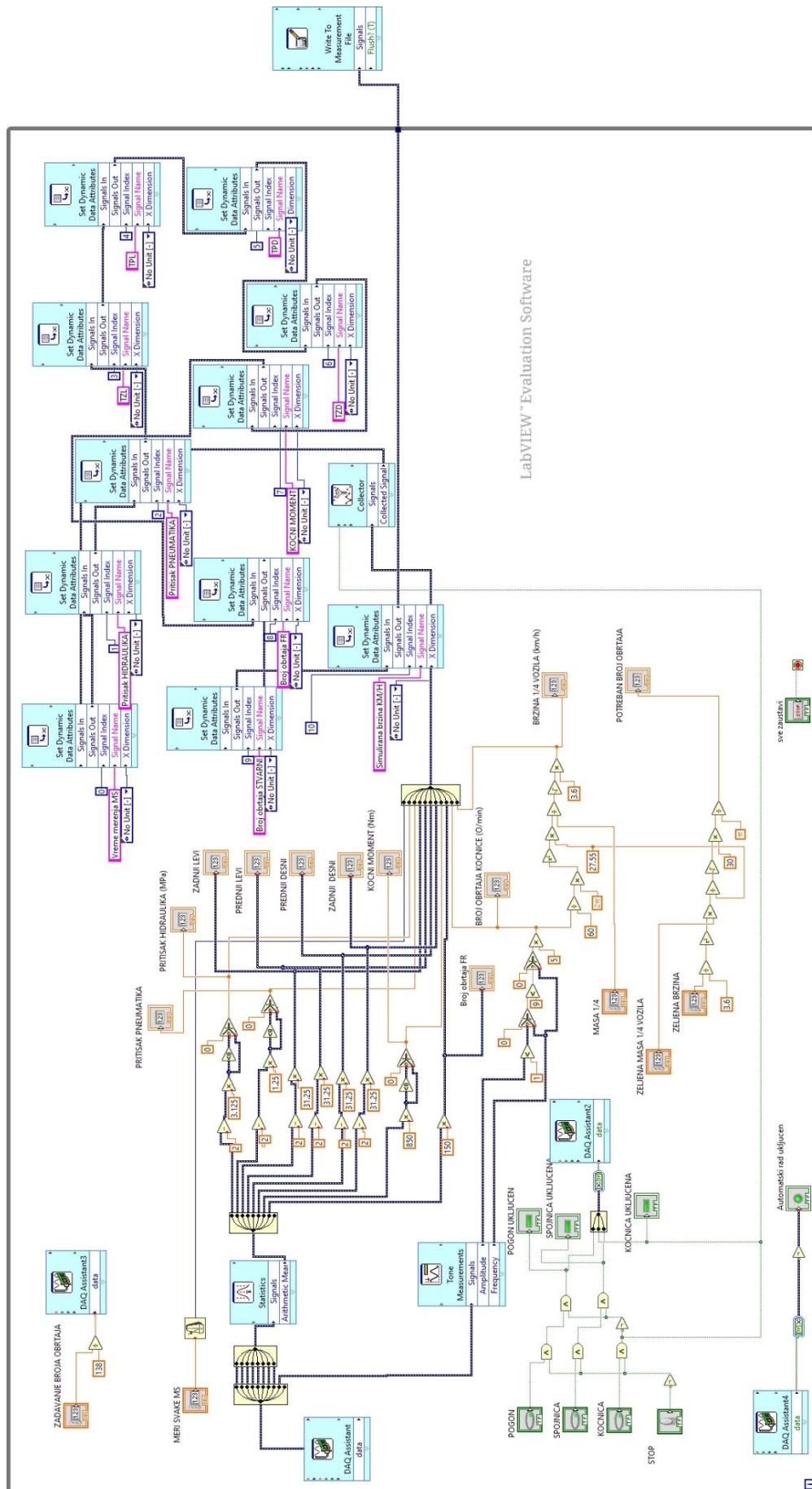
На слици 4.18 је јасно назначено да постоје још две опције и то опција *ZAUSTAVI SVE* и индикатор *AUTOMATSKI RAD UKLJUCEN*. Опција *ZAUSTAVI SVE* омогућава да се директно заустави рад програма, односно престаје било које мерење. Индикатор *AUTOMATSKI RAD UKLJUCEN* показује да ли је укључен рад динамометра на аутоматском режиму, односно режим управљања путем софтвера, или ручном режиму управљања. Када је индикатор црвене боје, као на слици 4.18, онда је динамометар укључен на ручни режим и ручно подешавање. Програм прати параметре и, када је софтвер овако укључен, није могуће управљати њиме са контролног панела. Када је динамометар укључен на аутоматском режиму, индикатор ће бити зелене боје и тада је могуће регулисати рад динамометра преко овог програма.



Слика 4.18 Аутоматски рад и заустављање софтвера

Софтвер има могућност да сачува све податке који су измерени, а почиње са чувањем података и њиховим меморисањем у тренутку када се активира команда *KOCNICA* у контролном панелу. Софтвер је тако подешен да не чува податке пре тога. Програм престаје са меморисањем у тренутку када се искључи команда *KOCNICA*, тј. када се активира опција *ZAUSTAVI SVE*.

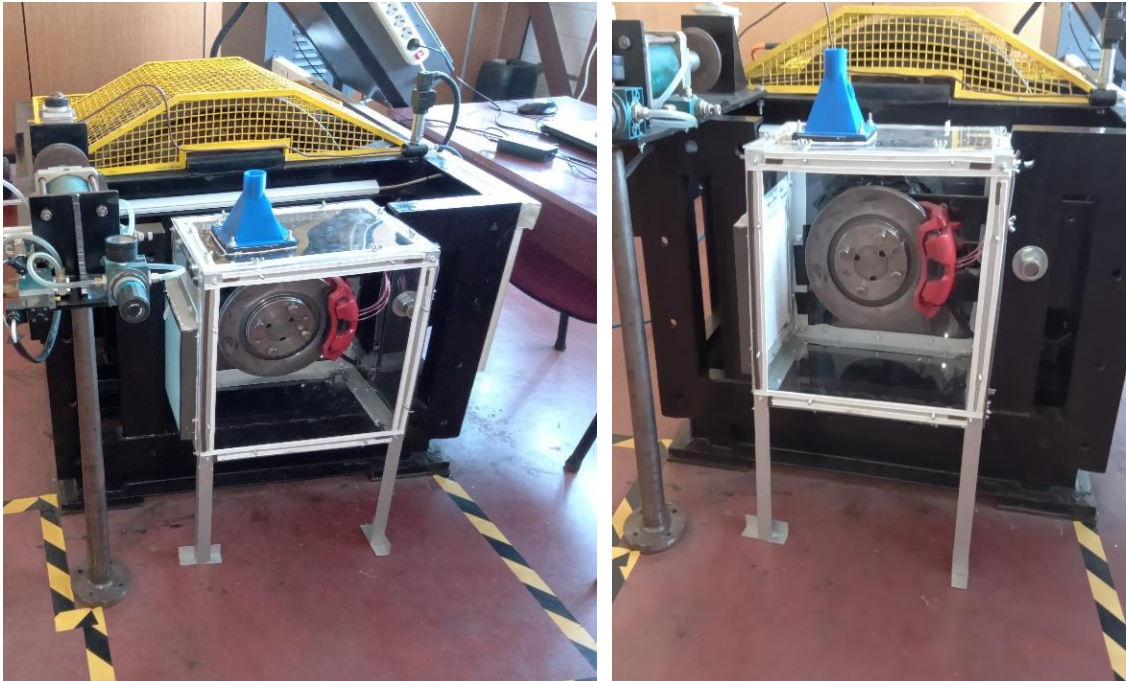
Да би претходно приказани интерфејс функционисао, иза њега стоји блок шема која је приказана на слици 4.19. Дата блок шема представља срж претходно приказаног интерфејса програма за управљање мерном инсталацијом. Ова шема је у позадини управљачког интерфејса и обједињује све претходно приказане опције са хардвером инерцијалног кочног динамометра. Елементи блок шеме сакупљају или прорачунавају податке које добијају преко управљачке јединице инерцијалног кочног динамометра и приказују их на управљачком интерфејсу као читљиве податке. Такође, на блок шеми је приказан сваки елемент који омогућава и да се подаци забележе у базу података. Блок шема је формирана у сврху остваривања експерименталног мерења и да би кориснику, приликом мерења, управљање било што једноставније, али и да буде лакша промена одређених вредности или других компоненти које су приказане у различитим панелима. Циљ израде блок шеме јесте да интерфејс буде функционалан, да се оствари лако сналажење при задавању вредности, промени и читању улазних или излазних величина и оствари једноставан прорачунски део, али свакако да се добије и софтвер који би омогућио ефикасно управљање инерцијалним кочним динамометром.



Слика 4.19 Блок шема софтвера за управљање инерцијалним кочним динамометром

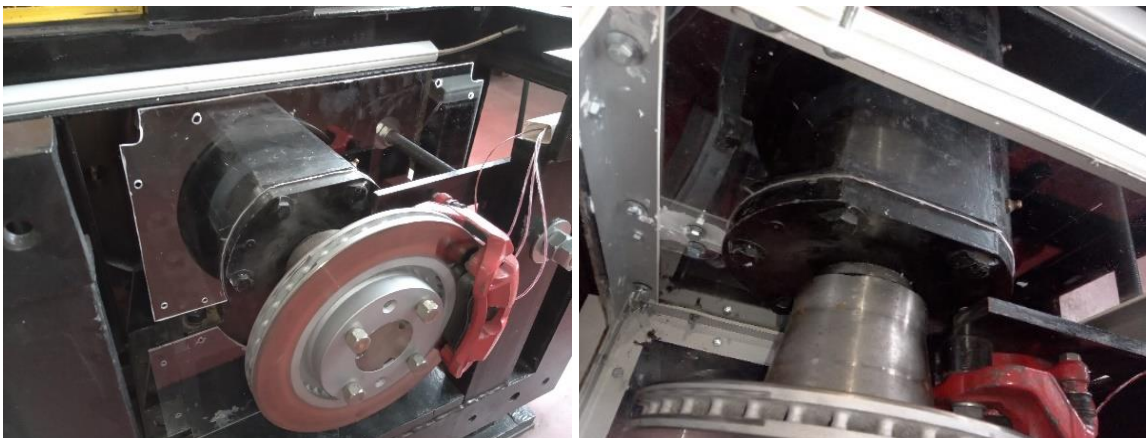
4.2 Модификације на инерцијалном кочном динамометру у циљу испитивања концентрације честица и примењени уређаји

Да би се извршило мерење концентрације честица које настају приликом хабања кочница, било је потребно извршити одређене модификације на инерцијалном кочном динамометру. Приликом мерења концентрације честица које настају при хабању кочница, потребно је изоловати кочницу од амбијенталног простора. На основу анализе кућишта које су развили други аутори, конструисано је кућиште које је приказано на слици 4.20, а које је постављено на инерцијалном кочном динамометру.



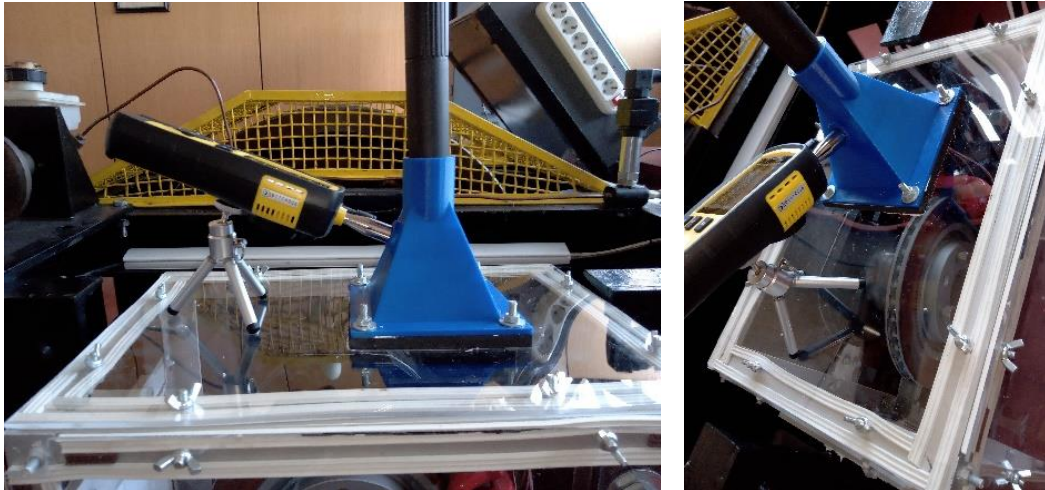
Слика 4.20 Кућиште за сакупљање честица на инерцијалног кочном динамометру

Носећа структура кућишта је направљена од алуминијумских L профила димензија 40 mm x 40 mm. Облик носеће структуре кућиште је прилагођен могућностима за правилно постављање на динамометру. Кућиште је затворено са свих страна. На носећој структури кућишта постављене су плоче од плексигласа дебљине 2 mm. Плоче плексигласа су прилагођење димензијама носеће структуре и инерцијалном кочном динамометру (слика 4.21).



Слика 4.21 Плоче плексигласа постављене на носећој структури кућишта

Да би се мерила концентрација честица које настају као продукт хабања кочница, из кућишта се морају извлачити честице, па тако мерни уређај *Trotec PC220* мора бити повезан директно са кућиштем. На горњем делу кућишта је постављен посебно конструисан елемент који има део у који се поставља уређај за мерење концентрације честица, као што је приказано на слици 4.22. После сваког отварања кућишта и сваког циклуса кочења потребно је проветрити и очистити кућиште, па се зато на овом елементу налази и посебно место где се може поставити и укључити уређај за извлачење ваздуха из кућишта.



Слика 4.22 Елемент за постављање уређаја за мерење честица и извлачење ваздуха из кућишта након мерења

Уређај за извлачење ваздуха је приказан на слици 4.23. Он је повезан преко елемента за везу са кућиштем. Овај уређај се укључује сваки пут после отварања кућишта и после сваког процеса кочења и има улогу да после мерења извуче ваздух са честицама из претходног процеса кочења.



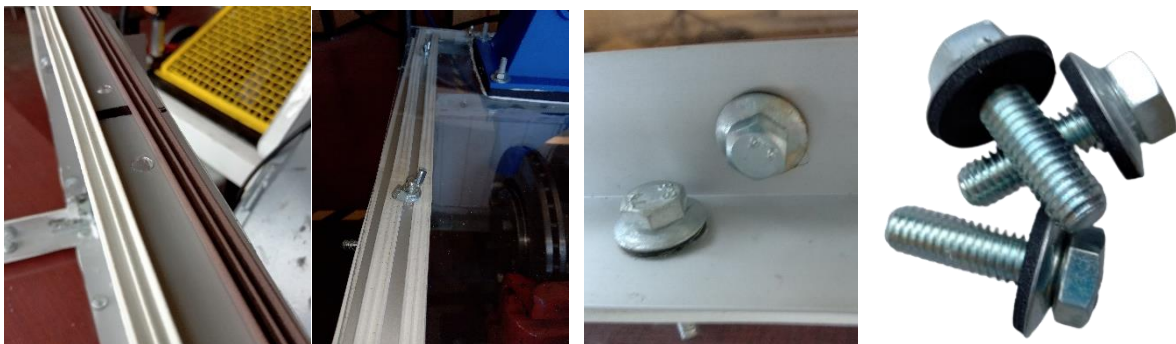
Слика 4.23 Елемент који повезује кућиште са уређајима за мерење честица и извлачење – пречишћавање ваздуха унутар кућишта

Да би се у кућиште увлачио чист ваздух без честица из амбијенталног простора, на кућишту постоји посебан отвор у коме је постављен *HEPA* филтер *Alpha AZB-F*. Улога овог филтера јесте да током рада уређаја за извлачење ваздуха из кућишта (саставни део уређаја за мерење концентрације честица), у кућиште кроз филтер уђе ваздух из амбијенталног простора који је пречишћен и не садржи честице. Овај филтер омогућава да се елиминира 99,7 % загађивача, као што су честице $PM_{2.5}$. На слици 4.24 је приказан начин постављања филтера на кућишту.

Да би се обезбедило да кућиште буде потпуно херметички затворено, што је неопходно да у кућиште не би допреле честице које нису продукт хабања кочница, на сваком отвору или на месту везе обезбеђено је заптивање применом гумених трака, гумених подлошки, силикона, гумених заптивки, ... На слици 4.25 су приказани примери заптивања на одређеним местима.



Слика 4.24 HEPA филтер за пречишћавање ваздуха који се увлачи у кућиште



Слика 4.25 Примери херметичког заптивања кућишта

4.2.1 Уређај за мерење концентрације честица

За мерење концентрације честица примењен је уређај *Trotec PC220* који је приказан на слици 4.26. Уређај за мерење концентрације честица са опремом је постављен на горњем делу кућишту и може мерити масену концентрацију или број насталих честица. Коришћен је режим за мерење масене концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. У овом режиму, максимална концентрација коју уређај може мерити је $2000 \mu g/m^3$. *Trotec PC220* је уређај који користи оптичку методу мерења, према којој се применом ласера мери величина и број честица, а уређај рачуна концентрацију увучених честица. Мерење и раздвајање концентрације честица применом овог уређаја се врши на основу стандарда *ISO-21501-4* (Одређивање расподеле величине честица - Интеракцијске методе осветљења појединачне честице - 4. део: Бројач честица у ваздуху помоћу распршења светлости у чистим просторима). Уређај поседује фабрички сертификат о испитивању, односно о калибрацији. Ефективност бројања овог уређаја је 50% за честице величине $0,3 \mu m$ и 100% за честице величине веће од $0,45 \mu m$. Карактеристике уређаја за мерење честица су приказане у табели 4.5. Ови подаци су у границама прихватљивог, што је то у складу са студијом [354]. Уређај за мерење концентрације честица је постављен у близини извора честица - у овом случају у близини кочнице.

Овај уређај није директно повезан са рачунаром, тј. налази се у *off-line* режиму. Оптички уређај има сопствену меморију и бележи податке у интерној меморији, а затим се забележени подаци преносе на рачунар. Дужина мерења концентрације насталих честица је 45 s, а затим се добија коначан резултат измерене концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Ти подаци се користе даље у анализи измерне концентрације честица.



Слика 4.26 Уређај за мерење концентрације честица насталих приликом хабања кочница

Табела 4.5 Карактеристике уређаја за мерење концентрације честица Trotec PC220

Карактеристика	Вредност / податак
Режими мерења	Концентрација, диференцијално, кумулативно
Приказивање резултата мерења	Масена концентрација честица, број честица
Метода мерења	Метода расипања светлости
Величине честица које се може вршити бројање [μm]	0,3; 0,5; 1; 2,5; 5; 10
Величине честица за које се може вршити мерење масене концентрације честица [$\mu\text{m}/\text{m}^3$]	2,5; 10
Проток [l/min]	2,83
Ефикасност мерења	50% за честице до 0,3 μm 100% за честице веће од 0,45 μm
Уверење о калибрацији уређаја	Да

4.2.2 Уређај за мерење релативне влажности ваздуха и амбијенталне температуре

Потребно је узети у обзир два допунска фактора која утичу на концентрацију честица, а то су амбијентална температура и влажност ваздуха. За мерење релативне влажности ваздуха у кућишту и амбијенталне температуре коришћен је уређај *Auriol 4-LD5631*, који је приказан на слици 4.27, док су техничке карактеристике уређаја приказане у табели 4.6. Овај уређај има два елемента од којих је један постављен у кућишту, док се на другом приказују измерене вредности. На крају мерења се бележе подаци и уносе у базу измерених вредности на рачунару.



Слика 4.27 Уређај за мерење релативне влажности ваздуха и амбијенталне температуре унутар кућишта

Табела 4.6 Карактеристике уређаја за мерење амбијенталне температуре и влажности ваздуха Auriol 4-LD5631

Карактеристика	Вредност / податак
Мерни опсег мерења влажности ваздуха	20% до 95%
Максимална грешка у приказивању влажности ваздуха	$\pm 5\%$
Мерни опсег уређаја за мерење температуре унутар кућишта	-40 °C до +60 °C
Максимална грешка у приказивању температуре уређаја унутар кућишта	$\pm 1\text{ °C}$ (0 °C до 50 °C); $\pm 2\text{ °C}$ (-40 °C до 0 °C, 50 °C до 60 °C)
Мерни опсег уређаја за мерење температуре ван кућишта	-10 °C до +50 °C
Максимална грешка у приказивању температуре уређаја ван кућишта	$\pm 1\text{ °C}$ (0 °C до 50 °C); $\pm 1,5\text{ °C}$ (-10 °C до 0 °C)
Максимална дозвољена удаљеност између уређаја унутар и ван кућишта	50 m

4.3 Примењени тест и начин мерења

На бази анализе радова великог броја аутора, формиран су сопствени тестови како би се извршила анализа и дошло до закључка о емисији насталих честица услед хабања кочних елемената. Анализирани су и примењени улазни фактори кочења на основу којих је формиран тест који су примењен у истраживању приказаном у овој дисертацији.

4.3.1 Утицајни фактори и њихова подела

На слици 4.28 приказани су фактори чији је утицај на честице анализиран, али и њихова подела према месту прикупљања. Утицајни фактори и се могу поделити на две групе, и то на директне и индиректне. Директни фактори који утичу на концентрацију честица су они фактори на које возач може утицати својим понашањем у току вожње, односно кочења. У индиректне факторе сврстани су они фактори на које сам возач не може директно утицати, већ су они резултат процеса кочења или околине.



Слика 4.28 Утицајни фактори који су посматрани у истраживању

У директне утицајне факторе спадају: дефинисана почетна брзина кретања возила, симулирано оптерећење $\frac{1}{4}$ возила, кочни притисак у хидрауличком делу кочне

инсталације, различите врсте кочних плочица. У индиректне утицајне факторе спадају: време кочења, момент кочења, кинетичка енергија возила, успорење, температура кочних плочица (средња вредност температуре са сва четири давача температуре), коефицијент трења између фриксионих парова, амбијентална температура, релативна влажност ваздуха.

Неки од фактора су добијени применом различитих једначина, а на основу измерених вредности. Први фактор јесте кинетичка енергија возила дата једначином (4.1).

Једначина (4.8), преко које је прорачуната средња вредност успорења возила, представља однос дефинисане брзине (v) дате у m/s и времена које је потребно до потпуног заустављања (t) датог у s :

$$a = \frac{v}{t}. \quad (4.8)$$

Применом давача и чувањем података бележи се време до потпуног заустављања, то значи да је ово време познато и коришћено у прорачуну.

Температура кочних плочица мерена применом четири давача који се налазе унутар кочних плочица. У прорачунима и анализама коришћена је средња вредност четири измерене вредности. Примењена је средња вредност температуре спољног наилазног дела кочне плочице (t_{sn}), спољног излазног дела кочне плочице (t_{si}), унутрашњег наилазног дела кочне плочице (t_{un}), и унутрашњег излазног дела кочне плочице (t_{ui}), што је приказано једначином (4.9):

$$t_{kp} = \frac{t_{sn} + t_{si} + t_{un} + t_{ui}}{4}. \quad (4.9)$$

Када је реч о коефицијенту трења, он је израчунат на основу једначине (4.10):

$$\mu = \frac{M_k}{2 \cdot p \cdot A_k \cdot r_e}, \quad (4.10)$$

где су: M_k - кочни момент, p - притисак у кочној инсталацији, A_k - површина клипа и r_e - ефективни радијус.

4.3.2 Вредности улазних фактора и примењени тест

У табели 4.7 су представљене вредности улазних фактора приликом мерења. Вредности које су вариране приликом мерења су у складу са анализом и прегледом других истраживања која су вршена у циљу анализе хабања кочница и настанка честица. Анализом је утврђено да у неколико истраживања или возних циклуса максимална брзина не прелази 80 km/h , а у циљу анализе утицаја брзине на настанак честица, брзине су у овом истраживању вариране у опсегу од 20 km/h до 80 km/h .

Притисак у кочном систему је у складу са вредностима које су приказане у претходним истраживањима. Примењени тест је формиран на основу објављених резултата других аутора, као и возних циклуса који су коришћени у анализираним истраживањима кочних система.

Табела 4.7 Примењене вредности улазних фактора

Фактор	Вредност
Симулирана маса $\frac{1}{4}$ возила (kg)	150, 200
Дефинисана почетна брзина возила (km/h)	20, 40, 60, 80
Кочни притисак у хидрауличком делу кочне инсталације (MPa)	1, 2, 3, 4

На основу усвојених вредности фактора кочења, у табели 4.4 су приказане комбинације улазних фактора кочења које су примењене при једном мерењу, односно при једном тесту. Свака вредност фактора је обухваћена и комбинована са вредностима осталих фактора, што омогућава прецизну анализу утицаја сваког од фактора при промени другог.

Иста метода, односно иста комбинација фактора је примењена и за Тагучи методу планирања експеримента. Тагучи метода се састоји од три корака: планирање експеримента, анализа односа сигнал-шум (S/N) (енгл. *signal-to-noise ratio* - S/N) и оптимизација.

У првом кораку, скуп експеримената је планиран да се истраже утицаји различитих фактора на перформансе процеса. Експерименти су планирани на основу ортогоналних низова, који су скуп систематски распоређених тест случајева који омогућавају ефикасну и ефективну идентификацију најзначајнијих фактора. Ортогонални низови смањују број потребних експеримената истовремено осигуравајући да се сви фактори тестирају на различитим нивоима.

У кораку анализе односа S/N , перформансе сваког експеримента се процењују на основу односа сигнала (жељени излаз) према шуму (нежељени излаз). Однос S/N се користи за одређивање оптималних нивоа фактора који ће максимизирати перформансе производа или процеса.

Корак оптимизације укључује идентификацију оптималних нивоа фактора на основу анализе односа S/N и спровођење експеримената за потврду ради валидације резултата. Тагучијева метода планирања експеримента одговара у овом случају методи L32 (2^{14}). Ознака L32 указује да је укупно примењено 32 комбинације фактора, према табели 4.8. Оваква Тагучи метода планирања експеримента је изабран јер омогућава да се сагледају и прецизније прорачунају, односно утврде утицаји фактора на концентрацију честица. Већ број комбинације фактора доводи до бољих закључака, што је утврђено у [355], где је детаљно представљена Тагучијева метода планирања експеримента. Примена свих комбинација омогућава оптималну анализу, што је важно за добијање тачних и прецизних закључака. Ова три фактора су једина три улазна који се задају у току једног мерења.

Табела 4.8 Комбинације улазних фактора примењених у тесту

Редни број комбинације	Симулирана маса ¼ возила (kg)	Дефинисана почетна брзина возила (km/h)	Кочни притисак у хидрауличком делу кочне инсталације (МПа)
1.	150	20	1
2.	150	20	2
3.	150	20	3
4.	150	20	4
5.	150	40	1
6.	150	40	2
7.	150	40	3
8.	150	40	4
9.	150	60	1
10.	150	60	2
11.	150	60	3
12.	150	60	4
13.	150	80	1
14.	150	80	2
15.	150	80	3
16.	150	80	4
17.	250	20	1
18.	250	20	2
19.	250	20	3
20.	250	20	4
21.	250	40	1
22.	250	40	2
23.	250	40	3
24.	250	40	4
25.	250	60	1
26.	250	60	2
27.	250	60	3
28.	250	60	4
29.	250	80	1
30.	250	80	2
31.	250	80	3
32.	250	80	4

4.3.3 Поступак мерења

Да би се добили репрезентативни подаци мерења, било је потребно дефинисати процедуру једног мерења које је спроведено у летњим месецима. Дефинисано је да почетна температура кочних плочица буде $28\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пре сваког мерења, кочне плочице, диск, сви елементи унутар кућишта и простор унутар кућишта су пребрисани и очишћени да би се елиминисале честице из претходног циклуса кочења или честице које су ушле у кућиште приликом отварања истог, а нису продукт хабања кочница. После затварања кућишта, сваки пут је био укључен уређај за извлачење ваздуха из кућишта да би се избацио ваздух са честицама и у кућиште увукао ваздух који је пречишћен кроз *HEPA* филтер, и на тај начин се елиминисале честице које би биле у ваздуху. Уређај за извлачење ваздуха је био сваки пут укључен пре мерења и дужина трајања пречишћавања ваздуха у кућишту је била 300 s. После сваких 300 s, а пре мерења, проверено је да ли је добро пречишћен ваздух. Кућиште је проветрено сваки пут после мерења и то све док се не постигне концентрација честица $\text{PM}_{2.5}$ и PM_{10} од $0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ до максимално $2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, што је приказано на слици 4.29 приликом једне провере концентрације честица у кућишту.

После проветравања кућишта, уређај за мерење концентрације честица подешава се на мод *MASS – CONCENTRATION*. На рачунару се задају вредности за покретање инерцијалног кочног динамометра (брзина, маса и притисак у систему за кочење). Затим се покреће инерцијални кочни динамометар, а када се достигне потребан број обртаја замајне масе, односно дефинисана почетна брзина возила на основу прорачуна у софтверу, активира се уређај за мерење концентрације честица, а потом се активира систем за кочење. Уређај за мерење концентрације честица подешен да мери концентрацију честица 45 s, а почетак мерења је на почетку процеса кочења и траје до истека тог дефинисаног времена. После мерења, бележе се измерене вредности на уређајима за мерење концентрације честица, релативне влажности ваздуха и амбијенталне температуре. Ти подаци се уносе у базу података, заједно са подацима који су измерени путем давача који су постављени на инерцијалном кочном динамометру. Сви подаци се касније користи за анализу утицајних фактора на концентрацију насталих честица.



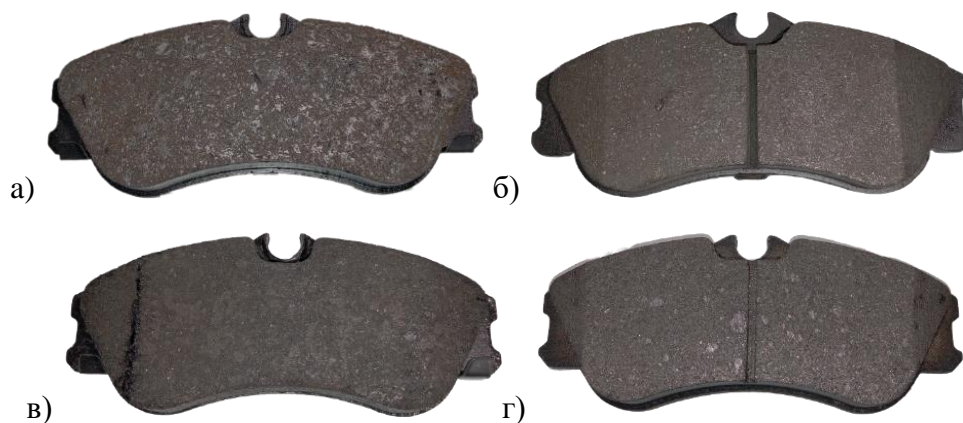
Слика 4.29 Провера концентрације честица у кућишту после пречишћавања ваздуха

Мерење концентрације честица при једној групи вредности фактора понавља се три пута. Ако је неко мерење неуспешно (уколико нису измерене вредности, није укључен уређај, дошло до престанка рада инерцијалног кочног динамометра, отказа неке компоненте или нису добро унети улазни фактори рада инерцијалног кочног динамометра, ...), оно се понавља. За анализу података се користе све добијене вредности или за одређене анализе, средња вредност измерених и добијених вредности. После мерења врши се поновно процес хлађења кочних парова до почетне температуре кочних плочица, чишћење свих површина унутар кућишта и проветравање кућишта.

4.4 Објекат мерења

У овом истраживању коришћене су четири различите кочне плочице које су доступне на тржишту у Републици Србији. Кочне плочице су различитих произвођача, разликују се према свом саставу, али исто тако и према неким елементима конструкције. Оне у истраживању носе кодне ознаке *A, B, C* и *D*. Битно је напоменути чињеницу да би се при истраживању утицаја геометријских обележја кочних плочица, најпозданији резултати добили при коришћењу наменски направљених кочних плочица за потребе истраживања, а не коришћењем оних доступних на тржишту, што није било могуће остварити у тренутку израде истраживања у докторској дисертацији.

На слици 4.30 су приказане фрикционе кочне плочице које су коришћене у истраживању. Кочне плочице разликују по својој геометрији, односно облику фрикционе површине. Коришћене су кочне плочице које имају: потпуно равну кочну површину, централни прорез по средини и закошене бочне ивице и само закошене бочне ивице без прореза по средини кочне плочице.



Слика 4.30 Примењене кочне плочице: а) кочна плочица А, б) кочна плочица В, в) кочна плочица С, г) кочна плочица D

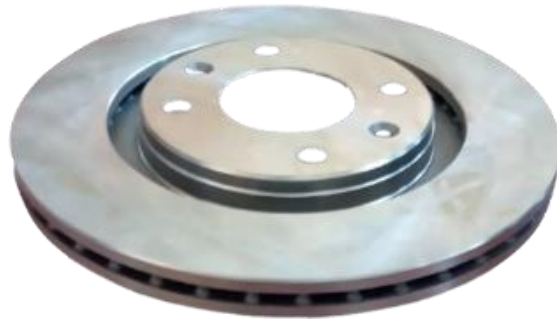
У циљу описа кочних плочица формирана је табела 4.9 у којој су представљени подаци о кочним плочицама и њихове карактеристике на основу доступних података. Свака од ових плочица је доступна на тржишту, а разликују се и према ценовном рангу. Карактеристике ових кочних плочица се разликују и према саставу јер су неке од њих представљене као еколошки прихватљиве, са ознаком да су произведене према стандарду са *N* категоријом смеше, а неке од њих немају такве ознаке.

Мада су све кочне плочице намењене за исти модел возила, њихове геометријске карактеристике се разликују. Кочна плочица *A* је без прореза и закошења бочних ивица, што значи да има потпуно равну фрикциону површину, а према свом саставу спада у полуметалне кочне плочице. Кочна плочица *B* спада у кочне плочице које имају прорез по средини фрикционе површине и закошење бочних ивица. Ова кочна плочица према свом саставу спада у кочне плочице са ниским процентом метала, односно према спецификацији произвођача у свом саставу садржи еколошки прихватљиве материјале. Кочна плочица *C* према својој геометрији нема прорез по средини, али има бочне закошене ивице. Ова кочна плочица спада према свом саставу у кочне плочице са *N* смешом, тако да и ова кочна плочица спада према саставу у плочице са ниским процентом метала. Кочна плочица *D* има прорез по средини фрикционе површине и закошене бочне ивице, а према саставу спада у групу полуметалних кочних плочица.

Табела 4.9 Карактеристике коришћених кочних плочица

Кодна ознака кочне плочице	Тип кочне плочице	Геометрија кочне плочице
<i>A</i>	Полуметалне	Без прореза и закошења
<i>B</i>	Кочне плочице са ниским процентом метала, еколошки прихватљиви материјалу	Прорез по средини и закошење на бочним странама
<i>C</i>	<i>N</i> категорија смеше	Закошење на бочним странама
<i>D</i>	Полуметалне	Прорез по средини и закошење на бочним странама

Као кочни диск, примењен је диск од ливеног гвожђа (сиви лив), који према својој конструкцији припада у групу вентилираних дискова. Овај кочни диск одговара возилу за које су намењене и кочне плочице. У овом истраживању је акценат истраживања стављен на хабање кочних плочица, па је примењен само један диск (слика 4.31).



Слика 4.31 Диск примењен у истраживању

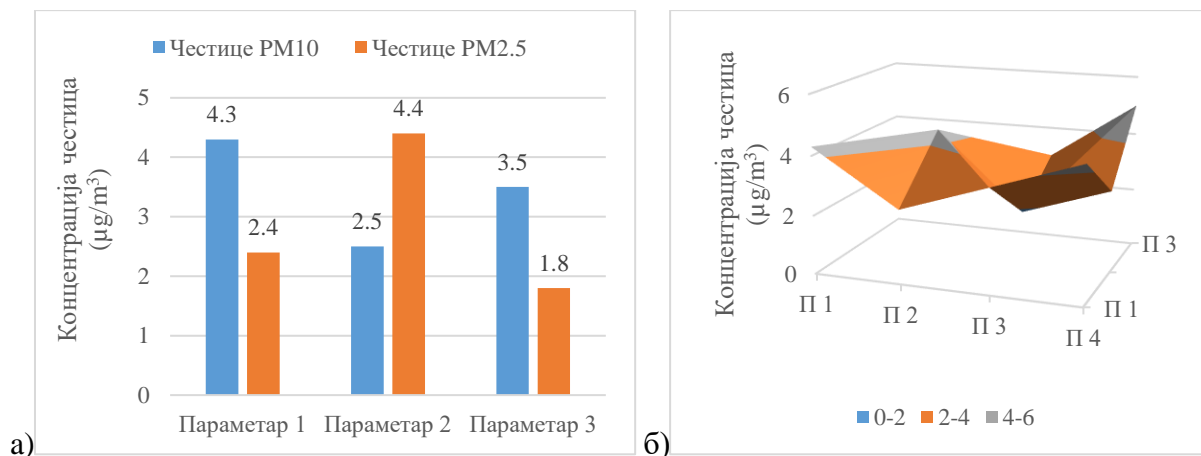
4.5 Оцена резултата

Добијени резултати мерења су анализирани применом више метода да би се дошло до закључака о утицају различитих параметара на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. На основу анализе добијених података мерења, дошло се до закључака о утицају различитих параметара на концентрацију насталих честица, а према кочним плочицама које су коришћене у експерименту. Добијени подаци мерења су приказани и анализирани применом следећих метода:

- упоредна анализа дијаграма са две и три осе, која омогућава поређење података добијених мерењем и доношење закључака о насталој емисији честица. Применом оваквог графичког приказа резултата мерења може се увидети разлика о утицају анализираних фактора и кочних плочица;
- примена Тагучи методе за утврђивање најутицајнијих фактора, која омогућава да се на основу планираног експеримента и на основу вредности добијених мерењем, графичко-статистичком методом одреди утицај кочних фактора за сваку кочну плочицу понаособ. На основу свих добијених података се може на крају закључити који су то најутицајнији кочни фактора који делују на концентрацију насталих честица (притисак у кочном систему - у даљем тексту притисак, дефинисана почетна брзина возила - у даљем тексту брзина и оптерећење једне четвртине возила - у даљем тексту оптерећење);
- корелациона анализа, уз помоћ које се применом статистичке методе и више тестова добијају подаци о рангу утицајних параметара. На основу тога се може одредити значај и јачина везе између сваког од параметра који потенцијално имају утицај на емисију честица. У овом случају је дато више параметара у односу на Тагучи анализу, где су у обзир узети само кочни фактори,
- неуронске мреже, које у основи представљају једну од метода за предвиђање резултата и добијених вредности. Применом овакве методе може се развити модел помоћу кога би се извршило предвиђање резултата уз варирање различитих фактора и без мерења. То доводи до примене модела који се може сврстати у ситуационе методе за предвиђање емисије, односно концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} .

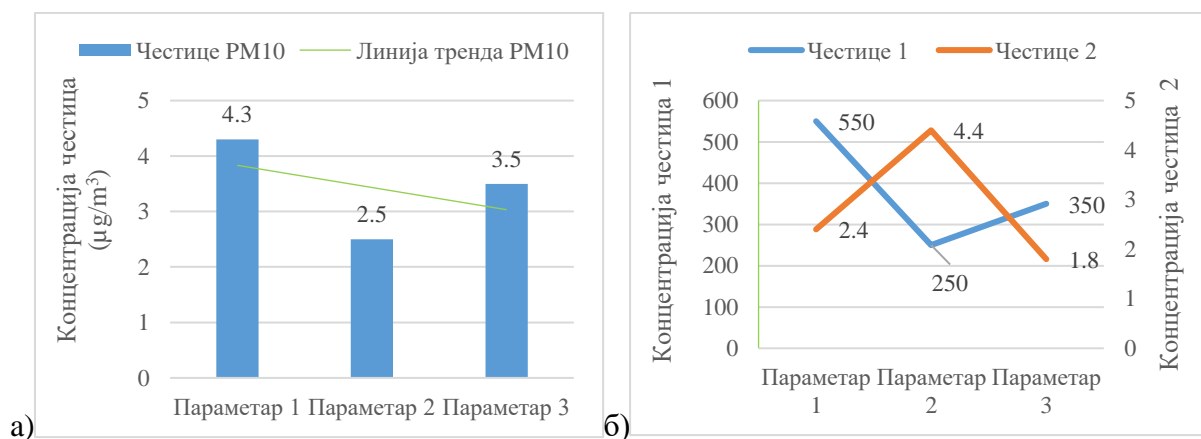
4.5.1 Упоредне дијаграмске анализе

За представљање добијених експерименталних података примењене су две различите врсте дијаграма, а примери добијених дијаграма приказани на слици 4.32. Избор дијаграма је извршен према томе шта се од података жели приказати и начин на који се подаци желе приказати.



Слика 4.32 Примењени дијаграми у приказу резултата: а) дводимензионални дијаграми (2D дијаграми), б) тродимензионални дијаграми (3D дијаграми)

Примењена су два типа дводимензионалних дијаграма, који су приказани на слици 4.33. Први тип дијаграма је приказан на слици 4.33а и то је стубни дијаграм са линијом тренда. Свакако, линија тренда даје јасну слику о порасту или паду концентрације честица. Други тип дијаграма је приказан на слици 4.33б и он представља дијаграм где су добијене вредности линијски приказане.



Слика 4.33 Примењени дводимензионални дијаграми у приказу резултата: а) дводимензионални стубни дијаграм са линијом тренда, б) дводимензионални линијски дијаграм

4.5.2 Тагучи анализа и анализа варијансе (ANOVA)

Тагучи метода је примењена за анализу фактора кочења, односно утицаја директних фактора на концентрацију честица PM₁₀ и PM_{2.5}, са посебним освртом на различите кочне плочице. Како је раније наведено, у докторској дисертацији је коришћен Тагучи метода планирања експеримента, да би се касније извршила анализа добијених података применом Тагучи анализе. За ову анализу примењена је метода типа L32 (2¹ 4²).

Тагучи метода планирања експеримента користи ортогоналне низове, који процењују ефекте фактора на средњу вредност и варијацију одговора. Ортогонални низ значи да је метода уравнотежена, тако да су нивои фактора једнако пондерисани. Због тога се сваки фактор може проценити независно од свих осталих фактора, тако да ефекат једног фактора не утиче на процену другог фактора. Ово може смањити време и трошкове везане са експериментом када се користе факторијални дизајни [356].

Ознака методе L (број) (број^{експонент}) означава следеће:

- L(број) = број података за анализу (број^{експонент}),
- број = број нивоа за сваки фактор,
- експонент = број фактора [357].

Тако, на пример, L27(3¹³) значи да метода има 27 комбинација фактора и 13 фактора са 3 нивоа [355, 356]. Ако је нотација L (број^{експонент} број^{експонент}), онда се ради о методи на мешовитом нивоу, односно уколико се напише нпр. L18 (2¹ 3⁷), значи да метода има 18 комбинација фактора, 1 фактор са 2 нивоа и 7 фактора са 3 нивоа [355, 357]. Оваква два низа примењена су у истраживању [355] и извршено је поређење применом сета података који је коришћен у докторској дисертацији.

У претходном делу су у табели 4.9 приказане комбинације фактора који су примењени за каснију Тагучи анализу утицаја фактора на концентрације честица. Сви фактори су примењени за све четири кочне плочице и добијени резултати су упоређени. Као софтверски пакет је примењен *MiniTab* за софтверску анализу. У овом случају примењена је Тагучи анализа на три улазна фактора, односно на улазне кочне факторе упоређујући понаособ утицај на концентрацију честица PM₁₀ и PM_{2.5}. Као фактори који су узети у обзир за утицај на концентрацију насталих честица су:

- дефинисана почетна брзина кретања возила,
- симулирано оптерећење ¼ возила,
- кочни притисак у хидрауличком делу кочне инсталације.

Тагучи анализа се примењује у низу различитих области и има широку примену у циљу оптимизације, али и закључивања о утицају различитих фактора на неку појаву или догађај. Применом Тагучи анализе, према [358-360] се могу пронаћи оптимални фактори за случај неког догађаја или појаве у зависности од тога да ли се жели постићи већа или мања вредност неког фактора. Применом Тагучи анализе долази до се процене односа S/N за сваки од одабраних фактора. Приликом одабира оптимизације фактора потребно је пре свега одабрати који је однос S/N повољнији. Применом ове методе се могу оптимизовати фактори на тај начин да је резултат повољан ако се добију веће вредности излаза (енгл. *larger is better*), односно да је оптимална вредност излаза мања (енгл. *smaller is better*). За случај концентрације честица, потребно је оптимизовати факторе тако да је излаз мањи. Вредност S/N односа за излаз има мању вредност приликом оптимизације, израз (4.11):

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (4.11)$$

где су: n - број података (испитивања), y – измерени подаци у i -том испитивању.

Ова једначина је важна за анализу у докторској дисертацији јер је потребна минимална концентрација честица која настаје приликом хабања кочница. Самим тим, улазни подаци које је потребно оптимизовати треба да дају минималну вредност концентрације честица PM₁₀ и PM_{2.5}.

Анализа варијансе (енгл. *Analysis of Variance* - ANOVA) представља методу која је различита од Тагучи методе, али се често могу користити у комбинацији. ANOVA је метода преко које се може извршити анализа утицаја различитих фактора на неку посматрану величину. Конкретно, овде је применом ANOVA извршена анализа утицаја

фактора на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ за сваку кочну плочицу посебно. И у овом случају је за анализу примењен софтверски пакет *Minitab 19*. За *ANOVA* су коришћени исти подаци као и за Тагучи анализе. За анализу се рачуна утицај фактора и који се касније упоређују да би се дошло до закључа о утицају сваког појединачног фактора на концентрацију честица, преко F односа који представља значајан фактор за закључивање о утицају различитих фактора [361]. F однос је статистички параметар који показује однос између група и варијанси унутар једног скупа података. Може укључити било који број фактора у једном експерименту. Резултирајућа анализа применом *ANOVA* може дати ефекат сваког фактора независно, али може пружити информације о интеракцијама између фактора. На основу [347, 362], приликом прорачуна, рачунају се следеће вредности: степен слободе, сума квадрата, средња вредност суме квадрата, F однос, процентуално учешће сваког фактора на концентрацију честица.

Помоћу ове методе могуће је израдити дијаграме пресека сваког фактора на основу којих се графички може приказати и закључити о утицају сваког фактора на концентрације честица. На основу добијених података анализе о утицају различитих фактора, а применом прорачуна у софтверу, формирана је табела у којој су приказани рангови утицаја улазних фактора на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у зависности од кочних плочица које су примењене.

4.5.3 Корелациона анализа

Корелациона анализа представља методу утврђивања јачине везе између различитих параметара и варијабли. У дисертацији, корелациона анализа је коришћена за утврђивање зависности између концентрације честица PM_{10} , односно $PM_{2.5}$ и осталих 11 параметара који су измерени или израчунати приликом вршења експеримента. Применом корелационе анализе могуће је утврдити значај везе и утицај појединих параметара на концентрацију честица. Коришћени су следећи параметри:

1. дефинисана почетна брзина возила,
2. симулирано оптерећење једне четвртине возила,
3. притисак у хидрауличком делу кочне инсталације,
4. кочни момент,
5. успорење,
6. време кочења,
7. кинетичка енергија,
8. средња вредност температура кочних плочица,
9. коефицијент трења између фриксионих површина,
10. амбијентална температура,
11. релативна влажност ваздуха.

Корелациона анализа представља део регресионе анализе, преко које се врши анализа међусобне повезаности између две варијабле, односно параметра. Корелација између две варијабле може бити позитивна и негативна. За случај позитивне корелације између две варијабле постоји таква веза да са порастом вредности једног параметра и друга вредност расте. Код негативне корелације са порастом вредности једног параметра друга вредност параметра опада. Без обзира о којој врсти корелације да је реч, свакако је важно да између два параметра постоји веза. Веза између два параметра исказује се преко коефицијента корелације. Преко коефицијента корелације утврђује се од коликог је значаја веза између два параметра или варијабле [363, 364]. На основу табеле 4.10 се може увидети вредност корелације и интерпретација корелационе везе, која је уједно коришћена као скала и

начин за тумачење резултата корелационе анализе у докторској дисертацији. У овом случају су све вредности приказане позитивно, односно за случај позитивне корелације, али би иста интерпретација била и за негативну корелацију, само би у том случају постојао знак минус (-).

За одређивање корелације, односно везе између два параметра анализира се њихово међусобно расипање, као и начин расипања да би се закључило да ли постоји пораст или смањење једног параметра у односу на други. Што је расипање података мање, то је јача корелациона веза између два посматрана податка, односно параметра.

