

## Analiza radnih parametara kočenja pri ispitivanju habanja kočnica i nastanka čestica na inercijalnom kočnom dinamometru

SASA Ž. VASILJEVIĆ, Akademija strukovnih studija Šumadija  
Odsek Kragujevac, Kragujevac  
JASNA D. GLIŠOVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,  
Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac  
JOVANKA K. LUKIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,  
Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac  
NADICA R. STOJANOVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,  
Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac  
IVAN LJ. GRUJIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,  
Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

*Pregledni rad*  
UDC: 504.5:629.331  
629.3-592  
DOI: 10.5937/tehnika2202195V

*Paralelno sa značajnim smanjenjem uticaja vozila na životnu sredinu, ostvarenim razvojem savremenih pogonskih sistema koji imaju sve manje štetnog uticaja, dolazi do identifikacije novih zagađivača na vozilu. Jedan od takvih zagađivača su kočnice, koje habanjem dovode do stvaranja čestica koje se oslobađaju u vazduh tj. generalno u životnu sredinu. Ispitivanje mehanizama nastanka čestica pri kočenju, pa samim tim i habanja kočnica, danas postaje jedan od značajnih oblasti istraživanja. Najčešća se ispitivanja u ovoj oblasti vrše primenom inercijalnih kočnih dinamometara i pin-on-disc mašina. U ovom radu izvršen je pregled uticaja nekih od radnih parametara (početna brzina vozila, pritisak kočenja, i usporenje) koji se najčešće variraju prilikom ispitivanja na inercijalnom kočnom dinamometru. Postoji niz testova i ciklusa koji se primenjuju prilikom istraživanja kočnica, ali koji nisu konkretno definisani za ispitivanja nastanka čestica pri kočenju. UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) je uvrstila u svoj plan i u fazi razvoja je uvođenje standardizovanih ciklusa kojima će biti propisan kočni ciklus čija namena će upravo biti ispitivanje nastanka čestica. Ovakav pregledni rad može biti od značaja za istraživače, koji se bave ovom oblašću i razvijaju sopstvene cikluse ili testove za ispitivanje koncentracije ili mase nastalih čestica prilikom kočenja.*

**Ključne reči:** testovi, kočenje, inercijalni, dinamometar, čestice

### 1. UVOD

Emisija štetnih materijala je jedan od najvećih ekoloških problema sa kojima se savremeno čovečanstvo susreće [1]. Veliki broj zagađivača je identifikovan, pa se tako najčešće vezuju za industriju, saobraćaj, domaćinstva, itd. Takođe, pored zagađivača, važne su i materije koje se oslobađaju i koje identifikujemo kao zagađujuće materije. Jedan od takvih materijala jesu i čestice, koje se oslobađaju u vazduh,

a time i u životnu sredinu [2]. Čestice su možda jedan od najdominantnijih zagađivača vazduha. Štetnost čestica se izražava kroz više parametara, ali najčešće se u obzir uzima njihova veličina i sastav čestica, koje zavise od samog izvora [3].

Kada je u pitanju saobraćaj, dominantan izvor čestica jesu vozila [4]. Pored drugih štetnih materijala vozilo može emitovati čestice sagorevanjem u motoru i habanjem određenih elemenata (tzv. non-exhaust emisija čestica) [5]. Danas kada postoje različiti sistemi za prečišćavanje izduvnih gasova od motora, stroge euro norme za emisiju i intenzivan razvoj vozila na hibridni i elektro pogon, identifikovani su drugi izvori čestica. Upravo jedan od tih izvora su i kočnice, koje emituju čestice koje nastaju habanjem frikcionih parova prilikom kočenja [6]. Imajući u vidu različita istraživanja kojima se došlo do rezultata da je ovo

---

Adresa autora: Saša Vasiljević, Akademija strukovnih studija Šumadija – Odsek Kragujevac, Kragujevac, Kosovska 8

e-mail: vasiljevic.sasa036@gmail.com

Rad primljen: 17.01.2022.

Rad prihvaćen: 18.03.2022.

jedan od značajnih problema zagađenja životne sredine, postoje određeni potencijal i mogućnosti za uvođenje zakonske regulative i standarda za smanjenje emisije čestica koja nastaje habanjem kočnica [7].

Habanje kočnica se najčešće ispituje primenom računarskih simulacija, laboratorijskim istraživanjima na inercijalnom kočnom dinamometru, pin-on-disc tribometra i realnim putnim ispitivanjima [8]. Međutim, problem u ispitivanjima kočnica je taj što se još uvek nisu definisani standardni, odnosno vozni ciklusi i testovi za ispitivanje kočnica u pogledu nastanka čestica pri kočenju. Veliki broj autora u istraživanjima koriste vozne cikluse koji su propisani za ispitivanje u automobilske industriji, ali u drugim oblastima. Često istraživači identifikuju nastanak čestica pri kočenju primenom sopstveno razvijenih testova. Međutim postoje indicije od strane UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) da će doći do propisivanja voznog ciklusa ili testova za ovu oblast [9].

Cilj ovog rada jeste pregled voznih ciklusa i testova koji su primenjeni u ispitivanjima kočnica sa aspekta habanja i nastanka čestica, samo na inercijalnom kočnom dinamometru. Ovakav pregled može biti značajan za istraživače u oblasti triboloških karakteristika kočnica i nastanka čestica, koji na osnovu ovog pregleda mogu razvijati svoje testove.

## 2. INERCIJALNI KOČNI DINAMOMETRI I VRSTE VOZNIH CIKLUSA (TESTOVA)

Inercijalni kočni dinamometri predstavljaju jedan od najčešće primenjenih uređaja za ispitivanje kočnica. Prednost inercijalnih kočnih dinamometara je što se na uređaju koriste kočnice koje se koriste i na vozilima, tako da se u laboratorijskim uslovima mogu ispitivati stvarne kočnice u kontrolisanim uslovima. Ovakva ispitivanja spadaju u grupu ispitivanja koja su najpribližnija stvarnom procesu kočenja na vozilu. Na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu je razvijen inercijalni kočni dinamometar (BrakeDyno 2020). U cilju simuliranja kinetičke energije jedne četvrtine vozila primenjuje se zamajna masa koja je pogonjena preko elektromotora, a na kraju vratila se nalazi sam rotor tj. disk kočnice. Promena broja obrtaja zamajne mase omogućava izbor vrednosti kinetičke energije, pa se na taj način ostvaruje promena simulirane početne brzine kočenja i opterećenja jedne četvrtine vozila prema matematičkom modelu prikazanom u Grujić i dr. [10]. Aktiviranje kočnice se vrši primenom pneumatskih i hidrauličkih mehanizama. Celokupnim procesom kočenja, početnom brzinom, pritiskom i opterećenjem jedne četvrtine vozila se upravlja elektronskim putem. BrakeDyno 2020 sadrži niz davača preko kojih se mogu pratiti različite izlazne veličine (temperatura kočnih pločica, kočni moment, vreme kočenja, ...) [11]. Imajući u vidu da je inercijalni

dinamometar razvijen tako da se mogu vršiti adaptacije za različita merenja i istraživanja, na slici 1 je prikazan izgled BrakeDyno 2020 koji je modifikovan u cilju merenja koncentracije čestica koje nastaju habanjem frikcionih parova kočnica.



Slika 1 – BrakeDyno 2020 u procesu adaptacije za mogućnost merenja čestica

Ispitivanja kočnica koja su izvršena prema kočnim ciklusima na dinamometru predstavljaju jedan vid simulacije kretanja vozila u određenim voznim uslovima. Tako se u laboratorijskim uslovima ostvaruje kretanje vozila različitim brzinama i realizuje proces kočenja po unapred definisanom redosledu, u određenim vremenskim intervalima i pod određenim kočnim parametrima. Kočnim ciklusima se simulira kretanje vozila u gradskim ili van gradskim uslovima, što omogućava analizu u određenim i definisanim uslovima, pa se mogu izvršiti uporedne analize. Imajući u vidu da ne postoje standardom definisani kočni ciklusi za analizu nastanka čestica prilikom kočenja, različiti autori koriste vozne cikluse koji se koriste za analizu habanja kočnica ili neki drugi kočni ciklus koji se koristi u istraživanjima na motornim vozilima, a koji imaju u ovom slučaju cilj ispitivanje kočnice i nastanka čestica.