Табела 4.10 Вредности корелације и њихова јачина везе [364]

Вредност коефицијента корелације	Интерпретација корелационе везе
0,00 до 0,30	Веома слаба корелациона веза
0,31 до 0,50	Слаба корелациона веза
0,51 до 0,70	Умерена корелациона веза
0,71 до 0,90	Јака корелациона веза
0,91 до 1,00	Веома јака корелациона веза

Када је у питању корелациона анализа, веома значајан параметар за усвајање постојања корелационе везе између добијених резултата јесте статистичка значајност, односно p вредност. Анализом p вредности се оцењује да ли су добијене вредности корелације значајне и на ком нивоу су значајне и да ли корелацију треба узети у обзир, односно да ли треба веровати у добијене податке или их је потребно одбацити. У зависности од корелационе анализе, најчешће вредности које се узимају као валидни резултати корелације су резултати где је $p < 0,01$ или $p < 0,05$. Претходно наведене вредности приказују ниво значајности корелације. Тако, уколико је вредност $p < 0,01$ каже се да је корелација значајна на нивоу од 0,01. За случај када је $p < 0,05$ може се рећи да је коефицијент корелације значајан на нивоу од 0,05. У корелационим анализама поред коефицијента корелације, потребно је узети у обзир и овај параметар. Уколико је вредност параметра већа од наведених вредности, одбацује се вредност корелације, односно не узима се у обзир. Уколико је вредност мања или једнака наведеним вредностима, корелација се тада усваја и узима се у обзир. У суштини, p вредност омогућава да се одреди да ли су резултати корелационе анализе резултат стварне везе између променљивих или резултат случајних варијација [365-367].

У докторској дисертацији су за корелациону анализу коришћена два коефицијента корелације да би се тачно и на оптималан начин утврдило који су параметри који су у корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} . У наставку ће бити објашњени коефицијенти корелације који су примењени, а то су:

- Пирсонов коефицијент корелације и
- Спирманов коефицијент корелације.

4.5.3.1 Пирсонов коефицијент корелације

Коефицијент линеарне корелације (прост или Пирсонов коефицијент корелације) је показатељ корелације за случај анализе слагања две променљиве у линеарном односу. Коефицијент линеарне корелације је релативни показатељ корелације између две варијабле, независан од јединица мере варијабле X и Y . Уколико се не ради о линеарној зависности, може доћи до искривљених, односно погрешних закључака. Самим тим,

дијаграм растурања може показати да ли постоји нелинеарна веза варијабли или не постоји веза. Вредност коефицијента корелације није довољна да се закључи да ли је веза променљивих линеарна. На основу [363, 368], Пирсонов коефицијент корелације (r_p) се може израчунати применом једначине (4.12).

$$r_p = \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (4.12)$$

где су: X_i – вредности првог скупа података, Y_i – вредности другог скупа података, \bar{X} – средња вредност првог скупа података, \bar{Y} – средња вредност другог скупа података

4.5.3.2 Спирманов коефицијент корелације

Спирманов коефицијент корелације или Спирманов коефицијент корелације ранга се користи за случајеве одређивања повезаности између варијабли када се не ради о линеарној корелацији. Базира се на томе да се измери доследност повезаности између варијабли, а облик повезаности, као што је линеарни облик који је услов за примену Пирсоновог коефицијента, није битан. Спирманов коефицијент се користи када међу варијаблама не постоји линеарна повезаност, а није могуће применити одговарајућу трансформацију којом би се повезаност трансформисала у линеарну зависност. Приликом примене Спирмановог коефицијента, вредности варијабли потребно је рангирати и на такав начин свести на заједничку меру. На основу референце [363, 368], Спирманов коефицијент корелације се може израчунати преко једначине (4.13):

$$r_s = 1 - 6 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)}, \quad (4.13)$$

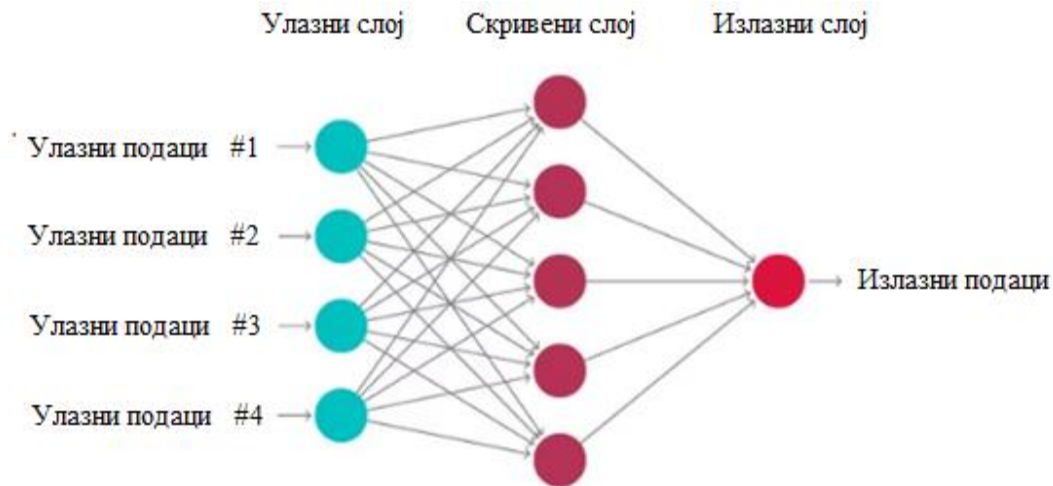
где су: d_i - разлика вредности рангова две посматране варијабле, n - је број различитих серија.

4.5.4 Неуронске мреже

За развој модела предвиђања концентрације честица, а на основу задавања вредности параметара који су коришћени у истраживању, примењене су неуронске мреже (енгл. *artificial neural networks* - ANNs или *simulated neural networks* - SNNs). У истраживању Васиљевић и др. [369] су применом неуронских мрежа и са једним сетом података већ извршили предвиђање концентрације честица које настају хабањем кочница, па је на основу тога и у докторској дисертацији примењен исти модел који је проширен другим параметрима за предвиђање емисије честица.

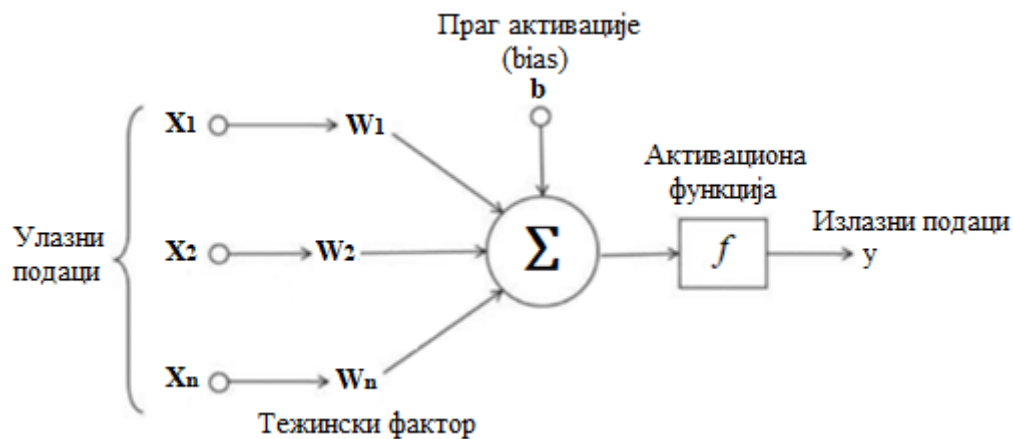
Неуронске мреже су скуп алгоритама по узору на људски мозак који су дизајнирани тако да препознају законитости у подацима које је потребно обрадити, а све то на основу учења. Обрасци које препознају су нумерички садржани у векторима у које морају бити преведени сви подаци из стварног света, било да су то слике, звук, текст или временска серија. Неуронска мрежа (слика 4.34) се састоји од неколико слојева који су међусобно повезани. У принципу, најважнији слојеви су улазни слојеви и излазни слојеви између којих се налазе тзв. скривени слојеви који имају за циљ обраду података да би се улазни подаци претворили у излазне податке. Сваки слој се састоји од неурона, а улазних неурона има онолико колико има улазних података, односно категорија улазних

података. Са друге стране, слој излазних података садржи онолико излазних неурона колико постоји излазних података. Поред тога, битно је напоменути да су излазни слојеви они слојеви који на крају дају коначне резултате или предвиђање резултата. Скривени слојеви су слојеви између улазних и излазних слојева, а тих слојева може бити много више од једног.



Слика 4.34 Структура неуронске мреже [370]

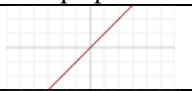


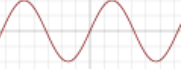
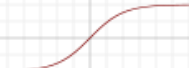


Уколико се ближе посматра један вештачки неурон или један чвор у целокупној мрежи, који је приказан на слици 4.35, он се састоји од различитих елемената. Праг активације (енгл. *bias*) представља параметар снаге веза између чворова у неуронској мрежи. Ако тежински фактор од чвора 1 до чвора 2 има већу величину, то значи да неурон 1 има већи утицај на неурон 2. Тежински фактор има улогу да врши корекцију улазне вредности према њеном значају на излазне, односно вредности које се требају добити на излазу. Тежински фактор близу нуле значи да промена тог улаза неће променити излаз. Негативни тежински фактори значе да повећање тог улаза смањује излаз. Тежински фактор одлучује колики ће утицај улаз имати на излаз.



Слика 4.35 Вештачки неурон [371]

Постоји низ различитих активационих функција које се примењују у вештачким неуронским мрежама, а све са циљем да би се улазне вредности (подаци) трансформисали у одговарајуће излазне вредности (податке) [372]. У табели 4.11 су представљене различите активационе функције. Активациона функција је математичка функција која мрежи додаје нелинеарност. Четири најчешће коришћене функције активације су: сигмоидна, хиперболички тангенс (\tanh), ReLu и softmax [373].

Табела 4.11 Неке од активационих функција [373-376]

Назив	График	Једначина	Интервал
Функција идентитета		$f(n) = n$	$(-\infty, \infty)$
Бинарна одскачна функција		$f(n) = \begin{cases} 1, & \text{за } 0 \leq n \\ 0 & \text{за } n < 0 \end{cases}$	$(0,1)$
Сигмоидна функција		$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	$(-\infty, \infty)$
Синусоида		$f(n) = \sin n$	$(-1,1)$
Хиперболички тангенс		$f(n) = \tanh(n) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$(-1,1)$
SoftPlus		$f(n) = \ln(1 + e^n)$	$(0, \infty)$
ReLU		$f(n) = \begin{cases} 0, & \text{за } n < 0 \\ n, & \text{за } 0 \geq n \end{cases}$	$(0,1)$

На основу претходно изнетог, излаз из једног неурона се може израчунати помоћу једначине (4.14). У једначини се узимају у обзир улазне јединице (подаци), тежински фактор, праг активације или биас и активациона функција [371]:

$$y=f\left(\sum_{i=1}^n p_i \cdot w_i + b\right), \quad (4.14)$$

где су: p_i - улазне јединице, w - тежински фактор, b - праг активације или биас и f - активациона функција.

Скривени слојеви у неуронској мрежи представљају значајне компоненте за анализу података кроз неуронску мрежу. Међутим, одабир скривених слојева у неуронској мрежи може престављати велики проблем, јер не постоје јасна правила о томе колико би требало у једној мрежи да постоји скривених слојева. Морају се донети две одлуке у вези са скривеним слојевима у неуронској мрежи и то колико скривених слојева заиста има у неуронској мрежи и колико ће неурона бити у сваком од ових слојева. Два или мање слојева често је довољно за једноставне скупове података. Међутим, код сложених скупова података, додатни слојеви могу бити од помоћи. Табела 4.12 сажима могућности неколико архитектура скривених слојева неуронских мрежа.

Табела 4.12 Број скривених слојева и карактеристике [377]

Број скривених слојева	Резултат
0	Може да превиђа само функције или одлуке које се могу јасно предвидети линеарним функцијама.
1	Може предвидети било коју функцију која садржи континуирано пресликавање из једног коначног облика у други.
2	Може представљати произвољну одлуку на граници произвољне тачности с рационалним функцијама активирања.
> 2	Додатни слојеви могу да омогуће сложена предвиђања.

Према извору [372, 378, 379], број неурона у скривеним слојевима се може одредити преко следећих препорука:

- две трећине од збира броја улаза и броја излаза, што је приказано и преко израза (4.15),

$$z = \frac{2 \cdot (N_x + N_y)}{3}, \quad (4.15)$$

- два пута мање од броја улаза што се може изразити преко израза (4.16),

$$z < 2 \cdot N_x, \quad (4.16)$$

- квадратни корен из производа броја улаза и излаза, што се може изразити преко израза (4.17).

$$z = \sqrt{N_x \cdot N_y}, \quad (4.17)$$

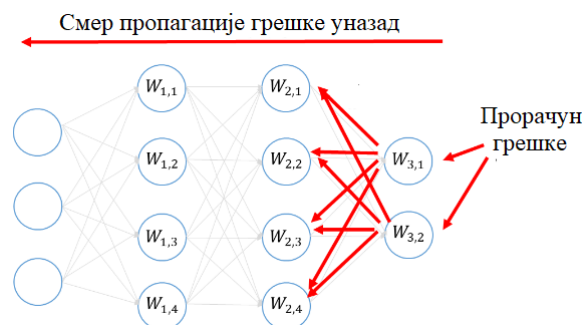
где су: z - потребан број неурона у скривеним слојевима, N_x - број улазних неурона (улаза), N_y - број излазних неурона (излаза).

4.5.4.1 Техника обучавања неуронских мрежа

Поред самог формирања неуронских мрежа, конструкција неуронских мрежа изискује још једну, али можда и најзначајнију радњу, а то је обучавање неуронских мрежа. Обучавање неуронских мрежа представља корекцију тежинских фактора до тог степена да се добијају одговарајући излазни подаци. Од целокупног броја података који се користе у обучавању неуронских мрежа, три основне групе су:

- подаци за обучавање, представљају узорак података који се користе за уклапање у модел и подешавање тежинских фактора,
- скуп података за валидацију модела, представља узорак података који се користи да се пружи непристрасна процена модела који се уклапа у скуп података обуке током подешавања хиперпараметара модела. Процена постаје пристраснија јер је вештина на скупу података за проверу ваљаности уграђена у конфигурацију модела,
- скуп података за тестирање модела који представља узорак података који се користи да пружи непристрасну процену коначног модела који се уклапа у скуп података обуке [380, 381].

Метода пропагације грешке уназад врши корекције тежинских фактора уназад, тј. од излазног слоја ка улазном слоју. Графички приказ пропагације грешке уназад дат на слици 4.36. Овом методом врши се прорачун излаза и добијених података, затим се рачуна грешка, па се врши корекција тежинских фактора.



Слика 4.36 Графички приказ разлике пропагације унапред и уназад [382]

Грешка (E) између добијених вредности на излазу (P) и реалних вредности (T) се може израчунати на основу израза (4.18):

$$E_k = \frac{1}{2} \sum (T-P)^2. \quad (4.18)$$

4.5.4.2 Примењена архитектура неуронских мрежа

У докторској дисертацији примењено је више различитих архитектура неуронских мрежа да би се дошло до предвиђања која дају најбоље резултате. У овом случају, за предвиђање су коришћени сви подаци који су измерени у току експеримента, што је укупно 384 податка. Подаци су распоређени тако да се за обучавање неуронских мрежа користи 70% (269 података), 15% за валидацију (58 података) и 15% за тестирање неуронске мреже (58 података). За прорачуне је примењен софтверски пакет *MatLab 2015*. Као улазни подаци коришћени су 14 улазних фактора, односно: дефинисана почетна брзина возила, симулирано оптерећење једне четвртине возила, притисак у хидрауличком делу кочне инсталације, кочни момент, успорење, време кочења, кинетичка енергија, средња вредност температуре кочних плочица, коефицијент трења између фриксионих површина, постојање прореза по средини кочне плочице, постојање закошења бочних ивица, тип кочне плочице према њиховом саставу, амбијентална температура, релативна влажност ваздуха.

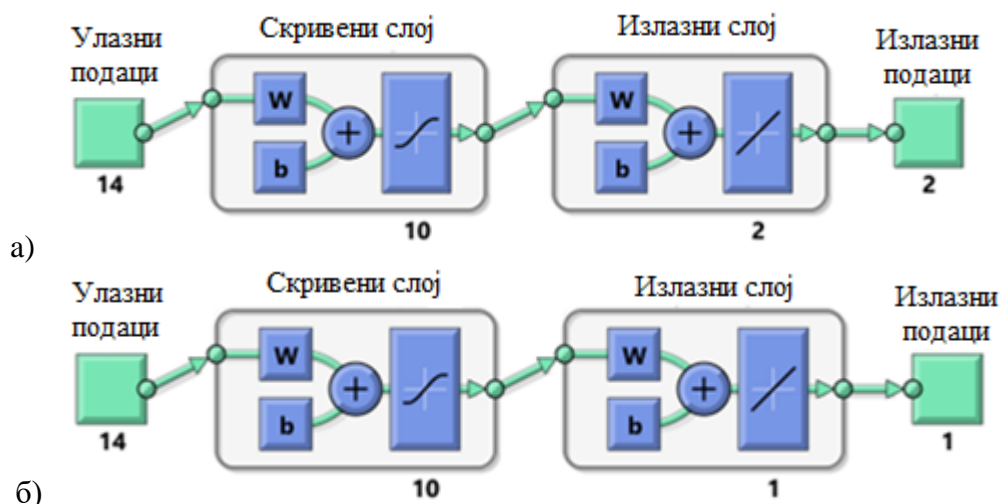
За случај фактора: постојање прореза по средини кочне плочице, постојање закошења бочних ивица и тип кочне плочице према њеном саставу, не постоје конкретне бројне вредности, па су усвојене вредности које описују појединачан случај. Када постоји закошење бочних ивица фриксионе плочице и прорез по средини усваја се вредност 1, а уколико не постоје, усваја се вредност 0. Када је у питању кодна ознака смеше, бројчане ознаке представљају следеће:

- 1 - N категорија смеше кочних плочица,
- 2 - кочне плочице са ниским процентом метала, тј. кочне плочице од еколошки прихватљивих материјала,
- 3 - полуметалне кочне плочице.

Формиране су неуронске мреже са једним излазом, односно понаособ за предвиђање концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Формирана је и неуронска мрежа са два излаза преко које би се извршило предвиђање концентрације честица преко једне неуронске мреже. У скривеном слоју коришћене су вредности које су се показале као најбоље у истраживању [369] и претходно наведеним препорукама. Карактеристике неуронске мреже су приказане у табели 4.13. На слици 4.37 су приказане архитектуре неуронских мрежа са једним скривеним слојем које су примењене у докторској дисертацији.

Табела 4.13 Архитектура неуронских мрежа

Редни број архитектуре неуронске мреже (РБАНМ)	Број неурона у скривеном слоју	Активациона функција у скривеном слоју	Активациона функција у излазном слоју
1.	5	Хиперболички тангенс	Линеарна функција
2.	10	Хиперболички тангенс	Линеарна функција
3.	15	Хиперболички тангенс	Линеарна функција
4.	20	Хиперболички тангенс	Линеарна функција
5.	25	Хиперболички тангенс	Линеарна функција
6.	30	Хиперболички тангенс	Линеарна функција
7.	50	Хиперболички тангенс	Линеарна функција



Слика 4.37 Примењене архитектуре неуронских мрежа са десет неурона у скривеном слоју: а) неуронска мрежа са два излаза, б) неуронска мрежа са једним излазом

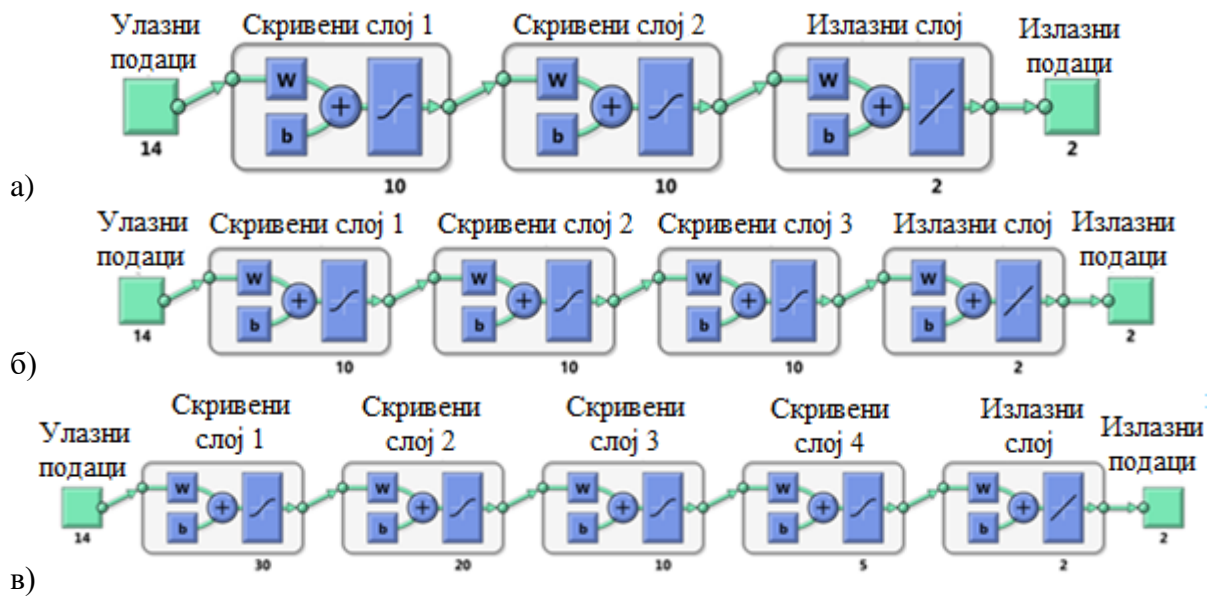
Поред неуронских мрежа са једним скривеним слојем, примењене су и неуронске мреже са више скривених слојева, тј. са два, три и четири скривена слоја. Архитектура неуронских мрежа је дата у табели 4.14, где је приказан број неурона према скривеним слојевима.

Табела 4.14 Архитектура неуронских мрежа са два и више скривених слојева

Редни број архитектуре неуронске мреже (РБАНМ)	Број скривених слојева	Број неурона у скривеним слојевима
8.	2	10 - 10
9.		20 - 20
10.		30 - 30
11.		50 - 50
12.		50 - 25
13.	3	10 - 10 - 10
14.		20 - 20 - 20
15.		30 - 30 - 30
16.	4	30 - 20 - 10 - 5

Активационе функције у скривеним слојевима су увек хиперболички тангенс, док је у излазном слоју примењена линеарна функција. У сваком случају, примењена су три алгоритма за обучавање неуронских мрежа. Све неуронске мреже са два и више скривених слојева су формиране тако да имају један и два излаза, односно и ове архитектуре су формиране тако да могу превидети концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ посебно.

На слици 4.38 су приказани примери неуронских мрежа са два и више скривених слојева које су примењене у докторској дисертацији. Приказане су неке од архитектура са два излаза из неуронске мреже, али су формиране и неуронске мреже са истим бројем скривених слојева и неурона у скривеним слојевима, које имају један излаз из неуронске мреже.



Слика 4.38 Примењене архитектуре неуронских мрежа са више скривених слојева:
 а) неуронска мрежа са два скривена слоја, б) неуронска мрежа са три скривена слоја,
 в) неуронска мрежа са четири скривена слоја

За обучавање неуронских мрежа примењене су три методе пропације грешке уназад [369], и то:

- *Levenberg-Marquardt backpropagation*,
- *Bayesian regularization backpropagation* и
- *Scaled conjugate gradient backpropagation* [369, 383-385].

5 СТАТИСТИЧКА ОБРАДА И АНАЛИЗА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Применом раније приказане методологије, дошло се до резултата о емисији, односно концентрацији честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ применом различитих кочних фактора (параметара) и кочних плочица. На основу експеримента, у овом поглављу су обрађени и анализирани сви добијени подаци до којих се дошло приликом мерења применом методологија обраде и анализе.

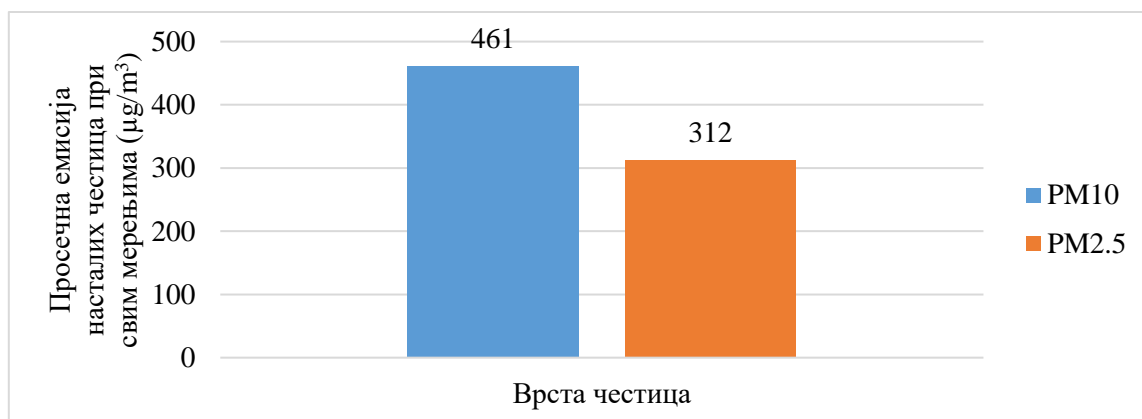
5.1 Графичко-аналитичка анализа података

Након мерења концентрације честица, извршена је анализа добијених података и њихово графичко приказивање. Анализа и приказ су извршени на три начина и то преко:

- анализе просечних вредности концентрација две величине честица у зависности од фактора кочења за све испитиване кочне плочице,
- анализе просечних вредности концентрација две величине честица у зависности од кочних фактора, али узимањем у обзир типа коришћених кочних плочица,
- анализе просечних вредности концентрација две величине честица у зависности од кочних плочица и фактора кочења, при чему су добијене вредности концентрација приказане на тродимензионалним дијаграмима.

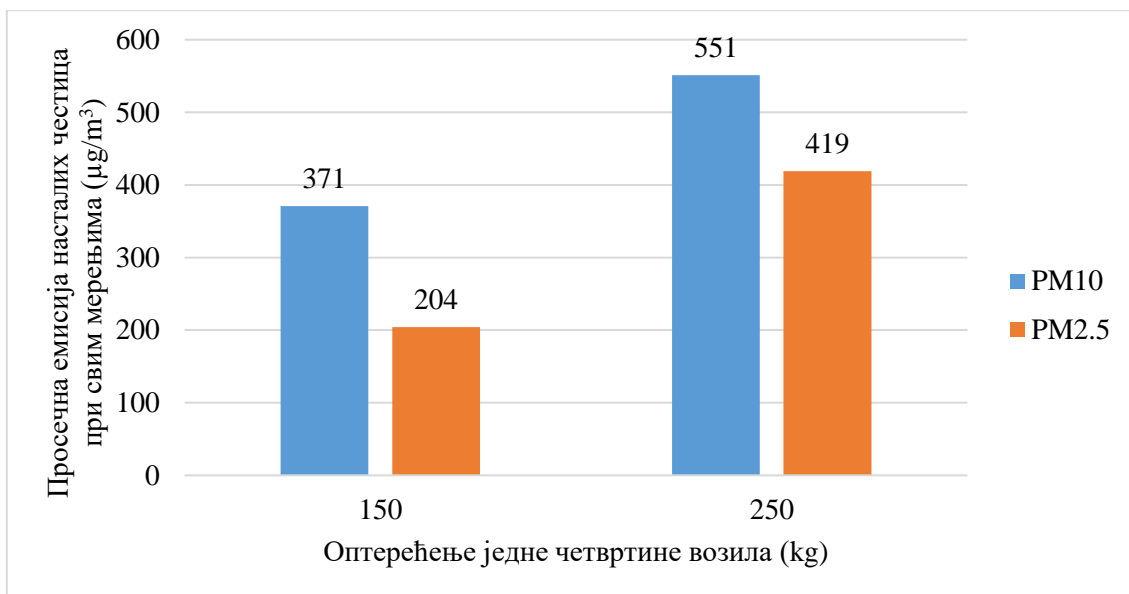
5.1.1 Анализа просечних вредности концентрација честица

Просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} која се односи на сва спроведена мерења за све испитиване кочне факторе и кочне плочице је приказана на слици 5.1. Концентрација честица PM_{10} је већа за 32,32 % од концентрације честица $PM_{2.5}$.



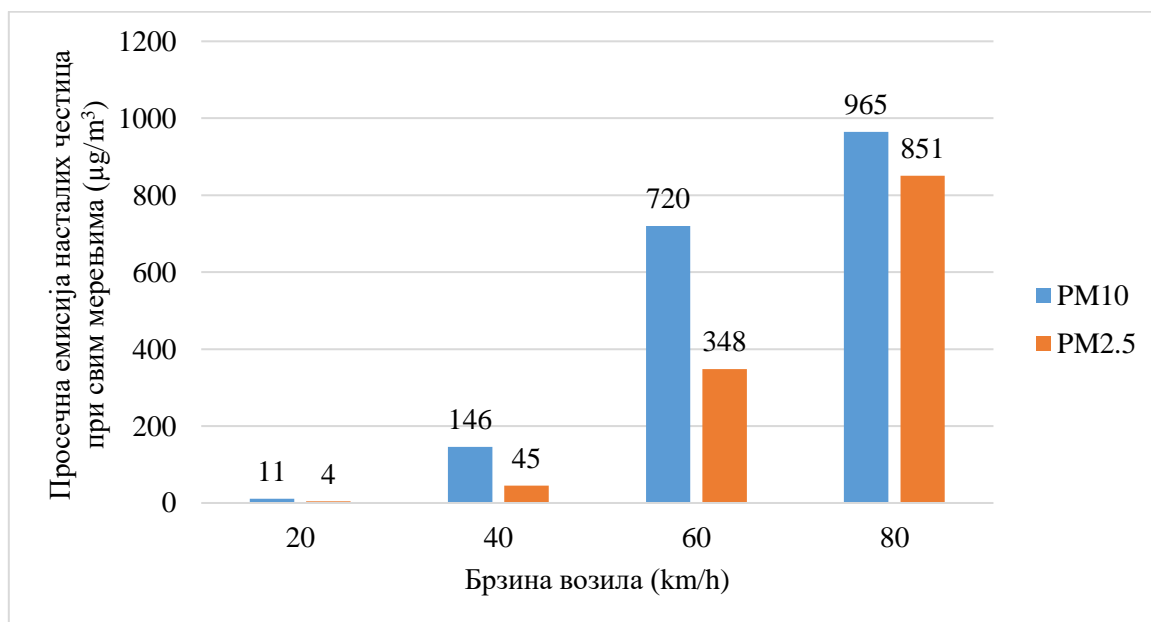
Слика 5.1 Просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} свих мерења

У наставку ће бити илустровани утицаји појединих фактора кочења на концентрацију честица хабања кочница. На слици 5.2 су приказане просечне концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ за све врсте кочних плочица у зависности од примењеног оптерећења које одговара делу кинетичке енергије за један предњи точак/кочницу возила. Концентрација честица PM_{10} је већа од концентрације честица $PM_{2.5}$ за оба примењена оптерећења. При оптерећењу од 250 kg, концентрација честица PM_{10} је већа за 32,67% у односу концентрацију истог типа честица при оптерећењу од 150 kg. Када је реч о честицама $PM_{2.5}$, концентрација при оптерећењу од 250 kg је већа за 105,39% у односу на концентрацију при оптерећењу од 150 kg. Подаци приказани на дијаграму представљају средње вредности свих мерења без обзира на остале факторе и кочне плочице.



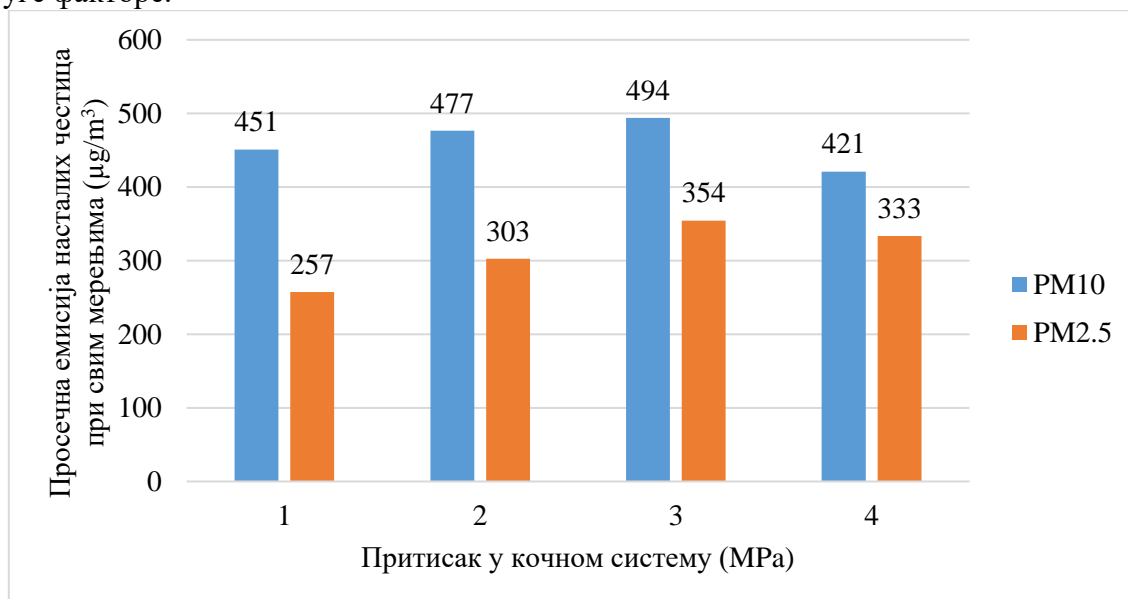
Слика 5.2 Просечна концентрација честица PM_{2.5} и PM₁₀ у зависности од примењеног оптерећења

Зависност добијених концентрације честица у функцији од почетне брзине кретања возила при кочењу је приказана на слици 5.3. На слици су приказане просечне вредности у зависности од брзине, не узимајући у обзир кочне плочице и остале факторе. Порастом брзине, повећава се и емисија честица које настају хабањем кочница. Повећањем брзине за 20 km/h, вишеструко се повећава концентрација честица, како честица PM_{2.5}, тако и PM₁₀. При свакој анализираној брзини, просечна концентрација честица PM₁₀ је већа од концентрације честица PM_{2.5}. Када се посматра концентрација честица PM₁₀ при брзинама од 20 km/h, 40 km/h и 60 km/h, она се вишеструко повећава, али се тај тренд пораста ублажава и разлика концентрације честица између брзина 60 km/h и 80 km/h је 34,03%. Са друге стране, слично је и са концентрацијом честица PM_{2.5}, осим што је концентрација при брзини од 80 km/h у односу 60 km/h већа за 59,11%.



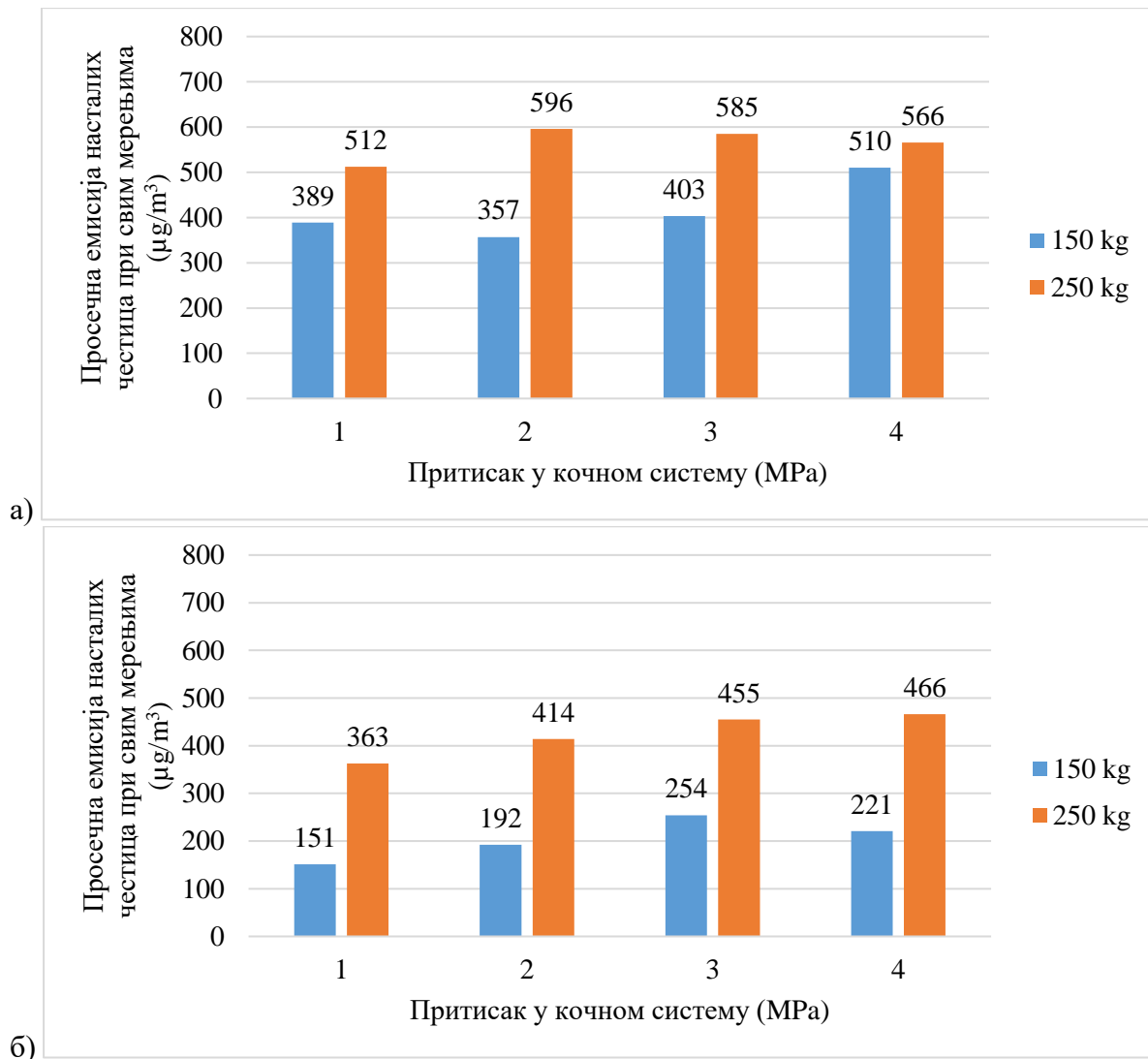
Слика 5.3 Просечна концентрација честица PM_{2.5} и PM₁₀ у зависности од примењене брзине

На слици 5.4 су приказане вредности концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у зависности од промене кочног притиска у хидрауличкој инсталацији. За све вредности притиска, концентрација честица PM_{10} је већа у односу на концентрацију честица $PM_{2.5}$. Може се закључити да концентрација честица не варира у великој мери у односу на средњу вредност када је у питању концентрација честица PM_{10} . Највећа концентрација честица оба типа је при притиску од 3 МПа, док је концентрација честица најмања при вредности притиска од 4 МПа. Концентрација честица $PM_{2.5}$ је најмања при притиску од 1 МПа, а највећа при 3 МПа. Потребно је напоменути да су ово просечне вредности свих мерења при одређеним притисцима, не узимајући у обзир кочну плочицу која је примењена и друге факторе.



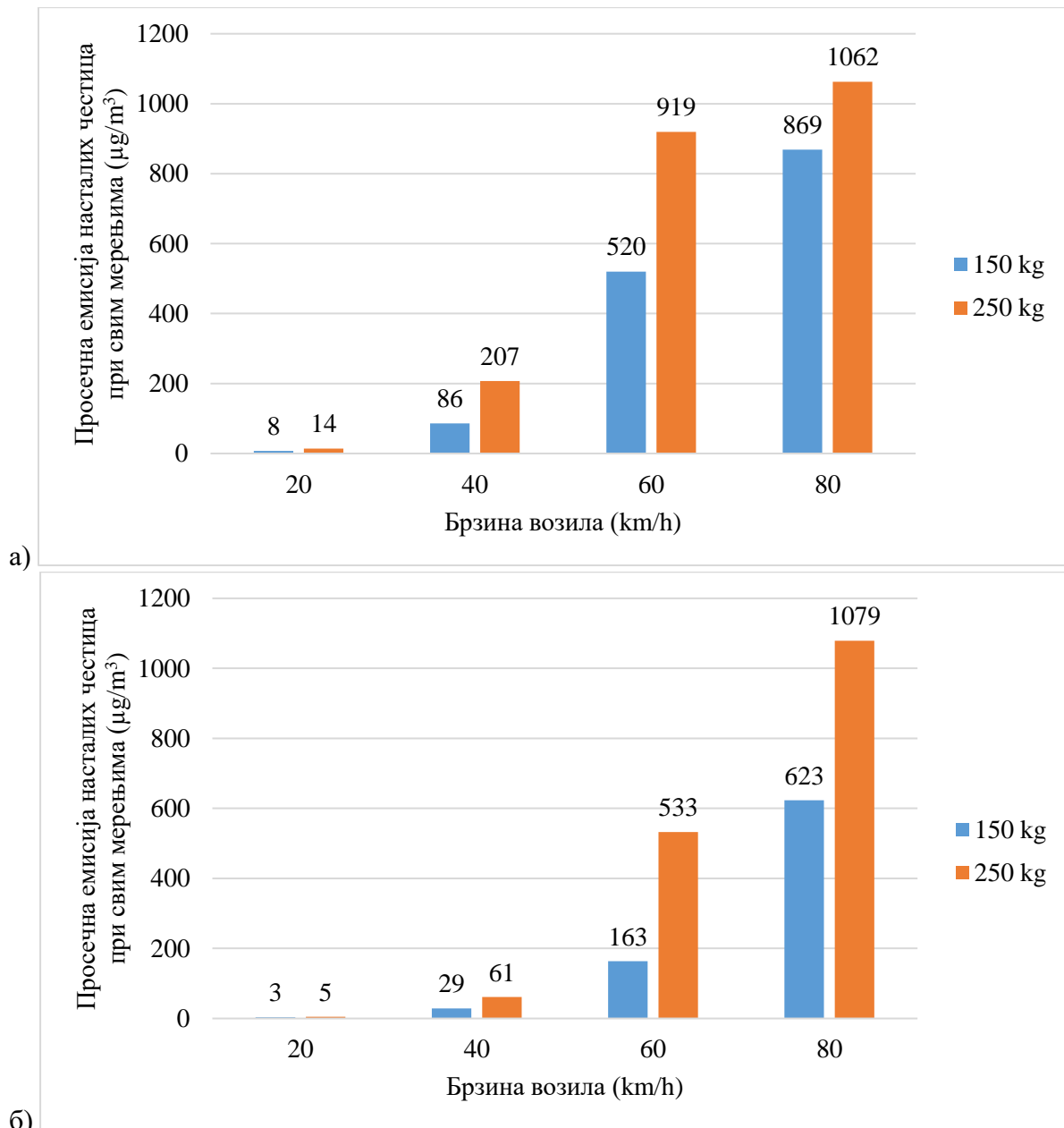
Слика 5.4 Просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у зависности од кочног притиска

Поређење концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у односу на два кочна фактора: притиска и оптерећења је графички представљено на слици 5.5. Вредности приказане на дијаграму представљају просечне вредности концентрација при свим мерењима, при чему су узети у обзир само варирано оптерећење и притисак, док брзина није узета у обзир, као и тип кочне плочице. Концентрација честица PM_{10} је већа у односу на концентрацију честица $PM_{2.5}$. Може се закључити да је за оптерећење масом од 250 kg концентрација честица увек већа у односу на оптерећење масом од 150 kg, без обзира на притисак у хидрауличком делу кочног система. Узимањем у обзир притиска у хидрауличком делу кочног система настаје одређена варијација концентрације честица, како PM_{10} , тако и $PM_{2.5}$. Највећа концентрација честица PM_{10} је при оптерећењу од 250 kg и притиску од 2 МПа, док за случај концентрације честица $PM_{2.5}$, највећа концентрација честица је при оптерећењу од 250 kg и притиску од 4 МПа. У овом случају се може закључити да на концентрацију честица већи утицај има оптерећење у односу на притисак у кочном систему. До овог закључка се долази посматрањем дијаграма где се уочава да постоје јако мале промене концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Промене концентрације честица са променом оптерећења су значајније у односу на промену притиска, јер у случају повећања оптерећења долази и до повећања и до 50%, док у случају притиска, промене имају значајно мање вредности.



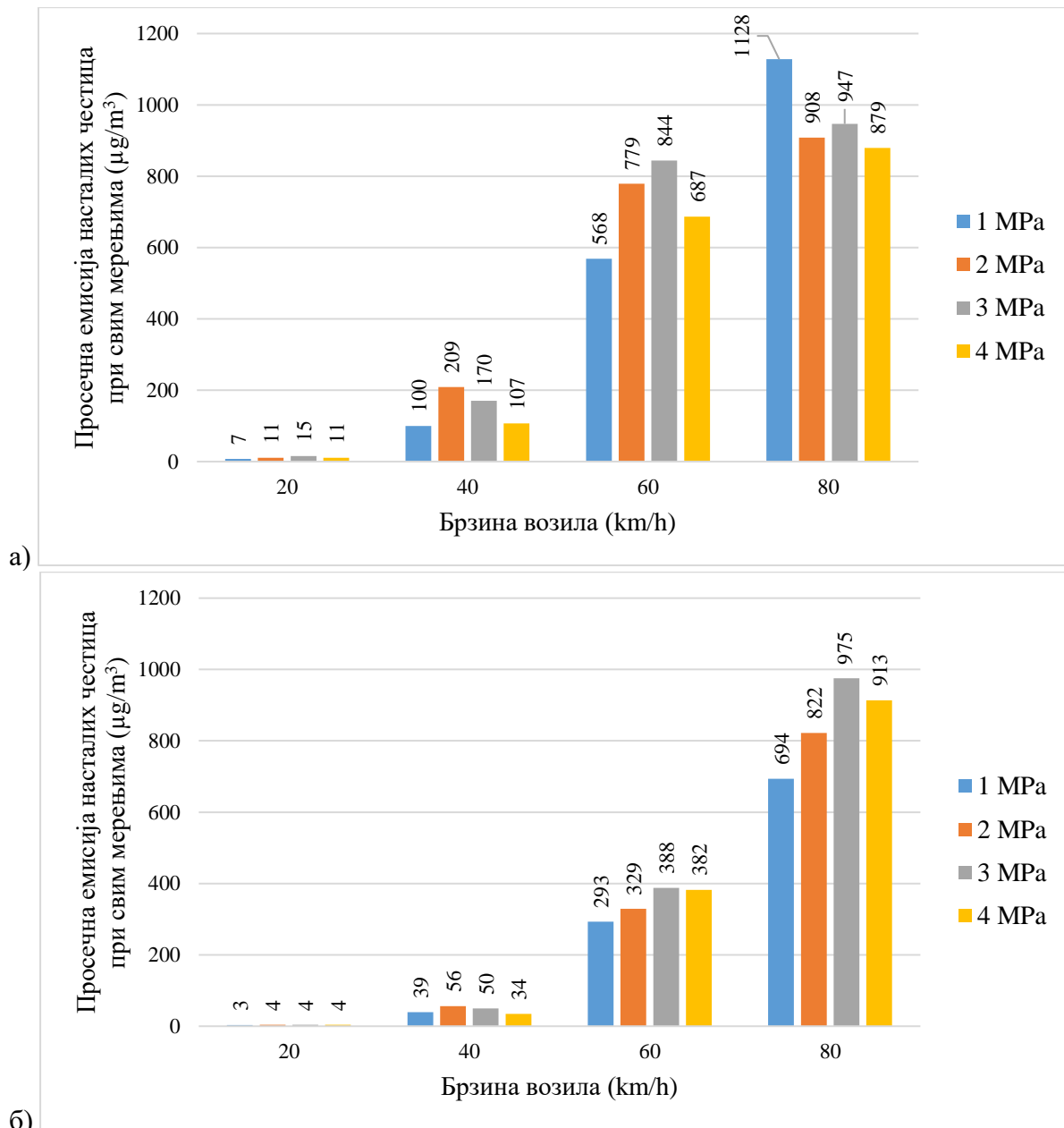
Слика 5.5 Просечна емисија честица у зависности од примењеног оптерећења и притиска, где је а) PM_{10} , б) $PM_{2.5}$

Поређење утицаја брзине и оптерећења на просечну концентрацију честица је приказано на слици 5.6. У овом случају, представљене су просечне вредности концентрације, али су као фактори узети само брзина и оптерећење при свим притисцима и кочним плочицама. Повећањем брзине и оптерећења повећава се и концентрација честица, како PM_{10} , тако и $PM_{2.5}$. При овим мерењима може се закључити да је, при брзини од 80 km/h и при оптерећењу од 250 kg, концентрација честица $PM_{2.5}$ већа у односу на концентрацију честица PM_{10} . Ово указује да је могуће да концентрација честица $PM_{2.5}$ буде већа у односу на концентрацију честица PM_{10} при одређеним вредностима фактора кочења. Уколико се упореде све приказане вредности, може се доћи до закључка да је у овом случају брзина значајан фактор у настанку честица, чак значајнији од оптерећења. Поређењем свих вредности до сада, може се закључити да при великим оптерећењима и брзинама настаје и већа емисија честица. До овог закључка се долази анализом промена ова два фактора и то за обе концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} . У случају промене оптерећења долази до мањег скока концентрације честица, док у случају промене брзине долази до значајније промене концентрације честица.