Sa druge strane, u određenom broju istraživanja se ne primenjuju neki od propisanih voznih ciklusa, bilo za koju oblast istraživanja. U ovom slučaju autori istraživanja na osnovu sopstvenih iskustava ili iskustva nekog od autora, sami definišu i biraju načine izvođenja testova. Prethodno rečeno se odnosi na formiranje sopstvenih testova, u smislu odabira parametara kočenja (npr. simulirane brzine, pritiska kočenja, početne temperature, usporenja, ...).

## 3. PRIMENJENI VOZNI CIKLUSI/TESTOVI U ISTRAŽIVANJIMA NASTANKA ČESTICA

U istraživanju [12] je primenjen vozni ciklus koji se koristi za ispitivanje emisije izduvnih gasova, a treba napomenuti da je istraživanje urađeno prema japanskim voznim ciklusima JC05 i JE08. Vozni ciklus JC05 se primenjuje za ispitivanje emisije gasova

putničkih vozila, dok se vozni ciklus JC08 koristi za emisiju gasova teretnih vozila na dizel pogon, pri čemu su oba ciklusa vezana za urbane testove. To je razlog što ovi testovi obuhvataju veći broj kočenja i ubrzavanja.

Maksimalne brzine koje su simulirane u ovom slučaju su 81,6 km/h za JC08 i 87,6 km/h za JE05. Prema [13], prosečna brzina za vozni ciklus JE05 je 26,94 km/h, a trajanje jednog ciklusa iznosi 1800 s. U istraživanju je za JS08 trajanje testa bilo 1230 s. Vršeno je ispitivanje za dve kočnice putničkih vozila i jedne za lako teretno vozilo, pa je ukupno sprovedeno pedeset merenja po jednoj kočnici.

Kada su u pitanju motorna vozila, svakako je bitno spomenuti i dva testa koji se takođe primenjuju u automobilskom svetu, a koji mogu biti značajan pokazatelj za parametre kočenja. Pomenuta dva testa su WLTP (eng. Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) i NEDC (eng. The New European Driving Cycle) [14]. NEDC test se izvodi tako da je maksimalna brzina varirana do maksimalno 120 km/h, dok prosečna brzina iznosi 34 km/h, maksimalno usporenje 1,04 m/s<sup>2</sup>, dok je prosečno usporenje 0,5 m/s<sup>2</sup>. U slučaju WLTP testa maksimalna brzina iznosi 131 km/h (56,5 km/h, 76,6 km/h, 97,4 km/h i 131,3 km/h). U ovom slučaju maksimalno usporenje iznosi 1,58 m/s<sup>2</sup>, dok je prosečno usporenje 0,39 m/s<sup>2</sup> [14].

Na osnovu [15, 16] jedan od kočnih ciklusa koji je primenjen za analizu habanja kočnica i analizu nastalih čestica je WLTP-Brake test driving cycle (eng. Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure). Ovakav ciklus ispitivanja traje šest časova i obuhvata ukupno 310 kočenja (prema [17] 303 kočenja), u kojima je varirana brzina kretanja vozila, odnosno simulirana brzina i usporenje. Brzina je varirana od 40 km/h do 130 km/h, dok je usporenje u ovom slučaju varirano od 0,5 m/s<sup>2</sup> do 2 m/s<sup>2</sup>.

I u istraživanju [18] primenjen je test WLTP, s tim da je prema ovoj referenci prosečno usporenje 0,9 m/s<sup>2</sup> odnosno maksimalno usporenje iznosi 2,2 m/s<sup>2</sup>, prosečna brzina iznosi 42 km/h dok je maksimalna brzina 132 km/h, a izvedeno je 303 kočenja. Kada je reč o početnoj temperaturi kočenja, za prvi ciklus kočenja, temperatura je ambijentalna temperatura okoline, a za ostale cikluse kočenja, početna srednja vrednost inicijalne temperature kočenja iznosi 40°C.

U istraživanju [19] primenjen je kočni ciklus u kome su varirani brzina i kočni moment, tako da je izvršena kombinacija ovih parametara, odnosno izvršene su četiri različite operacije. Varijacija brzine je bila takva da su primenjene četiri različite vrednosti i to 50 km/h, 74 km/h, 98 km/h i 123 km/h, dok je kočni moment bio u intervalu od 1120 Nm (za brzinu od 50

km/h), 753 Nm, 568 Nm i 455 Nm (za brzinu od 123 km/h). Izvršeno je ukupno 350 kočenja.