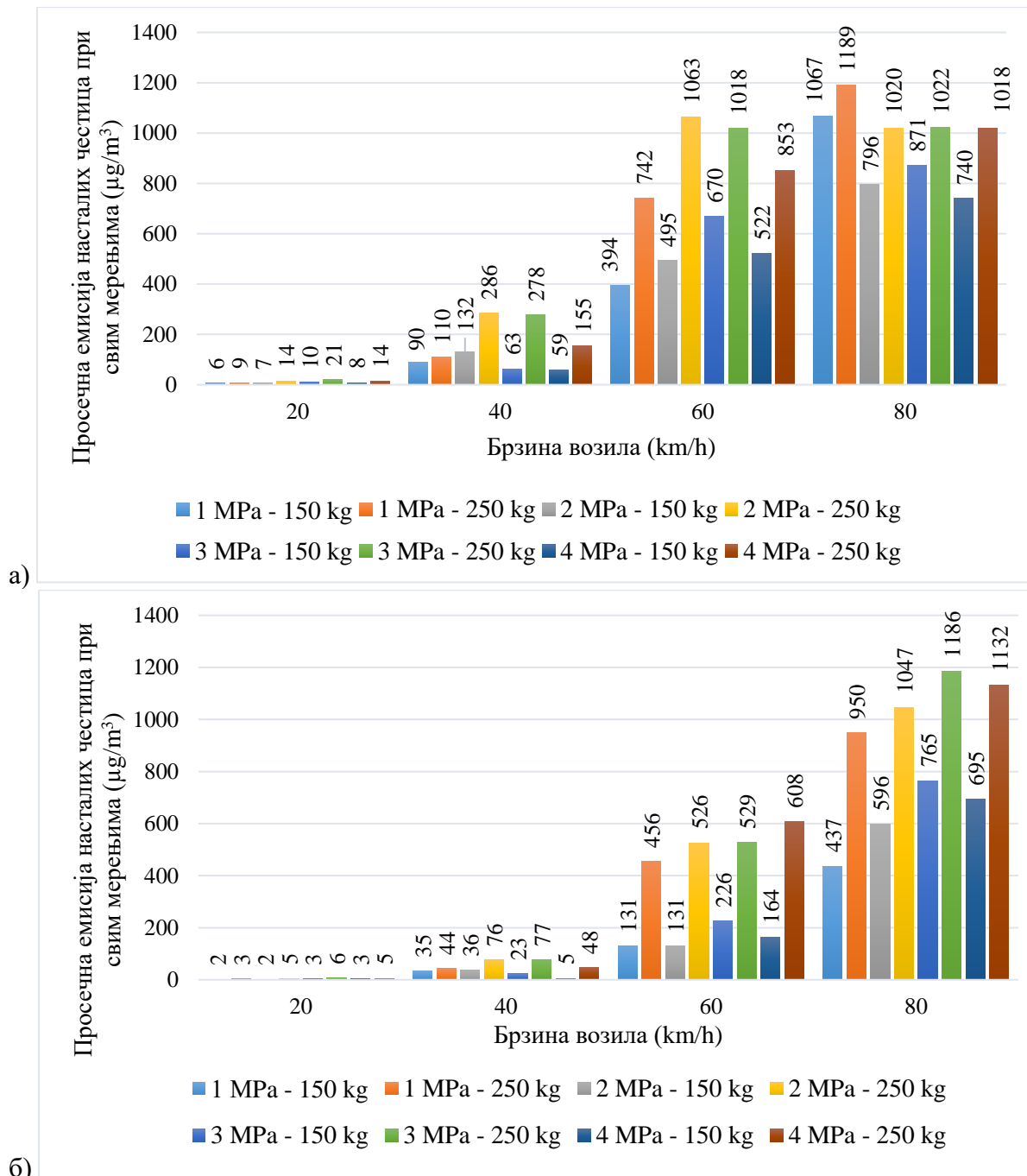
Слика 5.6 Просечна емисија честица у зависности од примењене брзине и оптерећења:
а) PM_{10} , б) $PM_{2.5}$

Добијене просечне вредности емисије честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, узимајући у обзир утицај притиска у хидрауличкој инсталацији и брзине и не узимајући у обзир утицај типа примењених кочних плочица, су приказане на слици 5.7. Анализом добијених података закључује се да се повећањем брзине, повећава и концентрација честица, док притисак има мањи утицај на емисију честица и постоји мала варијација концентрације честица. Концентрација честица PM_{10} је већ при брзини од 60 km/h висока, док вредност притиска доводи до мале разлике вредности концентрације честица. Значајно повећање концентрације честица $PM_{2.5}$ је при брзини од 80 km/h и при притиску од 1 МПа и 2 МПа концентрација је мања у односу на концентрацију честица PM_{10} , међутим при већим притисцима, односно при притисцима од 3 МПа и 4 МПа, долази до појаве да је концентрација честица $PM_{2.5}$ већа од концентрације честица PM_{10} .



Слика 5.7 Просечна емисија честица у зависности од притиска и оптерећења: а) PM₁₀, б) PM_{2.5}

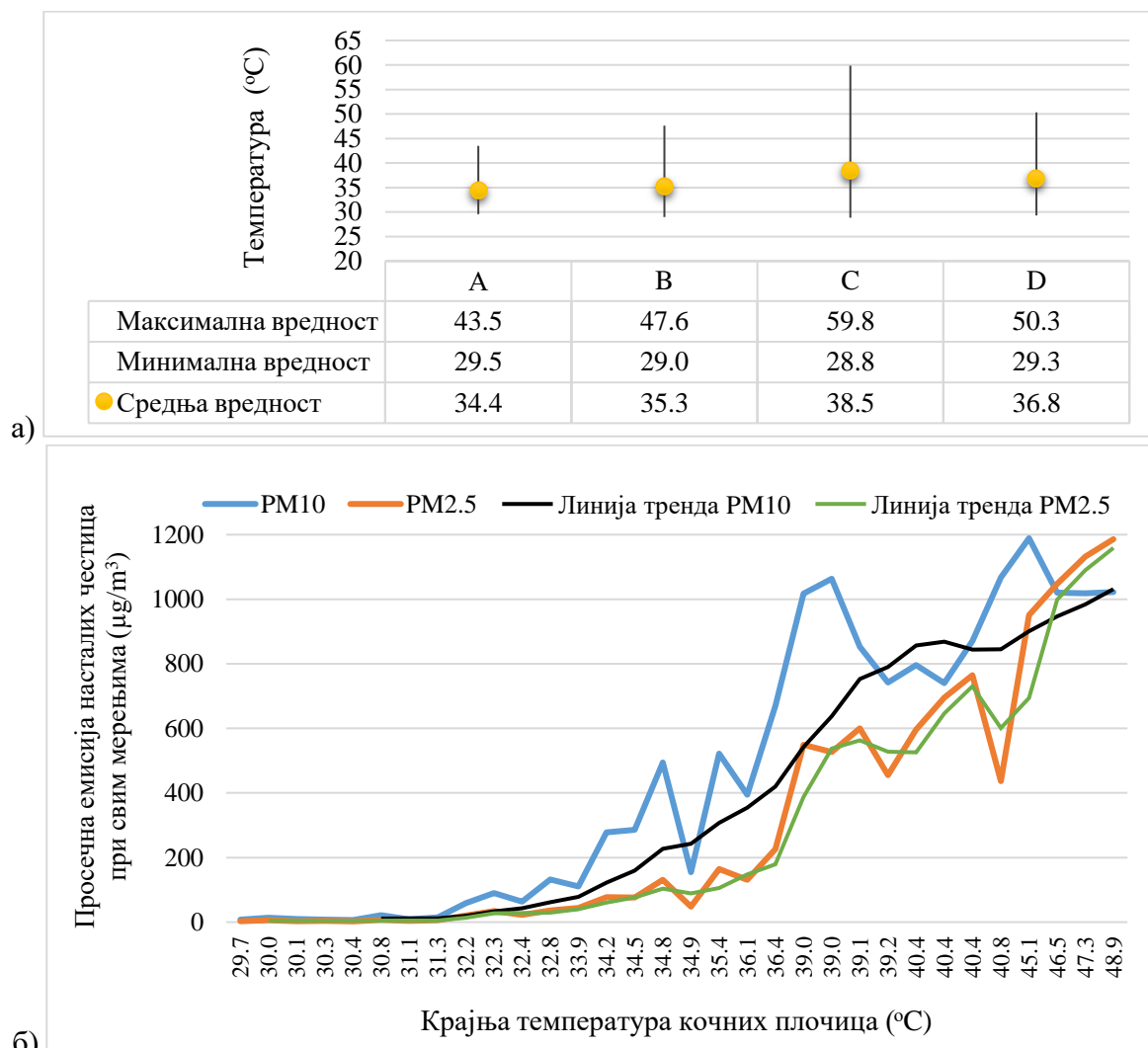
Ако се у анализу уврсте сва три кочна фактора, може се створити јасна слика о њиховом утицају на концентрацију честица PM₁₀ и PM_{2.5} које настају приликом хабања кочница. Анализом свих фактора кочења утврђено је да се концентрација обе величине честица значајно повећава при брзинама већим од 60 km/h и при већим оптерећењима. Повећање притиска у кочној инсталацији доводи до малих варијација концентрације честица. Приметно да при већим оптерећењима и брзинама, а при притисцима већим од 2 MPa, долази до веће концентрације честица PM_{2.5} у односу на концентрацију честица PM₁₀. Може се рећи да брзина и оптерећење имају значајнији утицај на концентрацију честица од притиска у кочној инсталацији. Значај утицајних фактора у овом случају је постављен на основу промене вредности концентрације честица PM_{2.5} и PM₁₀ приликом промене фактора брзине, оптерећења и притиска.



Слика 5.8 Просечна емисија честица у зависности од брзине, притиска и оптерећења:
а) PM₁₀, б) PM_{2.5}

Један од индиректних фактора који не зависи директно од дејства возача, односно на који возач не може утицати приликом кочења, јесте температура кочних плочица. На слици 5.9а је приказана температура кочних плочица на крају процеса кочења, односно средња, минимална и максимална вредност температуре кочних плочица, за сваки тип кочне плочице. Зависност концентрације честица је приказана на слици 5.9б у зависности од средње вредности температуре, за обе величине честица. Уколико се посматра тренд концентрације честица у зависности од температуре, концентрација честица повећава се са порастом температуре. Специфично је то што је концентрација честица PM_{2.5} мања од концентрације честица PM₁₀ до неке одређене температуре, а при већим температурама кочних плочица, долази до тога да се повећава концентрација честица PM_{2.5}, док се

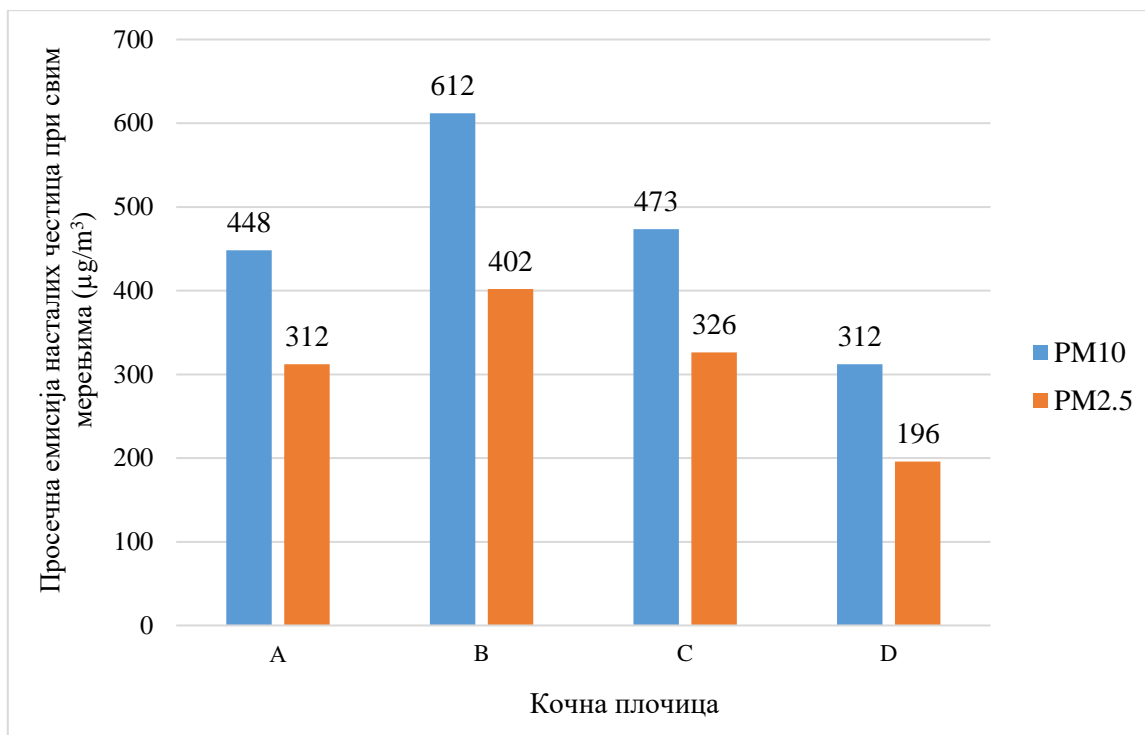
концентрација честица PM_{10} смањује. Тако се може закључити да је концентрација честица $PM_{2.5}$ већа при вишим температурама кочних плочица, што одговара претходним истраживањима која су спроведена и приказана у претходном делу рада.



Слика 5.9 Просечна емисија честица: а) вредности температуре, б) концентрација честица у зависности од температуре

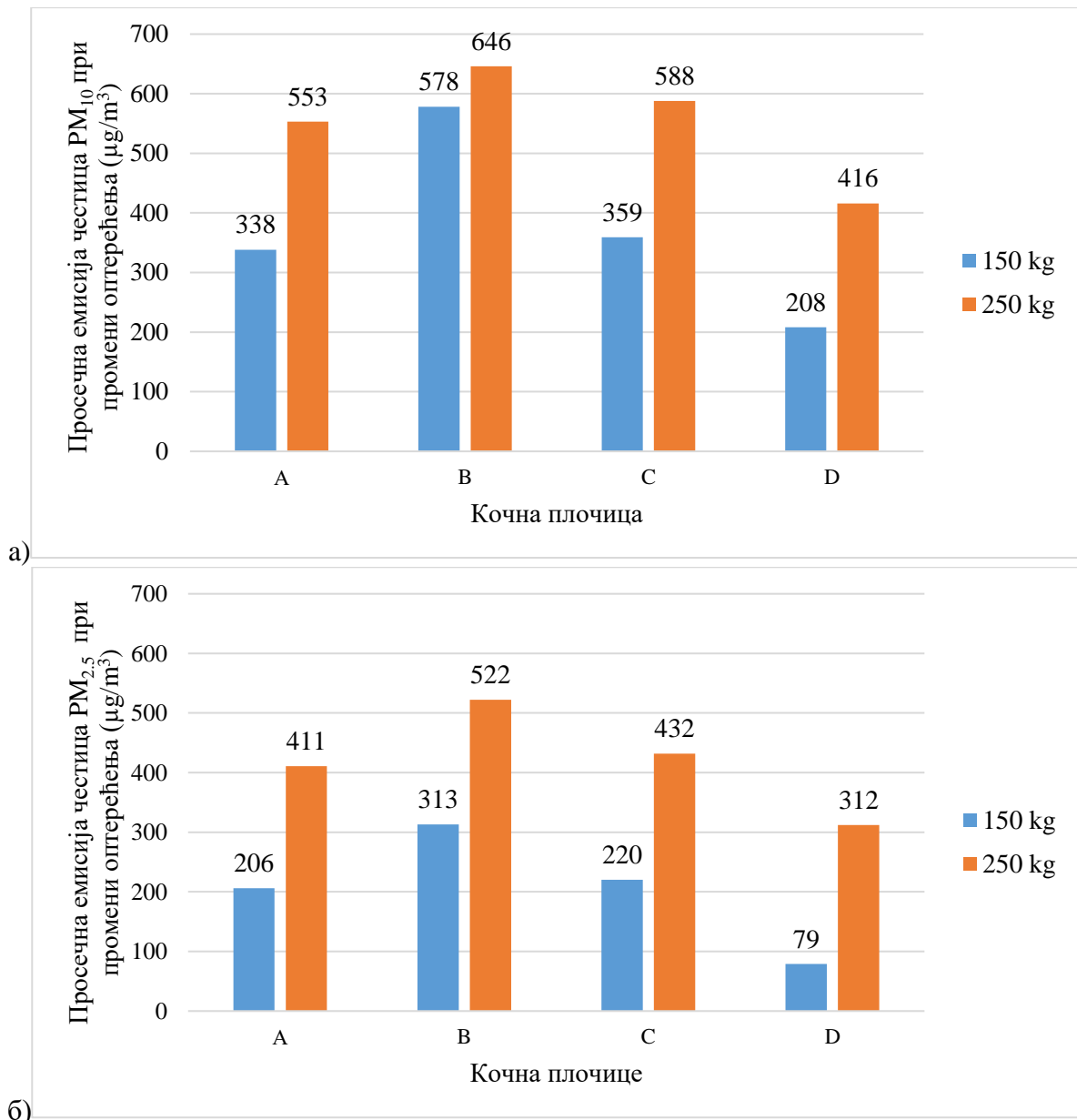
5.1.2 Анализа просечних вредности концентрације честица у зависности од типа кочних плочица

У овом делу је праћен утицај дефинисаних кочних фактора на концентрацију насталих честица, с тим да је узет у обзир и утицај типа кочних плочица. На слици 5.10 су приказане просечне концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ за све кочне плочице. Са слике 5.10, види се да је највећа концентрација честица снимљена за кочну плочицу *B*, док је најмања концентрација честица била за кочну плочицу *D*. Интересантно је истаћи да су кочне плочице *A* и *C* емитовале сличну концентрацију честица, како PM_{10} , тако и $PM_{2.5}$, с тим да је кочна плочица *A* емитовала за 5,58% мању концентрацију честица PM_{10} , док је концентрација честица $PM_{2.5}$ мања за 4,49%. Упоредјујући најмању вредност концентрације честица PM_{10} (кочна плочица *D*) са највећом концентрацијом (кочна плочица *B*), разлика вредности износи 49,02%. Са друге стране, упоређујући највеће (кочна плочица *B*) и најмање (кочна плочица *D*) вредности концентрације честица $PM_{2.5}$ може се приметити да разлика износи 51,24% [386].



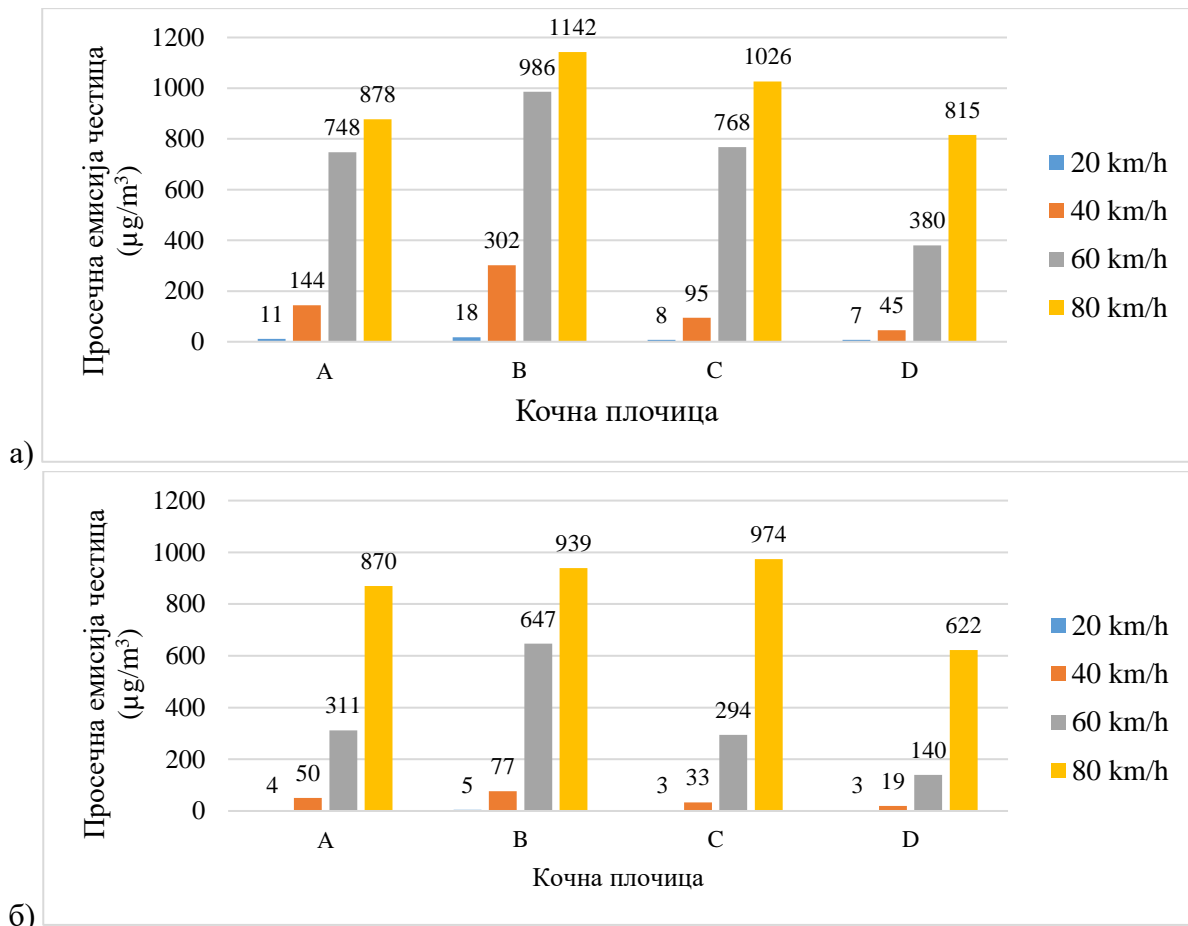
Слика 5.10 Просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у зависности од типа кочне плочице

Посматрањем оптерећења као фактора који може утицати на концентрацију насталих честица, на слици 5.11 су приказане просечне концентрације честица, а према типу кочне плочице. Посматрајући резултате за честице PM_{10} , постоји одређена варијација вредности за различите кочне плочице. Тако, кочне плочице *A* и *C* имају сличну разлику при промени оптерећења, кочна плочица *A* има концентрацију већу за 38,88%, док кочна плочица *C* има концентрацију већу за 38,95%. Најмању разлику при промени оптерећења, а када је у питању концентрација честица PM_{10} има кочна плочица *B* – разлика је 10%. Највећа разлика је код кочне плочице *D*, која при мањем оптерећењу има 50% мању концентрацију честица PM_{10} . Кочна плочица *D* има највећу разлику концентрације честица $PM_{2.5}$ при промени оптерећења плочица и она износи 74,68%. Најмање промене у емисији честица имају кочне плочице *B* и *C* (40,04%, односно 40,07%). Највећу концентрацију честица и при мањем и при већем оптерећењу даје кочна плочица *B* [386].



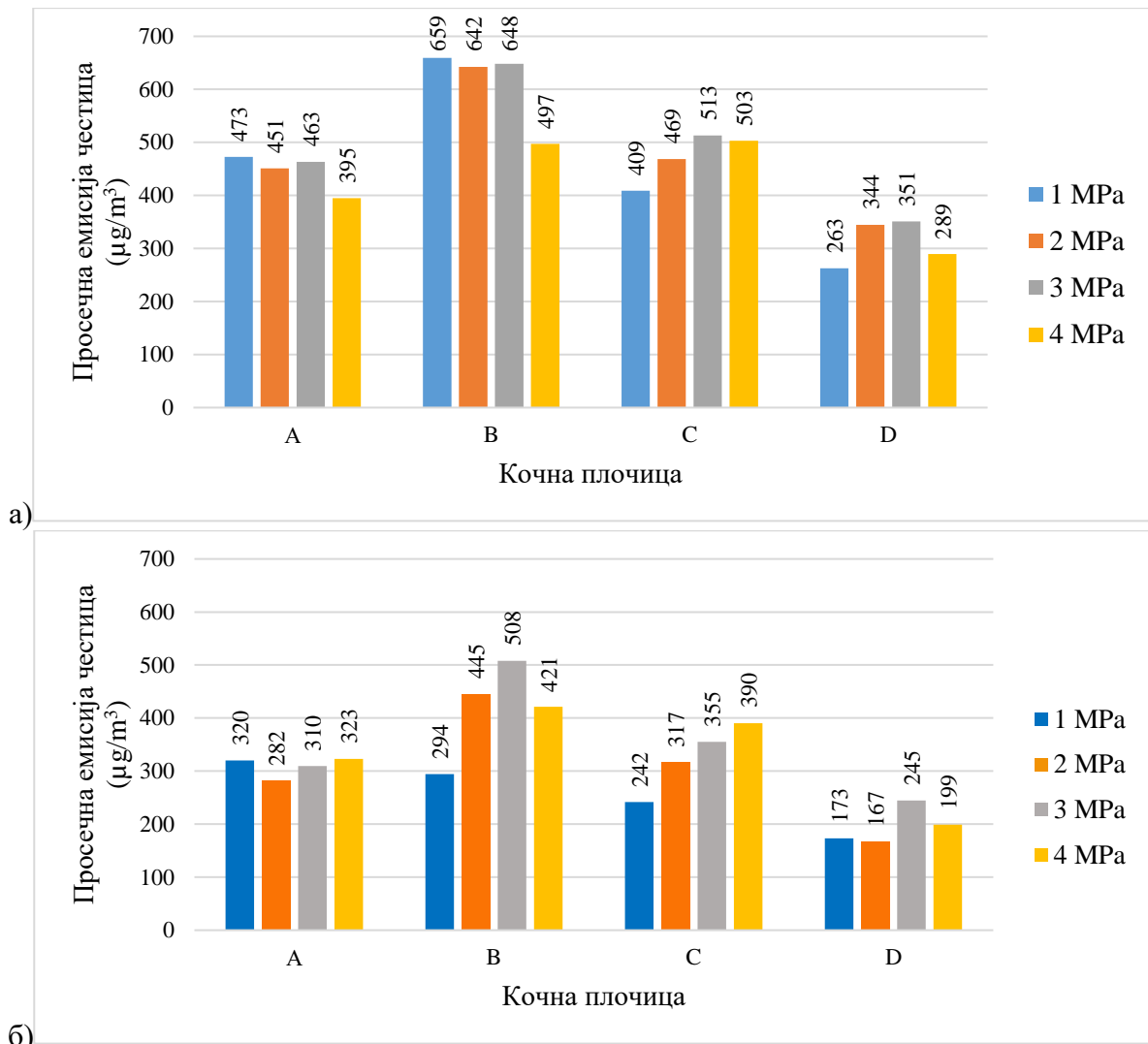
Слика 5.11 Просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у зависности од кочне плочице: а) PM_{10} , б) $PM_{2.5}$

На слици 5.12 је приказана просечна концентрација честица узимајући у обзир утицај почетне брзине и утицај типа кочних плочица. При промени брзине, постоји разлика у концентрацији честица, а промена зависи од и типа кочне плочице. Уочљиво је да највећу концентрацију честица PM_{10} при свим брзинама даје кочна плочица *B*, док је најмања концентрација честица при свим брзинама добијена за кочну плочицу *D*. Концентрација честица $PM_{2.5}$ је највећа при брзини од 80 km/h и највећа је за кочне плочице *C*. Највећа концентрација честица се јавља код кочне плочице *B*. Најмању концентрацију честица даје кочна плочица *D*, осим за брзину 20 km/h, када кочне плочице *C* и *D* имају идентичне вредности концентрације честица $PM_{2.5}$. Може се утврдити да кочне плочице *A* и *C* имају најприближније вредности концентрације честица. Брзина може различито деловати на концентрацију честица, а вредност емисије, односно концентрација честица увелико зависи од кочне плочице која се примењује на возилу [386].



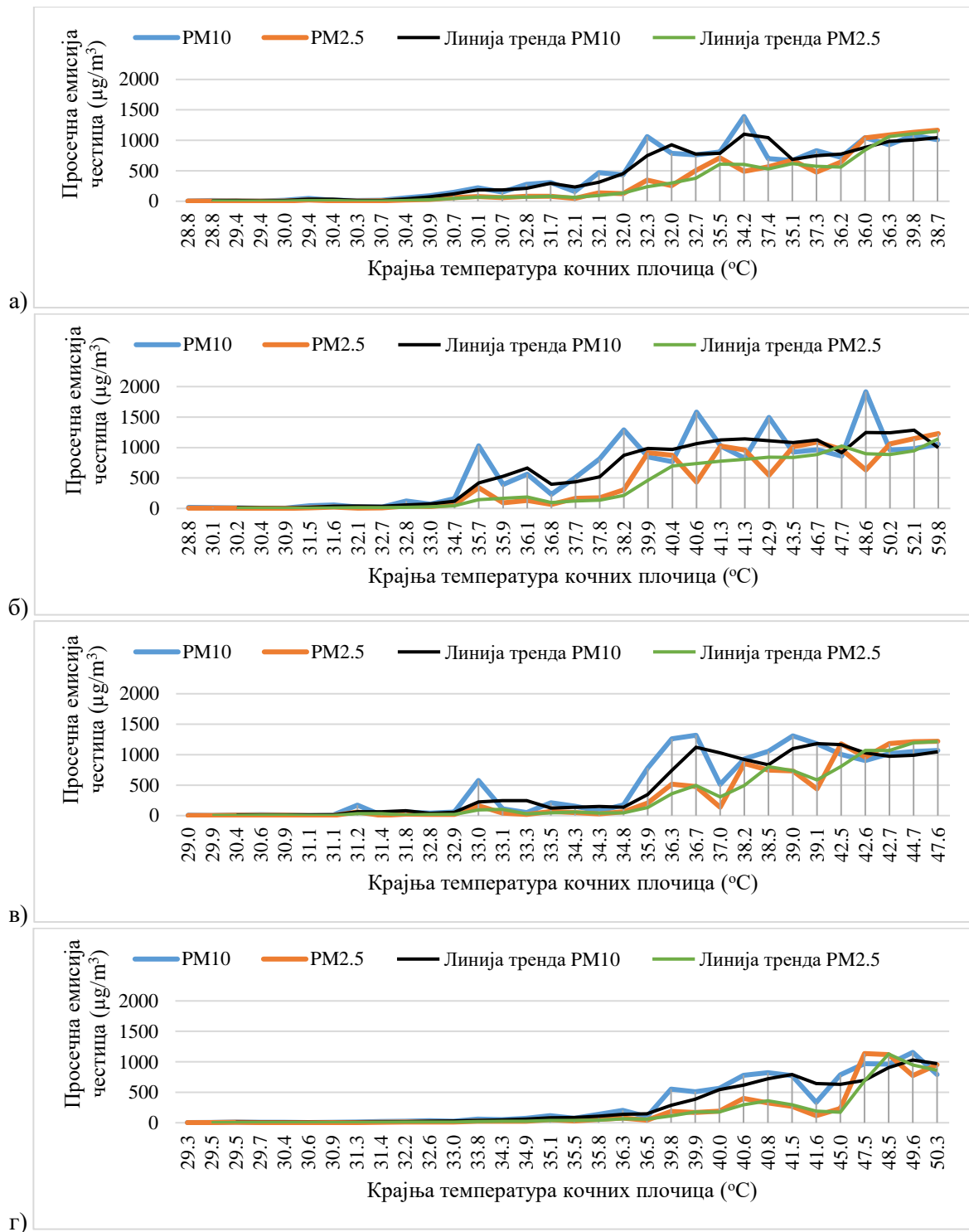
Слика 5.12 Просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у зависности од брзине и кочне плочице: а) PM_{10} , б) $PM_{2.5}$ [386]

Утицај притиска у хидрауличком кочном систему на концентрацију честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} је анализиран, а графички су резултати приказани на слици 5.13. Притисак у односу на претходне величине има најмањи утицај на концентрацију честица. Ако се посматра концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} за различите типове кочних плочица, може се приметити да промена притиска има умерен утицај на концентрацију честица које оне емитују за све кочне плочице. Може се закључити да промена кочног притиска нема значајан утицај на промену концентрације честица уколико се упоређи са претходно анализираним факторима. Код кочне плочице *A*, концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} варира са кочним притиском, с тим да је при кочном притиску од 4 МРа концентрација честица PM_{10} најмања, док је при истом притиску концентрација честица $PM_{2.5}$ највећа, али нема значајног повећања за остале притиске. При примени кочне плочице *B*, са променом кочног притиска нема значајније промене концентрације честица PM_{10} , осим код притиска од 4 МРа када долази до пада концентрације, што је случај и са концентрацијом честица $PM_{2.5}$, с тим да је при осталим притисцима концентрација у порасту. Анализом добијених података за кочне плочице *C*, долази се до закључка да, са порастом притиска, концентрација честица PM_{10} расте, а при притиску од 4 МРа благо опада, док концентрација честица $PM_{2.5}$ расте са порастом притиска. Кочна плочица *D* емитувала је најмању концентрацију честица при свим притисцима. Концентрација честица PM_{10} је најмања при притиску од 1 МРа, затим постоји пораст концентрације, да би се смањила при притиску од 4 МРа. Концентрација честица $PM_{2.5}$ нема значајне разлике, осим што је већа при притиску од 3 МРа, када има пораст у односу на остале притиске.



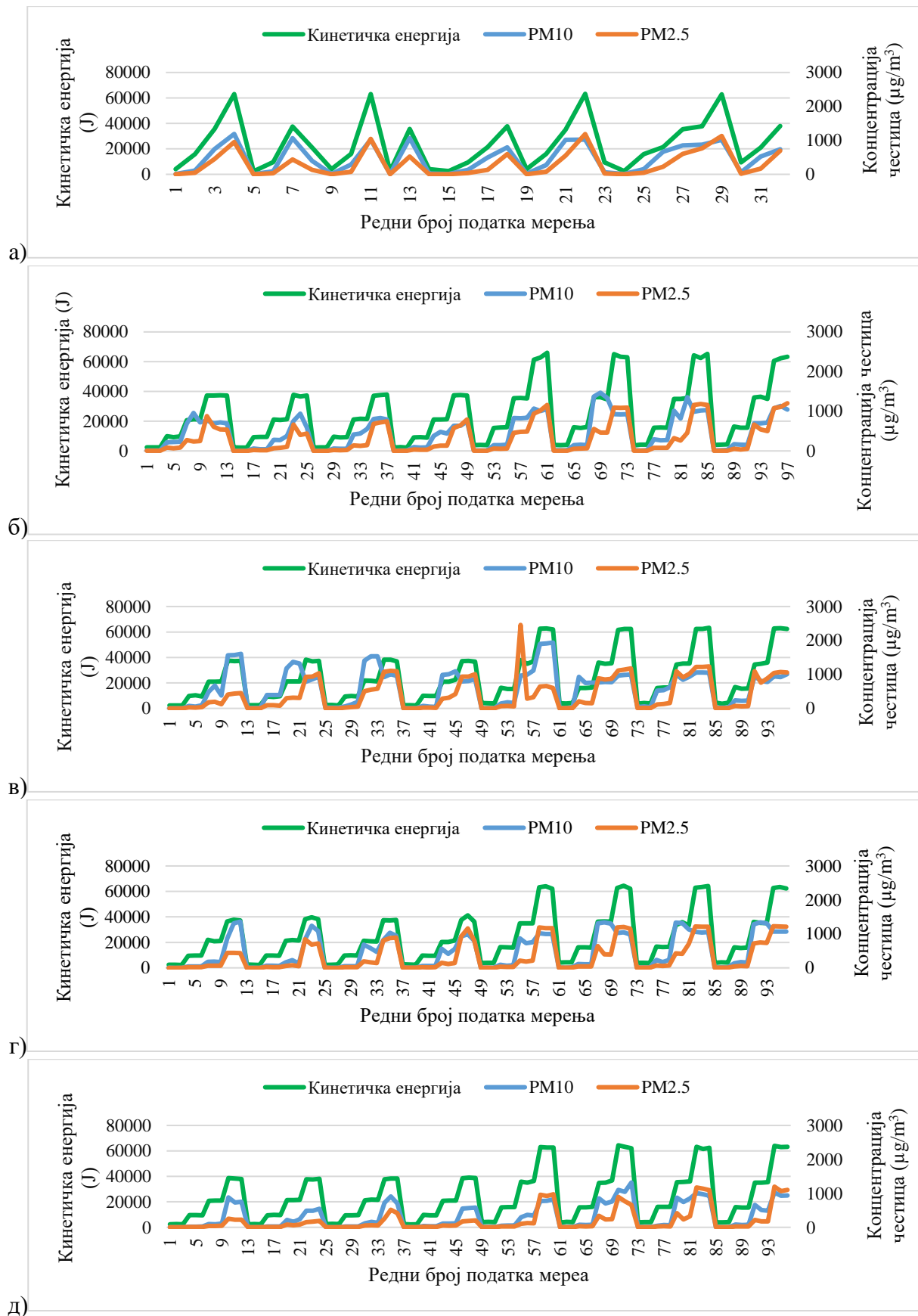
Слика 5.13 Просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у зависности од притиска и кочне плочице: а) PM_{10} , б) $PM_{2.5}$ [386]

Као један од индиректних фактора који могу имати утицај на концентрацију честица, анализирана је крајња температура кочних плочица. Анализом емисије честица код различитих кочних плочица може се закључити да крајња температура кочних плочица може имати различит утицај на концентрацију честица, као и однос у уделу између $PM_{2.5}$ и PM_{10} честица. При порасту температуре кочних плочица долази до повећања концентрације честица. Анализом трендова раста концентрације честица, код кочних плочица *A* и *C*, после одређене вредности температуре кочне плочице, долази до појаве да је концентрација честица $PM_{2.5}$ већа у односу на концентрацију честица PM_{10} . Битно је напоменути да код кочне плочице *A* до овога долази раније, односно при мањој температури у односу на кочну плочицу *C*. Уочава се да је код концентрације честица за плочицу *D*, разлика између концентрација $PM_{2.5}$ и PM_{10} честица највећа у односу на остале кочне плочице. Код кочне плочице *B* је најмања разлика између концентрације честица. Она достиже највећу температуру и при високим температурама долази до тога да концентрација $PM_{2.5}$ постаје већа од концентрације честица PM_{10} .



Слика 5.14 Просечна концентрација честица PM_{2.5} и PM₁₀ у зависности од крајње температуре кочне плочице, у зависности од кочне плочице: а) кочна плочица А, б) кочна плочица В, в) кочна плочица С, г) кочна плочица D [386]

Упоредни приказ кинетичке енергије и концентрације честица PM_{2.5} и PM₁₀ је дат на слици 5.15. Као што је приказано на слици 5.15а, види се да концентрација честица прати тренд кинетичке енергије као један од изведених фактора који има значајан утицај на концентрацију честица. На сликама 5.15б, в, г и д приказан је тренд промене концентрације честица PM_{2.5} и PM₁₀ у односу на кинетичку енергију за сваки тип кочних плочица појединачно.

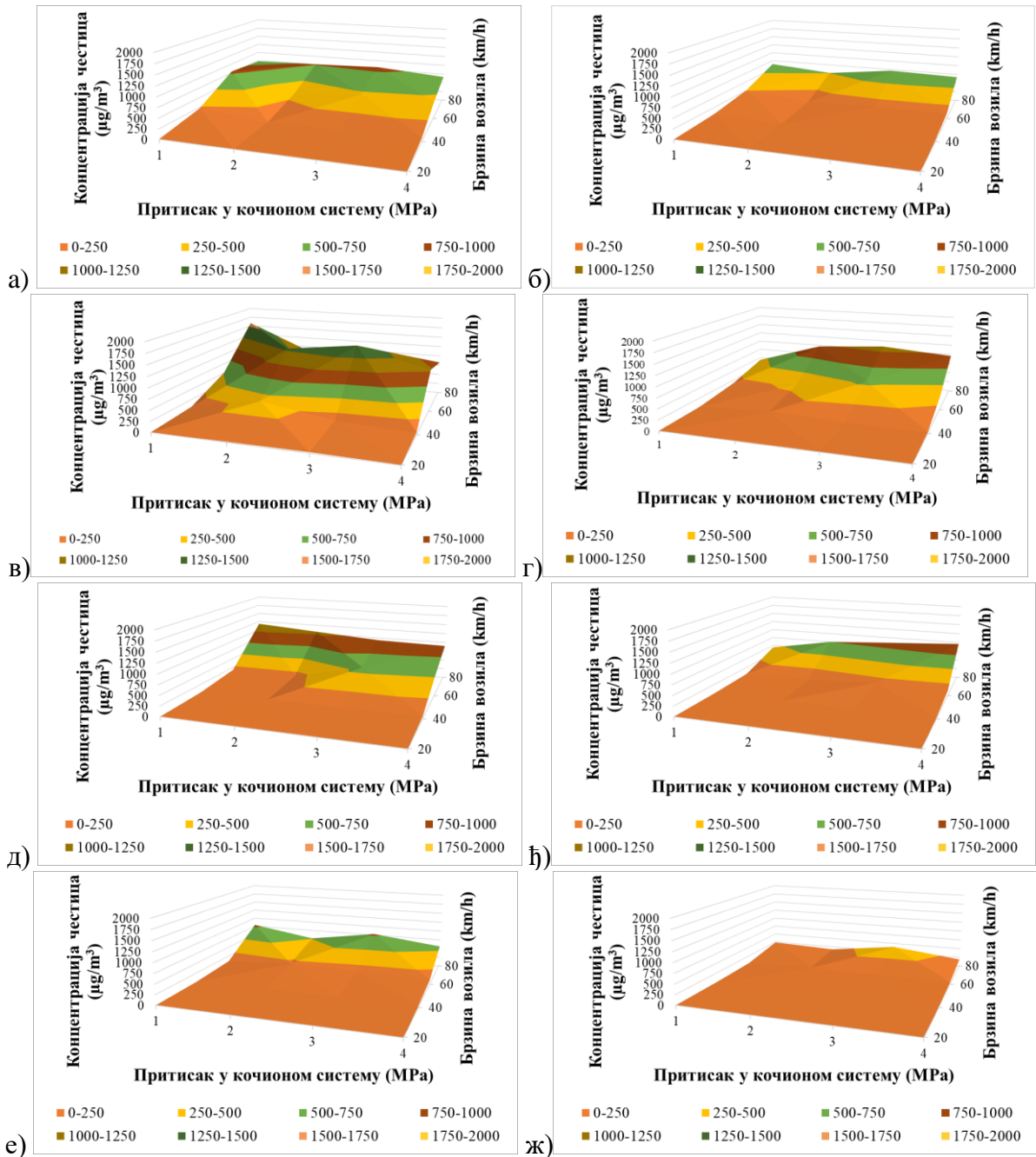


Слика 5.15 Кинетичка енергија и просечна концентрација честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} у зависности од кочне плочице: а) просечне вредности, б) кочна плочица А, в) кочна плочица В, г) кочна плочица С, д) кочна плочица Д [386]

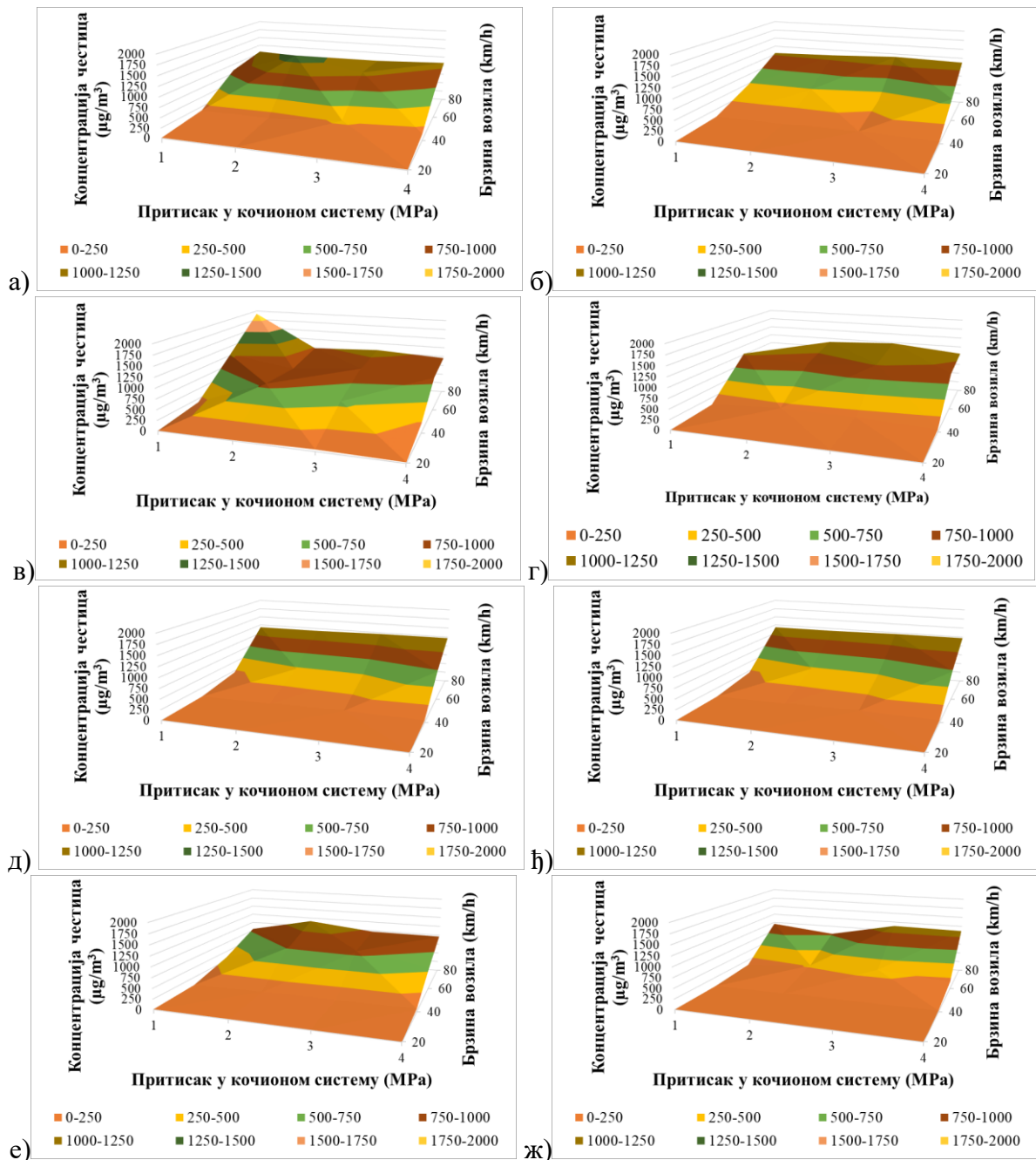
5.1.3 Анализа просечних вредности концентрације честица у зависности од типа кочних плочица и поређење утицајних фактора

На слици 5.16 су приказане концентрације честица при промени притиска у хидрауличком делу кочног система и брзине возила. Важно је напоменути да је у овом случају узет у обзир и трећи фактор – оптерећење, који има вредност 150 kg. На сликама 5.16а, в, д и е су приказани дијаграми концентрације честица PM_{10} , док су на сликама 5.16б, г, њ и ж приказани дијаграми концентрације честица $PM_{2.5}$. На основу приказаних вредности, долази се до закључка да брзина има много већи утицај на концентрацију честица, како $PM_{2.5}$, тако и PM_{10} . Притисак се показао као фактор који доводи до варијације у промени концентрација честица, али нема јасног тренда пораста, односно смањења концентрације. Свакако да су промене концентрације честица значајно повезане са кочним плочицама које се примењују. Уочава се да за кочне плочице *A* и *C* долази до повећања концентрације честица за кочне притиске 1 МПа и 4 МПа, али у другим случајевима долази управо до супротне појаве. Брзина свакако има утицај на концентрацију честица, али, посматрајући дијаграме, може се увидети да највећи утицај има на концентрацију честица код кочне плочице *B*. Код кочне плочице *D*, при притиску од 3 МПа долази до пораста концентрације обе врсте честица. Највећа промена у концентрацији честица је при притиску од 4 МПа за кочну плочицу *C*, код које постоји пад вредности концентрације честица PM_{10} , односно пораст концентрације честица $PM_{2.5}$.