Perricone i dr. [20] je u svom testu koristio takođe kočne cikluse gde je izvršeno variranje parametara i to početne brzine, usporenja i početne temperature. Ceo test je podeljen u nekoliko faza i svaka od faza (ciklusa kočenja) je imala u prikazanom istraživanju po nekoliko ponavljanja. U tabeli 1 su prikazani parametri procesa kočenja po seriji kočenja. Svaka faza u ovom ciklusu je u osnovi trebala da simulira neke određene putne uslove i kategorije puta. Definisane su početna brzina ( $v_p$ ), krajnja brzina ( $v_k$ ), početna temperatura ( $t_p$ ), usporenje ( $a$ ) i broj kočenja ( $n$ ).

Tabela 1. Varirani parametri uslovi u kočnom ciklusu [20]

	$v_p$ km/h	$v_k$ km/h	$t_p$ °C	$a$	$n$
Uhodavanje	50	4	100	0,25g	100
Test urbanih puteva 1	50	4	150	0,25g	20
Test ruralnih puteva 1	80	4	200	0,35g	20
Test ruralnih puteva 2	100	4	125	0,4g	20
Test urbanih puteva 2	50	4	150	0,25g	20
Test ruralnih puteva 3	100	4	125	0,4g	20

Još jedan od ciklusa koji je primenjen za ispitivanje emisije čestica od strane Woo i dr. [8] je FTP-75 (eng. Federal Test Procedure). Bitno je napomenuti da je ovo jedan od testova koji se sprovodi u Sjedinjenim Američkim Državama. Na osnovu [21] došlo se do podataka da srednja brzina iznosi 34,12 km/h, dužina simuliranog putovanja iznosi 17,77 km, a dužina trajanja iznosi 1877 s, dok se na osnovu [22] može zaključiti da je maksimalna brzina iznosila 91,25 km/h. Neke od vrednosti brzine koje se variraju su 36,86 km/h, 49,57 km/h, 51,82 km/h, 76,44 km/h i 91,25 km/h.

U istraživanju [23] je prikazan još jedan od ciklusa koji se može primeniti za ispitivanje nastanka čestica koje nastaju habanjem kočnica, a to je 3h-LACT (eng. Los Angeles City Traffic). Ovo je jedan od testova namenjenih za vozila sa američkog tržišta [24]. Na osnovu [25], vidi se da je u LOWBRASYS (eng. a LOW environmental impact BRAke SYStem) projektu primenjena skraćena verzija ovog testa. Maksimalna brzina koja se postiže na ovom testu je 154,33 km/h, minimalna vrednost je 16,90 km/h, dok je srednja vrednost brzine 53,79 km/h. Prilikom testa izvršeno je 217 kočenja, a pritisak u kočnom sistemu je bio 15 bar [26].

Sanders i dr. [27], su primenili dva različita testa i to Urbani dinamometrijski program (eng. Urban Dynamometer Program (UDP)) i test koji je simulacija kočenja prema Auto Motor und Sport magazine (AMS). U slučaju UDP varirane su simulirane početne brzine, usporenje i početna brzina kočenja. Brzine su simulirane u opsegu od 37 km/h do 89 km/h. Usporenja je u ovom slučaju varirano u granicama od 0,6 m/s<sup>2</sup> do 1,6 m/s<sup>2</sup>. Početna temperatura je zavisila od toga za koje je vozilo istraživanje sprovedeno, ali za putnička vozila je iznosila od 54°C do 177°C. Bilo je tačno 24 različite varijante parametara, a svaki test je ponovljen 41 put. AMS test je bio sačinjen od ukupno 10 ponavljanja kočenja usporenjem od 0,8 g od početne brzine vozila od 100 km/h, test je bio ponovljen 3 puta, odnosno izvršeno je ukupno 30 kočenja.

U istraživanju [28] primenjen je kočni ciklus se bazira na standardu SAE J2707 metod B, koji se koristi u automobilske industriji za procenu habanja frikcionih parova sistema za kočenje i poznat je kao Block Wear Evaluation. Početne brzine koje su primenjene u ovom slučaju su 50 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 150 km/h i 180 km/h, a takođe je varirano i usporenje. Broj kočenja varira u zavisnosti od sekcije kočenja, ali su uglavnom to 5, 10, 20 i 50 kočenja. U ovom slučaju je izvršena polovina kočenja (zaustavljanja) koji su propisani standardom SAE J2707 za uhođavanje frikcionih parova. Takođe je slična metodologija primenjena i u istraživanju [29], gde je primenjen isti test samo skraćena verzija istog.