На слици 5.17 су приказане концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} при оптерећењу од 250 kg. На сликама 5.17 а, в, д и е су приказани дијаграми концентрације честица PM_{10} , док су на сликама 5.17 б, г, њ и ж приказани дијаграми концентрације честица $PM_{2.5}$. При оптерећењу од 250 kg, може се утврдити да притисак у кочном систему има много мањи утицај на концентрацију честица, међутим, са друге стране, брзина и у овом случају није занемарљив фактор. При већим брзинама, долази до појаве да код неких кочних плочица концентрација честица $PM_{2.5}$ буде већа од концентрације честица PM_{10} . Утицај притиска има мањи утицај на промену концентрацију честица. Највећи утицај се може видети код кочне плочице *B*, код које је приметно да при притиску од 1 МПа, долази до највеће концентрације честица PM_{10} , што је уједно и највећа вредност концентрација честица при овим условима. Ово се може приписати примењеној кочној плочици и утицају фактора на кочну плочицу *B*, јер се јавља само у том случају. Притисак у односу на брзину је имао најмањи утицај на промену концентрација, па и резултати имају сличан тренд пораста, односно смањења када је у питању кочна плочица *C*. За случај кочне плочице *D*, при свим притисцима, осим за вредност притиска од 2 МПа, нема знатног утицаја на промене концентрација. При притиску од 2 МПа, а при брзинама од 60 km/h и 80 km/h долази до смањења концентрације честица $PM_{2.5}$, док се повећава концентрација честица PM_{10} . Тренд за остале притиске је идентичан.



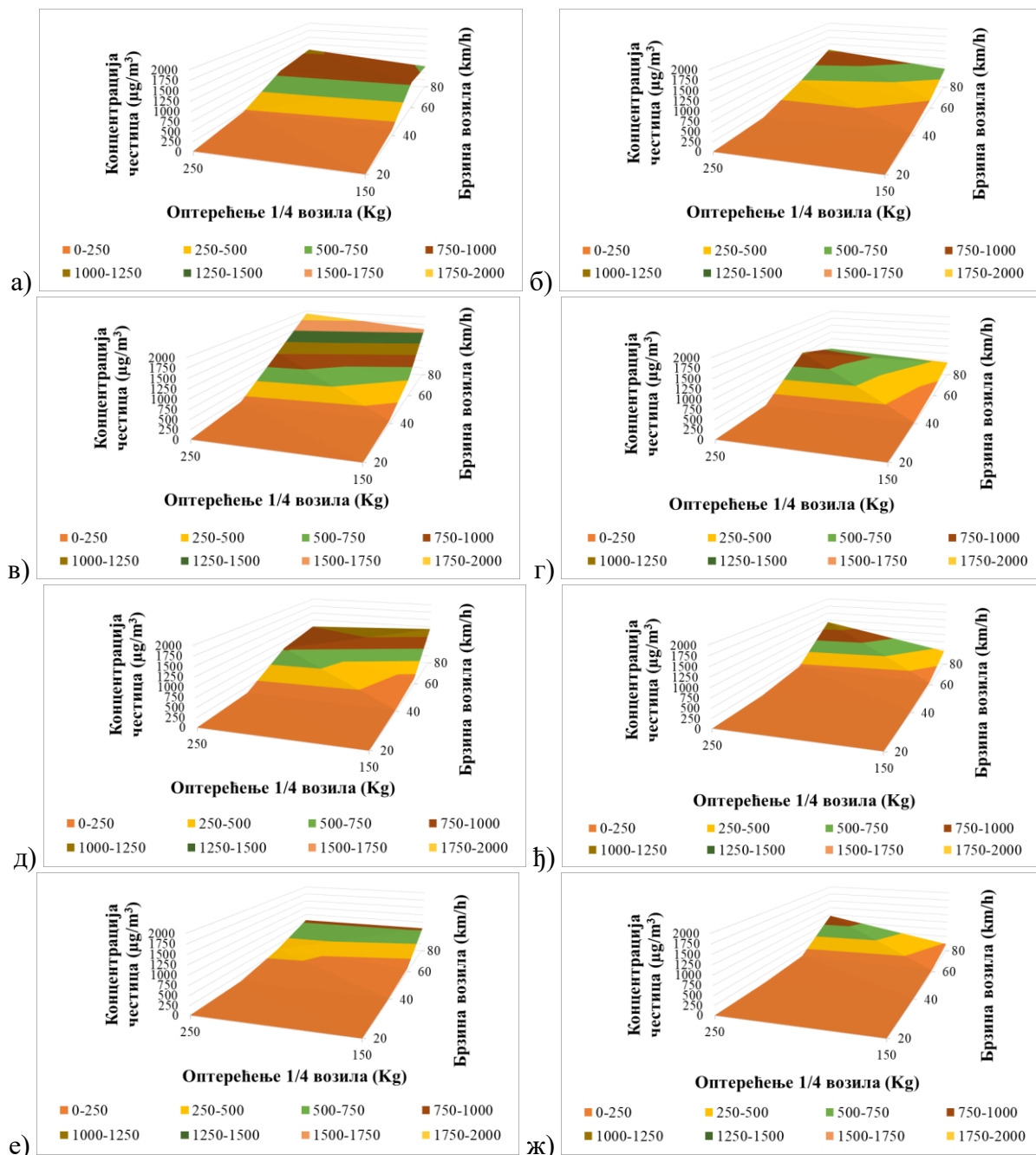
Слика 5.16 Зависност концентрације честица у односу на брзину и притисак при оптерећењу од 150 kg: а) кочна плочица А – PM_{10} , б) кочна плочица А – $\text{PM}_{2.5}$ в) кочна плочица В – PM_{10} , г) кочна плочица В – $\text{PM}_{2.5}$, д) кочна плочица С – PM_{10} , е) кочна плочица С – $\text{PM}_{2.5}$, е) кочна плочица D – PM_{10} , ж) кочна плочица D – $\text{PM}_{2.5}$



Слика 5.17 Зависност концентрације честица у односу на брзину и притисак при оптерећењу од 250 kg: а) кочна плочица А – PM_{10} , б) кочна плочица А – $\text{PM}_{2.5}$ в) кочна плочица В – PM_{10} , г) кочна плочица В – $\text{PM}_{2.5}$, д) кочна плочица С – PM_{10} , е) кочна плочица С – $\text{PM}_{2.5}$, ж) кочна плочица Д – $\text{PM}_{2.5}$

Извршена је и анализа утицаја промене оптерећења и брзине при притисцима од 1 МПа до 4 МПа. На слици 5.18, дијаграми под а, в, д и е односе се на концентрацију честица PM_{10} , док се дијаграми под б, г, ж и ж односе на концентрације честица $\text{PM}_{2.5}$. Анализом дијаграма оптерећења и брзине при притиску од 1 МПа на слици 5.18, долази се до закључка да је утицај оптерећења и брзине знатно већи при већем оптерећењу и при брзинама од 40 km/h и већим. Утицај оптерећења је доминантан, поготово када је у питању концентрација честица $\text{PM}_{2.5}$. Нагле промене концентрација настају при брзини од 40 km/h применом кочне плочице В, док код осталих кочних плочица долази до промене и значајне разлике при брзини од 60 km/h , при којој се изједначава

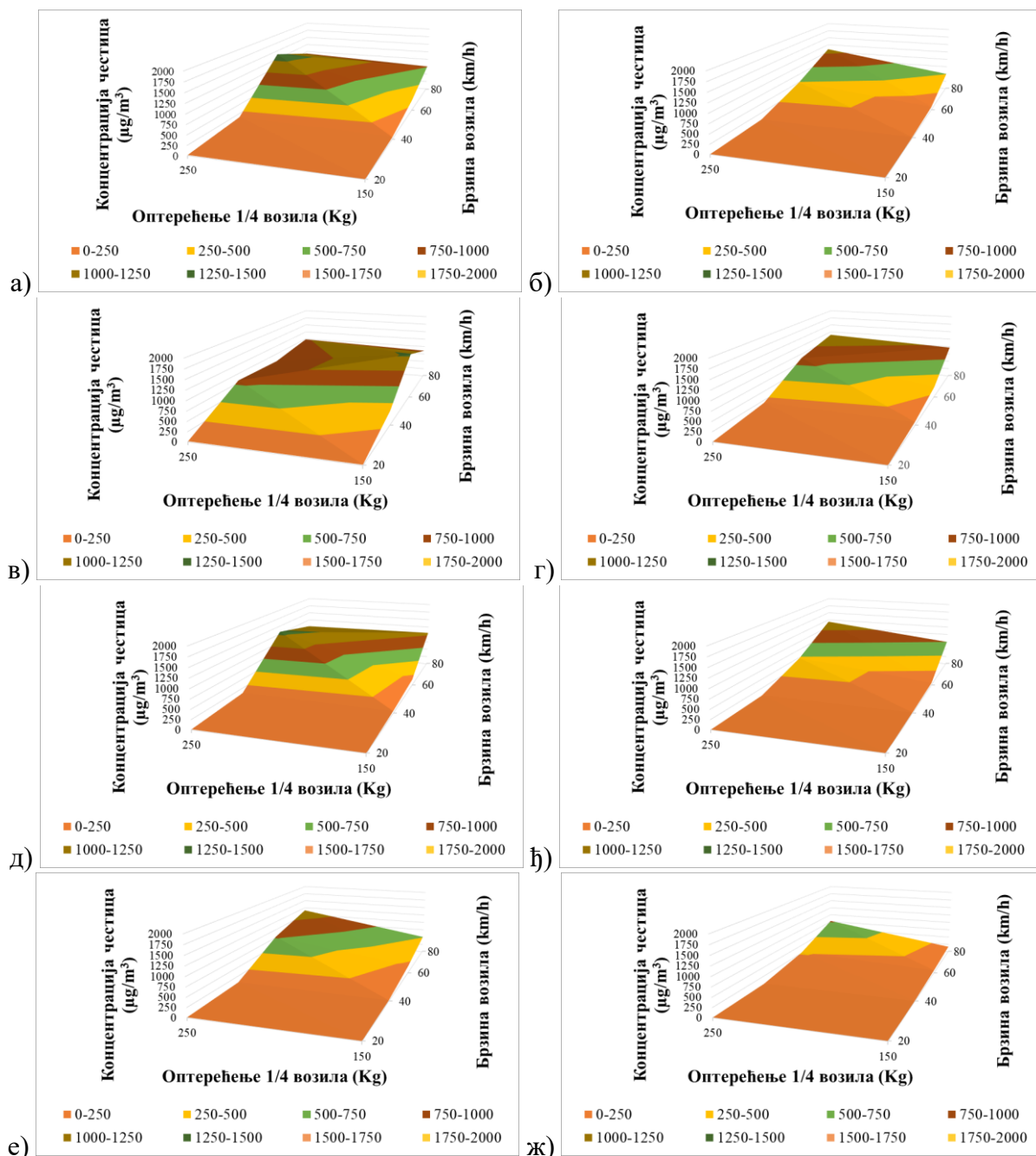
концентрација честица при брзини од 60 km/h и оптерећењу од 250 kg са концентрацијом честица од 80 km/h и оптерећењем од 150 kg. За случај концентрације честица PM_{10} , утицаји оба фактора су изузетно изражени, а при већим оптерећењима и брзинама, долази и до појаве да је концентрација честица $PM_{2.5}$ већа од концентрације честица PM_{10} .



Слика 5.18 Зависност концентрације честица у односу на брзину и оптерећење при притиску од 1 МРа kg: а) кочна плочица А – PM_{10} , б) кочна плочица А – $PM_{2.5}$ в) кочна плочица В – PM_{10} , г) кочна плочица В – $PM_{2.5}$, д) кочна плочица С – PM_{10} , е) кочна плочица С – $PM_{2.5}$, ж) кочна плочица Д – $PM_{2.5}$

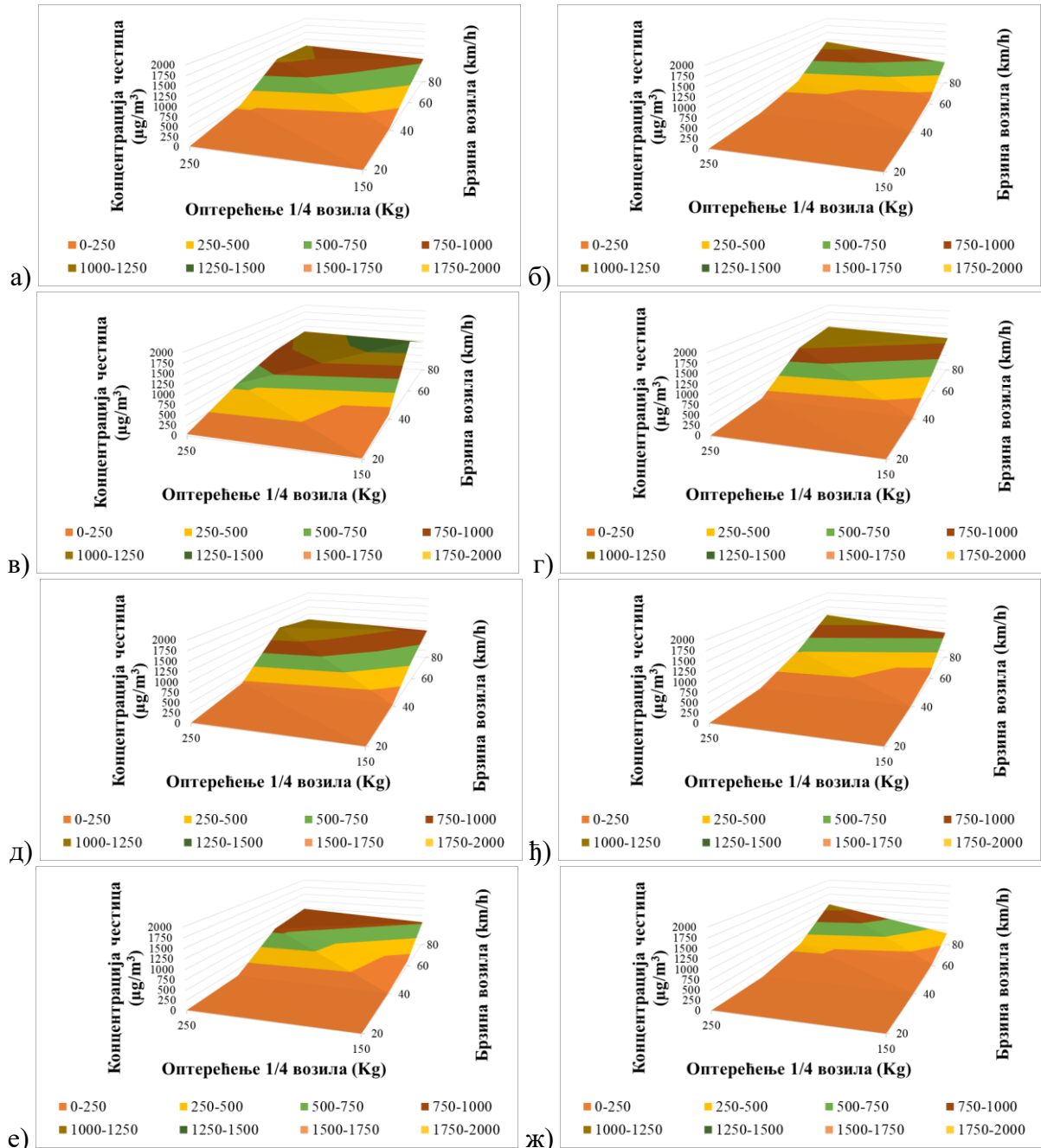
Концентрације честица $PM_{2.5}$ и PM_{10} , при промени оптерећења и брзине, су упоређиване и за притисак од 2 МРа, што је приказано на слици 5.19. Промене оптерећења и брзине доводе до промена у концентрацији честица, при чему, са повећањем брзине и

оптерећења, долази и до повећања концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Промена оптерећења и брзине показује да највећи утицај има на концентрацију честица PM_{10} при примени кочне плочице *B*. Уочава се значајнија разлика у дијаграму концентрације честица PM_{10} када је се користи кочна плочица *D*. Анализом осталих дијаграма видљиво је да нема великих промена у добијеним резултатима.



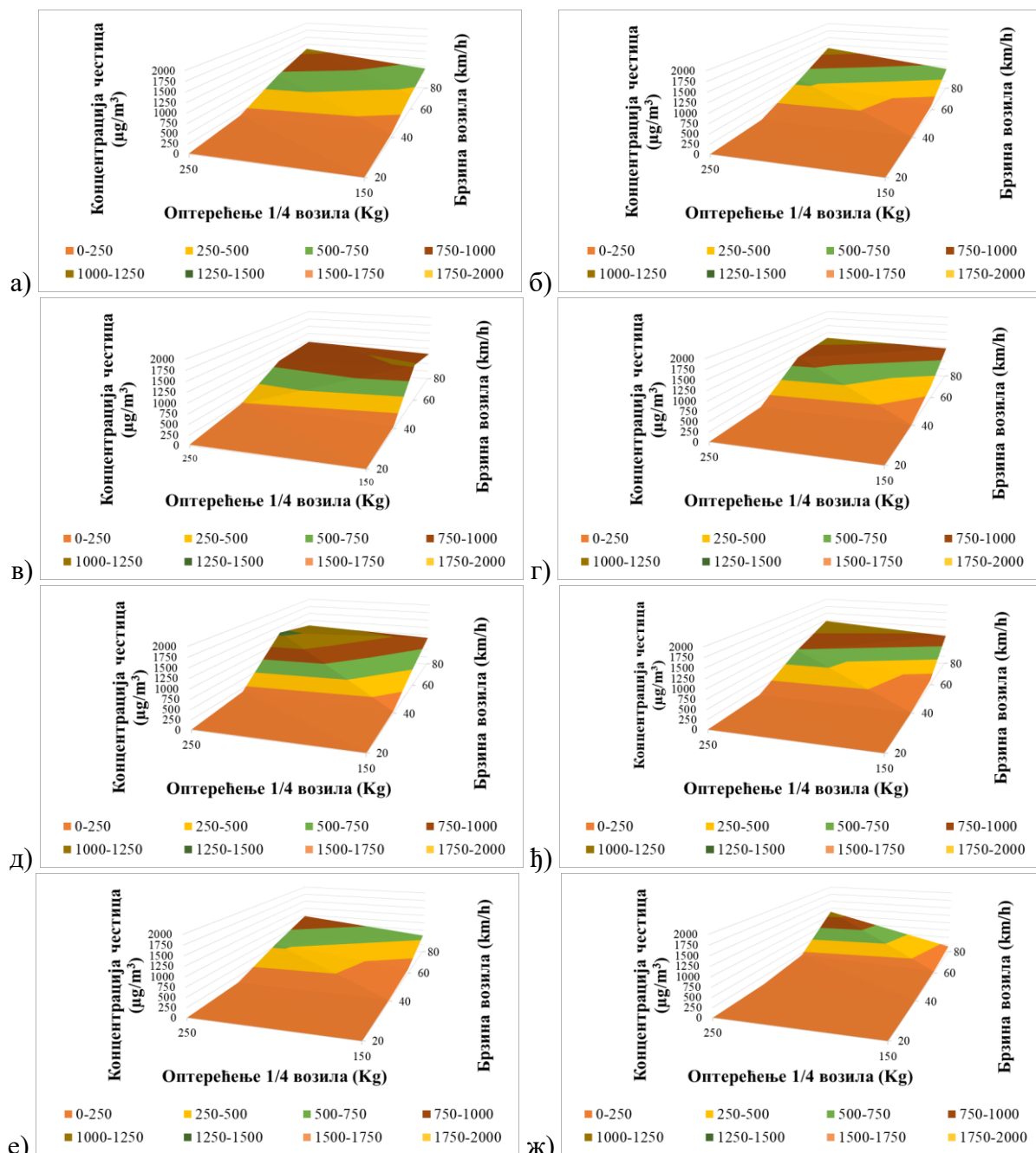
Слика 5.19 Зависност концентрације честица у односу на брзину и оптерећење при притиску од 2 МРа kg: а) кочна плочица А – PM_{10} , б) кочна плочица А – $PM_{2.5}$ в) кочна плочица В – PM_{10} , г) кочна плочица В – $PM_{2.5}$, д) кочна плочица С – PM_{10} , е) кочна плочица С – $PM_{2.5}$, ж) кочна плочица Д – $PM_{2.5}$

Измерене су концентрације и при притиску од 3 МРа, а при различитим оптерећењима и брзинама (слика 5.20). У овом случају, највеће концентрације честица и промене се јављају код кочне плочице *B*. Промене се јављају и за концентрацију PM_{10} при примени кочне плочице *D*, код које концентрација честица постаје већа у односу на остале притиске при промени оптерећења и при брзини од 80 km/h. У односу на остале притиске, у овом случају нема значајнијих промена у концентрацији честица, где притисак доводи само до варијација измерених концентрација честица.



Слика 5.20 Зависност концентрације честица у односу на брзину и оптерећење при притиску од 3 МРа kg: а) кочна плочица *A* – PM_{10} , б) кочна плочица *A* – $PM_{2.5}$ в) кочна плочица *B* – PM_{10} , г) кочна плочица *B* – $PM_{2.5}$, д) кочна плочица *C* – PM_{10} , ђ) кочна плочица *C* – $PM_{2.5}$, е) кочна плочица *D* – PM_{10} , ж) кочна плочица *D* – $PM_{2.5}$

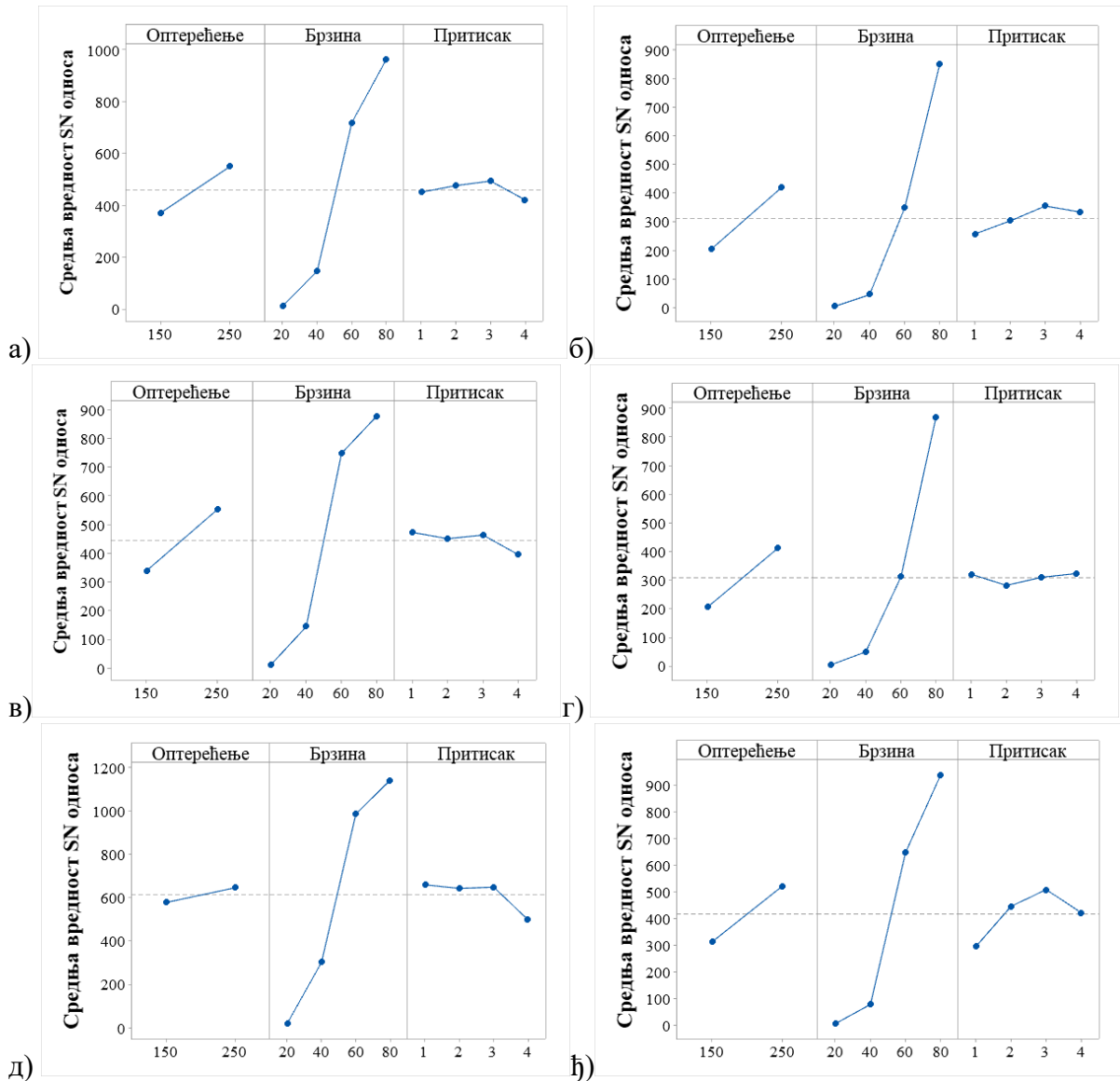
Примена притиска од 4 МРа и утицај промене вредности фактора на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је такође анализиран и дијаграми утицаја су приказани на слици 5.21. У односу на претходне вредности притиска, у овом случају највећа промена концентрације честица је приметна код честица $PM_{2.5}$ за случај кочне плочице С. Долази до незнатних промена и у концентрацијама обе врсте честица у поређењу са свим претходно примењен притисцима. У односу на претходну анализу, може се закључити да при промени притиска долази до варијације концентрације честица, али да су оптерећење, као и брзина утицајнији фактори.

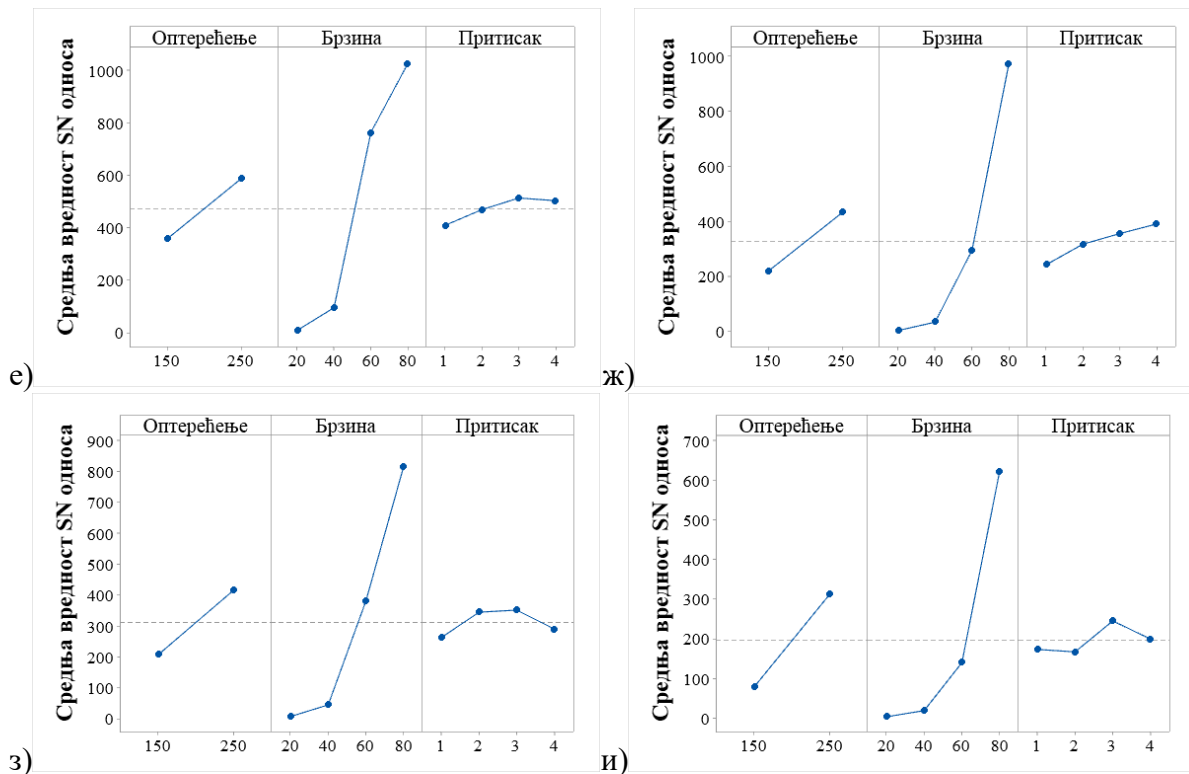


Слика 5.21 Зависност концентрације честица у односу на брзину и оптерећење при притиску од 4 МРа kg : а) кочна плочица А – PM_{10} , б) кочна плочица А – $PM_{2.5}$ в) кочна плочица В – PM_{10} , г) кочна плочица В – $PM_{2.5}$, д) кочна плочица С – PM_{10} , ж) кочна плочица С – $PM_{2.5}$, е) кочна плочица Д – PM_{10} , ж) кочна плочица Д – $PM_{2.5}$

5.2 Тагучи анализа добијених резултата

Применом Тагучијевог дизајна експеримента и каснијом анализом, долази се до података о утицају кочних фактора на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. На сликама 5.22а и 5.22б су приказани утицајни фактори, не узимајући у обзир врсту кочне плочице, за обе концентрације честица. На сликама 5.22в, г, д, њ, е, ж, з, и су приказани дијаграми концентрација честица према типу кочних плочица. Брзина је најутицајнији фактор на концентрацију насталих честица на свим примењеним кочним плочицама. Постоје одређене варијације при нижим брзинама, али са повећањем брзине повећава се и настала концентрација. Слично је и са оптерећењем, међутим, посматрањем резултата анализе, показало се да код кочне плочице *В*, притисак утиче више од оптерећења на концентрацију честица. У свим осталим случајевима, показало се да оптерећење ипак има већи утицај на концентрацију честица у односу на притисак, што се поклапа са претходним анализама. Различити притисци различито утичу на концентрације честица, а њихов утицај зависи од примењене кочне плочице, како се види на приказаним дијаграмима. Тако, за разлику од оптерећења, где са повећањем долази и до повећања концентрације честица, притисак и његов утицај зависи пре свега од примењених кочних плочица.

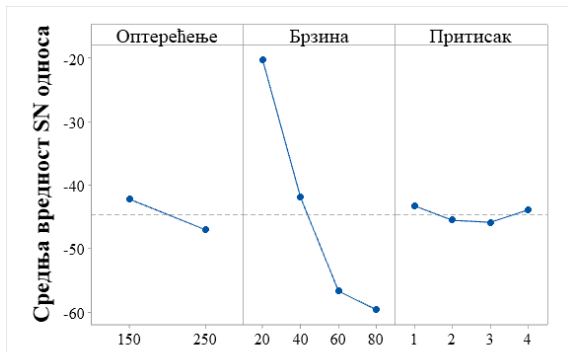




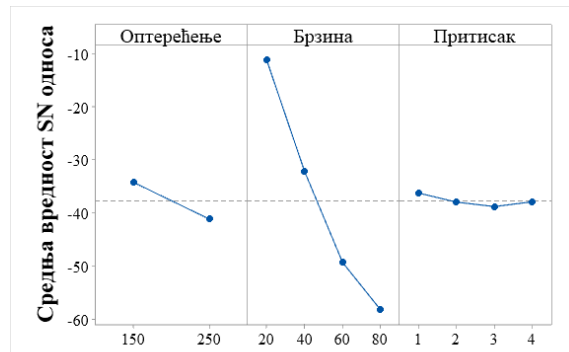
Слика 5.22 Анализа утицаја посматраних фактора према Тагучи методи: а) према средњој концентрацији честица PM_{10} , б) према средњој концентрацији честица $PM_{2.5}$, в) кочна плочица А – PM_{10} , г) кочна плочица А – $PM_{2.5}$ д) кочна плочица В – PM_{10} , њ) кочна плочица В – $PM_{2.5}$, е) кочна плочица С – PM_{10} , ж) кочна плочица С – $PM_{2.5}$, з) кочна плочица Д – PM_{10} , и) кочна плочица Д – $PM_{2.5}$ [386]

Анализа оптимизације фактора у циљу постизања најмање концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је приказана на слици 5.23. На основу претходно извршених анализа и на основу свих закључака, може се увидети да се најмања концентрација честица добија при мањим брзинама и при мањем оптерећењу. Чињеница је да притисак различито делује на концентрације честица у зависности од кочне плочице, а оптималан притисак се разликује од случаја до случаја. Притисак у кочном систему нема значајан утицај на концентрацију честица, али се тај утицај ипак не може занемарити. Уколико се изведе и израчуна кинетичка енергија возила, та је величина од значаја за концентрацију честица. Кинетичка енергија ће свакако бити анализирана и у даљем раду и анализама корелације између параметара.

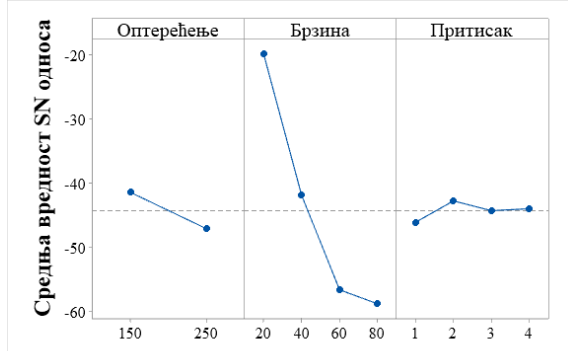
Оптимални кочни притисци, као што је речено, зависе од кочне плочице. Међутим, може се рећи да су оптимални притисци или они најмањи примењени (1 МПа) или они највећи примењени (4 МПа). Једина разлика је што је код примене кочне плочице А, оптималан притисак од 2 МПа.



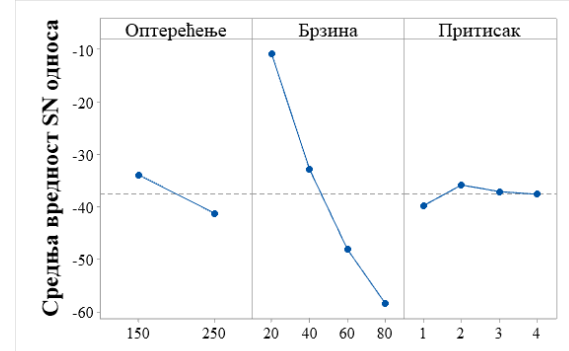
а) *SN: што мања вредност то боља*



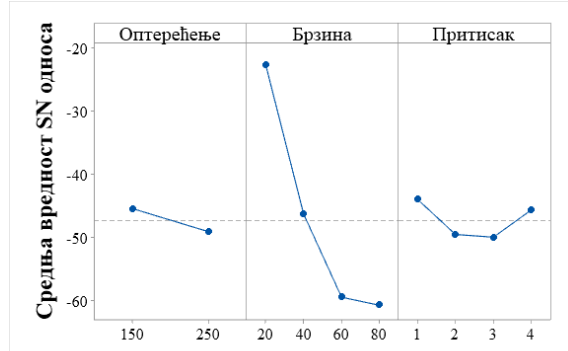
б) *SN: што мања вредност то боља*



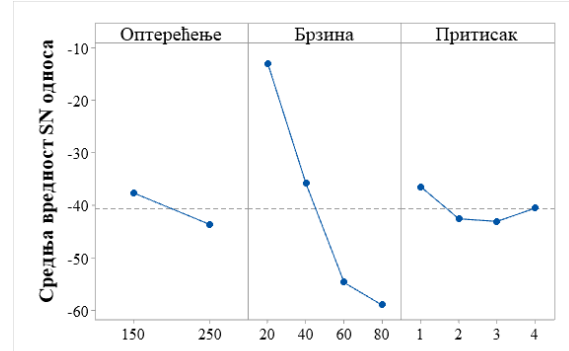
в) *SN: што мања вредност то боља*



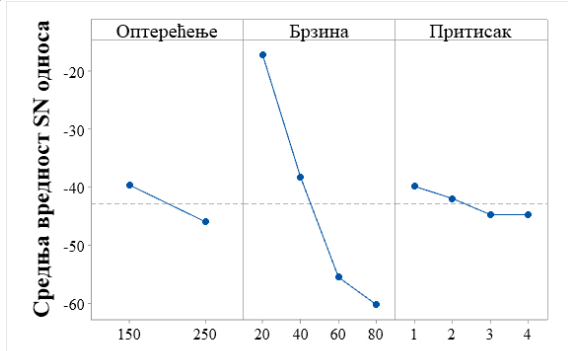
г) *SN: што мања вредност то боља*



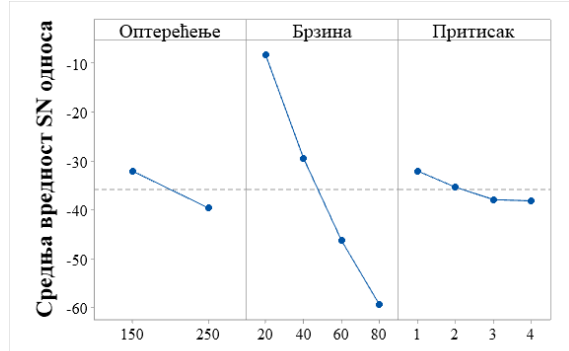
д) *SN: што мања вредност то боља*



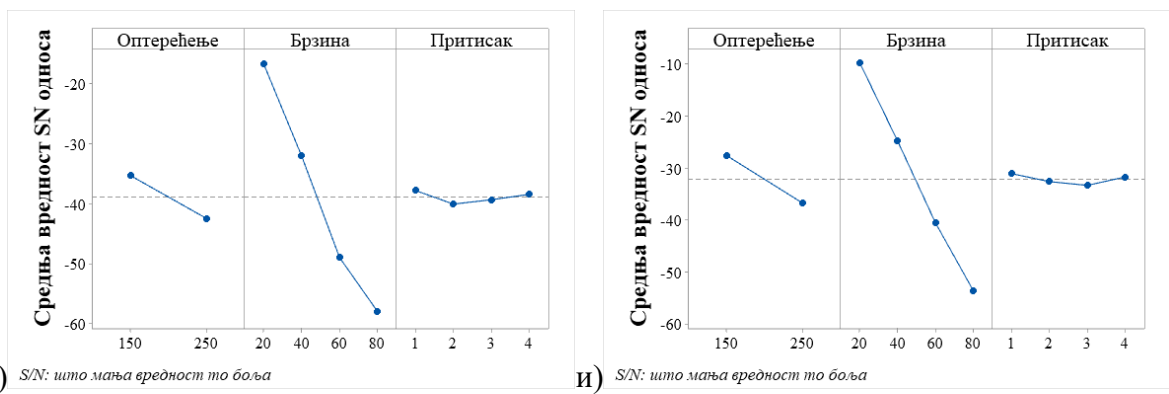
е) *SN: што мања вредност то боља*



ж) *SN: што мања вредност то боља*



з) *SN: што мања вредност то боља*



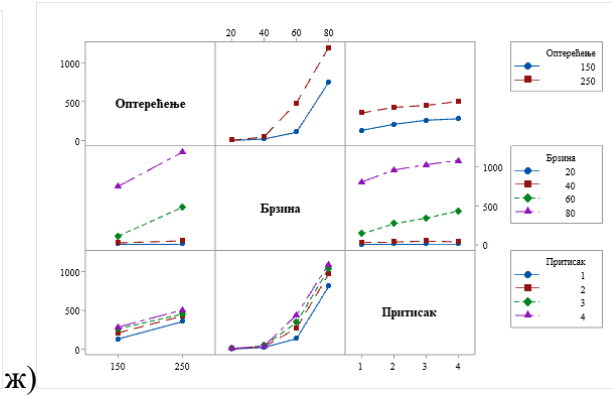
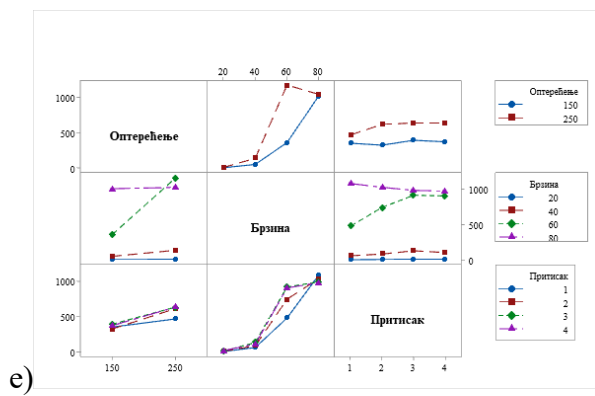
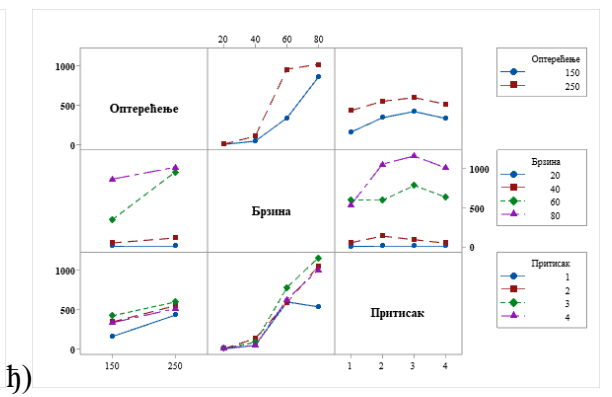
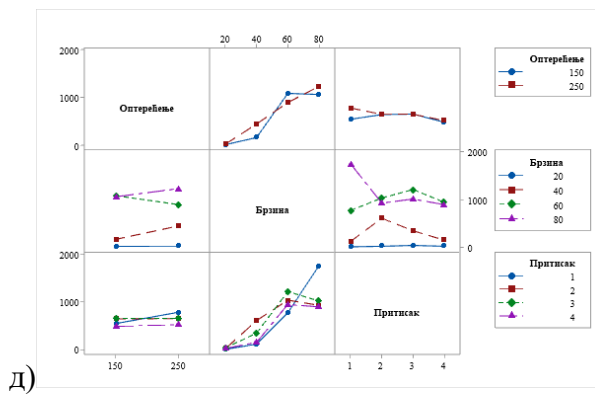
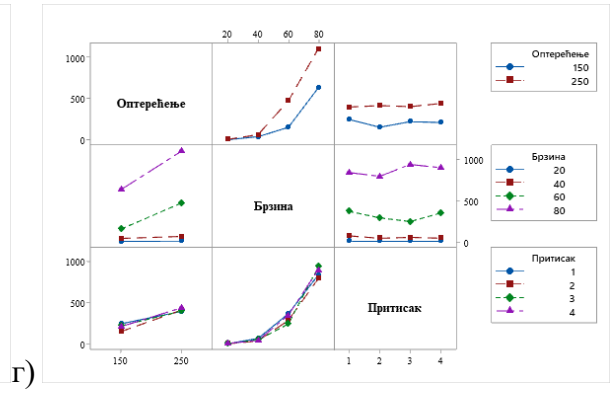
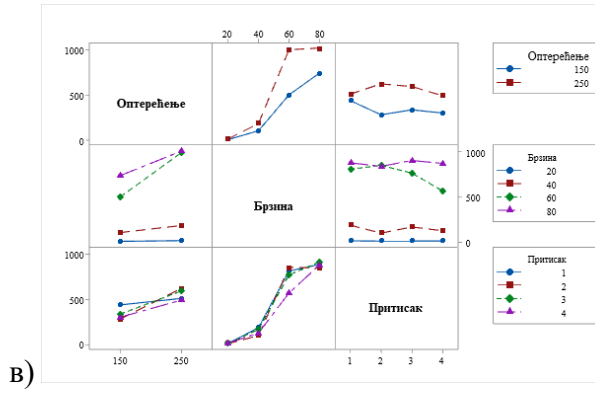
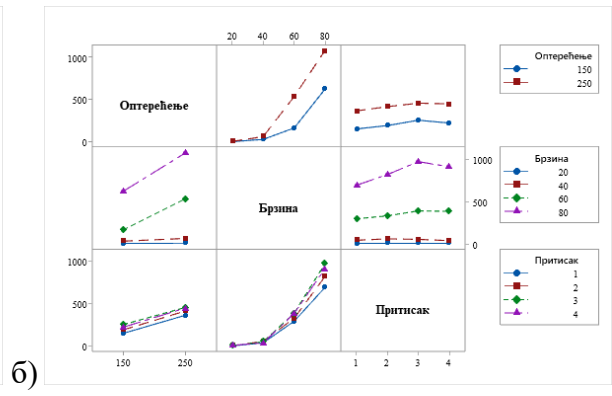
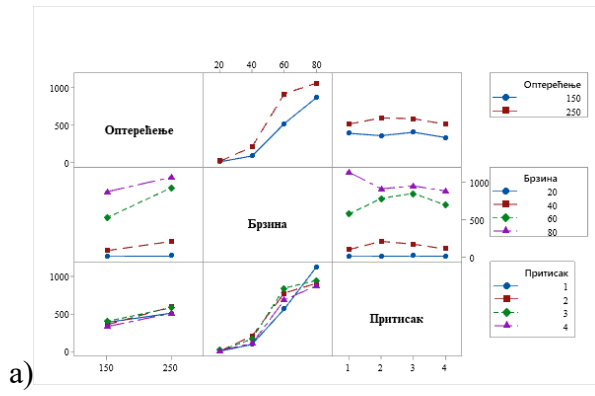
Слика 5.23 Анализа оптимално посматраних фактора за најмању концентрацију честица према Тагучи методи: а) према средњој концентрацији честица PM₁₀, б) према средњој концентрацији честица PM_{2.5}, в) кочна плочица А – PM₁₀, г) кочна плочица А – PM_{2.5} д) кочна плочица В – PM₁₀, њ) кочна плочица В – PM_{2.5}, е) кочна плочица С – PM₁₀, ж) кочна плочица С – PM_{2.5}, з) кочна плочица D – PM₁₀, и) кочна плочица D – PM_{2.5}

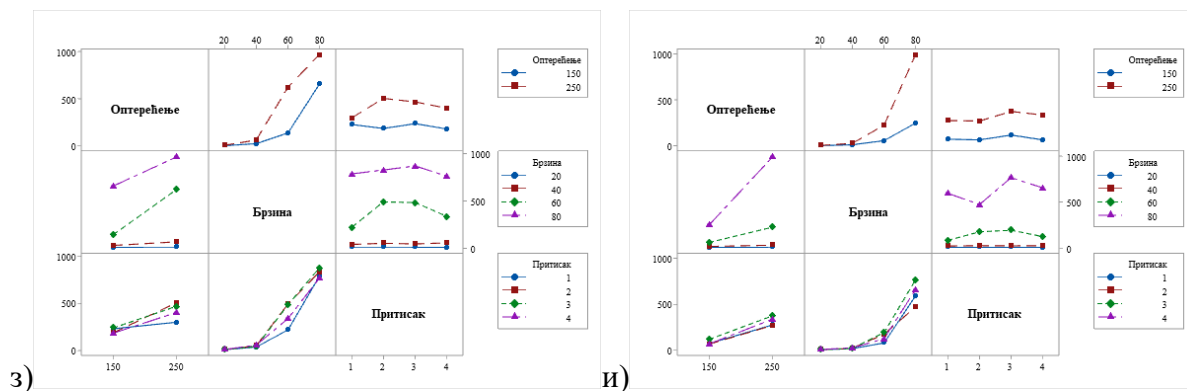
Посматрајући добијене резултате о утицају кочних фактора на концентрацију честица PM₁₀ и PM_{2.5}, може се доћи до података приказаних у табели 5.1. Вредности у табели 5.1 представљају ранг значајности. Вредност ранга значајности 1 означава највећи утицај, 2 означава средњи утицај на концентрацију честица и вредност 3 значи да фактор има најмањи утицај на концентрацију честица. Дата је сумарна табела, у којој је извршен приказ добијених података на основу свих средњих вредности концентрације, за различите кочне плочице. На основу табеле 5.1, генерално посматрано, највећи утицај на концентрацију има брзина, затим оптерећење, и на крају притисак у хидрауличком систему кочења. Са друге стране, ако се посматра утицај кочних фактора према типу кочних плочица, за кочне плочице А, С и D најзначајнији је брзина, затим оптерећење и на крају притисак у хидрауличком кочном систему. Код кочне плочице В, највећи утицај на концентрацију обе врсте честица имају брзина, затим притисак и на крају оптерећење. На основу тога, применом Тагучи методе, могуће је утврдити да фактори кочења могу утицати различито на концентрацију насталих честица када се посматрају кочне плочице, па према томе кочне плочице имају утицаја на насталу концентрацију честица PM₁₀ и PM_{2.5}.

Табела 5.1 Анализа значајности утицаја различитих кочних фактора на концентрацију честица PM₁₀ и PM_{2.5} према Тагучи анализи [386]

	Оптерећење		Брзина		Притисак	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Све плочице	2	2	1	1	3	3
Кочна плочица А	2	2	1	1	3	3
Кочна плочица В	3	3	1	1	2	2
Кочна плочица С	2	2	1	1	3	3
Кочна плочица D	2	2	1	1	3	3

Применом ANOVA анализе промене варијанси дошло се до дијаграма интеракција између различитих фактора и њиховог утицаја на концентрације честица PM₁₀ и PM_{2.5}. На слици 5.24 су приказани добијени резултати применом ове анализе. Интеракцијом и променама оптерећења и брзине добијају се највеће промене у концентрацији честица, док са променом притиска и интеракцијом између притиска и остала два фактора, не добијају се значајне промене у концентрацијама честица.





Слика 5.24 Интеракције између различитих фактора и концентрације честица применом ANOVA: а) према средњој концентрацији честица PM_{10} , б) према средњој концентрацији честица $PM_{2.5}$, в) кочна плочица А – PM_{10} , г) кочна плочица А – $PM_{2.5}$ д) кочна плочица В – PM_{10} , е) кочна плочица В – $PM_{2.5}$, е) кочна плочица С – PM_{10} , ж) кочна плочица С – $PM_{2.5}$, з) кочна плочица Д – PM_{10} , и) кочна плочица Д – $PM_{2.5}$

Анализом варијанси тј. применом ANOVA методе може се утврдити да поједини фактори имају другачији утицај на насталу концентрацију честица, што је приказано у табели 5.2. Тако, према овој анализи, на концентрацију честица $PM_{2.5}$, за све случајеве почев од средњих вредности до сваке кочне плочице појединачно, највећи утицај има брзина, оптерећење и на крају притисак у хидрауличком делу кочног система. Са друге стране, на концентрацију честица PM_{10} , само код кочне плочице В, кочни фактори делују тако да највећи утицај на концентрацију има брзина, притисак и на крају оптерећење. Посматрајући просечне вредности фактора и кочне плочице, може се закључити да највећи утицај има брзина, затим притисак у кочном систему и на крају оптерећење.

Табела 5.2 Анализа значајности утицаја различитих кочних фактора на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ према анализи варијанси преко ANOVA

	Оптерећење		Брзина		Притисак	
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Све плочице	2	2	1	1	3	3
Кочна плочица А	2	2	1	1	3	3
Кочна плочица В	3	2	1	1	2	3
Кочна плочица С	2	2	1	1	3	3
Кочна плочица Д	2	2	1	1	3	3

5.3 Корелациона анализа добијених података

У овом поглављу је приказана корелациона анализа измерених вредности концентрација честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и директних и индиректних кочних фактора (параметара). За обе врсте честица је одређена корелација са параметрима кочења. Примењена су два типа корелационе анализе концентрације честица и параметара кочења, и то применом Пирсонов коефицијента и Спирмановог коефицијента. У сваком од случајева је утврђен ниво значајности корелације (колоне Sig. (2-tailed)). Број података који је коришћен за сваки однос фактора и концентрације честица PM_{10} или $PM_{2.5}$ приказан је у колонама које су означене са ознаком N. Вредност N зависи од тога колико је података коришћено за одређени прорачун корелације, односно колико је података доступно за одређени прорачун корелације. Директни параметри кочења су: оптерећење $\frac{1}{4}$ возила (у тексту оптерећење), дефинисана почетна брзина возила (у тексту брзина) добијена на основу

измереног броја обртаја на инерцијалном кочном динамометру, циљана брзина која је требала бити постигнута на инерцијалном кочном динамометру и притисак у хидрауличком систему кочења (у тексту притисак). Дефинисана почетна брзина и циљана брзина имају јако мало одступање, као и циљани притисак и притисак. Индиректни параметри су они параметри на које не утиче директно возач и овде спадају: температура кочних плочица, кочни момент, време кочења, успорење, релативна влажност ваздуха, амбијентална температура и коефицијент трења између фриксионих парова.

5.3.1 Примена Пирсоновог коефицијента у циљу корелационе анализе

Корелациона анализа свих добијених података је приказана у табели 5.3. За све случајеве је утврђено је да ли постоји значај корелације на нивоу од 0,01 или 0,05 (у табели је вредност приказана у колони *Sig. (2-tailed)*). Вредности корелације између фактора и концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ су приказане у колони *Пирсонова корелација*, за сваку врсту концентрације посебно. На основу свих података мерења извршена је анализа веза корелације између одређених параметара и просечних концентрација честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Утврђено је да постоји значајна и јака корелација између концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Када је у питању концентрација честица PM_{10} , утврђено је да има веома јаку корелацију са брзином кретања возила и температуром кочних плочица, док је умерена корелација са временом кочења. Концентрација честица $PM_{2.5}$ је у веома јакој корелацији са брзином возила, док је са крајњом температуром кочних плочица у јакој корелацији. На концентрацију честица $PM_{2.5}$ утиче време кочења коју има вредност на нивоу слабе корелације, што указује на мали утицај на концентрацију честица али постоји утицај који постоји. Кинетичка енергија возила као изведен параметар је у веома јакој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$.

Табела 5.3 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења и међусобна зависност параметара

	PM_{10}			$PM_{2.5}$			*. Корелација значајна на нивоу 0,05.	**. Корелација значајна на нивоу 0,01.
	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N		
Оптерећење	0,215	0,237	32	0,288	0,11	32		
Брзина	0,917**	<,001	32	0,853**	<,001	32		
Циљана брзина	0,917**	<,001	32	0,851**	<,001	32		
Притисак	-0,019	0,917	32	0,084	0,648	32		
Циљани притисак	-0,011	0,952	32	0,092	0,616	32		
Температура кочних плочица	0,920**	<,001	32	0,967**	<,001	32		
Кочни момент	0,05	0,785	32	0,145	0,429	32		
Време кочења	0,591**	<,001	32	0,468**	0,007	32		
Успорење	0,162	0,376	32	0,214	0,239	32		
Релативна влажност ваздуха	-0,002	0,99	32	-0,043	0,815	32		
Амбијентална температура	0,27	0,135	32	0,296	0,1	32		
Кинетичка енергија	0,931**	0,000	32	0,971**	0,000	32		
PM_{10}	--		32	0,893**	<,001	32		
$PM_{2.5}$				--		32		

Посматрајући резултате за кочне плочице типа *A*, табела 5.4, утврђено је да постоји више фактора који утичу на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Оптерећење и концентрација обе врсте честица имају слабу корелацију на нивоу значајности 0,05. Када је у питању концентрација честица PM_{10} , веома јаку корелацију има брзина, јаку корелацију са концентрацијом има температура кочних плочица, време кочења је у умереној корелацији, док је амбијентална температура у веома слабој корелацији, али она постоји. Са друге стране, концентрација честица $PM_{2.5}$ је у веома јакој корелацији са крајњом температуром кочних плочица, у јакој корелацији са брзином возила, у умереној корелацији са временом кочења и у веома слабој корелацији са амбијенталном температуром. Анализом кинетичке енергије, може се закључити да је она у корелацији са концентрацијама честица на нивоу значајности од 0,01. Кинетичка енергија је у јакој корелацији са насталом концентрацијом честица PM_{10} , док за честице $PM_{2.5}$, постоји веома јака корелација са кинетичком енергијом возила.

Табела 5.4 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу *A*

	PM_{10}			$PM_{2.5}$				
	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N		
Корелација	Оптерећење	0,246*	0,015	97	0,259*	0,01	97	*. Корелација значајна на нивоу 0,05. **. Корелација значајна на нивоу 0,01.
	Брзина	0,852**	<,001	97	0,848**	<,001	97	
	Циљана брзина	0,850**	<,001	97	0,844**	<,001	97	
	Циљани притисак	-0,067	0,514	97	-0,001	0,99	97	
	Притисак	-0,064	0,534	97	0,001	0,99	97	
	Температура кочних плочица	0,863**	<,001	97	0,934**	<,001	97	
	Кочни момент	-0,039	0,701	97	0,024	0,812	97	
	Време кочења	0,582**	<,001	97	0,543**	<,001	97	
	Успорјење	0,071	0,487	97	0,118	0,251	97	
	Релативна влажност ваздуха	0,002	0,984	97	-0,016	0,876	97	
	Амбијентална температура	0,261**	0,01	97	0,322**	0,001	97	
	Коефицијент трења између фриксионих парова	0,151	0,139	97	0,109	0,286	97	
	Кинетичка енергија	0,883**	0,000	97	0,964**	0,000	97	
	PM_{10}	--		97	0,834**	< 0,001	97	
	$PM_{2.5}$				--		97	

У табели 5.5 су приказани резултати корелационе анализе концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ за случај кочне плочице *B*. У претходном случају (кочне плочице типа *A*) постојала је јака корелација између концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, а за плочицу *B* постоји корелација на значајном нивоу која је умерено јака корелација. Концентрација честица PM_{10} је у јакој корелацији са брзином и крајњом температуром кочних плочица, у умерено јакој корелацији са временом кочења и у слабој корелацији са амбијенталном температуром. Са друге стране, концентрација честица $PM_{2.5}$ је у јакој корелацији са температуром кочних плочица и брзином, у слабој корелацији са временом кочења и у веома слабој корелацији са оптерећењем и успорењем. Кинетичка енергија је на нивоу значајности од 0,01, а поред тога са концентрацијама честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је у јакој корелационој вези.

Табела 5.5 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу В

	PM_{10}			$PM_{2.5}$			
	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N	
Корелација	Оптерећење	0,063	0,541	96	0,218*	0,033	96
	Брзина	0,844**	<,001	96	0,790**	<0,001	96
	Циљана брзина	0,844**	<,001	96	0,787**	<0,001	96
	Циљани притисак	-0,1	0,333	96	0,104	0,316	96
	Притисак	-0,09	0,384	96	0,114	0,269	96
	Температура кочних плочица	0,740**	<,001	96	0,819**	<0,001	96
	Кочни момент	-0,06	0,563	96	0,127	0,218	96
	Време кочења	0,631**	<,001	96	0,404**	<0,001	96
	Успорјење	0,124	0,23	96	0,248*	0,015	96
	Релативна влажност ваздуха	0,15	0,146	96	0,14	0,174	96
	Амбијентална температура	0,334**	<,001	96	0,191	0,062	96
	Коефицијент трења између фрикционих парова	0,16	0,119	96	0,046	0,654	96
	Кинетичка енергија	0,779**	0,000	96	0,827**	0,000	96
	PM_{10}	--		96	0,629**	<0,001	96
	$PM_{2.5}$				--		96

*. Корелација значајна на нивоу 0,05.

**. Корелација значајна на нивоу 0,01.

Ако се посматрају кочне плочице типа С, концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, су у јакој међусобној корелацији. У овом случају, поједини фактори имају идентичан утицај на концентрације обе врсте честица. Брзина је са концентрацијом обе врсте честица у јакој корелацији, док је оптерећење у оба случаја у веома слабој корелацији, а коефицијент трења је у слабој корелацији са концентрацијом насталих честица. Крајња температура кочних плочица је у јакој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} , а концентрација честица $PM_{2.5}$ у веома јакој корелацији. Време кочења је у слабој корелацији за обе концентрације честица, али је за честице PM_{10} вредност корелације већа. Успорјење је у веома слабој корелацији која је на нивоу значајности од 0,05. Показало се да је кинетичка енергија у корелацији са концентрацијом честица. Показало се да је са концентрацијом честица PM_{10} у јакој корелационој вези, док је концентрација честица $PM_{2.5}$ са кинетичком енергијом у веома јакој корелационој вези.

Табела 5.6 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу С

	PM_{10}			$PM_{2.5}$			
	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N	
Корелација	Оптерећење	0,232*	0,023	96	0,247*	0,015	96
	Брзина	0,302**	0,003	96	0,339**	<,001	96
	Циљана брзина	0,841**	<,001	96	0,824**	<,001	96
	Циљани притисак	0,074	0,475	96	0,126	0,222	96
	Притисак	0,083	0,424	96	0,134	0,194	96
	Температура кочних плочица	0,799**	<,001	96	0,919**	<,001	96
	Кочни момент	0,106	0,304	96	0,153	0,137	96
	Време кочења	0,451**	<,001	96	0,396**	<,001	96
	Успорјење	0,178	0,083	96	0,204*	0,046	96
	Релативна влажност ваздуха	0,154	0,135	96	0,043	0,675	96
	Амбијентална температура	0,146	0,157	96	0,175	0,088	96
	Коефицијент трења између фриксионих парова	0,382**	<,001	96	0,336**	<,001	96
	Кинетичка енергија	0,859**	0,000	96	0,938**	0,000	96
	PM_{10}	--		96	0,821**	<,001	96
	$PM_{2.5}$				--		96

*. Корелација значајна на нивоу 0,05.

** . Корелација значајна на нивоу 0,01.

Добијени резултати корелације различитих фактора и концентрације честица приказани су табели 5.7 за кочну плочицу типа *D*. Оптерећење је у корелацији са обе концентрације честица, али концентрација честица PM_{10} је у веома слабој корелацији са њим, док је за честице $PM_{2.5}$ у слабој корелацији. Брзина је у јакој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} , док је у умереној корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$. Крајња температура је у јакој корелацији са концентрацијама оба типа честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, при чему корелација са концентрацијом честица PM_{10} има већу вредност. Кочни момент за ове кочне плочице има веома слабу корелацију са концентрацијом честицама. Време кочења је у слабој корелацији са концентрацијом за обе врсте честица. Успорјење је у веома слабој корелацији само са концентрацијом PM_{10} . На основу резултата, може се закључити да постоји корелација између концентрације честица и коефицијента трења између фриксионих парова. Коефицијент трења има умерену корелацију са обе концентрације честица, с тим да је вредност корелације већа за концентрацију честица PM_{10} . Корелациона веза кинетичке енергије је веома јака са концентрацијом честица PM_{10} , док је у јакој корелационој вези са концентрацијом честица $PM_{2.5}$.

Табела 5.7 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу D

	PM_{10}			$PM_{2.5}$				
	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N	Пирсонова корелација	Sig. (2-tailed)	N		
Корелација	Оптерећење	0,282**	0,005	96	0,359**	<,001	96	* . Корелација значајна на нивоу 0,05. ** . Корелација значајна на нивоу 0,01.
	Брзина	0,835**	<,001	96	0,679**	<,001	96	
	Циљана брзина	0,835**	<,001	96	0,680**	<,001	96	
	Циљани притисак	0,026	0,8	96	0,054	0,603	96	
	Притисак	0,03	0,768	96	0,058	0,573	96	
	Температура кочних плочица	0,868**	<,001	95	0,782**	<,001	95	
	Кочни момент	0,203*	0,047	96	0,204*	0,046	96	
	Време кочења	0,467**	<,001	96	0,406**	<,001	96	
	Успорјење	0,207*	0,043	96	0,158	0,125	96	
	Релативна влажност ваздуха	-0,032	0,759	96	-0,01	0,926	96	
	Амбијентална температура	0,105	0,308	96	0,074	0,473	96	
	Коефицијент трења између фриксионих парова	0,674**	<,001	96	0,550**	<,001	96	
	Кинетичка енергија	0,934**	0,000	96	0,887**	0,000	96	
	PM_{10}	--		96	0,842**	<,001	96	
	$PM_{2.5}$				--		96	

У табели 5.8 су приказани резултати корелација између утицајних фактора и концентрација честица за сваку анализирану кочну плочицу. На основу табеле 5.8, може се утврдити значај сваког параметра, као и њихов различит утицај на емисију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Врста кочних плочица је једнако значајна за концентрацију честица које настају приликом хабања кочница. Показало се да су концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у јакој корелационој вези, код свих типова кочних плочица, осим за кочне плочице типа B , за које је утврђено да између ове две концентрације постоји умерена корелациона веза. Анализа је показала да је код свих кочних плочица брзина у јакој корелационој вези са обе концентрације честица. У јакој корелационој вези са концентрацијама честица је и температура кочних плочица. Крајња температура је у веома јакој корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$ за кочне плочице A и C . Оптерећење се показало да има веома слабу или слабу корелацију са концентрацијом честица, док се за кочне плочице B , показало да нема корелацију са концентрацијом честица PM_{10} . Време кочења се показао као фактор који је у корелацији која је слаба или умерена са концентрацијом обе врсте честица, али интензитет корелације зависи од кочне плочице. Успорјење се показало као један од фактора који је у веома слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} за кочне плочице D , док је веома слабој корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$ за кочне плочице B и C . Амбијентална температура је у веома слабој и слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ за случај кочне плочице A , док за кочне плочице B је у слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} . Коефицијент трења између фриксионих парова је у слабој корелацији са обе врсте честица, када се посматрају резултати за кочне плочице C , док је умереној корелацији са обе врсте честица које настају хабањем кочне плочице D . Кочни момент је једино у слабој корелацији са концентрацијом обе врсте честица када је у питању кочна плочица

D. Кинетичка енергија се у овом случају, за све четири кочне плочице, показао као утицајни параметар. Корелациона веза са концентрацијама честица зависи од примењене кочне плочице, али углавном је то јака или веома јака корелациона веза између кинетичке енергије и концентрација честица. Применом Пирсоновог коефицијента показало се да кочни притисак и релативна влажност ваздуха нису у корелацији са концентрацијом честица PM₁₀ и PM_{2.5} ни код једне врсте кочних плочица.

Табела 5.8 Упоредна анализа корелација различитих параметара и концентрације PM₁₀ и PM_{2.5} у зависности од кочне плочице применом Пирсоновог коефицијента: зелена) веома слаба корелација, жута) слаба корелација, плава) умерена корелација, љубичаста) јака корелација, црвена) веома јака корелација [386]

	Кочна плочица A		Кочна плочица B		Кочна плочица C		Кочна плочица D	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Оптерећење	0,246*	0,259*	0,063	0,218*	0,232*	0,247*	0,282**	0,359**
Брзина	0,852**	0,848**	0,844**	0,790**	0,302**	0,339**	0,835**	0,679**
Циљана брзина	0,850**	0,844**	0,844**	0,787**	0,841**	0,824**	0,835**	0,680**
Циљани притисак	-0,067	-0,001	-0,1	0,104	0,074	0,126	0,026	0,054
Притисак	-0,064	0,001	-0,09	0,114	0,083	0,134	0,03	0,058
Температура кочних плочица	0,863**	0,934**	0,740**	0,819**	0,799**	0,919**	0,868**	0,782**
Кочни момент	-0,039	0,024	-0,06	0,127	0,106	0,153	0,203*	0,204*
Време кочења	0,582**	0,543**	0,631**	0,404**	0,451**	0,396**	0,467**	0,406**
Успорјење	0,071	0,118	0,124	0,248*	0,178	0,204*	0,207*	0,158
Релативна влажност ваздуха	0,002	-0,016	0,15	0,14	0,154	0,043	-0,032	-0,01
Амбијентална температура	0,261**	0,322**	0,334**	0,191	0,146	0,175	0,105	0,074
Коефицијент трења између фрикционих парова	0,151	0,109	0,16	0,046	0,382**	0,336**	0,674**	0,550**
Кинетичка енергија	0,883**	0,964**	0,779**	0,827**	0,859**	0,938**	0,934**	0,887**
PM ₁₀		0,834**		0,629**		0,821**		0,842**
PM _{2.5}	0,834**		0,629**		0,821**		0,842**	

* Корелација значајна на нивоу 0,05.

** Корелација значајна на нивоу 0,01.

5.3.3 Примена Спирмановог коефицијента у циљу корелационе анализе

У овом поглављу је приказана корелациона анализа применом Спирмановог коефицијента (*Spearman's rho*). Као и у претходном случају, анализирани су корелације које су статистички значајне на нивоу 0,01 и 0,05. Посматрајући просечне вредности свих добијених података, не узимајући у обзир тип кочне плочице, добијене су корелације концентрација честица PM₁₀ и PM_{2.5} које су приказане у табели 5.9. Може се закључити да су концентрације честица PM₁₀ и PM_{2.5} у веома јакој корелацији. Када се посматрају фактори и њихов утицај на концентрације честица, добијају се слични подаци као и применом Пирсоновог коефицијента. Показало се да је иста корелација између обе концентрације честица и брзине, као и крајње температуре кочних плочица. Ова два параметра показала су јаку корелациону везу са концентрацијом насталих честица. Време кочења је у умереној корелационој вези са концентрацијом честица PM₁₀ и PM_{2.5}. Веома јака корелациона веза показала се између концентрације честица PM₁₀ и PM_{2.5} и кинетичке енергије.

Табела 5.9 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења и међусобна зависност параметара

		Spearman's rho						*. Корелација значајна на нивоу 0,05. **. Корелација значајна на нивоу 0,01.
		PM ₁₀			PM _{2.5}			
		Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N	Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N	
Корелација	Оптерећење	0,244	0,179	32	0,244	0,179	32	
	Брзина	0,908**	<,001	32	0,944**	<,001	32	
	Циљана брзина	0,931**	<,001	32	0,954**	<,001	32	
	Притисак	-0,029	0,876	32	0,097	0,598	32	
	Циљани притисак	0,095	0,606	32	0,229	0,208	32	
	Температура кочних плочица	0,951**	<,001	32	0,974**	<,001	32	
	Кочни момент	0,186	0,307	32	0,305	0,09	32	
	Време кочења	0,666**	<,001	32	0,602**	<,001	32	
	Успорење	0,156	0,394	32	0,288	0,11	32	
	Релативна влажност ваздуха	-0,025	0,893	32	-0,031	0,868	32	
	Амбијентална температура	0,319	0,075	32	0,307	0,087	32	
	Кинетичка енергија	0,955**	0,000	32	0,982**	0,000	32	
	PM ₁₀	--		32	0,953**	<,001	32	
	PM _{2.5}				--		32	

За случај кочне плочице типа А, показало се да на концентрацију честица PM₁₀ и PM_{2.5} утичу кочни фактори који се разликују према својој корелационој вези, као што је приказано у табели 5.10. Оптерећење је са обе концентрације честица у веома слабој корелацији. Показало се да је брзина, када је у питању концентрација честица PM_{2.5}, у веома јакој корелацији, док је са концентрацијом честица PM₁₀ у јакој корелацији, али је вредност корелације приближна граници да буде и веома јака корелациона веза. Крајња температура кочних плочица има веома јаку корелацију са концентрацијом честица PM₁₀ и PM_{2.5}. Време кочења је у умереној корелацији са концентрацијом обе концентрације честица. Амбијентална температура је у веома слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{2.5}, док је у слабој корелацији са концентрацијом честица PM₁₀. Ако се посматрају резултати осталих параметара, не постоји значајна корелација са концентрацијом честица. Показало се да постоји веома јака корелациона веза између кинетичке енергије и концентрација честица PM₁₀ и PM_{2.5}.

Табела 5.10 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу А

		Spearman's rho						*. Корелација значајна на нивоу 0,05.	**. Корелација значајна на нивоу 0,01.
		PM_{10}			$PM_{2.5}$				
		Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N	Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N		
Корелација	Оптерећење	0,254*	0,012	97	0,200*	0,05	97		
	Брзина	0,895**	<,001	97	0,956**	<,001	97		
	Циљана брзина	0,901**	<,001	97	0,955**	<,001	97		
	Циљани притисак	-0,065	0,529	97	-0,028	0,782	97		
	Притисак	-0,031	0,764	97	-0,002	0,983	97		
	Температура кочних плочица	0,920**	<,001	97	0,954**	<,001	97		
	Кочни момент	-0,001	0,995	97	0,027	0,795	97		
	Време кочења	0,703**	<,001	97	0,689**	<,001	97		
	Успорење	0,095	0,356	97	0,152	0,137	97		
	Релативна влажност ваздуха	-0,015	0,886	97	0,029	0,778	97		
	Амбијентална температура	0,310**	0,002	97	0,288**	0,004	97		
	Коефицијент трења између фрикционих парова	0,174	0,089	97	0,177	0,083	97		
	Кинетичка енергија	0,930**	0,000	97	0,978**	0,000	97		
	PM_{10}	--		97	0,947**	<,001	97		
	$PM_{2.5}$				--		97		

Анализом резултата за кочне плочице типа В, вредности корелација утицајних фактора са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је приказана у табели 5.11. Утврђено је да између концентрација честица постоји јака корелација. Брзина има јаку корелацију са концентрацијом честица PM_{10} , док је концентрација честица $PM_{2.5}$ у веома јакој корелацији са брзином. Крајња температура кочних плочица је у јакој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} , док је са концентрацијом честица $PM_{2.5}$ у веома јакој корелацији. Време кочења је у умереној корелацији са концентрацијом обе врсте честица. Успорење је у веома слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} . Утврђено да постоји слаба корелација успорења и концентрације честица $PM_{2.5}$. Амбијентална температура је у односу на концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у слабој корелационој вези. Остали кочни параметри нису показали значајну корелацију са концентрацијом честица. Постоји јака корелациона веза концентрације честица PM_{10} и кинетичке енергије, док између концентрације честица $PM_{2.5}$ и кинетичке енергије постоји веома јака корелациона веза.

Табела 5.11 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу В

		Spearman's rho						*. Корелација значајна на нивоу 0,05.	**. Корелација значајна на нивоу 0,01.
		PM_{10}			$PM_{2.5}$				
		Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N	Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N		
Корелација	Оптерећење	0,066	0,524	96	0,188	0,067	96		
	Брзина	0,867**	<,001	96	0,909**	<,001	96		
	Циљана брзина	0,879**	<,001	96	0,927**	<,001	96		
	Циљани притисак	-0,017	0,871	96	0,12	0,243	96		
	Притисак	0,035	0,734	96	0,192	0,061	96		
	Температура кочних плочица	0,861**	<,001	96	0,942**	<,001	96		
	Кочни момент	0,042	0,682	96	0,167	0,103	96		
	Време кочења	0,616**	<,001	96	0,601**	<,001	96		
	Успорјење	0,211*	0,039	96	0,319**	0,002	96		
	Релативна влажност ваздуха	0,08	0,437	96	0,072	0,487	96		
	Амбијентална температура	0,479**	<,001	96	0,462**	<,001	96		
	Коефицијент трења између фриксионих парова	0,14	0,174	96	0,011	0,912	96		
	Кинетичка енергија	0,873**	0,000	96	0,944**	0,000	96		
	PM_{10}	--		96	0,853**	<,001	96		
	$PM_{2.5}$				--		96		

Применом ове анализе на факторе који утичу на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, за кочну плочицу С, дошло се до резултата приказаних у табели 5.12. Између ове две концентрације честица постоји веома јака корелациона веза. Може се закључити да су оптерећење, кочни момент, успорење и релативна влажност ваздуха у веома слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Корелација између брзине и концентрације честица за случај ове кочне плочице је на значајном нивоу. Концентрација честица PM_{10} са брзином је у јакој корелацији, док је брзина у веома јакој корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$. Крајња температура кочних плочица је у веома јакој корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$, док је у јакој корелацији са честицама PM_{10} . Време кочења је у умереној корелацији са обе концентрације честица. Корелација између коефицијента трења фриксионих парова и концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је на значајном нивоу. За обе врсте честица ово представља веома слабу корелациону везу, што указује на низак утицај на концентрацију честица, али утицај ипак постоји и не треба га занемарити јер је ниво статистичке значајности од 0,01. На основу претходне анализе, може се закључити да постоји значајна корелациона веза између концентрације честица $PM_{2.5}$ са притиском (на нивоу од 0,05), па је потребно узети у обзир и овај утицајни фактор. Корелациона веза између кинетичке енергије и концентрација честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је веома јака и на нову значајности од 0,01.

Табела 5.12 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу C

		Spearman's rho					
		PM_{10}			$PM_{2.5}$		
		Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N	Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N
Корелација	Оптерећење	0,241*	0,018	96	0,217*	0,034	96
	Брзина	0,880**	<,001	96	0,940**	<,001	96
	Циљана брзина	0,893**	<,001	96	0,957**	<,001	96
	Циљани притисак	0,109	0,292	96	0,123	0,231	96
	Притисак	0,181	0,078	96	0,202*	0,048	96
	Температура кочних плочица	0,873**	<,001	96	0,929**	<,001	96
	Кочни момент	0,225*	0,028	96	0,233*	0,022	96
	Време кочења	0,556**	<,001	96	0,575**	<,001	96
	Успорјење	0,238*	0,019	96	0,264**	0,009	96
	Релативна влажност ваздуха	0,250*	0,014	96	0,227*	0,026	96
	Амбијентална температура	0,082	0,428	96	0,08	0,439	96
	Коефицијент трења између фрикционих парова	0,395**	<,001	96	0,373**	<,001	96
	Кинетичка енергија	0,926**	0,000	96	0,977**	0,000	96
	PM_{10}	--		96	0,937**	<,001	96
	$PM_{2.5}$				--		96

*. Корелација значајна на нивоу 0,05.

** . Корелација значајна на нивоу 0,01.

Када је у питању анализа фактора који утичу на концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и међусобне корелације, а за случај кочне плочице D , резултати су приказани у табели 5.13. Корелација између концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ се показала као веома јака. Оптерећење, иако је на нивоу значајности од 0,05, показало је да је са концентрацијом обе врсте честица у веома слабој корелацији. Брзина возила је са обе концентрације честица у веома јакој корелацији. Крајња температура кочних плочица је у веома јакој корелационој вези са концентрацијама честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Коефицијент трења је са обе концентрације честица у јакој корелационој вези. Време кочења са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ има умерену корелациону везу. Кочни момент и успорење су у веома слабој корелационој вези са оба случаја концентрација честица, али су на високом нову значајности корелације од 0,01. За случај концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, корелациона веза са кинетичком енергијом у оба случаја је веома јака и на значајном нивоу.

Табела 5.13 Анализа корелације просечно добијених вредности мерења концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ и утицај различитих параметара за кочну плочицу D

		Spearman's rho						*. Корелација значајна на нивоу 0,05.	**. Корелација значајна на нивоу 0,01.
		PM_{10}			$PM_{2.5}$				
		Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N	Коефицијент корелације	Sig. (2-tailed)	N		
Корелација	Оптерећење	0,246*	0,016	96	0,249*	0,014	96		
	Брзина	0,912**	<,001	96	0,915**	<,001	96		
	Циљана брзина	0,943**	<,001	96	0,947**	<,001	96		
	Циљани притисак	0,012	0,906	96	0,02	0,847	96		
	Притисак	0,028	0,784	96	0,035	0,737	96		
	Температура кочних плочица	0,938**	<,001	95	0,935**	<,001	95		
	Кочни момент	0,263**	0,01	96	0,274**	0,007	96		
	Време кочења	0,637**	<,001	96	0,634**	<,001	96		
	Успорјење	0,266**	0,009	96	0,274**	0,007	96		
	Релативна влажност ваздуха	-0,056	0,587	96	-0,088	0,394	96		
	Амбијентална температура	0,197	0,055	96	0,168	0,103	96		
	Коефицијент трења између фрикционих парова	0,824**	<,001	96	0,834**	<,001	96		
	Кинетичка енергија	0,971**	0,000	96	0,975**	0,000	96		
	PM_{10}	--		96	0,993**	<,001	96		
	$PM_{2.5}$				--		96		

На основу свих података до којих се дошло корелационом анализом између различитих фактора приликом кочења возила и концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, а узимајући у обзир утицај различитих кочних плочица, применом Спирмановог коефицијента, дошло се до података који су приказани у табели 5.14. Оптерећење је фактор који је у веома слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ када су у посматрају резултати анализе за кочне плочице A , C и D , док се за кочне плочице B није показала корелација на значајном статистичком нивоу. Брзина, када се анализирају кочне плочице A , B и C , је у јакој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} , док за кочне плочице D је у веома јакој корелацији. Брзина је у веома јакој корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$ за све четири кочне плочице. Притисак је у слабој корелационој вези само са концентрацијом честица $PM_{2.5}$ и само за кочну плочицу C . Крајња температура кочних плочица је, као и брзина, један од фактора који је у веома јакој или јакој корелацији са концентрацијом обе врсте честица, а јачина корелације зависи само од кочних плочица. Ако се посматрају кочне плочице C и D , кочни момент је у веома слабој корелацији са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Време кочења је фактор који је за обе концентрације у јакој корелационој вези за кочне плочице A , док за остале три кочне плочице, овај фактор је у умереној корелационој вези са концентрацијом честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Успорјење, за случај кочне плочице A , није у корелационој вези са концентрацијама честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. За случај кочне плочице B налази се у слабој корелацији са концентрацијом честица $PM_{2.5}$, док за случај кочних плочица C и D је у слабој корелацији. Успорјење и концентрација честица PM_{10} су у веома слабој корелацији за случај кочних плочица B , C и D . Релативна влажност ваздуха је у веома слабој корелацији

са концентрацијом обе врсте честица само за случај кочне плочице *C*. Амбијентална температура је имала утицај само на концентрације честица које настају хабањем кочних плочица *A* и *B* и то у слабој или веома слабој корелацији. Коефицијент трења између фрикционих парова има утицај само на концентрације честица за кочне плочице *C* и *D*. За кочне плочице *C*, корелациона веза између концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је веома слаба, док за кочне плочице *D* је јака корелација између концентрације честица и коефицијента трења између фрикционих елемената. Посматрањем концентрације честица за кочне плочице *B*, утврђено је да постоји јака корелациона веза између обе концентрације честица, док је корелациона веза између концентрација честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ веома јака у случају кочних плочица *A*, *C* и *D*. Корелациона веза између кинетичке енергије и концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ је јака у свим случајевима, осим за кочне плочице *B*, код којих се корелациона веза са концентрацијом честица PM_{10} показала као јака корелациона веза.

Табела 5.14 Упоредна анализа корелација различитих параметара и концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у зависности од кочне плочице применом Спирмановог коефицијента: зелена) веома слаба корелација, жута) слаба корелација, плава) умерена корелација, љубичаста) јака корелација, црвена) веома јака корелација [386]

	Кочна плочица <i>A</i>		Кочна плочица <i>B</i>		Кочна плочица <i>C</i>		Кочна плочица <i>D</i>	
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Оптерећење	0,254*	0,200*	0,066	0,188	0,241*	0,217*	0,246*	0,249*
Брзина	0,895**	0,956**	0,867**	0,909**	0,880**	0,940**	0,912**	0,915**
Циљана брзина	0,901**	0,955**	0,879**	0,927**	0,893**	0,957**	0,943**	0,947**
Циљани притисак	-0,065	-0,028	-0,017	0,12	0,109	0,123	0,012	0,02
Притисак	-0,031	-0,002	0,035	0,192	0,181	0,202*	0,028	0,035
Температура кочних плочица	0,920**	0,954**	0,861**	0,942**	0,873**	0,929**	0,938**	0,935**
Кочни момент	-0,001	0,027	0,042	0,167	0,225*	0,233*	0,263**	0,274**
Време кочења	0,703**	0,689**	0,616**	0,601**	0,556**	0,575**	0,637**	0,634**
Успорјење	0,095	0,152	0,211*	0,319**	0,238*	0,264**	0,266**	0,274**
Релативна влажност ваздуха	-0,015	0,029	0,08	0,072	0,250*	0,227*	-0,056	-0,088
Амбијентална температура	0,310**	0,288**	0,479**	0,462**	0,082	0,08	0,197	0,168
Коефицијент трења између фрикционих парова	0,174	0,177	0,14	0,011	0,395**	0,373**	0,824**	0,834**
Кинетичка енергија	0,930**	0,978**	0,873**	0,944**	0,926**	0,977**	0,971**	0,975**
PM_{10}		0,947**		0,853**		0,937**		0,993**
$PM_{2.5}$	0,947**		0,853**		0,937**		0,993**	

* Корелација значајна на нивоу 0,05.

** Корелација значајна на нивоу 0,01.

5.4 Примена неуронских мрежа у циљу формирања модела превиђања концентрације честица

У овом поглављу су анализирани модели предвиђања концентрације насталих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ добијени коришћењем неуронских мрежа. Извршен је развој предвиђања концентрације применом два различита приступа, односно модела са једним и са два излаза. Примењено је седам архитектура неуронских мрежа од којих је свака обучена применом три различита алгорита за обучавање. Резултати коефицијента регресије

добијени на обучавању неуронске мреже (O), варијацији (B) и тесту (T) су приказани у табели 5.15. Примењено је 384 податка, где је за обучавање неуронских мрежа коришћено 70% (269 података), за валидацију 15% (58 података) и за тестирање 15% (58 података). Извршена је провера регресије на основу свих података (Π). Сви резултати коефицијента регресије између предвиђених и циљаних података у табели 5.15 су приказани као вредности које су приближне вредности 10. Коефицијент регресије има вредност од 0 до 1, али, ради лакшег разумевања, све вредности су помножене бројем 10.

Резултати указују да је могуће извршити предвиђање концентрације честица применом неуронске мреже, а добијени резултати зависе од архитектуре неуронске мреже. Најбоље резултате предвиђања је, као тренинг обучавања, показао алгоритам *Bayesian Regularization* и то за случај неуронске мреже са тридесет неурона. Показало се да неуронске мреже са више неурона у скривеном слоју дају боље резултате. У истраживању [369], дошло се до закључка да неуронске мреже са више неурона у скривеном слоју дају најповољније резултате. Исто тако, показало се да се најбољи резултати добијају када се неуронска мрежа обучава применом *Levenberg-Marquardt* алгоритмом. Са сетом податка који је коришћен у докторској дисертацији, показало да се добијају бољи резултати обучавањем неуронске мреже применом *Bayesian Regularization* алгоритма, када је у питању неуронска мрежа са више неурона у скривеном слоју.

Табела 5.15 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са два излаза за концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
1 (5)	9,7338	8,8378	9,7336	9,654	9,8083	0,00	9,7140	9,823	9,1955	9,1865	9,5395	9,528
2 (10)	9,7698	9,6653	9,6946	9,781	9,9488	0,00	9,8850	9,862	9,3162	9,3841	9,4401	9,355
3 (15)	9,9105	9,2471	9,6674	9,664	9,9817	0,00	9,7601	9,623	9,7092	9,7855	9,8140	9,441
4 (20)	9,9779	8,7969	9,7278	9,713	9,9799	0,00	9,6193	9,919	9,6407	9,7729	9,7212	9,660
5 - 25	9,8158	9,5585	9,8607	9,764	9,9891	0,00	9,5759	9,909	9,5507	9,6447	9,5589	9,550
6 - 30	9,9392	8,8980	9,6700	9,714	9,9899	0,00	9,7664	9,958	9,5202	9,2401	9,5785	9,477
7 - 50	9,9897	8,8970	9,5658	9,715	9,9999	0,00	8,4005	9,719	9,7677	9,6973	9,6241	9,719

Резултати формирања неуронске мреже која би предвиђала концентрацију честица PM_{10} су приказани у табели 5.16. Од свих неуронских мрежа са једним излазом, за концентрацију честица PM_{10} најбоље резултате је показала неуронска мрежа са двадесет неурона у скривеном слоју, а која је обучавана применом *Levenberg-Marquardt* алгоритма, што одговара и истраживању [369]. Остали алгоритми су показали мању ефикасност у предвиђању, али задовољавајуће резултате су дале и архитектуре неуронске мреже са петнаест неурона у скривеном слоју обучаване применом *Bayesian Regularization* алгоритма, док је неуронска мрежа обучавана применом *Scaled Conjugate Gradient* показала најбољи резултат са десет неурона у скривеном слоју.

Табела 5.16 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са једним излазом за концентрацију честица PM_{10}

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$
1 - 5	9,8395	9,8494	9,7111	9,812	9,9151	0,00	9,8501	9,903	9,0676	9,1632	9,4518	9,116
2 - 10	9,8593	9,8114	9,8567	9,849	9,9671	0,00	9,8392	9,496	9,5128	9,5667	9,3975	9,946
3 - 15	9,9331	9,8691	9,8429	9,901	9,9863	0,00	9,8546	9,967	9,3660	9,4052	9,3013	9,342
4 - 20	9,9619	9,7232	9,7310	9,989	9,9965	0,00	9,7378	9,956	9,7958	9,7402	9,7391	9,775
5 - 25	9,9935	9,7618	9,7703	9,918	9,9985	0,00	9,7354	9,955	9,7214	9,4992	9,5939	9,659
6 - 30	9,9657	9,7808	9,7894	9,907	9,9928	0,00	9,6563	9,933	9,8338	9,7384	9,7291	9,798
7 - 50	9,9671	9,4700	9,8363	9,876	9,9993	0,00	9,6374	9,943	9,9295	9,6722	9,8156	9,879

Када је у питању концентрација честица које настају хабањем кочница, у табели 5.17 су приказане вредности коефицијента регресије различитих неуронских мрежа које на излазу приказују концентрацију честица $PM_{2.5}$. Вредности коефицијента регресије указују да је неуронска мрежа са десет неурона у скривеном слоју, обучавана применом *Bayesian Regularization* алгоритма дала најбоље резултате предвиђања, када је у питању проба неуронске мреже са свим подацима који су примењени. Свака архитектура неуронске мреже која је примењена и обучавана преко овог алгоритма је дала најбоље резултате предвиђања концентрације честица $PM_{2.5}$.

Табела 5.17 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са једним излазом за концентрацију честица $PM_{2.5}$

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$
1 - 5	9,6114	9,9634	9,8756	9,682	9,9634	0,00	9,8532	9,948	9,6285	8,6823	9,7380	9,426
2 - 10	9,5719	9,8986	9,7596	9,647	9,9734	0,00	9,8554	9,954	9,5740	9,8347	9,8666	9,653
3 - 15	9,6717	9,8442	9,8145	9,708	9,9919	0,00	9,3682	9,888	9,5040	9,7899	9,8074	9,586
4 - 20	9,5547	9,7363	9,8442	9,620	9,9990	0,00	9,3697	9,930	9,4415	9,7586	9,8126	9,540
5 - 25	9,9458	8,5839	9,8615	9,624	9,9999	0,00	9,6390	9,943	9,5879	9,7884	9,8048	9,642
6 - 30	9,9206	9,8122	8,3914	9,570	9,9999	0,00	9,6329	9,944	9,5362	9,6002	9,6823	9,558
7 - 50	10,000	7,8650	9,7339	9,507	9,9999	0,00	9,5408	9,906	9,6393	9,8044	9,7181	9,680

5.4.1 Неуронске мреже са два скривена слоја

Неуронске мреже са два скривена слоја које врше предвиђање концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ су обучаване применом три алгоритма и резултати су приказани у табели 5.18. Показало се да најбоље предвиђања и обучавања на основу коефицијента регресије даје неуронска мрежа са по тридесет неурона у скривеним слојевима која је обучавана алгоритмом *Bayesian Regularization*. Исто тако, може се применити и неуронска мрежа са десет неурона у скривеним слојевима која је обучавана применом алгоритма Levenberg-Marquardt, с тим да претходно наведена неуронска мрежа даје прецизније податке.

Табела 5.18 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са два излаза за концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
8 (10 - 10)	9,8734	9,9691	9,8645	9,885	9,9979	0,00	9,4092	9,9031	9,6892	9,4976	9,7434	9,6647
9 (20 - 20)	9,4287	9,3271	8,7367	9,2924	1	0,00	9,6517	9,9467	9,2997	9,5117	9,2827	9,328
10 (30 - 30)	9,8207	9,9377	9,9346	9,8506	9,9981	0,00	9,899	9,9541	9,2171	9,3515	9,423	9,2725
11 (50 - 50)	9,7436	9,8969	9,9247	9,7947	9,9999	0,00	9,2815	9,878	9,7475	9,6094	9,8594	7,7428
12 (50 - 25)	9,9582	9,9117	9,2939	9,8285	1	0,00	8,7827	9,7762	9,4941	9,6491	9,5564	9,5303

У табели 5.19. су дати резултати обучавања неуронске мреже са два скривена слоја која би предвидела концентрацију честица PM_{10} , као и коефицијент регресије за све тренинге. Резултати показују да најбоље резултате, са најмањом грешком, даје неуронска мрежа са двадесет неурона у скривеним слојевима која је обучавана применом алгоритма *Levenberg-Marquardt*.

Табела 5.19 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са једним излазом за концентрацију честица PM_{10}

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
8 (10 - 10)	9,9057	9,9549	9,9129	9,9155	1	0,00	8,6139	9,7733	9,7094	9,6342	9,6374	9,6829
9 (20 - 20)	9,9497	9,9699	9,9377	9,9496	1	0,00	9,6255	9,9383	9,8362	9,9273	9,8549	9,8539
10 (30 - 30)	9,9509	9,9823	9,897	9,9462	1	0,00	9,3248	9,8891	9,3995	9,3362	9,5343	9,8891
11 (50 - 50)	9,933	9,9683	9,9392	9,9396	9,9747	0,00	9,82	9,9465	8,9132	9,241	9,325	9,3432
12 (50 - 25)	9,9448	9,9051	9,9086	9,9336	0,9999	0,00	9,4634	9,9077	9,7659	9,7033	9,7052	9,7453

Предвиђање концентрације честица $PM_{2.5}$ коришћењем неуронске мреже са два скривена слоја показало се као комплексније. У табели 5.20 су дати резултати обучавања и предвиђања концентрације честица на основу коефицијента регресије. Најбоље резултате предвиђања даје неуронска мрежа са педесет неурона у скривеним слојевима обучавана применом *Bayesian Regularization* алгоритма. Анализом претходно наведених и формираних неуронских мрежа, у поређењу са овом развијеном неуронском мрежом, закључује се да претходно развијене мреже могу дати прецизније резултате предвиђања. Самим тим, овакву архитектуру за предвиђање само концентрације честица $PM_{2.5}$ је могуће одбацити.

Табела 5.20 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са једним излазом за концентрацију честица $PM_{2.5}$

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
8 (10 - 10)	6,6212	8,4446	7,3208	6,9618	1	0,00	9,362	9,8743	9,5254	9,8935	9,824	9,6267
9 (20 - 20)	9,5086	9,9127	9,966	9,6294	1	0,00	8,5755	9,8184	9,6324	9,643	9,7754	9,6501
10 (30 - 30)	9,9708	8,3965	9,9267	9,6313	1	0,00	9,2862	9,8765	9,5257	9,6244	9,8335	9,578
11 (50 - 50)	9,7468	9,5729	9,9572	9,7245	9,949	0,00	9,572	9,8956	9,4033	9,8476	9,8511	9,5365
12 (50 - 25)	9,725	9,8418	9,6434	9,7245	9,999	0,00	8,4266	9,7863	9,2138	9,3021	9,2138	9,1844

5.4.2 Неуронске мреже са три скривена слоја

Неуронске мреже са три скривена слоја су доста комплексније и захтевају више ресурса када је у питању рад рачунара, самим тим мањи број архитектура неуронских мрежа је формиран и обучаван. Добијене вредности коефицијента регресије коришћењем неуронске мреже са два излаза која би предвидела концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ су приказане у табели 5.21. Најповољније резултате је дала неуронска мрежа са двадесет неурона у скривеним слојевима применом алгорита *Bayesian Regularization*.

Табела 5.21 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са два излаза за концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$	$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
13 (10-10-10)	9,6906	9,9206	9,912	9,7542	1	0,00	9,5893	9,911	9,5366	9,7939	9,7161	9,7955
14 (20-20-20)	9,8061	9,904	9,8704	9,8307	1	0,00	9,6797	9,947	9,8196	9,7468	9,3303	9,7183
15 (30-30-30)	9,4031	9,5394	9,6201	9,4592	9,8815	0,00	9,6489	9,8399	9,9465	9,5447	9,9533	9,8833

Предвиђање концентрације честица PM_{10} применом неуронских мрежа са три скривена слоја дати су у табели 5.22. Најбоље резултате је показала неуронска мрежа са тридесет неурона у скривеним слојевима, а која је обучавана применом *Levenberg-Marquardt* алгорита.

Табела 5.22 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са једним излазом за концентрацију честица PM_{10}

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$
13 (10-10-10)	9,9572	9,9737	9,9837	9,9631	1	0,00	9,258	9,8489	9,6339	9,604	9,121	9,5528
14 (20-20-20)	9,8374	9,937	9,9323	9,8098	1	0,00	8,565	9,7796	9,822	9,8305	9,7313	9,313
15 (30-30-30)	9,9927	9,911	9,9803	9,9717	1	0,00	9,6287	9,9392	9,7183	9,7851	9,6557	9,7192

Резултати примене неуронских мрежа са три скривена слоја са једним излазом, а које би предвиђале концентрацију честица $PM_{2.5}$ приказани су у табели 5.23. Најповољније резултате предвиђања је дала неуронска мрежа са десет неурона у скривеним слојевима, а која је обучавана применом *Levenberg-Marquardt* алгоритма.