U istraživanju autora Almirall i Cabre [30] izvršena je uporedna analiza različitih voznih testova koji se koriste širom sveta, poput onih koji se izvode na testovima u Kini, Evropi i Sjedinjenim Američkim Državama. Testovi koji se koriste u Kini su Yellow Mountain i Shanghai, kao Evropski testovi su prikazani Mojacar i Barcelona, dok je kao test u Sjedinjenim Američkim Državama korišćen test Los Angeles. Minimalne i maksimalne brzine voznih ciklusa variraju, ali minimalna brzina u poređenju svih testova je 20 km/h, dok je maksimalna brzina 120 km/h, ali u zavisnosti od testa te vrednosti se razlikuju. Prosečne brzine po testu su: Yellow Mountain-42 km/h, Shanghai-42 km/h, Mojacar-61 km/h, Barcelona-39 km/h, Los Angeles-39 km/h. Takođe se može uočiti da se vrednosti usporenja kreću u intervalu od 0,5 m/s<sup>2</sup> do 4 m/s<sup>2</sup>.

Analizom istraživanja [31, 32] uočeno je da su u ispitivanjima habanja kočnica i nastanka čestica koristili tzv. AK-Master test koji se inače sprovodi pod standardom SAE J2522 [33]. Na osnovu referenci [31-33] uočeno je da se prilikom testa mogu sprovesti različiti testovi koji su propisani standardom, ali pri analizi nastalih čestica se najčešće sprovode testovi brzina/pritisak i to serije od 6.4.1 do 6.4.5 gde se

variraju inicijalne brzine, krajnje brzine i pritisci u kočnom sistemu. U tabeli 2, prema prethodno navedenim referencama, prikazane su vrednosti parametara brzina, dok je za svaki test u referenci [32] variran pritisak (P<sub>k</sub>) od 10 do 80 bar.

Tabela 2. Primenjene vrednosti pritiska i brzine prema AK-Master [31-33]

	v <sub>p</sub> km/h	v <sub>k</sub> km/h	P <sub>k</sub> 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	

Takođe jedan od testova koji se sprovode, a van je kočnih ciklusa, je i Evropska direktiva za ispitivanje kočnica. Ova Direktiva [34] nije konkretno vezana za habanje kočnica, ali jeste vezana za ispitivanje kočnica, odnosno konkretno zamenskih disk kočnica i elemenata. Prema izvoru [34] ovi testovi se izvode na osnovu promene parametara kočenja i primenjuje se za vozila kategorije M<sub>1</sub> i M<sub>2</sub>. Prema ECE R90 propisano je koju opremu mora imati inercijalni kočni dinamometar. Definisana su dva testa i to variranje pritiska i početne temperature. U prvom testu varirani su kočni pritisci u opsegu od 1,5 MPa do 5,1 MPa, pri početnoj brzini od 80 km/h, dok je krajnja brzina 30 km/h. Propisano je 32 ponavljanja. U slučaju drugog testa, početne temperature su u granicama od 100°C do 483°C. Početna brzina iznosi 100 km/h, dok je krajnja 5 km/h. Pritisak uvek iznosi 16 MPa.

#### 4. KOČNI TESTOVI RAZVIJENI OD STRANE ISTRAŽIVAČA

U istraživanju [35] kočnica vozila sa inercijom od 50 kg·m<sup>2</sup> sproveden je test u 5 ciklusa od 500 kočenja pri brzinama od početne 60 km/h do zaustavljanja. Kočenje je izvedeno uz konstantno usporenje od 2 m/s<sup>2</sup>. Svaki ciklus ima konstantnu temperaturu na početka kočenja, prvi na 100°C, drugi na 200°C, treći na 300°C, četvrti na 400°C i peti ponovo na 100°C. Svrha ponavljanja ciklusa na 100°C je da se proveriti da li se habanje ponavlja istim intenzitetom čak i nakon izlaganja visokim temperaturama.

Na osnovu kočnog ciklusa [36] koji predstavlja predloženi test koji je formiran na osnovu kočnog ciklusa tokom putnih ispitivanja, je detaljno prikazan u [37]. Za naša istraživanja zanimljiva je vrednost usporenje u ovom testu koje se menja od 0,16 m/s<sup>2</sup> do 0,31 m/s<sup>2</sup> a u zavisnosti od početnih brzina koje su imale vrednosti 36 km/h, 52 km/h, 57 km/h, 70 km/h i 79 km/h.