Табела 5.23 Добијене максималне вредности коефицијента регресије у зависности од архитектуре и врсте тренинга неуронске мреже са једним излазом за концентрацију честица $PM_{2.5}$

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$
13 (10-10-10)	9,9419	9,9832	9,9279	9,9497	1	0,00	8,5504	9,823	9,0882	9,551	9,492	9,2169
14 (20-20-20)	9,9124	9,9603	9,135	9,7497	1	0,00	7,353	9,5609	9,6074	9,8478	9,615	9,6379
15 (30-30-30)	9,7815	9,9389	9,4889	9,719	1	0,00	9,2446	9,9054	9,8177	9,4175	9,6304	9,6868

5.4.3 Неуронске мреже са четири скривена слоја

Неуронска мрежа са четири скривена слоја није дала најповољније резултате. Неуронска мрежа са два излаза која би предвидела концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, показала је најбоље резултате када се обучава применом алгоритма *Bayesian Regularization*, као и неуронска мрежа која би предвидела само концентрацију честица $PM_{2.5}$. Неуронска мрежа са једним излазом, а која би превиђала концентрацију честица PM_{10} показала је најбоље резултате обучавањем применом *Levenberg-Marquardt* алгоритма.

Табела 5.24 Добијене максималне вредности коефицијента регресије за неуронске мреже са четири скривена слоја за предвиђање концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$

Архитектура	Levenberg-Marquardt				Bayesian Regularization				Scaled Conjugate Gradient			
	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$	$O(e^{-1})$	$B(e^{-1})$	$T(e^{-1})$	$\Pi(e^{-1})$
<i>Предвиђање концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ (неуронска мрежа са два излаза)</i>												
16	9,7572	9,9692	9,9391	9,8156	1	0,00	9,6181	9,9414	9,2481	9,3086	9,2493	9,2516
<i>Предвиђање концентрације честица PM_{10} (неуронска мрежа са једним излазом)</i>												
16	9,9279	9,9833	9,9521	9,9422	1	0,00	9,8575	9,12	9,8397	9,908	9,7637	9,8386
<i>Предвиђање концентрације честица $PM_{2.5}$ (неуронска мрежа са једним излазом)</i>												
16	9,9637	9,6615	8,4724	9,6075	1	0,00	9,7886	9,9711	9,4451	9,8939	9,909	9,5718

5.4.4 Усвајање архитектура неуронских мрежа

На основу свих архитектура и свих обучавања неуронских мрежа које су приказане у овом поглављу, у наставку су приказани најповољнији резултати до којих се дошло обучавањем неуронских мрежа за предвиђање концентрација честица.

За случај предвиђања концентрације честица применом неуронске мреже са два излаза, у табели 5.25 су приказане најповољније вредности коефицијента регресије за сваку од архитектура неуронских мрежа узимајући у обзир број скривених слојева. При предвиђању концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ применом једне неуронске мреже, најповољније резултате показала је неуронска мрежа са тридесет неурона у једном скривеном слоју која је обучавања применом *Bayesian Regularization* алгоритма за обучавање неуронске мреже.

Табела 5.25 Максималне вредности коефицијента регресије за неуронске мреже са два излаза за предвиђање концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ на основу појединачних архитектура

Број скривених слојева	Архитектура скривених слојева	Алгоритам за обучавање неуронске мреже	Добијени резултат			
			$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
1	30	Bayesian Regularization	9,9899	0,00	9,7664	9,958
2	30-30	Bayesian Regularization	9,9981	0,00	9,899	9,9541
3	20-20-20	Bayesian Regularization	1	0,00	9,6797	9,947
4	30-20-10-5	Bayesian Regularization	1	0,00	9,6181	9,9414

Неуронске мреже са једним излазом, а које би предвиделе насталу концентрацију честица PM_{10} , најповољније резултате показују приликом обучавања применом *Levenberg-Marquardt* алгоритма. Добијене вредности према различитим архитектурама, а првенствено према броју скривених слојева, приказане су у табели 5.26, односно приказани су најповољнији резултати. Уколико се посматрају сви добијени подаци, најбоље резултате показала је неуронска мрежа са двадесет неурона у једном скривеном слоју.

Табела 5.26 Максималне вредности коефицијента регресије за неуронске мреже са једним излазом за предвиђање концентрације честица PM_{10} на основу појединачних архитектура

Број скривених слојева	Архитектура скривених слојева	Алгоритам за обучавање неуронске мреже	Добијени резултат			
			$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
1	20	Levenberg-Marquardt	9,9619	9,7232	9,7310	9,989
2	20-20	Levenberg-Marquardt	9,9497	9,9699	9,9377	9,9496
3	30-30-30	Levenberg-Marquardt	9,9927	9,911	9,9803	9,9717
4	30-20-10-5	Levenberg-Marquardt	9,9279	9,9833	9,9521	9,9422

Формирање неуронске мреже за предвиђање концентрације честица $PM_{2.5}$ показало се да је веома комплексно у поређењу са осталим случајевима предвиђања. У табели 5.27 приказане су максимално добијене вредности регресије према броју скривених слојева и

архитектури неуронских мрежа. Најповољније резултате предвиђања даје неуронска мрежа са четири скривена слоја која је обучавана применом *Bayesian Regularization* алгоритма.

Табела 5.27 Максималне вредности коефицијента регресије за неуронске мреже са једним излазом за предвиђање концентрације честица $PM_{2.5}$ на основу појединачних архитектура

Број скривених слојева	Архитектура скривених слојева	Алгоритам за обучавање неуронске мреже	Добијени резултат			
			$O (e^{-1})$	$B (e^{-1})$	$T (e^{-1})$	$\Pi (e^{-1})$
1	10	Bayesian Regularization	9,9734	0,00	9,8554	9,954
2	50-50	Bayesian Regularization	9,949	0,00	9,572	9,8956
3	10-10-10	Levenberg-Marquardt	9,9419	9,9832	9,9279	9,9497
4	30-20-10-5	Bayesian Regularization	1	0,00	9,7886	9,9711

6 МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ЕМИСИЈЕ ЧЕСТИЦА И ОТКЛАЊАЊА ЊИХОВЕ ШТЕТНОСТИ

У овом поглављу су приказане мере којима би се смањило штетно утицај честица, али и смањила емисија честица које настају приликом процеса кочења возила. Неке од мера су оне које се односе на примену савремених решења на моторном возилу, где би постојала могућност сакупљања честица које настају хабањем кочница. Значајни су системи који би могли имати ширу примену, а који се данас користе само код неких специфичних категорија возила. Такав систем би могао бити систем регенеративног кочења, код кога нема хабања фриксионих плочица, осим ако се активирају фриксионе кочнице при већим брзинама и силама кочења. Ови напредни системи би се могли развити толико да се цео принцип сведе на потпуно електромагнетно кочење или коришћење регенеративног кочења које би функционисало успешно и при већим силама кочења. На тај начин не би долазило до хабања фриксионих парова кочница.

Неке од мера за смањење емисије честица би могле да се односе на развој фриксионих материјала и осавремењавање технологија производње и завршне обраде површине.

Како је закључено, одређени фактори кочења утичу на емисију насталих честица, а који су повезани са утицајем возача у процесу кочења. Имајући то у виду, произилази да се обуком возача може смањити емисија насталих честица и хабање фриксионих парова, што ће у наставку бити детаљно објашњено. Свакако да се проблем честица у урбаним срединама, где постоји велики број кочења, може решити увођењем савремених система регулисања саобраћаја који би смањили број кочења. Како је оптерећење по осовини или генерално укупна маса возила један од фактора који утиче на емисију честица које настају хабањем кочница, теретна возила спадају у ред већих. Из овог разлога, једна од мера која би се могла увести јесте да се приликом регулисања саобраћаја и планирања простора, теретна возила преусмеравају увек на обилазне путеве око насељених места, а поготово ван урбаних подручја. На тај начин би се смањило утицај честица на здравље људи у градовима.

Данас постоји више савремених технологија које би довеле до смањења емисије честица које настају од кочница, а аутори [387] су дали оцену ових технологија према количини смањења честица за различите категорије возила. Неке од тих метода су потврђене, а неке још увек нису потврђене за поједине категорије возила.

Тако су у табели 6.1 приказане неке од технологија које имају утицаја на смањење честица које потичу од различитих категорија возила. Оценама од 0 до 5 оцењено је колико би утицаја имала та технологија на одређену категорију возила у циљу смањења емисије честица. Оценом 0 су оцењене оне технологије које нису релевантне за примену на одређеној категорији возила; оцена 1 означава да би било минимално смањење честица применом те технологије; оцене 4 и 5 имају најзначајнији потенцијал за смањење емисије честица од хабања кочница у будућности. У табели 6.1 су поља означена и различитим бојама, па тако бела поља означавају мало или никакво смањење емисије честица, плава боја означава мало очекивано смањење емисије честица, а зелена поља указују на очекиване могућности за највеће смањење честица које настају хабањем кочница [387].

Табела 6.1 Утицај различитих технологија на смањење емисије честица које настају хабањем кочница [387]

	Путничка возила	Лака теретна возила	Камиони	Тегљачи	Аутобуси
Примена лаких материјала за израду возила	1	1	2	2	2
Керамичко-угљенични дискови	2	0	0	0	0
Шири точкови	1	1	1	1	1
Регенеративно кочење	5	4	2	1	4
Системи за брзо увлачење потисног клипа кочнице	1	1	1	1	1
Систем електронског кочења преко кабла (енгл. <i>Brake by wire</i>)	2	2	2	2	2

6.1 Уређаји и системи за сакупљање насталих честица

Настале честице се ослобађају у животну средину на један од наведених начина који су претходно приказани у докторској дисертацији. Један од предлога и мера за сакупљање честица које настају хабањем кочница јесте примена технологија или система који би могли сакупљати настале честице, односно примена додатака (модула) који би могли спречити ослобађање ових честица. У раду [388] су детаљно објашњени системи и њихова улога у смањењу емисије честица. Приказ и објашњење оваквих система представља основу за њихов даљи развој и осавремењавање. У будућности би се на возилима могли користити системи који имају висок степен увлачења честица и спречавају ослобађања честица у ваздух кроз процес филтрације. Могу се користити модули, односно додаци, који би били фиксирани на диску кочнице и могли сакупљати честице које настају при хабању кочница унутар филтера.

Данас се у великој мери производе електрична возила која имају углавном већу масу у односу на возила са погоном на МСУС. У докторској дисертацији је већ утврђено да маса возила има утицај на насталу емисију честица. Већина возила на електрични погон имају додатни систем који се активира приликом кочења, а који се назива систем регенеративног кочења. У овом случају, електромотор мења своју улогу и прелази на режим рада генератора и на тај начин ствара отпор при коме се успорава возило. При мањим брзинама се активира само систем регенеративног кочења, а касније и фриксионе кочнице. Овакав принцип рада је повољан када је у питању смањење емисије насталих честица приликом кочења. Тако би се могли у будућности развити слични системи који би стварали много већи отпор, па чак и отпор који би могао у потпуности заменити фриксионе кочнице. На тај начин не би било хабања кочница, па ће у будућим истраживањима фокус бити на развоју чисто електромагнетних кочница код којих не би било хабања елемената.

6.1.1 Системи за сакупљање честица

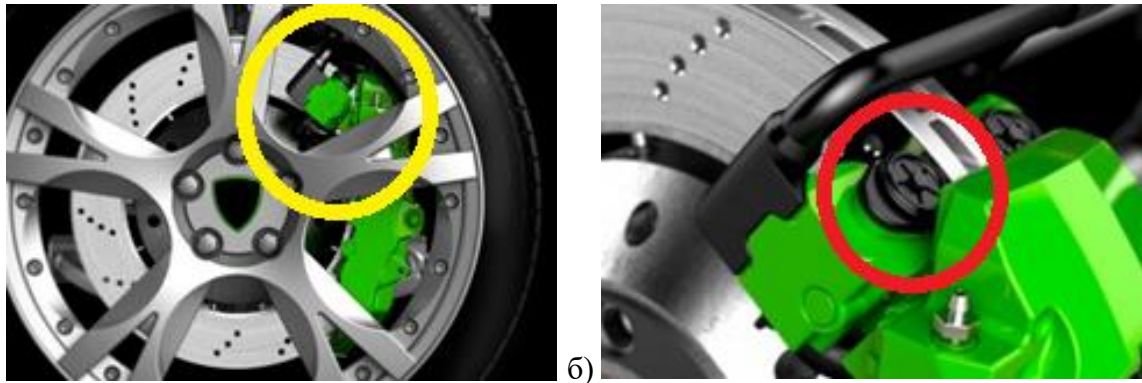
Савремене технологије на возилима омогућавају управљање радом целокупног возила, док савремени технички системи на возилу могу омогућити и да се сачува животна средина. Једна од таквих технологија јесте и она која омогућава сакупљање честица у филтерима. Пример таквих уређаја на возилу, чија је улога сакупљање честица, је уређај који је пројектован од стране *Tallano Technologie SAS*. Компанија која је дала ово идејно решење очекује ефикасност сакупљања 90% емитованих честица и наводи да је концепт применљив за различите конструкције клешта и да је изводљива употреба као накнадно уграђеног решења. Позитивно јесте и то што је компанија предвидела примену оваквог система, поред друмског саобраћаја, и у железничком саобраћају. Систем је дизајниран да се, након подешавања, монтира на различита возила, од малих градских аутомобила до подземних возова. Пројектован је да издржи екстремне временске услове (снег, киша, град), тј. систем толерише веома ниске и веома високе температуре које могу владати у радним условима кочнице. Цео систем усисавања честица има масу мању од 100 g. Овај систем је потпуно аутономан, не утиче на перформансе возила, али и нема велики утицаја на повећање масе возила [389].

Постоје два типа овог уређаја које је поменута компанија развила, односно механички и електронски систем, који су приказани на слици 6.1. Механички систем сакупљања честица који је приказан на слици 6.1а је старији систем који се покреће када дође до кочења и који се активира ротацијом точка покретача када дође до контакта са диском кочнице. Савременији систем који је контролисан од стране управљачке јединице је приказан на слици 6.1б.



Слика 6.1 Концепт технологије на возилу за сакупљање честица: а) механички систем сакупљања честица б) електронски систем сакупљања честица [390, 391]

Први систем који је компанија *Tallano Technologie SAS* развила је био механички систем за сакупљање честица које настају хабањем кочница. Уређај се налази на бочној страни кочних клешта ради боље ефикасности прикупљања честица. Идеја је да се уређај постави близу зоне контакта диска и фрикционих плочица кочнице, где настаје хабања, и на тај начин би се избегла емисија честица и обезбедила већа ефикасност сакупљања честица. Уређај је приказан на слици 6.2, и као што се види на слици 6.2а, уређај је везан за клешта кочнице. Покретање уређаја се врши на тај начин што се приликом кочења клешта кочнице приближавају диску кочнице и у том тренутку погонски точкић уређаја, који је на слици 6.2б означен црвеном бојом, долази у контакт са диском који се окреће. Његовим окретањем и трењем се покреће погонски точкић уређаја који стартује механизам за сакупљање честица.



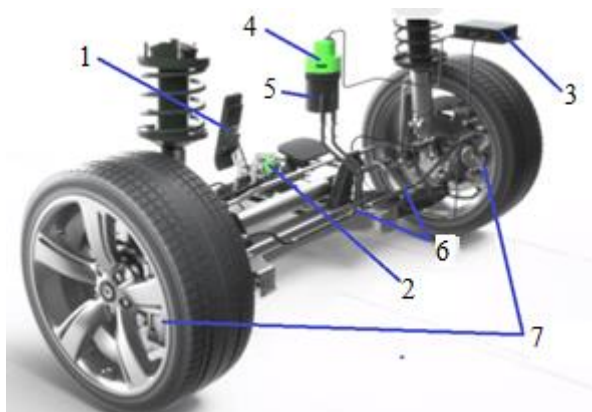
Слика 6.2 Механички уређај за сакупљање честица фирме Tallano Technologie SAS [392]

Покретањем погонског точића на уређају се покрећу и елементи унутар уређаја који увлаче честице. На слици 6.3 су приказани унутрашњи елементи, односно лопатице, чија је улога увлачење створених честица, док је на истој слици дат и приказ самог процеса сакупљања, односно увлачење насталих честица. Уређај је постављен уз саму кочницу, односно са „предње стране“ кочних клешта, па се сакупљају све честице. Недостатак може бити тај што уређај не може сакупити честице које се у ваздух могу ослободити са бочних страна уређаја. Осим тога, може доћи и до хабања погонског ротора на уређају, па систем не обавља своју функцију.



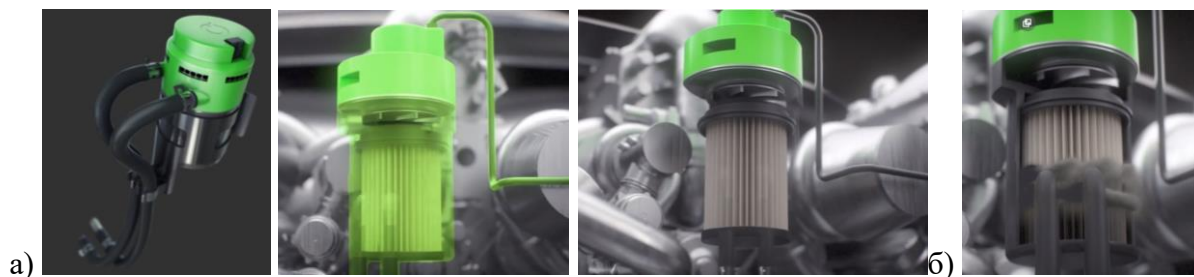
Слика 6.3 Механизам за сакупљање честица [390, 393]

Компанија Tallano Technologie SAS је пројектовала и електронски уређај за сакупљање честица који функционише помоћу мехатроничких система на возилу. У односу на механички систем, електронски систем је погођен од стране управљачке јединице која активира системе за усисавање честица чим детектује активирање кочнице од стране возача. Изглед уређаја, односно филтера који је једна од видљивих компоненти без кога уређај не би могао обављати функцију, као и позиција филтера са актуатором, односно уређајем за усисавање, је приказан на слици 6.4. Активирањем педале кочнице (1), давач (2) детектује активирање кочнице и шаље сигнал електронској управљачкој јединици. Управљачка јединица активира актуатор (4) који врши увлачење ваздуха са честицама од кочница. Актуатор, односно уређај за увлачење ваздуха, је директно везан са филтером за ваздух, а он је преко цеви (6) директно повезан са фрикционим плочицама, односно кочним клештима. Преко цеви, ваздух и честице пролазе кроз филтер за сакупљање честица, односно честице остају у филтеру, док се чист ваздух враћа у околину. На основу претходно приказаног, може се закључити да честице остају заробљене у филтеру који се налази у делу (5). Приликом престанка дејства возача на педалу кочнице и актуатор за увлачење ваздуха престаје са радом до поновног кочења.



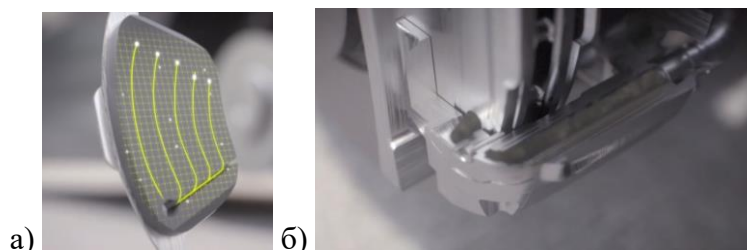
Слика 6.4 Саставне компоненте електронског система за сакупљање честица које настају хабањем кочница [389]

Веома значајне компоненте у систему су актуатор за увлачење ваздуха и филтер ваздуха који има улогу да задржи честице које настају приликом кочења. Они чине једну целину приказану на слици 6.5а, на којој је могуће видети и начин постављања филтера унутар овог елемента. На основу слике 6.5б, сав ваздух који се увуче у овај систем мора проћи кроз филтер за прочишћавање, у коме остају наталожене све честице.



Слика 6.5 Актуатор и филтер за сакупљање честица [394]

Битно је анализирати и конструкцију дела који сакупља честице са кочног система, односно са фрикционих површина. На први поглед, кочна клешта имају класичан изглед. Међутим, уколико се изврши дубља анализа система, фрикционе облоге су специјално конструисане и имају прорез (слика 6.6а) који омогућава сакупљање и усмеравање честица ка делу уређаја који увлачи честице са фрикционих облога, а који је пројектован у склопу кочних клешта. На слици 6.6б је дат приказ начина и смера увлачења честица.

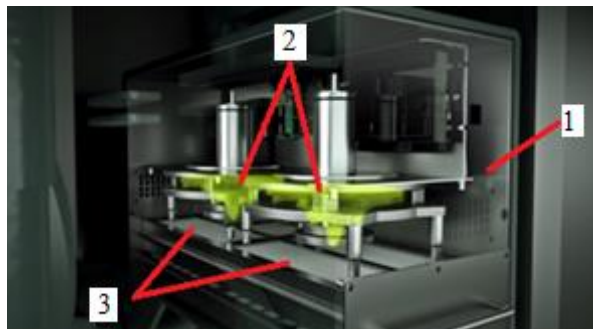


Слика 6.6 Конструкција фрикционе плочице (а) и начин увлачења честица из контакта са диск-фрикциона плочица (б) [394]

Овакав електронски систем је поузданији и ефикаснији у односу на механички систем. Међутим, потребно је још увек радити на пројектовању и моделирању начина сакупљања честица у делу контакта фрикционе плочице и диска кочнице. И поред начина на који је замишљено сакупљање честица у зони контакта, велики број честица се може ослободити у атмосферу.

Досадашњи приказ технологије се односио на друмска возила, али она може имати примену и за случај железничких возила. Железничка возила имају већу масу, па самим тим је потребно више времена за кочење, а тиме је и број честица који се ствара већи, па би ова технологија била од великог значаја као саставни елемент железничких возила. Принцип рада ове технологије се суштински не разликује од електронског система сакупљања честица, међутим, разлика је у томе што је систем свакако већи и по габаритима и по елементима унутар система за сакупљање честица.

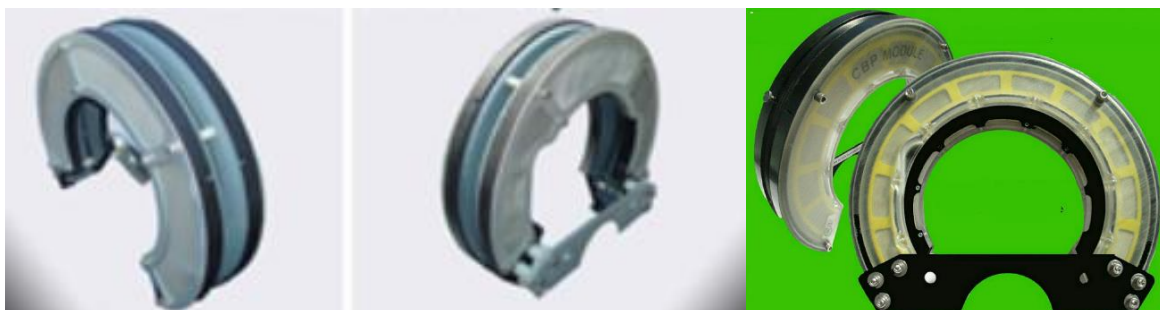
На слици 6.7 је приказан уређај за сакупљање честица на железничким возилима. Цео систем је смештен у кућишту уређаја (1), и унутар њега се налазе турбине за увлачење ваздуха и честица (2), док ваздух са честицама пролази кроз филтер (3), где остају сакупљене честице, док се чист ваздух враћа у атмосферу.



Слика 6.7 Уређај за сакупљање честица на железничким возилима: 1) кућиште уређаја, 2) турбине за увлачење ваздуха, 3) филтери у којима се задржавају честице [394]

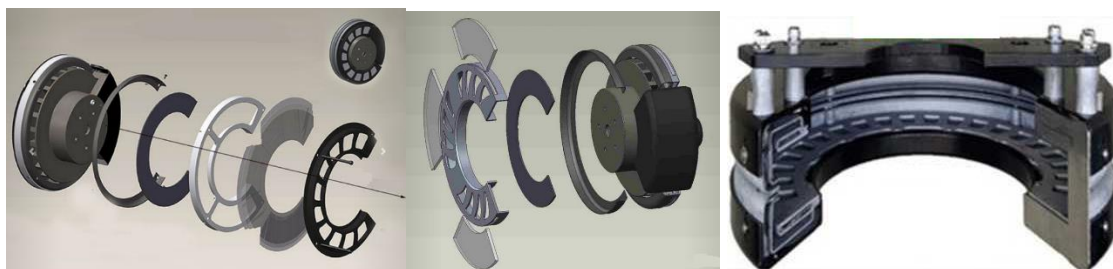
6.1.2 Филтери – модули за сакупљање честица

Поред мехатроничких и механичких уређаја, пројектован је још један уређај који може смањити број честица које се ослобађају у ваздух. Овај уређај представља модул који се поставља директно на кочни механизам. Систем који носи скраћеницу *CBP* модул (енгл. *Clean Brake Performance*), омогућава сакупљање честица на возилу и лако се може поставити на свако возило, а обухвата целу кочницу, нема покретне делове и не троши енергију. На слици 6.8 је дат приказ изгледа овог модула. *CBP* модул је патентиран у Сједињеним Америчким Државама. Ова технологија је недавно патентирана у Европи и Јапану и први је практични систем за сакупљање честица на диску на свету који доводи до чистијег глобалног окружења и побољшања перформанси кочења. Комерцијализација ове технологије има огроман потенцијал за стварање нових зелених индустрија.



Слика 6.8 *CBP* модул [395, 396]

Сви елементи овог система који се монтира на кочни механизам, као и изглед унутрашњости, приказани су на слици 6.9. Битно је напоменути да се монтира са обе стране диска и обухвата цео кочни механизам.



Слика 6.9 Саставни елементи CBP модула и склоп свих елемената [397]

Како се овај елемент поставља на диск, односно везује за кочни механизам, он је тако конструисан да обухвата целокупну површину диска, али омогућава несметан рад кочних клешта и ефикасност у раду фрикционих плочица. На слици 6.10 је приказан изглед постављеног CBP модула на кочном систему возила *Dodge Caravan*. Монтиран је, односно везан за кочна клешта и обухвата целу површину диска, односно и место на коме долазе фрикционе облоге у контакту са диском, али и место излаза из контакта [397].



Слика 6.10 Постављени модул на кочном механизму возила *Dodge Caravan* [397]

Принцип рада, приказан на слици 6.11, се своди на струјање ваздуха унутар модула, али струјање ваздуха се остварује и преко фрикционих површина. Улазак ваздуха се остварује ротацијом вентилационог диска, па се на тај начин увлачи ваздух у систем. Ваздух у систем улази и усмерава се преко канала, струји преко диска, а затим се укупан проток ваздуха усмерава у канал филтера, пропушта кроз филтер и усмерава назад према површини диска. Такав пречишћен ваздух се ослобађа у атмосферу.



Слика 6.11 Принцип рада CBP модула [398]

Испитивање ефикасности овог модула је вршено на основу динамометарске процедуре испитивања SAE J2707B и утврђено је да је применом овог уређаја хабање фрикционих облога у просеку 17% мање и да је за 2% мање хабање диска кочнице. Када су у питању честице, у најгорем случају, било је прикупљено 92% укупно насталих честица. Стална циркулација ваздуха доводи до смањења температуре фрикционих плочица и то температура спољашње фрикционе облоге је смањена за 82%. Треба напоменути да извор [399] није дао податке о којим се фрикционим облогама ради.

Највеће светске компаније развијају своје модуле, односно филтере који би могли бити додатак или део кочног система на возилу. Компанија *MANN+HUMMEL* као једна од компанија која се бави производњом филтера, развила је модул који има улогу сакупљања честица. На слици 6.12 је дат приказ модула постављеног на кочном систему, тј. само на делу диска кочнице, а везује се за кочна клешта. На слици 6.12 је приказано више варијанти постављања овог филтера. Компанија је овај модул назвала *Fine Dust Eater*. Филтер је веома практичан и не заузима пуно простора и једноставне је конструкције.



Слика 6.12 Начин и варијанте постављања филтера *Fine Dust Eater* на кочном систему [400-402]

Овај филтер се поставља и везује за предњу страну кочних клешта, односно у смеру окретања диска кочнице. На тај начин, све честице се „убацују“ директно у филтер који се налази унутар модула и ваздух се прочишћава. На слици 6.13 је приказан изглед филтера унутар модула и начин на који се филтрира ваздух са честицама, односно сакупљају честице.



Слика 6.13 Изглед филтера *Fine Dust Eater* и начин сакупљања честица [403]

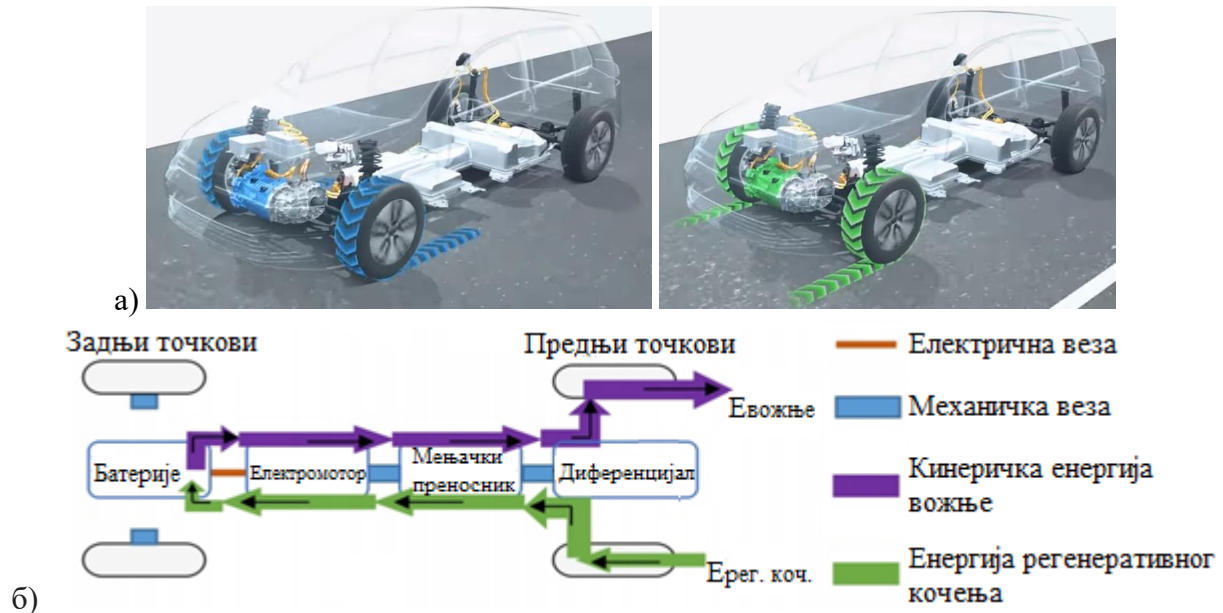
Након што је *MANN+HUMMEL* први пут представио технологију 2017. године, у раној фази развојног процеса, испитивања овог уређаја су потврдила његову ефикасност. Након успешно завршеног *Großglockner* теста у аеродинамичком тунелу, у коме је симулирана возња по планини, добијени резултати су показали да има високу температурну отпорност. Снег и вода нису показали никакав утицај на филтер. Циљ прикупљања 80% честица прашине са кочнице постигнут је према досадашњим тестовима. *MANN+HUMMEL* претпоставља да је сервисни интервал овог уређаја приближно исти као и код замене фрикционих плочица. Компанија је веома оптимистична када је реч о маси и надају се да могу постићи масу производа испод 500 g [401].

6.2 Систем регенеративног кочења

Регенеративно кочење спада у једну од технологија која је према извору [387] најбоље оцењена за све категорије возила у вези смањења честица које настају приликом кочења. Разлог је што приликом кочења од стране возача, систем мења улогу електромотора, тако да он из улоге покретача возила мења своју функцију и постаје генератор који пуни батерије на возилу. На тај начин, електромотор, односно генератор, ствара отпор који

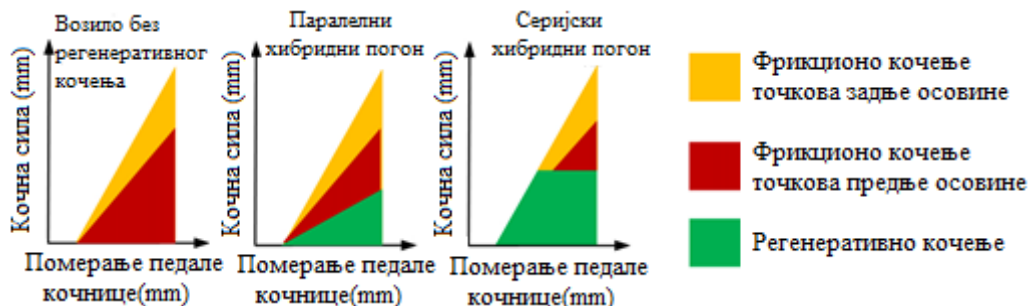
смањује брзину возила, односно кочи возило, тако да нема потребе за покретањем кочног механизма. Наравно, цео систем је електронски управљан, па електронска управљачка јединица препознаје активирање кочнице од стране возача [404].

На слици 6.14а је приказан претходно наведени принцип рада овог система, док је на слици 6.14б приказан принцип тока снаге приликом кретања, али и приликом регенеративног кочења возила, са свим компонентама кроз које снага пролази. Потребно је напоменути и да је овакав начин кочења могућ за случајеве када на возилу постоје уграђени електромотори и постоје батерије. Данас је овакав систем кочења најчешће примењен на возилима на хибридни погон и електрични погон.



Слика 6.14 Принцип рада регенеративног кочења: а) режим рада мотора на путу при вожњи и кочењу, б) ток енергије при вожњи и кочењу у систему преноса снаге возилу [405, 406]

Возила са регенеративним кочењем имају диск кочне механизме, али овај кочни механизам се активира само када електронска управљачка јединица детектује да возач активира кочницу већом силом, односно када је потребна већа кочна сила за заустављање возила. У овом другом случају, постоји емисија створених честица, али при чисто регенеративном кочењу и при градским, малим брзинама, нема створених честица. Претходно наведени принцип активирања кочног система је приказан на слици 6.15, где је сликовито објашњено при којим силама активирања педале кочнице и дужини кочења се активира регенеративно кочење, а при којим силама се активирају и фриксионе кочнице. Постоји разлика у начинима и стратегији активирања ова два типа кочења, па чак и према типу хибридног погона возила (серијски и паралелни погон) [406].



Слика 6.15 Активирање фриксионих кочница и система регенеративног кочења [406]

6.3 Увођење законских прописа и норматива

Да би се смањио утицај честица које настају приликом хабања фрикционих парова кочница, могуће је увођење законских норми, односно прописа који би се односили на емисију кочница, односно за фрикционе парове. Регулатива би се могла односити на концентрацију честица које би једно возило ослободило при једном кочењу. Оваква мерења и сама оцена испуњености захтева би се могла вршити на линији техничког прегледа. За овакве прописе потребна су додатна испитивања којима би се прописао начин мерења настале емисије честица која је ослобођена у ваздух, као и граничне вредности емисије. Граничне вредности би требало бити одређене према категоријама возила, али и у зависности од оптерећења. Ово ће свакако бити један од даљих праваца истраживања када су у питању методологија која би се могла применити у мерењу и граничне вредности добијене концентрације.

Поред прописа, ту су и обавезни системи, односно модули који би се применили на једном возилу за сакупљање честица. Возила која би имала у својој опреми овакве системе, односно модуле, би могла добити посебне ознаке које би означавале да се ради о возилу које ослобађа мање честица чији је извор систем за кочење.

Са циљем смањења штетности честица које настају приликом хабања фрикционих парова кочница, могла би се увести и законска регулатива која би прописала забрану одређених материјала или ограничила употребу одређених материјала по маси једног елемента. Данас, у Републици Србији је забрањена употреба азбеста у кочним облогама [119]. На сличан начин, могла би се ограничити примена метала или других материјала у кочним плочицама, као што је то случај у државама Калифорнија и Вашингтон. Оваквим ограничењима дошло би се до тога да и настале честице имају мање штетни утицај на здравље човека и животну средину, али би се обезбедио и подстицај на употребу мање штетних материјала који су еколошки прихватљивији.

6.4 Развој материјала и технологија производње фрикционих парова

Развој формула фрикционих парова које би биле еколошки прихватљиве је данас једна од значајних области која се увелико проучава. Тако би се у будућности могли применити и развити композитни материјали који би имали мању брзину хабања и настанка честица. Могли би се развити састави кочних плочица од материјала који би имали мањи утицај на здравље човека (нпр. примена органских материјала). Могуће је у наредним истраживањима утврдити материјале који би и даље испуњавали захтеве које требају остварити фрикциони парови диск кочница, али да дође до смањења емисије честица које настају при хабању истих. Могло би се испитати међусобно понашање различитих материјала који се примењују у фрикционом контакту, односно материјала за производњу диска и кочних плочица. Могли би се развити фрикциони парови који би били компатибилни и код којих би се смањила емисија насталих честица.

Поред примене различитих материјала који би утицали на смањење емисије честица и њиховог утицаја на здравље човека и животну средину, једна од мера која се може применити јесте и употреба савремених технологија у производњи фрикционих парова. Тако би се наредна истраживања ослањала на примену технологија које би довеле до производње хомогене смеше кочних облога или примене технологија које би оствариле нови начин производње смеше, уз примену савремених материјала. Примена технологије облагања фрикционе површине би дала значајан ефекат у смањењу хабања фрикционих

парова, па самим тим и емисије честица. Поред познатих материјала, могли би се испитати и нови материјали који би имали улогу смањења брзине хабања и настанка честица, уз испитивање технологија које би биле погодне за нове материјале за облагање.

6.5 Обука возача

У докторској дисертацији су представљени фактори који утичу на настанак честица, па је закључено да на неке факторе настанка честица може утицати сам возач својим стилем вожње. Обука возача са циљем смањења хабања кочница би била једна од значајних мера које би довеле до смањења настанка честица, а мера се односи на обуку возача са циљем смањења броја активирања кочница. Возачи би се могли едуковати тако да стекну осећај и знања да за успоравање возила примене само моторску кочницу, односно да се успоравање врши применом мењачког преносника без активирања кочница.

Тежина возила, односно оптерећење по сваком точку се показало као значајан фактор за емисију честица које настају хабањем кочница. Возачи теретних возила, која углавном имају успориваче, приликом обуке би се требало упознати са применом овог система и његовим што чешћим коришћењем приликом успоравања уместо фриktionих кочница.

Примена градских аутобуса, који имају велику масу и често саобраћају у градским зонама, је значајна са аспекта емисије честица. При обуци возача аутобуса, у циљу смањења емисије честица које настају хабањем кочница, потребно је да се обучавају да се углавном ослањају на успориваче, при чему би се фриktionе кочнице активирале само при заустављањима или у ситуацијама када је потребно брзо реаговати. Ово је посебно значајна мера која се односи на обуку возача аутобуса, јер постоји већа фреквенција циркулације аутобуса у урбаним срединама.

6.6 Регулисање и планирање саобраћаја

Поред свих претходно наведених мера које се односе на смањење утицаја честица на човеково здравље, али и смањење емисије честица које настају хабањем кочница у урбаним срединама, важна мера би била и регулисање саобраћаја. Регулисање саобраћаја, али и генерално планирање простора би могло смањити у великом проценту емисију честица које настају при хабању кочница. Ова метода се односи на то да се смањи број кочења у урбаним срединама. Тако би се ова мера у градским зонама односила на то да се примењују у што већој мери координисане светлосне сигнализације или савремени системи сигнализације који би пратили број возила и омогућили смањење потребе за бројним кочењима, односно заустављањима. Поред могућности регулисања рада светлосне сигнализације са циљем смањења броја кочења, могле би се применити и кружни токови саобраћаја на местима где постоји потребан простор и могуће је извести такву раскрсницу у урбаном подручју. Такође је потребно водити рачуна о геометрији пута у циљу смањења броја кочења, што би довело и до смањења настале емисије честица. Планирањем саобраћаја би се могло утицати на опадање емисије честица на тај начин што би се за возила која су у транзиту могла користити обилазница око насељених зона, што би смањило загађење унутар насељених, односно градских зона.

7 ЗАКЉУЧАК

Проблем загађења ваздуха представља један од водећих проблема већ данас, али и у будућности. Загађење ваздуха бројним материјама које се испуштају на различите начине представља велики ризик по здравље човека, али и по човеково окружење. Један од значајних загађивача ваздуха представљају и честице, које могу имати различите величине. Њихова величина је један од важних фактора опасности по околину и човека. Честице имају ознаку РМ, док број у индексу представља њихову величину у микрометрима. Најчешће праћене и анализирани честице су РМ₁₀ и РМ_{2.5}. Ако се узме у обзир чињеница да честице настају као последица сагоревања материја или хабањем одређених материјала, то додатно повећава њихову штетност. Утицај честица може бити различит у зависности од њиховог састава и величине. Када је у питању здравље човека, честице мањег пречника су опасније, јер оне могу доспети дубље у организам човека. Честице могу утицати на различите органе у човековом организму и могу довести до озбиљних здравствених проблема. Када су у питању други живи организми, тј. биљке и животиње, показало се да честице могу утицати и на њихов развој.

Извори загађења честицама у основи се разликују према начину на који се честице емитују. Честице могу настати, пре свега, сагоревањем материја. Када је у питању возило, то би било сагоревањем горива у мотору. Други начин настанка честица јесте хабањем два елемента који су у међусобном контакту. Код моторног возила такви извори честица би били и фриксиони елементи кочница, што је био предмет анализе у докторској дисертацији.

Хабање фриксионих парова кочница ће у будућности постати један од водећих извора честица на возилу, мада је тај тренд већ присутан и данас. Разлог томе је што код МСУС данас постоје строге законске обавезе које прописују максимално дозвољену емисију, између осталог и честица. Самим тим, савремена возила имају ниску емисију честица која настају сагоревањем у мотору. Са друге стране, возила на електрични погон не емитују издувне гасове, па самим тим ни честице, јер се као покретач користи електромотор. Слично као и код хибридних возила, која користе два вида погона, од којих је један електромотор, а други МСУС, који најчешће задовољавају прописане стандарде настале емисије.

Када су у питању извори честица које се генеришу хабањем елемената, конкретно елемената кочница, за сада не постоје законске норме или стандарди који би прописали дозвољене вредности настале емисије или ослобођене концентрације честица. Данас постоје законски прописи који су везани за примену одређених материјала у фриксионим паровима. У свету је присутан развој различитих система или додатака на кочницама који смањују концентрацију насталих честица, односно оних које се ослобађају у ваздуху. Неопходно је што пре увести мере које би контролом састава примењених материјала утицале на штетност насталих честица, али и да се смањи концентрација ослобођених честица у ваздуху.

Испитивање честица које настају као последица хабања фриксионих парова кочница и њихово мерење може се спроводити на више различитих начина. Најреалнија испитивања су она која се спроводе у путним условима, где на возило утичу разне силе које је некада тешко идентификовати. У путним условима је компликовано мерити само емисију честица које настају хабањем кочница, јер постоји велика могућност мерења и честица чији извор уопште није возило или кочнице. Испитивање које даје резултате

сличне реалним условима јесте примена инерцијалног кочног динамометра, где се примењују исти фрикциони елементи као они на стварном возилу. Како се мерење изводи у лабораторијским условима, много је лакше издвојити емисију која настаје хабањем кочница. Углавном се врши модификација инерцијалног кочног динамометра постављањем кућишта у коме се налази склоп кочнице. У лабораторијским условима је много лакше задати и контролисати факторе кочења, али и идентификовати друге параметре који имају утицај на насталу емисију честица, попут температуре између фрикционих парова, релативне влажности ваздуха, амбијенталне температуре, итд.

Настанак честица које су продукт хабања фрикционих парова кочница зависи од великог броја различитих фактора. У докторској дисертацији, у односу на сва претходна истраживања, анализиран је већи број параметара, изведено више мерења, праћене различите комбинације фрикционих парова, а подаци су обрађени са више различитих статистичких метода, да би се дошло до исправних закључака. Сви параметри су подељени на две категорије и то на оне који су директно контролисани од стране возача и на оне на које возач нема директан утицај приликом вожње и кочења. Друга група параметара произилази из директних параметара и њихове комбинације, а обухваћени су и они фактори који су условљени производњом фрикционих парова и њиховим саставом. У истраживањима су варирана три различита улазна фактора, а то су: дефинисана почетна брзина возила, кочни притисак у хидрауличком делу кочне инсталације и оптерећење једне четвртине возила. Поред тога, у овој докторској дисертацији примењене су четири различите кочнице плочице које имају различите саставе, али су се разликовале и према својим геометријским извођењима облика фрикционих површина. Већи акценат истраживања је био на кочним плочицама у односу на диск, знајући да се на комерцијалним моделима возилима могу применити кочне плочице различитог састава и геометријског облика, док је диск углавном устаљен за одређено возило.

На основу истраживања, извршених мерења и обраде добијених података, дошло се до закључака који су везани за овај случај истраживања фрикционих парова и примењене факторе кочења. Утицај одређених фактора се показао различитим за поједине типове кочних плочица, док у неким случајевима постоји идентичан или сличан утицај на концентрацију насталих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Закључна разматрања показују да брзина возила има веома велики утицај на концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Показало се да оптерећење једне четвртине возила има значајан утицај. Са повећањем оптерећења, повећава се и концентрација насталих честица. Осим ова два фактора, једна изведена величина, а то је кинетичка енергија возила, има високу директну корелацију са обе врсте честица. Кочни притисак доводи до варијације настале емисије честица, па тако његов утицај зависи од примењене кочне плочице. Фактор који има утицај на концентрацију честица за све случајеве кочних плочица јесте температура кочних плочица. Време кочења се показало као важан фактор који има утицај на емисију честица које настају хабањем кочница. Успоредно се може довести у везу са настанком честица у зависности од кочне плочице, јер се показало да нема утицаја на све кочне плочице. Коефицијент трења се показао као фактор који има утицај на насталу концентрацију честица, али не увек, већ у зависности од кочних плочица. Резултати показују да код две кочне плочице коефицијент трења има утицај, док у два случаја нема утицај. Амбијентална температура и релативна влажност ваздуха имају утицај на концентрацију насталих честица за неке кочне плочице. Може се рећи да састав кочница има утицај на концентрацију насталих честица, имајући у виду да је анализа применом више статистичких метода показала да на еколошки чистије кочнице утиче већи број фактора у настанку честица.

Када је анализиран састав кочних плочица и утицај на концентрацију честица, показало се да се применом еколошки прихватљивијих кочних плочица повећава и емисија насталих честица. Међутим, потребно је напоменути чињеницу да и поред повећане концентрације насталих честица, оне имају мањи утицај на човека и животну средину јер се примењују мање штетни материјали у њиховом саставу. Када је у питању геометријски облик, показало се да много већи утицај има састав од геометријског облика. Утврђено је да се при примени кочних плочица без жљебова по средини и зарубљених ивица емитује више честица у односу на оне које имају зарубљене ивице и жљебове по средини кочне плочице.

Када је у питању концентрација честица, закључено је да поред фактора и њихова комбинација може имати утицај на емисију насталих честица. Тако, при одређеним комбинацијама фактора, а поготово при већим брзинама и оптерећењима, концентрација честица $PM_{2.5}$ је већа од концентрације честица PM_{10} . Са повећањем тих параметара, долази и до повећања обе концентрације честица, али исто тако долази и до промене њиховог односа.

Развојем модела неуронских мрежа могуће је извршити предвиђања концентрација честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Такав модел се може применити у циљу развоја и унапређења савремених мехатроничких система којима би се смањила концентрација честица.

Постоје већ различити системи који се фокусирају на смањење концентрације ослобођених честица, али се свакако они данас интензивно развијају. Поред савремених мехатроничких система, развијају се и додаци на кочницама који спречавају ослобођење насталих честица. Свакако да тренутна законска регулатива и стандарди не предвиђају, а још мање не обавезују произвођаче на примену таквих система или додатака на кочницама. У будућности би овакви системи или додаци могли бити обавезна опрема возила. Поред тога, примена регенеративног кочења на електричним возилима има значајну улогу у смањењу настале емисије честица. Примена строжих прописа у области примењених материјала у кочним плочицама и материјала од којих се израђују дискови кочница, би имала значаја у циљу смањења емисије насталих честица.

7.1 Допринос аутора

Овим истраживањем и изработом докторске дисертације допринос аутора се огледа у следећем:

- Извршена је идентификацију утицајних фактора на концентрацију честица које настају хабањем фриксионих парова кочница;
- Применом различитих статистичких метода извршена је анализа утицајних фактора на концентрацију насталих честица и утврђена је разлика између утицаја појединих фактора, а узимајући у обзир утицај примењене кочне плочице;
- Утврђено је да фактори (параметри) могу различито утицати на концентрацију честица њиховом променом интензитета, а у зависности од примењене кочне плочице;
- Идентификовано је да на концентрацију честица имају утицај и примењене кочне плочице у погледу њиховог састава, као и конструктивних карактеристика;
- Анализиран је утицај појединих фактора на насталу концентрацију честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ понаособ;

- Утврђен је утицај појединих фактора на однос између концентрација честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ понаособ;
- Извршен је развој методологије и начина испитивања концентрације честица применом инерцијалног кочног динамометра и формиран сопствени тест на инерцијалном кочном динамометру да би се извршила анализа утицаја различитих фактора на концентрацију насталих честица;
- Идентификацијом утицаја појединих фактора на концентрацију насталих честица и развојем сопственог теста формирана је основа за даља истраживања;
- Приказано је да је могуће развити модел предвиђања концентрације насталих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ применом неуронских мрежа;
- Предложене су мере којима би се могла смањити концентрација насталих и ослобођених честица PM_{10} и $PM_{2.5}$, као и мере којима би се смањио негативан утицај на човека и животну средину.

7.2 Анализа постављених хипотеза

На основу прегледа литературе која се односи на емисију честица, али пре свега на основу постигнутих резултата и изведених закључака истраживања у докторској дисертацији, може се доћи до следећих закључака везаних за постављене хипотезе:

Применом инерцијалног кочног динамометра се може успешно измерити концентрација честица која настаје при кочењу диск кочнице модела једне четвртине возила

Као што је у докторској дисертацији приказано, успешно је извршено мерење концентрације честица које настају при хабању кочнице, тако што је симулирано оптерећење које одговара маси једне четвртине возила. Могуће је мерити концентрацију честица при промени различитих фактора кочења. Могуће је измерити различите параметре који су последица кочења, а применом различите мерне опреме. Тако се може закључити да је ова хипотеза у потпуности доказана, узимајући у обзир да је успешно измерена концентрација честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ при различитим кочним факторима (параметрима), а применом инерцијалног кочног динамометра.

Промена параметара у процесу кочења има утицај на укупну концентрацију честица које настају хабањем фриксионих парова диск кочнице

Ово је једна од хипотеза која је у потпуности потврђена. Приказани резултати мерења концентрације насталих честица показују да са повећањем одређених параметара долази до повећања концентрације честица. Уколико се посматрају одређени параметри појединачно, попут почетне брзине кочења, може се доћи до закључка да се са повећањем брзине повећава и концентрација насталих честица. Исто је и са оптерећењем једне четвртине возила - показало се да, при непромењеним осталим параметрима, долази до повећања концентрације честица. Тако се може променом једног параметра кочења повећати или смањити концентрација насталих честица, што значи да параметри имају утицај на укупну концентрацију честица.

Однос концентрација честица различитих величина које настају хабањем фриксионих парова диск кочнице зависи од параметара кочења

Промена параметара кочења не доводи само до промене у укупној концентрацији насталих честица, већ доводи и до промене односа између концентрације честица PM_{10} и $PM_{2.5}$. Концентрација честица PM_{10} је углавном већа у односу на концентрацију честица $PM_{2.5}$, међутим, при промени параметара кочења долази и до промене односа између величине концентрација ове две врсте честица. При повећању одређених параметара долази до тога да је концентрација честица $PM_{2.5}$ већа у односу на концентрацију честица PM_{10} . Значи, при одређеним параметрима кочења долази до тога да је однос концентрације честица већи у корист честица $PM_{2.5}$ у укупној концентрацији честица. Имајући све то у виду, ова хипотеза је у потпуности доказана.

Радни параметри кочења (почетна брзина кочења, притисак у кочном систему и оптерећење једне четвртине возила) увек имају идентичан утицај на измерену концентрацију честица без обзира на примењене кочне плочице.

Ова хипотеза је делимично доказана. Разлог томе је што неки параметри имају идентичан утицај на измерену концентрацију насталих честица за све кочне плочице, док код неких примењених кочних плочица радни параметри имају ипак другачији утицај на промену односа и укупну концентрацију насталих честица. Њихов утицаји се разликују у зависности од примењених плочица, односно њиховог састава и облика. Може доћи до појаве да параметри кочења имају идентичан утицај, као што је случај са притиском у кочном систему или да утицај буде идентичан за две кочне плочице, али да се разликује за трећу кочну плочицу. Тако, утицај одређених параметара утиче на концентрацију и однос честица, али се та вредност може разликовати од кочне плочице до кочне плочице.

7.3 Правци даљих истраживања

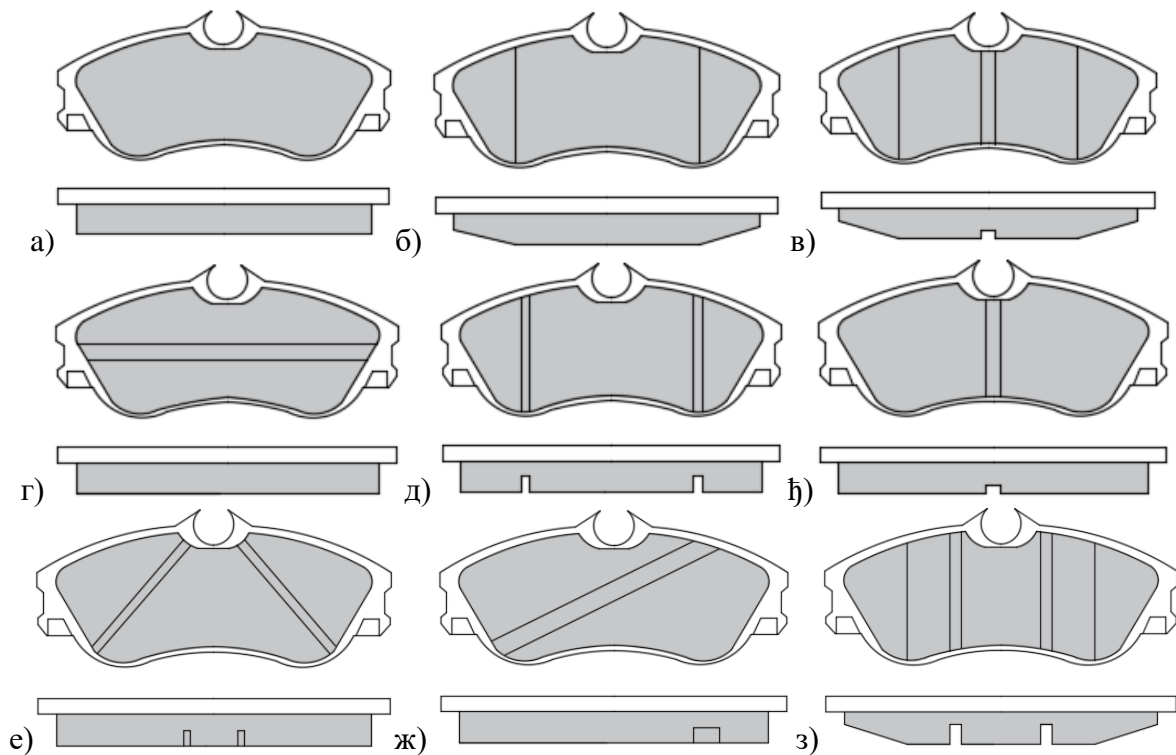
Даља истраживања ће бити усмерена на развој мерне инсталације која би се применила на возилу, а истраживања би се могла спровести у путним условима или на полигонима. Такође се може извршити и примена таквих уређаја у истраживањима у лабораторијским условима, али на динамометру са ваљцима, што би била боља варијанта, јер би се успешније контролисали утицајни фактори.

Поред утицаја кочних плочица, у даљим истраживањима се може утврдити и утицај дискова кочница. Треба испитати један исти пар кочних плочица, али би се применили различити дискови кочница. Дискови би се разликовали према саставу, технологији израде и према својој конструкцији (вентилирани дискови и невентилирани дискови). Дискови се разликују по свом саставу, али би се могао испитати и утицај геометрије дискова у смислу да дискови имају рупе или жљебове по фриксионој површини у поређењу са потпуно равном површином диска.

Када је у питању састав кочних плочица, у даљим истраживањима би требало утврдити тачан хемијски састав кочних плочица и поновити тест који је примењен у докторској дисертацији, па упоредити статистичким методама утицајне параметре на концентрацију честица. Могло би се утврдити појединачни утицај појединих материјала у кочним плочицама, а применом статистичких метода би се утврдила корелација сваког материјала. Исто тако, када је у питању материјал, могао би се анализирати хемијски састав честица у погледу материјала који су доминанти, чиме би се утврдило колико

процентуално учествују кочне плочице и диск у емисији честица. На основу параметара и састава честица могло би се утврдити да ли се са променом параметара кочења мења и састав насталих честица, наравно знајући састав кочних плочица.

Када су у питању кочне плочице, могао би се унапредити и развој методологије за анализу утицаја геометријског облика кочних плочица. У овом случају, примењен је мали број типова кочних плочица, па је то било једно од ограничења. Детаљнија анализа би се могла извршити на тај начин што би се набавиле кочне плочице које имају потпуно равну фрикциону површину. Такође, може се у будућим истраживањима детаљније анализирати разлика у кочним плочицама (материјал, конструкција, ...). На основу тога се може спровести и факторска анализа, као још једна статистичка метода за анализу. Затим би се могла извршити корекција фрикционих површина са зарубљеним фрикционим површинама и са жљебовима. Такви жљебови би се могли комбиновати да буду вертикални, хоризонтални и коси. На тај начин би се постигло да фрикционе површине буду од истог материјала и састава, али различитог геометријског облика. На овај начин се могу утврдити оптималан облик кочне плочице која би остварила најмању концентрацију честица, али и тачан утицај геометријског облика.



Слика 7.1 Могући геометријски облици примењени у кочним плочицама: а) равна фрикциона површина, б) зарубљена фрикциона површина, в) бочно зарубљена фрикциона површина са централним ожљебљењем, г) једно хоризонтално централно ожљебљење, д) два ожљебљења фрикционе површине, е) једно вертикално ожљебљење, ж) два коса ожљебљење, з) једно косо централно ожљебљење, е) два централна вертикална ожљебљења и бочно зарубљене фрикционе површине

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Definition of pollution. Доступно на: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/pollution> (приступљено: 20.01.2023).
- [2] Where Does Air Pollution Come From. Доступно на: <https://www.nps.gov/subjects/air/sources.htm#:~:text=mobile%20sources%20%E2%80%93%20such%20as%20cars,blown%20dust%2C%20wildfires%2C%20and%20volcanoes> (приступљено: 20.01.2023).
- [3] Gulshan, T. M. N. A.; Hari poornima, G.; Joyce, K.; et al. Air quality monitoring and assessment using IoT. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **2020**, 955 (1), 012006.
- [4] Clean Air For All – a lesson on key air pollutants, Balkan Green Energy News. Доступно на: <https://balkangreenenergynews.com/clean-air-for-all-a-lesson-on-key-air-pollutants/> (приступљено: 20.01.2023).
- [5] Primary and Secondary Pollutants. Доступно на: <https://psiberg.com/primary-and-secondary-pollutants/> (приступљено: 20.01.2023).
- [6] OECD. *Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge*, 1. edn.; OECD Publishing: Paris, France, 2020.
- [7] Warner, L.R.; Sokhi, R.S.; Luhana, L.; et al. I. Non-Exhaust Particle Emissions from Road Transport. Proceedings of 11th International Symposium Transport and Air Pollution, Graz, Austija, 19. – 21. june; Verlag der Technischen Universität Graz: Graz, Austria, 2002.
- [8] Глишовић, Ј.; Лукић, Ј. Мобилни системи, 1. изд.; Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу: Крагујевац, Република Србија, 2021.
- [9] Day, A. Brake System Layout Design. U *Braking of Road Vehicles*, 1. edn.; Day, A., ed., Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2014; pp. 149–213.
- [10] Стефановић, А. *Друмска возила – основи конструкције*. 1. изд.; Центар за моторе и моторна возила Машинског факултета у Нишу и Центар за безбедност Машинског факултета у Крагујевцу: Ниш, Република Србија, 2010.
- [11] Complete Guide to Disc Brakes and Drum Brakes. Доступно на: <https://www.lesschwab.com/article/complete-guide-to-disc-brakes-and-drum-brakes.html> (приступљено: 22.01.2023).
- [12] Akebono brake, Drum Brakes. Доступно на: https://www.akebono-brake.com/english/product_technology/product/automotive/drum/ (приступљено: 21.01.2023).
- [13] Basic principles of brakes. Доступно на: https://www.akebono-brake.com/docs/pdf/akebono_report_2016en_08.pdf (приступљено: 21.01.2023).
- [14] Degestein, T.; Winner, H. Dynamic measurement of the forces in the friction area of a disc brake during braking process. Proceedings of FISITA World Automotive Congress, Yokohama, Japan, 22-27 october; FISITA: Stansted, United Kingdom, 2006, F2006V218.
- [15] Rashid, A. Overview of disc brakes and related phenomena - a review. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration* **2014**, 10(4), pp. 257-301.
- [16] Puhn, F. *Brake Handbook*. 2. edn.; Summerlin, R., ed.; HP Books: Tucson, United States, 1985.
- [17] Nagesh, S. N.; Siddaraju, C.; Prakash, S. V.; et al. Characterization of Brake Pads by Variation in Composition of Friction Materials. *Procedia Materials Science* **2014**, 5, pp. 295–302.

- [18] Bonfanti, A. Low-impact friction materials for brake pads. PhD Thesis, University of Trento, Trento, Italy, 2016.
- [19] Verma, P. C.; Ciudin, R.; Bonfanti, A.; et al. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. *Wear* **2016** 346-347, pp. 56–65.
- [20] Brake Pad. Доступно на: <https://www.delphiautoparts.com/gbr/en/product/five-layers-quality-every-delphi-technologies-brake-pad> (приступљено: 25.01.2023).
- [21] What Backing Plate Is On My Brake Pad. Доступно на: https://www.brakepartsinc.com/dam/jcr:1154aa93-8884-4cf2-8427-d143fb5b1c3b/BrakingNews_Backing%20Plate.pdf (приступљено: 23.01.2023).
- [22] Brake Pads Companies in Egypt. Доступно на: <https://www.premiumfrontech.com/brake-pads-egypt/> (приступљено: 16.05.2022).
- [23] The engineering behind the shape. Доступно на: <https://www.wagnerbrake.com/technical/technical-tips/chamfers.html> (приступљено: 25.01.2023).
- [24] Abdul Hamid, M. K.; Shasudin, N. I.; Mat Lazim, A. R.; et al. Effect of Brake Pad Design On Friction and Wear with Hard Particle Present. *Jurnal Teknologi* **2014**, 71(2), pp. 135–138.
- [25] DiLisio, P.; Parisi, R.; Rieker, J.; et al. Brake Noise Resolution on the 1998 Mercedes-Benz M-Class. *SAE Technical Paper Series* **1998**, 107(6), pp. 2329-2337.
- [26] García-León, R., Flórez-Solano, E., Suárez-Quiñones, Á. Brake discs: A technological review from its analysis and assessment. *Informador Técnico* **2019**, 83(2), pp. 191–208.
- [27] To have better performance, are discs with holes or slots preferable? What advantages to each type offer? What are the contraindications of the two versions?. Доступно на: <https://www.brembo.com/en/company/news/disc-drilled-or-slotted> (приступљено: 25.01.2023)
- [28] Maske, P.; Purnapatre, S.; Agrawal, M.; et al. Transient thermal and static structural analysis of vented disc rotors. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research* 2020, 7(7), pp. 340-346.
- [29] Brake rotors — slotted, drilled, or plain jane. Доступно на: <https://bimmers.com/brake-rotors-slotted-drilled-or-plain-jane/> (приступљено: 25.01.2023).
- [30] Chłopek, Z., Jakubowski, A. A study of the particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność* **2009**, 4(4), pp. 45–52.
- [31] National Research Council. *Global Sources of Local Pollution An Assessment of Long-Range Transport of Key Air Pollutants to and from the United States*. The National Academies Press: Washington, United States, 2010.
- [32] Prabhat, K. Rai. *Biomagnetic Monitoring of Particulate Matter*, 1. edn.; Elsevier Science: Amsterdam, Netherlands, 2015.
- [33] Драгић, Н. Утицај суспендованих честица “PM_{2,5}” из ваздуха животне средине на морталитет, кардиоваскуларни и респираторни морбидитет одраслог становништва града Новог Сада. Докторска дисертација, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, Република Србија, 2020.
- [34] Mangipudy, R. S. Aerosols. U *Encyclopedia of Toxicology*, 2. edn.; Wexler, P., ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [35] Yadav, I. C., Devi, N. L. Biomass Burning, Regional Air Quality, and Climate Change. U *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2. edn.; Nriagu, J., ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2018.
- [36] Wu, Z., Liu, F., Fan, W. Characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} at Mount Wutai Buddhism Scenic Spot, Shanxi, China. *Atmosphere* **2015**, 6(8), pp. 1195–1210.

- [37] Acharya, B. Cleaning of Product Gas of Gasification. U *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*, 3. edn.; Basu P., ed.; Academic Press: Cambridge, United States, 2018, pp. 373–391.
- [38] Donaldson, K.; MacNee, W.; Stone, V. Particulate Matter, Ultrafine Particles. U *Encyclopedia of Respiratory Medicine*, 1. edn.; Laurent, G. J., Steve, D. S., eds.; Academic Press, Massachusetts, United States, 2006, pp. 104–110.
- [39] Kapper, K.L.; Bautista, F.; Goguitchaishvili, A.; Bógalo, M.F.; Cejudo-Ruíz, R.; Cervantes Solano, M. The use and misuse of magnetic methods to monitor environmental pollution in urban areas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **2020**, *72(1)*, A111219.
- [40] Abdul Hamid, M. S., H.; Mat Lazim, A.; Abu Bakar, A. R. Brake Wear Particle Size and Shape Analysis of Non-Asbestos Organic (NAO) and Semi Metallic Brake Pad. *Jurnal Teknologi* **2014**, *71(2)*, pp. 129-134.
- [41] Vallius, M. Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air. Academic dissertation, University of Kuopio, Kuopio, Finland, 2005.
- [42] Suspended particulates (TSP/SPM). Доступно на: <https://www.eea.europa.eu/publications/2-9167-057-X/page021.html> (приступљено: 05.02.2023).
- [43] Fan, Z.; Lin, L. Exposure Science: Contaminant Mixtures. U *Encyclopedia of Environmental Health*, 1. edn.; Nriagu J. O., ed.; Elsevier Science: Amsterdam, Netherlands, 2011, pp. 645–656.
- [44] Anderson, J. O.; Thundiyil, J. G.; Stolbach, A. Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology* **2012**, *8*, pp. 166–175.
- [45] Azarmi, F. Emissions, physicochemical characteristics and exposure to coarse, fine and ultrafine particles from building activities. Doctoral thesis, University of Surrey, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Guildford, United Kingdom, 2016.
- [46] Hinds, W.C. *Aerosol Technology: properties, behaviour and measurement of airborne particles*, 2. edn.; John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey, United States of America, 1999.
- [47] Kwon, H. S.; Ryu, M. H.; Carlsten, C. Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Experimental & Molecular Medicine* **2020**, *52(3)*, pp. 318–328.
- [48] Suspended particles in France in the period from 1990 to 2015. Доступно на: <https://www.citepa.org/en/air-and-climate/pollutants-and-ghg/particulate-matter> (приступљено: 15.07.2023.).
- [49] Mukherjee, A.; Agrawal, M. World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letters* **2017** *15(2)*, pp. 283–309.
- [50] What is particulate matter. Доступно на: https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Environmental%20Quality/Air/Air%20Monitoring/AWhatisParticulateMatter1.pdf (15.07.2023.).
- [51] Philip, S., Martin, R. V., van Donkelaar, A., et al. Global Chemical Composition of Ambient Fine Particulate Matter for Exposure Assessment. *Environmental Science & Technology* **2014**, *48(22)*, pp. 13060–13068.
- [52] What is particulate matter composed of. Доступно на: <https://www.irceline.be/en/documentation/faq/what-is-particulate-matter-composed-of> (приступљено: 07.02.2023).
- [53] Chemkar PM10 - Chemische karakterisatie van fijn stof in Vlaanderen 2006-2007. Доступно на: <https://www.vmm.be/publicaties/chemkar-pm10-chemische-karakterisatie-van-fijn-stof-in-vlaanderen-2006-2007> (приступљено: 07.02.2023).

- [54] Abulude, F. O. Particulate matter: an approach to air pollution. *Preprints* **2016**, 2016070057.
- [55] Health Effects Institute. State of Global Air 2019. Special report, Health Effects Institute: Boston, United States of America, 2019.
- [56] World Health Organization. Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. WHO Regional Office, Copenhagen, Denmark, 2013.
- [57] World health organization. 9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action. Доступно на: <https://www.who.int/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action> (приступљено: 07.02.2023).
- [58] Colovic, Daul, M.; Kryzanowski, M.; Kujundzic, O. Air Pollution and Human Health: The Case of the Western Balkans. UNECE: Geneva, Switzerland, 2019.
- [59] Bo, M.; Salizzoni, P.; Clerico, M.; et al. Assessment of Indoor-Outdoor Particulate Matter Air Pollution: A Review. *Atmosphere* **2017**, 8, 136.
- [60] European Environment Agency. Air quality in Europe — 2019 report. Report, Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2019.
- [61] Air Quality and Human Health, a Priority for Joint Action. Доступно на: [https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/air-quality-and-human-health-priority-joint-action#:~:text=Air%20quality%20and%20health&text=A%20further%20152%20000%20remature,\)%20in%20children%2C%203%25](https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/air-quality-and-human-health-priority-joint-action#:~:text=Air%20quality%20and%20health&text=A%20further%20152%20000%20remature,)%20in%20children%2C%203%25) (Приступљено: 11.03.2023).
- [62] Outdoor Air Pollution a Leading Environmental Cause of Cancer Deaths. Доступно на: https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr221_E.pdf (приступљено: 11.02.2023).
- [63] Particulate Matter (PM) Basics. Доступно на: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#effects> (приступљено: 11.02.2023).
- [64] Health and environmental effects of particulate matter (PM). Доступно на: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm> (приступљено: 11.02.2023).
- [65] Airborne particulate matter and their health effects. Доступно на: <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects/> (приступљено: 11.02.2023).
- [66] Particulate matter (PM10 and PM2.5). Доступно на: <https://www.health.nsw.gov.au/environment/air/Pages/particulate-matter.aspx> (приступљено: 11.02.2023).
- [67] Nani Guarieiro, L. L.; Nani Guarieiro L. A. 2013, Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel. U *Biofuels - Economy, Environment and Sustainability*, 1. edn.; Fang, Z., ed.; IntechOpen: London, United Kingdom, 2013, pp. 357-386.
- [68] Correia, A.; Arden Pope III, C.; Douglas, W.; et al. The Effect of Air Pollution Control on Life Expectancy in the United States: An Analysis of 545 US counties for the period 2000 to 2007. *Epidemiology* **2014**, 24, pp. 23-31.
- [69] Rai, P. K. Multifaceted Health impacts of Particulate Matter (PM) and its management: An overview. *Environmental Skeptics and Critics* **2015**, 4(1), pp. 1-26.
- [70] Gohler, D.; Stintz, M.; Hillemann, L.; et al. Characterization of Nanoparticle Release from Surface Coatings by the Simulation of a Sanding Process. *The Annals of Occupational Hygiene* **2010**, 54(6), pp. 615–624.
- [71] Schraufnagel, D. E. The health effects of ultrafine particles. *Experimental & Molecular Medicine* **2020**, 52, pp. 311-317.
- [72] Yu, W.; Ye, T.; Zhang, Y.; et al. Global estimates of daily ambient fine particulate matter concentrations and unequal spatiotemporal distribution of population exposure: a

- machine learning modelling study. *The Lancet Planetary Health* **2023**, 7(3), pp. e209–e218.
- [73] Almeida, S. M.; Manousakas, M.; Diapouli, E.; et al. Ambient particulate matter source apportionment using receptor modelling in European and Central Asia urban areas. *Environmental Pollution* **2020**, 266(3), 115199.
- [74] Chowdhury, S.; Pozzer, A.; Haines, A.; et al. Global health burden of ambient PM_{2.5} and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols. *Environment International* **2022**, 159, 107020.
- [75] Air pollution by suspended particles. Доступно на: http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/pp_pm.pdf (приступљено: 22.02.2023)
- [76] Singh, V.; Biswal, A.; Kesarkar, A. P.; et al. High resolution vehicular PM₁₀ emissions over megacity Delhi: Relative contributions of exhaust and non-exhaust sources. *Science of The Total Environment* **2020**, 699, 134273.
- [77] Vehicle emission and efficiency. Доступно на: https://www.eea.europa.eu/media/infographics/vehicle-emissions-and-efficiency-1/image/image_view_fullscreen (приступљено: 25.02.2023).
- [78] Vanherle, K.; Lopez-Aparicio, S.; Grythe, H., et al. Transport Non-exhaust PM-emissions - An overview of emission estimates, relevance, trends and policies. Report, European Topic Centre on Air pollution, transport, noise and industrial pollution: Kjeller, Norway, 2021.
- [79] Denier van der Gon, H.; Hulskotte, J.; Jozwicka, M.; et al. European Emission Inventories and Projections for Road Transport Non-Exhaust Emissions. U *Non-Exhaust Emissions An Urban Air Quality Problem for Public Health; Impact and Mitigation Measures*, 1. edn.; Amato F., ed.; Academic Press: Cambridge, United States of America, 2018, pp. 101–121.
- [80] Brake Wear Emissions in Particulate Matter. Доступно на: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/preliminary-investigations/brake-wear-emissions-pi-a11y.pdf> (приступљено: 12.06.2023).
- [81] Timmers, V. R. J. H.; Achten, P. A. J. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmospheric Environment* **2016**, 134, pp. 10–17.
- [82] Woo, S. H.; Jang, H.; Lee S. B.; et al. Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles: An experimental analysis. *Science of the Total Environment* **2022**, 842, 156961.
- [83] Jandacka, D.; Durcanska, D.; Bujdos, M. The contribution of road traffic to particulate matter and metals in air pollution in the vicinity of an urban road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **2017**, 50, pp. 397–408.
- [84] Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality. Доступно на: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495 (приступљено: 28.04.2023).
- [85] Philippe, F.; Morgeneyer, M.; Xiang, M.; et al. Representativeness of airborne brake wear emission for the automotive industry: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2021**, 235(10-11), pp. 2651–2666.
- [86] Grigoratos, T.; Martini, G. Non-exhaust Traffic Related Emissions. Brake and Tyre Wear PM. Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg, 2014.
- [87] Garg, B. D.; Cadle, S. H.; Mulawa, P. A.; et al. Brake Wear Particulate Matter Emissions. *Environmental Science & Technology* **2000**, 34(21), pp. 4463–4469.

- [88] Barlow, T.J.; Boulter, P.G.; McCrae, I.S.; et al. Non-exhaust particulate matter emissions from road traffic: Summary report. Report, Transport Research Laboratory (TRL Limited), Wokingham, United Kingdom, 2007.
- [89] Harrison, R. M.; Jones, A. M.; Gietl, J.; et al. Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements. *Environmental Science & Technology* **2012**, *46*(12), pp. 6523–6529.
- [90] Barlow, T. Briefing Paper on Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport. Report, Transport Research Laboratory (TRL Limited), Wokingham, United Kingdom, 2014.
- [91] Vasiljević, S.; Aleksandrović, B.; Glišović, J.; et al. Regenerative braking on electric vehicles: working principles and benefits of application. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **2022**, *1271*, 012025.
- [92] Liu, Y.; Chen, H.; Li, Y.; Gao, J.; et al. Exhaust and non-exhaust emissions from conventional and electric vehicles: A comparison of monetary impact values. *Journal of Cleaner Production*, **2022**, *331*, 129965.
- [93] Bondorf, L.; Köhler, L.; Grein, T.; et al. Airborne Brake Wear Emissions from a Battery Electric Vehicle. *Atmosphere* **2023**, *14*(3), 488.
- [94] Balaji, M. S.; Baskar, A.; Priya, A. S.; et al. Correlation of test bench with actual vehicle condition of Indian commercial passenger cars. Proceedings of International Conference on Advances in Industrial Engineering Applications (ICAIEA 2018), Chennai, India, 3. – 5. january 2018, pp. 33-43.
- [95] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, N.; et al. Brake wear mechanism and particulate formation. *Tractors and power machines* **2020**, *25*(1/2), pp. 80-89.
- [96] Laguna-Camacho, J. R.; Juárez-Morales, G.; Calderón-Ramón, C.; et al. Study of the wear mechanisms of disk and shoe brake pads. *Engineering Failure Analysis* **2015**, *56*, pp. 348–359.
- [97] Ивковић, Б. *Триболошки речник - Речник термина из области трибологије*, 1. изд.; Српско триболошко друштво, Машински факултет: Крагујевац, Република Србија, 2011.
- [98] Affatato, S.; Brando, D. Introduction to wear phenomena of orthopaedic implants. U *Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints*, 1. ed.; Affatato, S., ed.; Woodhead Publishing: Sawston, United Kingdom, 2012, pp. 3–26.
- [99] Pitting wear review. Доступно на: https://www.engineersedge.com/lubrication/pitting_wear.htm#:~:text=Pitting%20wear%20is%20due%20to,and%20forth%20until%20it%20breaks (приступљено: 25.02.2023).
- [100] Sharma, N.; Alam, S. N.; Ray, B. C.; et al. Wear Behaviour of Silica and Alumina-Based Nanocomposites Reinforced with Multi Walled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets. *Wear* **2018**, *418-419*, pp. 290-304.
- [101] Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W. 14 Fatigue Wear Engineering. U *Engineering Tribology*, 1. edn.; Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W., ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 1993, pp. 657–681.
- [102] Wang, X.; Wang, S.; Zhang, S.; et al. Wear mechanism of disc-brake block material for new type of drilling rig. *Frontiers of Mechanical Engineering in China* **2008**, *3*(1), pp. 10–16.
- [103] Mueller, M.; Ostermeyer, G. P. Cellular automata method for macroscopic surface and friction dynamics in brake systems. *Tribology International* **2007**, *40*(6), pp. 942–952.
- [104] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, B.; et al. The analysis of the influential parameters that cause particles formation during the braking process: A review, *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **2022**, 236(1), pp. 31-48.
- [105] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, B.; et al. Analysis of influencing factors on brake wear and non-exhaust emission with reference to applied materials in brake pads. *Mobility & Vehicle Mechanics* **2021**, 27(2), pp. 45-59.
- [106] Augsberg, K.; Gramstat, S.; Horn, R.; et al. Measures Development for Brake Dust Emissions with Computational Fluid Dynamics and Particle Imaging Velocimetry. *SAE Technical Paper* **2011**, 2011-01-2345.
- [107] Wahid, S. M. S. Automotive brake wear: a review. *Environmental Science and Pollution Research* **2018**, 25, pp. 174–180.
- [108] Rudnytskyj, A. Simulations of contact mechanics and wear of linearly reciprocating block-on-flat sliding test. Master's thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2018.
- [109] Xiao, X.; Yin, Y.; Bao, J.; et al. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering* **2016**, 8(5).
- [110] Researchers simulate wear of materials as they rub together. Доступно на: <https://news.cornell.edu/stories/2016/06/researchers-simulate-wear-materials-they-rub-together> (приступљено: 25.05.2023)
- [111] Hanaor, D. A. H.; Gan, Y.; Einav, I. Static friction at fractal interfaces. *Tribology International* **2016**, 93, pp. 229–238.
- [112] Dedkova, K.; Peikertova, P.; Wilhelmi, T.; et al. Microscopic study of friction layer and the distribution of components in automotive brake pads. Proceedings of European Microscopy Congress, Lyon, France, 28. august. – 02. september, 2016, pp. 708–709.
- [113] Sanders, P. G.; Xu, N.; Dalka, T. M.; et al. Airborne Brake Wear Debris: Size Distributions, Composition, and a Comparison of Dynamometer and Vehicle Tests. *Environmental Science & Technology* **2003**, 37(18), pp. 4060–4069.
- [114] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, N.; et al. Mechanism of particles released into the environment that is formed by brake wear on friction surfaces. Proceedings of EuroBrake 2021, online conference, Mainz, Germany, 17.- 21. may; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2021, EB2021-EBS-010
- [115] Hagino H., Oyama M., Sasaki S., 2015, Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating. *Wear* **2015**, 334-335, pp. 44–48.
- [116] Chasapidis, L.; Grigoratos, T.; Zygogianni, A.; et al. Konstandopoulos, A. G. Study of Brake Wear Particle Emissions of a Minivan on a Chassis Dynamometer. *Emission Control Science and Technology* **2018**, 4(4), pp. 271–278.
- [117] Sinha, A.; Ischia, G.; Menapace, C.; et al. Experimental Characterization Protocols for Wear Products from Disc Brake Materials. *Atmosphere* **2020**, 11(10), 1102.
- [118] Kukutschová, J.; Filip, P. Chapter 6-Review of Brake Wear Emissions: A Review of Brake Emission Measurement Studies: Identification of Gaps and Future Needs. U *Non-Exhaust Emissions An Urban Air Quality Problem for Public Health; Impact and Mitigation Measures*, 1. edn.; Amato F., ed.; Academic Press: Cambridge, United States of America, 2018, pp. 123–146.
- [119] Правилник о подели моторних и прикључних возила и техничким условима за возила у саобраћају на путевима, "Сл. гласник РС", бр. 40/2012, 102/2012, 19/2013, 41/2013, 102/2014, 41/2015, 78/2015, 111/2015, 14/2016, 108/2016, 7/2017 - испр., 63/2017, 45/2018, 70/2018, 95/2018, 104/2018, 93/2019, 2/2020 - испр., 64/2021, 129/2021 - др. правилник, 143/2022, 110/2022 – др, 48/2023.
- [120] Grigoratos, T.; Martini, G. Brake wear particle emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research* **2015**, 22, pp. 2491–2504.

- [121] Hulskotte, J. H. J.; Roskam, G. D.; Denier van der Gon, H. A. C. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors, *Atmospheric Environment* **2014**, *99*, pp. 436–445.
- [122] Mosleh, M.; Blau, P. J.; Dumitrescu D. Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials. *Wear* **2004**; *256(11-12)*, pp. 1128–1134.
- [123] Pant, P.; Baker, S. J.; Shukla, A.; et al. The PM 10 fraction of road dust in the UK and India: Characterization, source profiles and oxidative potential. *Science of The Total Environment* **2015**; *530-531*, pp. 445–452.
- [124] Lawrence, S.; Sokhi, R.; Ravindra, K.; et al. Source apportionment of traffic emissions of particulate matter using tunnel measurements. *Atmospheric Environment* **2013**, *77*, pp. 548-557.
- [125] Jadhav, S. P.; Sawant, S. H. A review paper: Development of novel friction material for vehicle brake pad application to minimize environmental and health issues. *Materials Today: Proceedings* **2019**, *19(2)*, pp. 209-212.
- [126] Bukowiecki, N.; Gehrig, R.; Lienemann, P.; et al. U. PM10 emission factors of abrasion particles from road traffic (APART). Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS), Zurich, Switzerland, 2009.
- [127] Adamiec, E.; Jarosz-Krzemińska, E.; Wieszala, R. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. *Environmental Monitoring and Assessment* **2016**, *188(6)*, 369.
- [128] Budai, P.; Clement, A. Spatial distribution patterns of four traffic-emitted heavy metals in urban road dust and the resuspension of brake-emitted particles: Findings of a field study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2018**, *62*, pp. 179–185.
- [129] Apegyei, E.; Bank, M.S.; Spengler, J. D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmospheric Environment* **2011**, *45(13)*, pp. 2310–2323.
- [130] Duong, T. T. T.; Lee, B. K. Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics. *Journal of Environmental Management* **2011**, *92(3)*, pp. 554–562.
- [131] Yan, G.; Mao, L.; Jiang, B.; et al. The source apportionment, pollution characteristic and mobility of Sb in roadside soils affected by traffic and industrial activities. *Journal of Hazardous Materials* **2019**, *384*, 121352.
- [132] Alves, D. D.; Riegel, R. P.; Klauk, C. R.; et al. Source apportionment of metallic elements in urban atmospheric particulate matter and assessment of its water-soluble fraction toxicity. *Environmental Science and Pollution Research* **2020**, *27*, pp. 12202–12214.
- [133] Adachi, K.; Tainosho, Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environment International* **2004**, *30*, pp. 1009–1017.
- [134] Song, F.; Gao, Y. Size distributions of trace elements associated with ambient particulate matter in the vicinity of a major highway in the New Jersey-New York metropolitan area. *Atmospheric Environment* **2011**, *45(37)*, pp. 6714–6723.
- [135] Hagino, H.; Oyama, M.; Sasaki, S. Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles. *Atmospheric Environment* **2016**, *131*, pp. 269–278.
- [136] Valotto, G.; Zannoni, D.; Rampazzo, G.; et al. Characterization and preliminary risk assessment of road dust collected in Venice airport (Italy). *Journal of Geochemical Exploration* **2018**, *190*, pp. 142–153.

- [137] Chan, D.; Stachowiak, G. W. Review of automotive brake friction materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2004**, *218*(9), pp. 953–966.
- [138] What are brake pads made of. Доступно на: <https://parts.olathetoyota.com/what-are-brake-pads-made-of> (приступљено: 01.03.2023).
- [139] Akenono brake pads. Доступно на: <http://www.suscon.org/pdfs/bpp/pdfs/OEBrakePads.pdf> (Приступљено: 01.03.2023).
- [140] Borawski, Andrzej. Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads – review. *Science and Engineering of Composite Materials* **2020**, *27*(1), pp. 374–396.
- [141] Banait, A. S.; Raibhole, V. N. Study on Tribological Investigations of Alternative Automotive Brake Pad Materials. *IOSR Journal of Engineering* **2019**, 40–43.
- [142] Ceramic vs. Semi Metallic Brake Pads, What’s The Difference. Доступно на: <https://www.bridgestonetire.com/tread-and-trend/drivers-ed/ceramic-vs-metallic-brake-pads> (приступљено: 05.03.2023).
- [143] Ceramic vs. Semi-Metallic vs. Organic: How To Choose The Best Brake Pads For Your Car. Доступно на: <https://www.brakepads.cn/ceramic-vs-semi-metallic-vs-organic/> (приступљено: 05.03.2023).
- [144] Brake Pads: Organic, Ceramic, And Semi-Metallic - What Are The Differences. Доступно на: <https://www.autoevolution.com/news/brake-pads-organic-ceramic-and-semi-metallic-what-are-the-differences-112665.html> (приступљено: 05.03.2023).
- [145] ATE Ceramic. Доступно на: <https://www.ate-brakes.com/products/disc-brakes/ate-ceramic-brake-pads/> (приступљено: 05.03.2023).
- [146] Abro. Abro Premium quality brake pads. Abro industries: Blackthorn, United States, 2014.
- [147] Ma, Y.; Martynková, G. S.; Valášková, M.; et al. Effects of ZrSiO₄ in non-metallic brake friction materials on friction performance. *Tribology International* **2008**, *41*(3), pp. 166–174.
- [148] Videršćak, D.; Schauerl, Z.; Ormuž, K.; et al. Influence of Brake Pad Properties to Braking Characteristics. *Promet - Traffic & Transportation* **2022** *34*(1), pp. 91–102.
- [149] Ceramic vs. Semi-Metallic Brake Pads: How They Work and What They’re Made Of. Доступно на: <https://www.advicsaftermarket.com/technical-resources/tech-tips/ceramic-vs-semi-metallic-brake-pads-how-they-work-and-what-theyre-made-of/> (приступљено: 05.03.2023)
- [150] Be Aware of Brake Pad Wear. Доступно на: <https://www.delphiautoparts.com/en-gb/resource-center/article/be-aware-of-brake-pad-wear#:~:text=Tapered%20Pad%20Wear%3A%20If%20the,pad%20can%20also%20cause%20this> (приступљено: 05.03.2023).
- [151] Juan, R. S.; Kurniawan, C.; Marbun, J.; et al. Mechanical properties of brake pad composite made from candlenut shell and coconut shell. *Journal of Physics: Conference Series* **2020** *1428*, pp. 012018.
- [152] Ceramic vs. semi-metallic brake pads: choosing the right pad. Доступно: <https://www.floorjackshop.com/best-type-of-brake-pads-ceramic-vs-semi-metallic-vs-organic/> (приступљено: 06.03.2023).
- [153] Davin, E. A. T.; Cristol, A. L.; Beaurain, A.; et al. Differences in Wear and Material Integrity of NAO and Low-Steel Brake Pads under Severe Conditions. *Materials* **2021** *14*(19), pp. 5531.
- [154] What are brake pads and what do they do. Доступно на: <https://www.wagnerbrake.com/technical/parts-matter/automotive-repair-and-maintenance/best-brake-pads-to-buy.html> (приступљено: 06.03.2023).

- [155] Low Metallic Brake Pads. Доступно на: <https://valorbrakes.com/low-metallic-brakes-pad/> (приступљено: 09.03.2023).
- [156] Organic Brake Pads. Доступно на: <https://valorbrakes.com/organic/> (приступљено: 09.03.2023).
- [157] Ceramic Brake Pads. Доступно на: <https://valorbrakes.com/ceramic-brake-pads-2/> (приступљено: 09.03.2023).
- [158] Umamaheswara, R.; Babji, R. A. Review paper on alternate materials for Asbestos brake pads and its characterization. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* **2015**, 2(2), pp. 556-562.
- [159] Manocha, L. M.; Prasad, G.; Manocha, S. Carbon-Ceramic Composites for Friction Applications. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* **2013**, 21(3), pp. 172–180.
- [160] Gupta, B.; Jashvantlal, A. Review of automotive brake friction materials”, *International Journal of Advance Engineering and Research Development* **2015**, 2(2), pp. 218-223.
- [161] Arman, M.; Singhal, S.; Chopra, P.; et al. A review on material and wear analysis of automotive Break Pad. *Materials Today: Proceedings* **2018**, 5(14), pp. 28305–28312.
- [162] Asotah, W.; Adeleke, A. Development of asbestos free brake pads using corn husks. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* **2017**, 16(31), pp. 129–144.
- [163] Olupona, J. A.; Abodunwa, J. A.; Fayoyin, F. K. Response of laying hens to graded levels of cocoa bean shells. *Proceeding of 28th Annual Conference Of Nigerian Society For Animal Production, Ibadan, Nigeria, 2003*, 28, pp. 247-249
- [164] Primaningtyas, W. E.; Sakura, R. R.; Suheni, Syafi'ie, I.; et al. Asbestos-free Brake Pad Using Composite Polymer Strengthened with Rice Husk Powder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **2019**, 462, 012015.
- [165] Idris, U. D.; Aigbodion, V. S.; Abubakar, I. J.; et al. Eco-friendly asbestos free brake-pad: Using banana peels. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences (JKSUES)* **2015**, 27(2), pp. 185–192.
- [166] Pujari, S.; Srikirana, S. Experimental investigations on wear properties of Palm kernel reinforced composites for brake pad applications. *Defence Technology* **2018**, 15(3), pp. 295-299.
- [167] Bretotean, C. P.; Craciun, A. L.; Josan, A.; et al. Experimental Study of Sintered Friction Material with Coconut Fiber for Brake Pads. *Materiale plastice* **2018**, 55(3), pp. 389–392.
- [168] Kholil, A.; Dwiayati, S. T.; Siregar, J. P.; et al. Development brake pad from composites of coconut fiber, wood powder and cow bone for electric motorcycle. *International journal of scientific & technology research* **2020**, 9(2), pp. 2938–2942.
- [169] Singaravelu, D. L.; Ragh, M. R.; Vijay, R. V.; et al. Development and performance evaluation of eco-friendly crab shell powder based brake pads for automotive applications. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* **2019**, 16(2), pp. 6502–6523.
- [170] Akıncioğlu, G.; Öktem, H.; Uygur, I.; et al. Determination of Friction-Wear Performance and Properties of Eco-Friendly Brake Pads Reinforced with Hazelnut Shell and Boron Dusts. *Arabian Journal for Science and Engineering* **2018**, 43(9), pp. 4727–4737.
- [171] Ademoh, N.; Adeyemi, O. Development and Evaluation of Maize Husks (Asbestos-Free) Based Brake Pad. *Industrial Engineering Letters* **2015**, 5(2), pp. 67-80.
- [172] Akıncioğlu, G.; Akıncioğlu, S.; Öktem, H.; et al. Wear response of non-asbestos brake pad composites reinforced with walnut shell dust. *Journal of the Australian Ceramic Society* **2020**, 56, pp. 1061-1072.

- [173] Olabisi, A.; Ademoh, N.; Boye, T. Development of asbestos-free automotive brake pad using ternary agro-waste fillers. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology* **2016**, 3(7), pp. 5307- 5323.
- [174] Lagel, M. C.; Hai, L.; Pizzi, A.; et al. Automotive brake pads made with a bioresin matrix. *Industrial Crops and Products* **2016**, 85, pp. 372–381.
- [175] Number of registered automobiles in California 2018 by type. Доступно на: <https://www.statista.com/statistics/196024/number-of-registered-automobiles-in-california/> (приступљено: 20.03.2023).
- [176] Electric Vehicles’ Day Will Come, and It Might Come Suddenly. Доступно на: <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2018-08-31/electric-vehicles-in-california-their-day-will-come-suddenly> (приступљено: 20.03.2023).
- [177] Motor vehicle brake friction. Доступно на: <https://dtsc.ca.gov/scp/brake-pad-legislation/#:~:text=On%20September%2027%2C%202010%2C%20Governor,certain%20heavy%20metals%2C%20and%20asbestos.> (приступљено: 20.04.2023).
- [178] Brake regulation. Доступно на: <https://dtsc.ca.gov/regs/hazardous-materials-motor-vehicle-brake-friction-materials/> (приступљено: 20.04.2023).
- [179] Better Brakes Law. Доступно на: <https://ecology.wa.gov/Waste-Toxics/Reducing-toxic-chemicals/Better-Brakes-law> (приступљено: 22.04.2023).
- [180] Chapter 70.285.010 RCW dispositions - brake friction material. Доступно на: <https://app.leg.wa.gov/RCW/default.aspx?cite=70.285.010> (приступљено: 22.04.2023).
- [181] Chapter 70.285.030 RCW dispositions - brake friction material. Доступно на: <https://app.leg.wa.gov/RCW/default.aspx?cite=70.285.030> (приступљено: 22.04.2023).
- [182] How to test brake friction materials and report results. Доступно на: <https://apps.leg.wa.gov/wac/default.aspx?cite=173-901-080> (приступљено: 22.04.2023).
- [183] Brake Rotors: The Six Different Types. Доступно на: <https://www.napatexas.com/single-post/2018/08/27/brake-rotors-the-six-different-types> (приступљено: 22.04.2023).
- [184] Carbon-ceramic discs. Доступно на: <https://www.brembo.com/en/car/original-equipment/products/carbon-ceramic-discs> (приступљено: 22.04.2023).
- [185] Carbon Ceramic Technology. Доступно на: <http://www.carbonceramicbrakes.com/en/technology/Pages/Technology.aspx> (приступљено: 22.04.2023).
- [186] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, B.; et al. Review of the coatings used for brake discs regarding their wear resistance and environmental effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **2022**, 236(10), pp. 1932–1949.
- [187] Gorjan, L.; Boretius, M.; Blugan, G.; et al. Ceramic protection plates brazed to aluminum brake discs. *Ceramics International* **2016**, 42, pp. 15739–15746.
- [188] Bosch subsidiary Buderus Guss introduces brake disc that generates up to 90% less brake dust. Доступно на: <https://www.greencarcongress.com/2017/11/20171121-bosch.html> (приступљено: 22.04.2023).
- [189] The Brake for Less Fine Dust New Euro 7 Pollution Rules. Доступно на: <https://www.laserline.com/en-int/the-brake-for-less-fine-dust/> (приступљено: 23.04.2023).
- [190] Elbriggmann, T. Hard like diamond. *Christophorus Porsche Magazine* **2017**; 384.
- [191] Rettig, M.; Grochowicz, J.; Käsgen, K.; et al. Carbide Brake Rotor Surface Coating Applied by High-Performance Laser-Cladding. Proceedings of EuroBrake 2020, conference, Barcelona, Spain, 16.- 19. june; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2020, EB2020-MDS-025.

- [192] Perricone, G.; Matějka, V.; Alemani, M.; et al. A concept for reducing PM10 emissions for car brakes by 50%. *Wear* **2018**, 396-397, pp. 135–145.
- [193] Fotovvati, B.; Namdari, N.; Dehghanghadikolaei, A. On Coating Techniques for Surface Protection: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* **2019**, 3(1), 28.
- [194] Göbel, M. Overview of Laser Metal Deposition Technology by TRUMPF – Applications, Trends and Products. Proceedings of International Conference on Additive Manufacturing - EMO, Hanover, Germany, 17., September; CECIMO: Brisel, Belgium, 2019.
- [195] Aranke, O.; Algenaid, W.; Awe, S.; et al. Coatings for automotive gray cast iron brake discs: A Review. *Coatings* **2019**, 9(9), 552.
- [196] Li, W.; Yang, X.; Wang, S.; et al. Research and prospect of ceramics for automotive disc-brakes. *Ceramics International* 2021, 47, pp. 10442-10463.
- [197] Hassan, M. H.; Abdullah. J. Drilling of fiber-reinforced composites: An innovative tool design. U *Hole-Making and Drilling Technology for Composites*, 1. edn.; Abdullah, A. B.; Sapuan, S. M., eds.; Woodhead Publishing: Sawston, United Kingdom, 2019, pp. 47-62.
- [198] Pero-Sanz Elorz, J. A.; Quintana Hernández, M. J.; Verdeja González, L. F. Equilibrium Transformations. U *Solidification and Solid-State Transformations of Metals and Alloys*, 1. edn.; Pero-Sanz Elorz, J. A., Quintana Hernández, M. J., Verdeja González, L. F., ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2017, pp. 209–254.
- [199] Kandeve-Ivanova, M.; Vencl, A.; Karastoyanov, D. *Advanced tribological coatings for heavy-duty applications*, 1. edn.; Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences: Sofia, Bulgaria, 2016.
- [200] Espallargas N. Introduction to thermal spray coatings. U *Future development of thermal spray coatings - types, designs, manufacture and applications*, 1. edn.; Espallargas N., ed.; Woodhead Publishing: Sawston, United Kingdom, 2015, pp. 1–13.
- [201] Kuroda, S.; Kawakita, J.; Watanabe, M.; et al. Warm spraying- a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles. *Science and Technology of Advanced Materials* **2008**, 9(3), 033002.
- [202] AlMangour, B. Fundamentals of Cold Spray Processing: Evolution and Future Perspectives. U *Cold-Spray Coatings: Recent Trends and Future perspectives*, 1. edn.; Cavaliere, P., ed.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018, pp. 3-24.
- [203] Ganvir, A. Design of suspension plasma sprayed thermal barrier coatings. PhD Thesis, University West, Trollhättan, Sweden, 2018.
- [204] Kılıç, H.; Mısırlı, C. Investigation of tribological behavior of 20NiCrBSi-WC12Co coated brake disc by HVOF method. *Materials Research Express* **2020**, 7, 016560.
- [205] Wahlström, J.; Lyu, Y.; Matjeka, V.; et al. A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions. *Wear* **2017**, 384-385, pp. 124–130.
- [206] Menapace, C.; Mancini, A.; Federici, M.; et al. Characterization of airborne wear debris produced by brake pads pressed against HVOF-coated discs. *Friction* **2020**, 8, pp. 421–432.
- [207] Dizdar, S.; Lyu, Y.; Lampa, C.; et al. U. Grey Cast Iron Brake Discs Laser Cladded with Nickel-Tungsten Carbide - Friction, Wear and Airborne Wear Particle Emission. *Atmosphere* **2020**, 11(6), 621.
- [208] iDisc - Brake disc that reduces brake dust and improves the air quality. Доступно на: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driving-safety-systems/idisc/> (приступљено: 25.05.2023).

- [209] iDisc - a key contribution toward improving our air quality. Доступно на: <https://www.bosch.com/research/know-how/success-stories/idisc-feature-rich-brake-disc-rotors-for-all-customers/> (приступљено: 25.05.2023).
- [210] iDisc – Innovation in a class of its own. Доступно на: <https://www.buderus-guss.de/en/brake-discs/idisc-brake-discs> (приступљено: 25.04.2023).
- [211] Hesse, D.; Hamatschek, C.; Augsburg, K.; et al. Testing of Alternative Disc Brakes and Friction Materials Regarding Brake Wear Particle Emissions and Temperature Behavior. *Atmosphere* **2021**, *12*(4), 436.
- [212] Olofsson, U.; Lyu, Y.; Åström, A. H.; et al. Laser Cladding Treatment for Refurbishing Disc Brake Rotors: Environmental and Tribological Analysis. *Tribology Letters* **2021**, *69*, 57.
- [213] Bortoleto, E. M.; Rovani, A. C.; Seriacopi, V.; et al. Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test. *Wear* **2013**, *301*(1-2), pp. 19–26.
- [214] Lyu, Y.; Wahlström, J.; Tu, M.; et al. A Friction, Wear and Emission Tribometer Study of Non-Asbestos Organic Pins Sliding Against AlSiC MMC Discs. *Tribology in Industry* **2018**, *40*(2), pp. 274-282.
- [215] Chandran M. Synthesis, Characterization, and Applications of Diamond Films. У *Carbon-based nanofillers and their rubber nanocomposites - carbon nano-objects*, 1. edn.; Srinivasarao, Y.; Raghvendra, M.; Sabu, T.; Nandakumar, K.; Hanna, M., eds.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2019, pp. 183–224.
- [216] McKeen, L. W. Introduction to the Tribology of Fluorocoatings. У *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook - The Definitive User's Guide*, 2. edn.; McKeen, L. W., ed.; William Andrew: Norwich, United Kingdom, 2016, pp. 277-297.
- [217] Kumara, S.; Panneerselvam K. Optimization of friction and wear of nylon 6 and glass fiber reinforced (gfr) nylon 6 composites against 30wt. % gfr nylon 6 disc. *Journal of Advanced Research in Materials Science* **2016**, *19*(1), pp. 14-32.
- [218] Bressan, J. D.; Daros, D. P.; Sokolowski, A.; et al. Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing. *Journal of Materials Processing Technology* **2008**, *205*(1-3), pp. 353–359.
- [219] Federici, M.; Alemani, M.; Menapace, C.; et al. A critical comparison of dynamometer data with pin-on-disc data for the same two friction material pairs - A case study. *Wear* **2019**, *424–425*, pp. 40-47.
- [220] Rahimi, M.; Bortoluzzi, D.; Wahlström, J. Input Parameters for Airborne Brake Wear Emission Simulations: A Comprehensive Review. *Atmosphere* **2021**, *12*(7), 871.
- [221] Varriale, F.; Carlevaris, D.; Wahlström, J.; et al. On the impact of pad material ingredients on particulate wear emissions from disc brakes. *Results in Engineering* **2023** *19*, 101397.
- [222] Duboka, Č.; Todorović J.; Arsenić, Ž. Application of an inertia dynamometer to check braking performance against theoretical predictions. Proceedings of 6th International Heavy Vehicle conference, Christchurch, New Zealand; IRTENZ: Christchurch, New Zealand, 1996, 11/96.
- [223] Милорадовић, Д. Испитивање моторних возила, 1. изд.; Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу: Крагујевац, Република Србија, 2021.
- [224] Winkler, A.; Amoroso, A.; Di Giosa, A.; et al. The effect of Covid-19 lockdown on airborne particulate matter in Rome, Italy: A magnetic point of view. *Environmental Pollution* **2021**, *291*(15), 118191.
- [225] Wahlström, J.; Söderberg, A.; Olander, L.; et al. A disc brake test stand for measurement of airborne wear particles. *Lubrication Science* **2009**, *21*(6), pp. 241–252.
- [226] Atzler, F.; Wiedensohler, A.; Roß, T.; et al. Roller dynamometer particle immission* measurement. *Automotive and Engine Technology* **2022**, *7*, pp. 15–26.

- [227] Grechkin, A. V.; Kotlyarenko, A. V.; Kutenev, V. F. Scientific problems in the field of research of non-exhaust particulate matter emissions formed during the movement of wheeled vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2021**, 867, 012088.
- [228] Triches, Jr M.; Gerges, S. N. Y.; Jordan R. Reduction of Squeal Noise from Disc Brake Systems Using Constrained Layer Damping. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **2004**, 26(3), pp. 340-348.
- [229] Dynamometer Simulation of Regenerative Braking (Part 2 of 4). Доступно на: <https://thebrakereport.com/dynamometer-simulation-of-regenerative-braking-part-2-of-4/> (приступљено: 12.05.2023).
- [230] Eggenschwiler, P. D.; Schreiber, D.; Habersatter, J. Brake Particle PN and PM Emissions of a Hybrid Light Duty Vehicle Measured on the Chassis Dynamometer. *Atmosphere* **2023**, 14(5), 784.
- [231] Mathissen, M.; Grigoratos, T.; Lahde, T.; et al. Brake Wear Particle Emissions of a Passenger Car Measured on a Chassis Dynamometer. *Atmosphere* **2019**, 10(9), 556.
- [232] Philippe, F.; Xiang, M.; Bressot, C.; et al. Relevance of pin-on-disc and inertia dynamometer bench experiments for braking emission studies. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* **2019**, 1323, 012025.
- [233] PMP Particle Measurement Programme Informal Working Group (PMP IWG). Non-exhaust traffic related particle emissions (brake and tyre/road wear). *GRPE-73-14*, 2016.
- [234] Wahlström, J.; Söderberg, A.; Olander, L.; et al. Airborne wear particles from passenger car disc brakes: A comparison of measurements from field tests, a disc brake assembly test stand, and a pin-on-disc machine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **2009**, 224(2), pp. 179–188.
- [235] Perzborn, N.; Agudelo, C.; Ostermeyer, G. On Similarities and Differences of Measurements on Inertia Dynamometer and Scale Testing Tribometer for Friction Coefficient Evaluation. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* **2015**, 8(1), pp. 104-117.
- [236] Thorpe, A.; Harrison, R. M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. *Science of The Total Environment* **2008**, 400(1-3), pp. 270–282.
- [237] Farwick zum Hagen, F. H.; Mathissen, M.; Grabiec, T.; et al. On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions. *Atmospheric Environment* **2019**, 217(19), 116943.
- [238] Abbasi, S.; Wahlström, J.; Olander, L.; et al. A study of airborne wear particles generated from organic railway brake pads and brake discs. *Wear* **2011**, 273(1), pp. 93–99.
- [239] Wahlström, J.; Olofsson, U. A field study of airborne particle emissions from automotive disc brakes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2014**, 229(6), pp. 747–757.
- [240] Riva, G.; Valota, G.; Perricone, G.; et al. An FEA approach to simulate disc brake wear and airborne particle emissions. *Tribology International* **2019**, 138, pp. 90-98.
- [241] Liu, Y.; Wu, S.; Chen, H.; et al. Brake wear induced PM10 emissions during the world harmonised light-duty vehicle test procedure-brake cycle. *Journal of Cleaner Production* **2022**, 361, 132278.
- [242] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, N.; et al. An overview of non-exhaust brake emission measuring methods. Proceedings of 15th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2021, Banja Luka, Republic of Srpska, 28. – 29. may; Borojević S., ed.; Faculty of Mechanical Engineering University of Banja Luka: Banja Luka, Republic of Srpska, 2021, pp. 339-348.

- [243] Perrenoud, A.; Gasser, M.; Rutishauser, B. R.; et al. Characterisation of nanoparticles resulting from different braking behaviours. *International Journal of Biomedical Nanoscience and Nanotechnology* **2010**, *1(1)*, pp. 17-33.
- [244] Riediker, M.; Gasser, M.; Perrenoud A.; et al. A system to test the toxicity of brake wear particles. Proceedings of 12th International ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, Switzerland, 23. – 25. june; Mayer, A., ed.; ETH Zurich: Zurich, Switzerland, 2008.
- [245] Model 6330 Brake Emissions Testing. Доступно на: <https://linkeng.de/product/model-6330-brake-emissions-testing/> (приступљено: 05.05. 2023).
- [246] New test benches in Gifhorn. Доступно на: <https://www.iav.com/en/news/brake-wear-particles-in-focus-new-test-benches-in-gifhorn/> (приступљено: 05.05.2023).
- [247] Iijima, A.; Sato, K.; Yano, K.; et al. Emission factor for antimony in brake abrasion dust as one of the major atmospheric antimony sources. *Environmental Science & Technology* **2008**, *42(8)*, pp. 2937–2942
- [248] Kukutschová, J.; Moravec, P.; Tomášek, V.; et al. On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes. *Environmental Pollution* **2011**, *159(8)*, pp. 998–1006.
- [249] Brake dust measurements-selection of the most suitable sampling method. Доступно на: <https://wiki.unece.org/download/attachments/42041609/PMP-43-13%20Brake%20dust%20measurement%20Horiba%20full.pdf?api=v2> (приступљено: 05.05.2023).
- [250] University of Leeds Enters the Arena of Brake Dust Collection and Analysis. Доступно на: <https://thebrakereport.com/university-of-leeds-enters-the-arena-of-brake-dust-collection-and-analysis/> (приступљено: 25.05.2023).
- [251] Niemann, H.; Winner, H.; Asbach, C.; et al. Influence of Disc Temperature on Ultrafine, Fine, and Coarse Particle Emissions of Passenger Car Disc Brakes with Organic and Inorganic Pad Binder Materials. *Atmosphere* **2020**, *11(10)*, pp. 1060.
- [252] Glišović, J.; Pešić, R.; Lukić, J.; et al. Airborne wear particles from automotive brake systems: environmental and health issues. Proceedings of 1. International Conference on Quality of Life, Kragujevac, Serbia, 09. – 10. june; Arsovski, S., Tadić, D., Stefanović, M., eds.; Faculty of Engineering University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia, 2016, pp. 289-296.
- [253] UN PMP Activities – Non-exhaust particles. Доступно на: https://a.storyblok.com/f/77802/x/24501b0bb8/cpm_hosier_2018_activities-of-the-un-pmp-particle-measurement-procedure-group-exhaust-and-non-exhaust-particle-emissions.pdf (приступљено: 25.05.2023).
- [254] Matějka, V.; Metinöz, I.; Wahlström, J.; et al. On the running-in of brake pads and discs for dyno bench tests. *Tribology International* **2017**, *115*, pp. 424–431.
- [255] Brake Wear Emissions - Status for the Introduction of "Non-Exhaust Regulations" and AVL Test & Engineering Solutions. Доступно на: <https://www.cert.ucr.edu/media/8711/download?attachment> (приступљено: 26.05.2023).
- [256] Wahlström, J.; Lyu, Y.; Matjeka, V.; et al. A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions. *Wear* **2017**, *384-385*, pp. 124–130.
- [257] Cueva, G.; Sinatora, A.; Guesser, W. L.; et al. Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors. *Wear* **2003**, *255(7-12)*, pp. 1256–1260.
- [258] Mirzababaei, S.; Filip, P. Impact of humidity on wear of automotive friction materials. *Wear* **2017**, *376-377*, pp. 717–726.

- [259] Barlow, T.J.; Latham, S.; McCrae, I.S.; et al. *A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions*, 3. vers.; Transport Research Laboratory (TRL Limited), Wokingham, United Kingdom, 2007.
- [260] Васиљевић, С.; Глишовић, Ј.; Лукић, Ј.; et al. Анализа радних параметара кочења при испитивању хабања кочница и настанка честица на инерцијалном кочном динамометру. *Техника* **2022**, 77(2), стр. 195-202.
- [261] Vasiljević S.; Glišović J.; Lukić J.; et al. 2022, Overview of tests and driving cycles conducted on an inertial brake dynamometer in the testing of particles formed during brake wear. Proceedings of EuroBrake 2022, Online conference, 17. – 19. may; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2022, EB2022-TSD-012.
- [262] Thermal regimes during proving ground measurements using WLTP-Brake cycle. Доступно на: <https://wiki.unece.org/download/attachments/73924923/PMP-48-04%20-%20Thermal%20Regimes%20During%20PG%20Using%20WLTP%20Cycle%2006NOV2018%20Public.pdf?api=v2> (приступљено: 26.05.2023).
- [263] Mathissen, M.; Grochowicz, J.; Schmidt, C.; et al. A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions. *Wear* **2018**, 414-415, pp. 219-226.
- [264] Grigoratos, T.; Agudelo, C.; Grochowicz, J.; et al. Statistical Assessment and Temperature Study from the Interlaboratory Application of the WLTP–Brake Cycle. *Atmosphere* **2020**, 11(12), 1309.
- [265] Particle Measurement Programme Informal Working Group (PMP IWG). Non-Exhaust Brake Emissions — Laboratory testing — Part 1: Inertia Dynamometer Protocol to Measure and Characterise Brake Emissions Using the WLTP-Brake Cycle. *GRPE-81-12*, 2020.
- [266] Liu, X.; Zhao, F.; Hao, H.; et al. From NEDC to WLTP: Effect on the Energy Consumption, NEV Credits, and Subsidies Policies of PHEV in the Chinese Market. *Sustainability* **2020** 12, pp. 5747.
- [267] WLTP: Нови стандарди за вредности потрошње. Доступно на: <https://www.volkswagen.rs/wltp/pregled-wltp-ciklusa> (приступљено: 13.10.2023).
- [268] Almirall, B. F.; Cabre, R. M. Study of the Chinese brake durability patterns and comparison with the main worldwide programmes. Proceedings of EuroBrake 2018, online conference, The Hague, Netherlands, 22. – 24. may; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2018, EB2018-VDT-020.
- [269] Woo, S. H.; Kim, Y.; Lee, S.; et al. Characteristics of brake wear particle (BWP) emissions under various test driving cycles. *Wear* **2021**, 480-481, 203936.
- [270] EPA Federal Test Procedure (FTP). Доступно на: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp> (приступљено: 26.05.2023).
- [271] Dynamometer Drive Schedules. Доступно на: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules> (приступљено: 27.05.2023).
- [272] Gomes, R. T.; Soares F. R. M.; Bergmann, P. C. The size effect of silicon carbide particles on the wear of brake pad materials. Proceedings of EuroBrake 2018, conference, Barcelona, Spain, 02. – 04. june; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2020, EB2020-FBR-024.
- [273] Perricone, G.; Alemani, M.; Metinöz, I.; et al. Towards the ranking of airborne particle emissions from car brakes – a system approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2016**, 231(6), pp. 781–797.
- [274] Alemani, M.; Perricone, G.; Olofsson, U.; et al. A proposed dyno bench test cycle to study particle emissions from disc brakes. Proceedings of EuroBrake 2014, conference, Lil, Francuska, 13. – 15. may; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2014, EB2014-SE-001.

- [275] Metinöz, I.; Matějka, V.; Alemani, M.; et al. A proposed dyno bench test cycle to study particle emissions from disc brakes. Proceedings of EuroBrake 2016, conference, Milan, Italy, 13. - 15. june; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2016, EB2016-MDS-010.
- [276] Gramstat, S.; Mertens, T.; Waninger, R.; et al. Functional Coatings of Gray-Cast Iron Brake Discs – Impact on the Tribology. U *Berichte aus dem μ -Club 2020 - Reports from the μ -Club 2020*, 1. edn.; Mayer, R., ed.; Springer Vieweg Berlin: Heidelberg, Germany, pp. 162-170.
- [277] Klaus, A.; Hasse, D. Comparative study of brake particle emissions. Proceedings of 11. Internationales AVL Forum Abgas- und Partikelemissionen, Ludwigsburg, Germany, 03 – 04. march; AVL, Bensheim, Germany, 2020.
- [278] SAE J2522, Dynamometer Global Brake Effectiveness, 2003
- [279] Japanese JE05 Cycle. Доступно на: https://dieselnet.com/standards/cycles/jp_je05.php (приступљено: 25.05.2023).
- [280] Perricone, G.; Alemani, M.; Wahlström, J.; et al. A proposed driving cycle for brake emissions investigation for test stand. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2020**, *234(1)*, pp. 122-135.
- [281] Wahlström, J.; Leonardi, M.; Tu, M.; et al. A Study of the Effect of Brake Pad Scorching on Tribology and Airborne Particle Emissions. *Atmosphere* **2020**, *11(5)*, 488.
- [282] What is los angeles city traffic test – how to test lact cycle. Доступно на: <https://www.tecsa-rd.it/en/losangeles-city-traffic-test-lact-cycle/> (приступљено: 27.05.2023).
- [283] Lowbrasys brake wear cycle - 3h LACT, Доступно на: <https://data.mendeley.com/datasets/4cgs6myx9d/1> (приступљено: 27.05.2023).
- [284] Mamakos, A.; Kolbeck, K.; Arndt, M.; et al. Particle Emissions and Disc Temperature Profiles from a Commercial Brake System Tested on a Dynamometer under Real-World Cycles. *Atmosphere* **2021**, *12*, 377.
- [285] Augsburg, K.; Sachse, H.; Krischok, S.; et al. Brake dust measurement. Proceedings of EuroBrake 2012, conference, Dresden, Germany, 16. - 18. april; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2012, EB2012-TM-13.
- [286] Młodzikowski, M.; Banach, D.; Orłowski, T. Wear of friction material in function of mechanical load and speed during real scale dynamometer tests. Proceedings of EuroBrake 2017, conference, Dresden, Germany, 02. - 04. may; FISITA, Stansted, United Kingdom. 2017, EB2017-SVM-011.
- [287] Gramstat, S.; Cserhati, A.; Lugovyy, D.; et al. Investigations of brake particle emissions – testing method, vehicle peculiarities and friction material influence. Proceedings of EuroBrake 2017, conference, Dresden, Germany, 02. - 04. may; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2017, EB2017-VDT-016.
- [288] Naotaka, N.; Toru, M. Moan noise generating mechanism and development of reduction technology. Proceedings of EuroBrake 2018, conference, The Hague, Netherlands, 22. - 24. may; FISITA, Stansted, United Kingdom. 2018, EB2018-BSY-002.
- [289] Sanuddin, A.; Kosarieh, S.; Gilkeson, C.; et al. Preliminary comparisons of particulate emissions generated from different disc brake rotors. Proceedings of EuroBrake 2020, conference, Barcelona, Spain, 21. - 23. may; FISITA, Stansted, United Kingdom. 2020, EB2021-STP-020.
- [290] Iijima, A.; Sato, K.; Yano, K.; et al. Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne particulate matter. *Atmospheric Environment* **2007**, *41(23)*, pp. 4908–4919.
- [291] Langhof, N.; Alber-Laukant, B.; Greuel, C.; et al. Fiber reinforced ceramic friction pads for automotive applications – the dependence of friction and wear on speed and braking

- pressure. Proceedings of EuroBrake 2012, conference, Dresden, Germany, 16. - 18. april; FISITA, Stansted, United Kingdom. 2012, EB2012-FM-06.
- [292] Economic Commission for Europe. Proposal for a new UN GTR on Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles, ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2023. Доступно на: <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+Web+Conference+23.11.2022> (приступљено: 20.10.2023).
- [293] JASO C470. Passenger car - Measurement Method for Brake Wear Particle Emissions. 2020.
- [294] Men, Z.; Zhang, X.; Peng, J.; et al. Determining factors and parameterization of brake wear particle emission. *Journal of Hazardous Materials* **2022**, *434*, 128856.
- [295] Paulus, A.; Kloda, M. Influence of Test Cycle and Energy Input on Brake Emissions. Proceedings of EuroBrake 2020, conference, Barcelona, Spain, 02. - 04. june; FISITA, Stansted, United Kingdom. 2020, EB2020-EBS-019.
- [296] Öztürk, B.; Arslan, F.; Öztürk, S. Effects of Different Kinds of Fibers on Mechanical and Tribological Properties of Brake Friction Materials. *Tribology Transactions* **2013**, *56(4)*, pp. 536–545.
- [297] Chen, J.; Xiong, X.; Yao, P. P.; et al. Effect of rubbed surface temperature on frictional behaviour of iron based P/M friction materials. *Powder Metallurgy Technology* **2004**, *22(4)*, pp. 223–227.
- [298] Alemani, M.; Wahlström, J.; Olofsson, U. On the influence of car brake system parameters on particulate matter emissions. *Wear* **2018**, *396-397*, pp. 67–74.
- [299] Alemani, M.; Nosko, O.; Metinoz, I.; et al. A Study on Emission of Airborne Wear Particles from Car Brake Friction Pairs. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* **2015**, *9(1)*, pp. 147-157.
- [300] Nosko, O.; Olofsson, U. Quantification of ultrafine airborne particulate matter generated by the wear of car brake materials. *Wear* **2017**, *374-375*, pp. 92–96.
- [301] Candeo, S.; Leonardi, M.; Gialanella, S.; et al. Influence of contact pressure and velocity on the brake behaviour and particulate matter emissions. *Wear* **2023**, *514–515*, 204579.
- [302] Gramstat, S.; Mertens, T.; Waninger, R.; et al. Impacts on Brake Particle Emission Testing. *Atmosphere* **2020**, *11(10)*, 1132.
- [303] Wahlström, J.; Matějka, V.; Lyua, Y.; et al. Contact Pressure and Sliding Velocity Maps of the Friction, Wear and Emission from a Low Metallic/Cast-Iron Disc Brake Contact Pair. *Tribology in Industry* **2017**, *39(4)*, pp. 460–470.
- [304] Olofsson, U.; Olander, L.; Jansson, A. A Study of Airborne Wear Particles Generated from a Sliding Contact. *Journal of Tribology* **2009**, *131(4)*, 044503.
- [305] Shorowordi, K.; Haseeb, A. S. M.; Celis, J. Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad. *Wear* **2004**, *256(11-12)*, pp. 1176–1181.
- [306] Non-exhaust emission sources. Доступно на: <https://www.envchemgroup.com/non-exhaust-emission-sources.html> (приступљено: 29.05.2023).
- [307] Han, X. M.; Gao, F.; Song, B. W.; et al. Effect of friction speed on friction and wear performance of Cu-matrix friction materials. *Tribology* **2009**, *29*, pp. 89–96.
- [308] Deng, H.; Li, K.; Li, H.; et al. Effect of brake pressure and brake speed on the tribological properties of carbon/carbon composites with different pyrocarbon textures. *Wear* **2010**, *270(1-2)*, pp. 95–103
- [309] Li, G.; Yan, Q.; Jianren, X.; et al. The Stability of the Coefficient of Friction and Wear Behavior of C/C–SiC. *Tribology Letters* **2015**, *58*, 13.

- [310] Songkitti, W.; Sa-ard-iam, S.; Plengsa-Ard, C.; et al. Effects of Payloads on Non-exhaust PM Emissions from A Hybrid Electric Vehicle during A Braking Sequence. *Aerosol and Air Quality Research* **2022**, *22*(7), 220150.
- [311] Songkitti, W.; Wirojsakunchai, E.; Aroonsrisopon, T. Identifying factors that affect brake wear PM emissions during real-world test conditions. *SAE Technical Paper* **2022**, 2022-01-0570
- [312] Ahmad, F.; Lo, S. H. J.; Aslam, M.; et al. Tribology Behaviour of Alumina Particles Reinforced Aluminium Matrix Composites and Brake Disc Materials. *Procedia Engineering* **2013**, *68*, pp. 674–680.
- [313] Oroumiyeh, F.; Zhu, Y. Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity. *Atmospheric Environment: X* **2021**, *12*, 100121.
- [314] Gawande, S. H.; Raibhole, V. N.; Banait, A. S. Study on Tribological Investigations of Alternative Automotive Brake Pad Materials. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* **2020**, *6*, 93.
- [315] Mamakos, A.; Arndt, M.; Hesse, D.; et al. Physical Characterization of Brake-Wear Particles in a PM10 Dilution Tunnel. *Atmosphere* **2019**, *10*(11), 639.
- [316] Bao, J.; Zhu, Z.; Tong, M.; et al. Influence of braking pressure on tribological performance of non-asbestos brake shoe for mine hoister during emergency braking. *Industrial Lubrication and Tribology* **2012**; *64*(4), pp. 230–236.
- [317] Yu, C.; Chen, J.; Zhang, Q.; et al. Research progress on friction and wear properties of powder metallurgy brake pad. *Advances in Mechanical Engineering* **2022**, *14*(12).
- [318] Paulus, A. Investigation of Brake Emissions of Different Brake Pad Materials with Regard to Particle Mass (PM) and Particle Number (PN). Proceedings of 38. Internationales μ -Symposium 2019 Bremsen-Fachtagung, Leverkusen, Germany, 25. october: Mayer, R. ed.; Springer Vieweg Berlin: Heidelberg, Germany, 2019, pp. 81–94.
- [319] Paulus, A.; Kloda, M. Influence of different Friction Materials on the Particle Size Distribution of Brake Emissions. Proceedings of EuroBrake 2020, conference, Barcelona, Spain, 02. – 04. june; FISITA, Stansted, United Kingdom. 2020, EB2020-EBS-018.
- [320] Wahlström, J.; Söderberg, A.; Olander, L.; et al. A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes. *Wear* **2010**, *268*(5), pp. 763–769.
- [321] Kukutschová, J.; Roubíček, V.; Mašláň, M.; et al. Wear performance and wear debris of semimetallic automotive brake materials. *Wear* **2010**, *268*(1), pp. 86–93.
- [322] Matějka, V.; Perricone, G.; Vlček, J.; et al. Airborne Wear Particle Emissions Produced during the Dyno Bench Tests with a Slag Containing Semi-Metallic Brake Pads. *Atmosphere* **2020**, *11*(11), 1220.
- [323] Lyu, Y.; Leonardi, M.; Wahlström, J.; et al. Friction, wear and airborne particle emission from Cu-free brake materials. *Tribology International* **2020**, *141*, 105959.
- [324] Barros, L. Y.; Poletto, J. C.; Neis, P. D.; et al. Influence of copper on automotive brake performance. *Wear* **2019**, *426-427 (deco A)*, pp. 741–749.
- [325] Macnaughta, M. Cast iron brake discs—a brief history of their development and metallurgy. *Foundryman* **1998**, *91*(10), pp. 321-324.
- [326] Agudelo, C.; Deacon, P.; Marschall, M.; et al. Systematic assessment of brake emissions during dynamometer tests. Proceedings of EuroBrake 2017, conference, Dresden, Germany, 02. – 04. may; FISITA, Stansted, United Kingdom, 2017, EB2017-VDT-026.
- [327] Ria, T.; Soib, M.; Kasir, R. Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development. U *Powder Metallurgy*, 1. edn.; Kondoh, K., ed.; IntechOpen: London, United Kingdom, 2012; pp. 1–32.
- [328] Joo, B. S.; Chang, Y.H.; Seo, H. J.; et al. Effects of binder resin on tribological properties and particle emission of brake linings. *Wear* **2019**, *434-435*, 202995.

- [329] Ma, X.; Fan, S.; Sun, H.; et al. Investigation on braking performance and wear mechanism of full-carbon/ceramic braking pairs. *Tribology International* **2019**, 142: 105981.
- [330] Li, G.; Yan, Q. Comparison of Friction and Wear Behavior Between C/C, C/C-SiC and Metallic Composite Materials. *Tribology Letters* **2015**, 60(1), 15.
- [331] Kwak, J.; Kim, H.; Lee, J.; et al. Characterization of non-exhaust coarse and fine particles from on-road driving and laboratory measurements. *Science of The Total Environment* **2013**, 458-460, pp. 273–282.
- [332] Ozcan, S.; Filip, P. Wear of carbon fiber reinforced carbon matrix composites: Study of abrasive, oxidative wear and influence of humidity. *Carbon* **2013**, 62, pp. 240–247.
- [333] Lyu, Y.; Bergseth, E.; Tu, M.; et al. Effect of humidity on the tribological behaviour and airborne particle emissions of railway brake block materials. *Tribology International* **2018**, 118, pp. 360–367.
- [334] Abdul Mokti, M.F.F.; Abdul Hamid, M.K.; Abu Bakar, A.R. Humidity and Water Effect on Wear Characteristics of Disc Braking System. *Applied Mechanics and Materials* **2016**, 819, pp. 612–617.
- [335] Djafri, M.; Bouchetara, M.; Busch, C.; et al. Effects of humidity and corrosion on the tribological behaviour of the brake disc materials. *Wear* **2014**, 321, pp. 8–15.
- [336] Blau, P. J.; McLaughlin, J. C. Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials. *Tribology International* **2003**, 36(10), pp. 709–715.
- [337] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, N.; et al. Review of European projects aiming at reduction of non-exhaust particles emission whose source is vehicle braking system. Proceedings of IX International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection 2019 (IIZS 2019), Zrenjanin, Serbia, 3. – 4. october, Technical Faculty Mihajlo Pupin University in Novi Sad: Zrenjanin, Serbia, 2019; pp. 496-503.
- [338] 50% Reduction of Brake Wear Particulate Matter. Доступно на: <https://cordis.europa.eu/project/id/324385> (приступљено: 29.05.2023).
- [339] Phase Rebrake. Доступно на: <https://cordis.europa.eu/project/id/324385/reporting> (приступљено: 15.04.2023).
- [340] CORDIS. Доступно на: <https://cordis.europa.eu/project/id/324385/results/es> (приступљено: 15.04.2023).
- [341] Lowbrasys - a LOW environmental impact BRAke SYStem. Доступно на: <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/road/lowbrasys> (приступљено: 12.05.2023).
- [342] Lowbrasys project mission. Доступно на: <https://cordis.europa.eu/project/id/636592> (приступљено: 12.05.2023).
- [343] Lowbrasys overview. Доступно на: <https://wiki.unece.org/download/attachments/29229228/PMP-39-06%2016-03-10%20PmP%20Meeting%20-%20LowBraSys%20Overview.pdf?api=v2> (приступљено: 12.05.2023).
- [344] a LOW environmental impact BRAke SYStem - participants. Доступно на: <https://trimis.ec.europa.eu/project/low-environmental-impact-brake-system> (приступљено: 22.05.2022).
- [345] Glišović, J.; Lukić, J.; Stojanović, B.; et al. Airborne wear particles from automotive brake systems in urban and rural areas. *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering* **2018**, 11(2), pp. 45-48.
- [346] The brakes of the future: the braking system of the future - Project Cobra. Доступно на: <https://www.bremboparts.com/europe/en/support/insights/the-brakes-of-the-future-the-braking-system-of-the-future-251319> (приступљено: 23.07.2023).

- [347] Стојановић Н. Идентификација термичких напрезања диск кочнице за различите радне параметре кочења. Докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, Република Србија, 2021.
- [348] Grujić, I.; Vasiljević, S.; Glisović, J.; et al. Simulation of vehicle's inertia using a flywheel mass to test disc brake system. U *New Technologies, Development and Application III*, 1 edn.; Karabegović, I. ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 360-367.
- [349] Muvdi, B. B.; Al-Khafaji, A. W.; McNabb, J. W. *Dynamics for engineers*, 1.edn.; Springer-Verlag: New York, United States of America, 1997.
- [350] Милосављевић, Д.; Вељовић, Љ.; Богдановић, Г. Механика 2, 1. изд.; Обрадовић, А.; Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу: Крагујевац, Република Србија, 2016.
- [351] Östergård, R. Flywheel energy storage a conceptual study. Conceptual study, Uppsala University, Uppsala, Sweden, 2011.
- [352] Павишић, М.; Голубовић, З.; Митровић, З. Механика Динамика система, 1. изд.; Обрадовић, А.; Машински факултет Универзитета у Београду: Београд, Република Србија, 2011.
- [353] Голубовић, З.; Симовић, М.; Митровић, З. *Механика Кинематика*, 2. изд.; Обрадовић, А.; Машински факултет Универзитета у Београду: Београд, Република Србија, 2015.
- [354] Xiang, M.; Morgeneuer, M.; Aguerre-Chariol, O.; et al. Airborne nanoparticle collection efficiency of a TEM grid-equipped sampling system. *Aerosol Science and Technology* **2021**, 55(5), pp. 526-538.
- [355] Vasiljević, S.; Taranović, D.; Lukić, J.; et al. Design of experimental research on influencing factors on the particle emission caused by brake wear. Proceedings of 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2023, Banja Luka, Republika Srpska, 01. – 03. june; Gvero, P., ed.; Mechanical Engineering University of Banja Luka: Banja Luka, Republic of Srpska, 2023, pp. 368-375.
- [356] Roy, K. R. *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*, 1 edn.; Wiley-Interscience, Hoboken, United States, 2001.
- [357] Krishnaiah, K.; Shahabudeen, P. *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*, 1 edn.; PHI, Delhi, India, 2012.
- [358] Bigot, S.; Valentinčić, J.; Blatnik, O.; et al. Micro EDM parameters optimisation. U *4M 2006 - Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, 1. edn.; Menz, W.; Dimov, S.; Fillon, B., ed.; Elsevier Science: Amsterdam, Netherlands, 2006, pp. 195–198.
- [359] Karazi, S. M.; Moradi, M.; Benyounis, K. Y. Statistical and Numerical Approaches for Modeling and Optimizing Laser Micromachining Process-Review. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1. edn.; Hashmi, S., ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2019.
- [360] Kowalczyk, M. Application of Taguchi method to optimization of surface roughness during precise turning of NiTi shape memory alloy. *Proceedings of SPIE 10445 Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, **2017**, 10445, pp. 104455G.
- [361] McIntosh, A. M.; Sharpe, M.; Lawrie, S. M. Research methods, statistics and evidence-based practice. In *Companion to Psychiatric Studies*, 8. edn.; Johnstone, C. E.; Owens, C. D.; Stephen M Lawrie, M. S.; McIntosh, M. A.; Michael D. Sharpe D. M., ed.; Churchill Livingstone: London, United Kingdom, 2010, pp. 157–198.

- [362] Rutherford, A. *ANOVA and ANCOVA: a GLM approach*, 2. edn.; John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey, United States of America, 2011.
- [363] Мутавчић, Б.; Николић-Ђорић, Е. *Статистика*, 1. изд.; Пољопривредни факултет Нови Сад Универзитет у Новом Саду: Нови Сад, Република Србија, 2018.
- [364] Hinkle, D.E.; Wiersma, W.; Jurs, S.G. *Statistics for the behavioral sciences: applying statistical concepts workbook*, 5. edn.; Houghton Mifflin: Boston, United States of America, 2003, pp. 154–196.
- [365] Moore, S. D.; Nots, I. W.; Fligner, A. M. *The basic practice of statistics*, 6. edn.; W. H. Freeman and Company: New York, United States of America, 2012, pp. 97-157.
- [366] Di Leo, G.; Sardanelli, F. Statistical significance: p value, 0.05 threshold, and applications to radiomics—reasons for a conservative approach. *European Radiology Experimental* **2020**, *4(1)*, 18.
- [367] Andrade, C. The P Value and Statistical Significance: Misunderstandings, Explanations, Challenges, and Alternatives. *Indian Journal of Psychological Medicine* **2019**, *41(3)*, pp. 210-215.
- [368] Јевремовић В.; Малишић Ј. *Статистике методе у метеорологији и инжењерству*, 1. изд.; Савезни хидрометролошки савез, Београд, Република Србија, 2002.
- [369] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, N.; et al. Application of neural networks in predictions of brake wear particulate matter emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2022**; *236(7)*, pp. 1579-1594.
- [370] Jäger, G. Replacing Rules by Neural Networks A Framework for Agent-Based Modelling. *Big Data and Cognitive Computing* **2019**, *3(4)*, pp. 51-61.
- [371] Ранковић, В. *Интелигентно управљање*, 1. изд.; Машински Факултет Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, Република Србија, 2008.
- [372] Миљковић, З.; Александрић, Д. *Вештачке неуронске мреже - збирка решених задатака са изводима из теорије*, 2. изд.; Машински Факултет Универзитета у Београду, Београд, Република Србија, 2019.
- [373] Sharma, S.; Sharma, S. Activation functions in neural networks. *Towards Data Science* **2017** *6(12)*, pp. 310–316.
- [374] Apicella, A.; Donnarumma, F.; Isgrò, F.; et al. A survey on modern trainable activation functions. *Neural Networks* **2021** *138*, pp. 14–32.
- [375] Qian, S.; Liu, H.; Liu, C.; et al. Adaptive activation functions in convolutional neural networks. *Neurocomputing* **2018** *272*, pp. 204–212.
- [376] Maleki, F.; Muthukrishnan, N.; Ovens, K.; et al. Machine Learning Algorithm Validation. *Neuroimaging Clinics of North America* **2020** *30(4)*, pp. 433–445.
- [377] Heaton research - the number of hidden layers. Доступно на: <https://www.heatonresearch.com/2017/06/01/hidden-layers.html> (приступљено: 15.07.2023)..
- [378] Schmidhuber, A. J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks* **2015**, *61*, pp. 85–117.
- [379] Радовић, М. Технике истраживања података и оптимизација математичких модела у биомедицинском инжењерингу. Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, Република Србија, 2015.
- [380] Wythoff, B. J. Backpropagation neural networks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **1993** *18(2)*, pp. 115–155.
- [381] Ye, Z.; Kim, M. K. Predicting electricity consumption in a building using an optimized back-propagation and Levenberg–Marquardt back-propagation neural network: Case study of a shopping mall in China. *Sustainable Cities and Society* **2018** *42*, pp. 176–183.

- [382] Alzubaidi, L.; Zhang, J.; Humaidi, A. J.; et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data* **2021**, *8*, pp. 53.
- [383] Levenberg-Marquardt backpropagation. Доступно на: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainlm.html> (приступљено: 17.07.2023).
- [384] Bayesian regularization backpropagation. Доступно на: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainbr.html> (приступљено: 17.07.2023).
- [385] Scaled conjugate gradient backpropagation. Доступно на: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainscg.html> (приступљено: 17.07.2023).
- [386] Vasiljević S., Glišović J., Lukić J., et al. Analysis of parameters influencing the formation of particles during the braking process: experimental approach. *Atmosphere* **2023** *14(11)*, 1618.
- [387] Wakeling D.; Murrells T.; Carslaw D.; et al. The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air. Report, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V: Berlin, Germany, 2017.
- [388] Vasiljević, S.; Glišović, J.; Stojanović, N.; et al. Systems and technologies for reducing the particle emission whose source is wear of the vehicle brakes. *Tractors and power machines* **2019**, *24(1/2)*, pp. 82-89.
- [389] Tallano Technology. Доступно на: <https://www.tallano-technologies.com/en/> (приступљено: 11.03.2023).
- [390] Gramstat, S. Technological Measures for Brake Wear Emission Reduction. Non-Exhaust Emissions. U *Non-Exhaust Emissions An Urban Air Quality Problem for Public Health; Impact and Mitigation Measures*, 1. edn.; Amato F., ed.; Academic Press: Cambridge, United States of America, 2018, pp. 205–227.
- [391] Cette start-up purifie l'air en agissant sur le freinage des métros et trains. Доступно на: <https://www.bfmtv.com/economie/cette-start-up-purifie-l-air-en-agissant-sur-le-freinage-des-metros-et-trains-1547909.html> (приступљено: 18.03.2023).
- [392] Aspirateur à poussières de freins. Доступно на: <https://www.aaaep.fr/blog-tests-psychotechniques/aspirateur-a-poussieres-de-freins-0223-2012/> (приступљено: 18.03.2023).
- [393] Pollution aux particules fines : un inventeur a trouvé la solution. Доступно на: <https://www.science-et-vie.com/nature-et-enviro/pollution-aux-particules-fines-un-inventeur-a-trouve-la-solution-19129> (приступљено: 18.03.2023).
- [394] Tallano technologies' mission. Доступно на: <https://www.tallano-technologies.com/en/public-health-and-air-quality/> (приступљено: 09.03.2023).
- [395] Images of CBPModule. Доступно на: <http://www.cleanbrakeperformance.com/index.html> (приступљено: 19.03.2023).
- [396] Particle collection module layout. Доступно на: <http://www.prweb.com/releases/2014/08/prweb12133939.htm> (приступљено: 19.03.2023).
- [397] CBPModule Disc Brake Dust Collection System. Доступно на: <https://contest.techbriefs.com/2013/entries/transportation-and-automotive/3602> (приступљено: 19.03.2023).

- [398] Clean Brake Performance. Доступно на: <https://contest.techbriefs.com/2016/entries/automotive-transportation/6977> (приступљено: 19.03.2023).
- [399] CBP Particle collection module. Доступно на: <http://www.cleanbrakeperformance.com/uploads/3/4/0/0/34008403/600-dpi-p1-flyer-ver4-final-8232016-1.jpg> (приступљено: 23.03.2023).
- [400] Mann + Hummel successfully tests brake dust particle filter. Доступно на: <https://www.mann-hummel.com/en/the-company/current-topics/press-releases/mann-hummel-successfully-tests-brake-dust-particle-filter/> (приступљено: 23.03.2023).
- [401] Particulate Filter for Emission Free Cars. Доступно на: <https://www.mann-hummel.com/en/the-company/current-topics/press-releases/the-brake-dust-particle-filter-from-mannhummel/> (приступљено: 23.03.2023).
- [402] Gebremster staub. Доступно на: <https://www.krafthand.de/artikel/gebremster-staub-33296/> (приступљено: 23.03.2023).
- [403] Particulate Filter for Emission Free Cars. Доступно на: <https://www.mann-hummel.com/en/research-and-development/innovations-and-creativity/filter-solution-for-the-brake/> (приступљено: 23.03.2023).
- [404] Khatavkar, D. O.; Bagadekar, A.; Parmar, D.; et al. Regenerative Braking System. *International journal of innovative research in engineering & multidisciplinary physical sciences* **2021** 9(4), 77-90.
- [405] Brake energy recuperation. Доступно на: <https://www.volkswagen.co.uk/en/electric-and-hybrid/sustainability/brake-energy-recuperation.html> (приступљено: 24.03.2023).
- [406] Qiu, C.; Wang, G.; Meng, M.; et al. A novel control strategy of regenerative braking system for electric vehicles under safety critical driving situations. *Energy* **2018**, 149, pp. 329–340.

БИОГРАФИЈА

Саша Ж. Васиљевић, рођен је 10.03.1993. године у Јагодини. Родом је из Јасенова код Деспотовца. Основну школу Стеван Синђелић у Великом Поповићу завршио је 2008. године. Техничку школу у Туприји завршио је 2012. године, где је проглашен за ђака генерације. Основне струковне студије уписао је на Високој техничкој школи струковних студија у Крагујевцу на студијском програму Друмски саобраћај. Завршио је 2015. године са просечном оценом 8,38 (осам и 38/100) и проглашен за најбољег студента студија на студијском програму Друмски саобраћај генерације 2012/2013. Основне академске студије уписао је 2015. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, на студијском програму Машинско инжењерство модул Друмски саобраћај. Завршио је 2016. године просечном оценом 8,43 (осам и 43/100).

Специјалистичке струковне студије уписао је 2015. године на Високој техничкој школи струковних студија у Крагујевцу, студијски програм Управљање друмским саобраћајем. Завршио је 2016. године са просечном оценом 9,00 (девет и 00/100).

Мастер академске студије уписао је 2016. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу на студијском програму Машинско инжењерство, модул Друмски саобраћај. Завршио је 2018. године са просечном оценом 9,00 (девет и 00/100).

Докторске академске студије уписао је 2018. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Предвиђене испите положио је просечном оценом 9,67 (девет и 67/100). Као аутор и коаутор се појављује на око 72 научних и стручних радова.

Од 01.11.2016 запослен је на Високој техничкој школи струковних студија Крагујевац (сада Академија струковних студија Шумадија, одсек Крагујевац), за ужу научну област Машинско инжењерство, као сарадник у настави. Од 01.11.2018. године биран - запослен је у звање асистента.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

**АНАЛИЗА УТИЦАЈНИХ ФАКТОРА НА ЕМИСИЈУ ЧЕСТИЦА НАСТАЛИХ
ХАБАЊЕМ КОЧНИЦА ВОЗИЛА**

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Крагујевцу, 06.11.2023. године,



потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

**АНАЛИЗА УТИЦАЈНИХ ФАКТОРА НА ЕМИСИЈУ ЧЕСТИЦА НАСТАЛИХ
ХАБАЊЕМ КОЧНИЦА ВОЗИЛА**

истоветне.

У Крагујевцу, 06.11.2023 године,



потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Саша Васиљевић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

**АНАЛИЗА УТИЦАЈНИХ ФАКТОРА НА ЕМИСИЈУ ЧЕСТИЦА НАСТАЛИХ
ХАБАЊЕМ КОЧНИЦА ВОЗИЛА**

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам²

² Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- ③ Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада³

У Крагујевцу, 06. 11. 2023 године,



потпис аутора

³ Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: [http://creativecommons.org/rs/](http://creativecommons.org.rs/)