U istraživanju koje je vršio Hagino i dr. [38] je izvršena analiza koncentracije čestica koje nastaju

habanjem kočnica, ali i čestica koje se oslobađaju ponovnim ubrzavanjem vozila. U odnosu na istraživanje [12] u ovom slučaju nije primenjen kočni ciklus, već su varirani samo određeni parametri kočenja. Kao i u prethodnom istraživanju korišćene su dve kočnice putničkih vozila i jedna za lako teretno vozilo. U ovom slučaju varirane su brzine kretanja vozila, odnosno simulirane brzine na inercijalnom kočnom dinamometru i usporenja. Tako su u ovom slučaju brzine imale vrednosti od 20 km/h, 40 km/h, i 60 km/h, dok su usporenja bila  $0,5 \text{ m/s}^2$ ,  $1,0 \text{ m/s}^2$ ,  $1,5 \text{ m/s}^2$  i  $3,0 \text{ m/s}^2$ . Usporenje od  $3,0 \text{ m/s}^2$  nije primenjeno za teretno vozilo zbog opterećenja. Merenja su vršena za čestice  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2,5}$ .

Iijima i dr. [39] su u svom istraživanju nastanka čestica habanjem kočnica varirali usporenje i brzinu. Treba imati u vidu da su u istraživanju ispitivali više kočnih pločica, dok se broj varijacija parametara razlikovao u zavisnosti od kočne pločice. Takođe se razlikovao i broj kočenja pri određenim parametrima. Simulirane brzine su bile 40 km/h, 50 km/h i 60 km/h, dok su primenjena usporenja  $1,0 \text{ m/s}^2$ ,  $2,0 \text{ m/s}^2$  i  $3,0 \text{ m/s}^2$ . U drugom istraživanju Iijima i dr. [40] su ispitivana habanja kočnica na brzinama 50 km/h i 60 km/h, dok je usporenje u ovom slučaju uvek bilo  $3,0 \text{ m/s}^2$ .

U istraživanju emisije koje nastaje habanjem kočnica prilikom kočenja [41] variran je pritisak u sistemu za kočenje i simulirana brzina vozila. Varirane brzine su iznosile 80 km/h i 100 km/h. Pritisaci koji su primenjeni u ovom slučaju su bili 5 bar i 10 bar. Za brzinu od 100 km/h su varirane obe vrednosti pritiska, dok je za brzinu od 80 km/h primenjen samo pritisak od 10 bar.

U istraživanju [42] su prikazani rezultati dva testa u kojima su varirani kontaktni pritisak između kontaktnih površina frikcionih parova i brzina. Prilikom testa promene brzina, pritisak između frikcionih parova je uvek bio  $2,44 \text{ N/mm}^2$  (24,4 bar), dok su varirane vrednosti brzine iznosile 19,8 km/h (136 kočenja), 62,6 km/h (44 kočenja) i 153,4 km/h (18 kočenja). U slučaju variranja pritiska između frikcionih parova, brzina diska je uvek iznosila 62,6 km/h, dok su vrednosti pritiska iznosila  $0,54 \text{ N/mm}^2$  (5,4 bar) i  $2,44 \text{ N/mm}^2$  (24,4 bar), a izvršeno je ukupno 44 kočenja.

U istraživanju [43] varirani su pritisak u sistemu za kočenje i simulirana brzina kočenja. Test se sastoji od različitih blokova koji odlikuju različiti brojevi aktiviranja kočnica (200 do 1000), iste početne temperature ( $150^\circ\text{C}$ ), različite vrednosti pritiska (10 bar do 50 bar) i različite startne brzine (60 km/h do 180 km/h). Konačna brzina je podešena kako bi se osigurala slična kinetička energija pri svakom kočenju. Vrednosti pritiska varirane su tako da su imale vrednosti 10 bar, 20

bar, 30 bar, 40 bar i 50 bar. Kada je reč o variranju kočnog pritiska, u istraživanju [44] varirane su vrednosti pritiska od 10 do 80 bara, odnosno vrednosti 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 60 bar, 70 bar i 80 bar. Prilikom analize buke koja nastaje kočenjem uzete se vrednosti pritiska od 0,25 MPa (2,5 bar), 0,50 MPa, 1 MPa i 1,5 MPa (15 bar) [45]. U istraživanju [46] variran je takođe pritisak u sistemu za kočenje, dok je brzina okretanja diska kočnice uvek bila 135 obrtaja u minuti, varirani pritisak u hidrauličnoj instalaciji je iznosio 5 bar, 10 bar i 15 bar.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih istraživanja koja proučavaju čestice koje nastaju habanjem kočnica, a koja su vršene na inercijalnom kočnom dinamometru, može se zaključiti sledeće:

Još uvek nije tačno propisan ili razvijen test/voznik ciklus/standard koji je namenjen za istraživanje nastanka čestica habanjem frikcionih parova.

Većina istraživača koriste kočne cikluse ili testove koji su propisani za istraživanja u drugim oblastima automobilske industrije ili popisuju/razvijaju sopstvene vozne cikluse/testove.

U testovima koji su primenjeni su varirani različiti parametri kočenja ili simulana kočenja u stvarnim uslovima. Variranje parametara zavisi od voznih ciklusa koji su primenjeni ili od onoga što sam istraživač želi ispitati.

U većini istraživanja su varirane brzine kretanja vozila, pritisci u kočnom sistemu, kočni momenti, usporenja, ...

Ovaj pregled pored značaja za buduće istraživače, biće primenjen za pripremu testa autora ovog rada u istraživanju uticaja pojedinih parametara kočenja i vrste kočnih pločica na habanje kočnica i nastanak čestica.

## 6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru istraživačkog projekta „Istraživanje bezbednosti vozila kao dela kibernetičkog sistema: Vozač-Vozilo-Okruženje“ broj TR35041, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] World Health Organization, Regional Office for Europe, *Health effects of particulate matter*, Denmark, 2013.
- [2] Perron N, Sandradewi J, Alfara MR, Lienemann, P, Gehrig R, Kasper-Giebl A, Lanz VA, Szidat S, Ruff M, Fahrni S, Wacker L, Baltensperger U, Prévôt ASH. Composition and sources of particulate matter

- in an industrialised Alpine valley, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 10, pp. 9391–9430, 2010.
- [3] Shaddick G, Thomas ML, Mudu P, Ruggeri G, Gumy S. Half the world's population are exposed to increasing air pollution, *Npj Climate and Atmospheric Science*, Vol. 3, 23, 2020.
- [4] Hung-Lung C, Yao-Sheng H. (2009). Particulate matter emissions from on-road vehicles in a freeway tunnel study, *Atmospheric Environment*, Vol. 43 No. 26, pp. 4014–4022, 2009.
- [5] Charron A, Polo-Rehn L, Besombes JL, Golly B, Buisson C, Chanut H, Marchand N, Guillaud G, Jaffrezo JL. Identification and quantification of particulate tracers of exhaust and non-exhaust vehicle emissions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 19, No. 7, pp. 5187–5207, 2019.
- [6] Kukutschová J, Filip P. Review of Brake Wear Emissions, in: Amato F. (Ed.), *Non-Exhaust Emissions*, Ch. 6, Academic Press, London, 2018.
- [7] Kay D. EuroBrake 2021: Brake emissions regulation imminent as non-exhaust emissions surge, [Internet] 2021 [citirano 25.11.2021]. Dostupno na: <https://www.fisita.com/post/eurobrake-2021-brake-emissions-regulation-imminent-as-non-exhaust-emissions-surge>
- [8] Sinha A, Ischia G, Menapace C, Gialanella S. Experimental Characterization Protocols for Wear Products from Disc Brake Materials, *Atmosphere*, Vol. 11, No. 10, pp. 1102, 2020.
- [9] UNECE. UNECE to develop global methodology to measure particle emissions from vehicles' braking systems [Internet], 2021. [Citirano: 07.12.2021]. Dostupno na: <https://unece.org/environment/press/unece-develop-global-methodology-measure-particle-emissions-vehicles-braking>
- [10] Grujić I, Vasiljević S, Glišović J, Stojanović N. Simulation of vehicle's inertia using a flywheel mass to test disc brake system, *Proceedings of 6th International Conference "New Technologies, Development and Application III. NT 2020"*, Sarajevo, 2020, 25-27 June, pp. 360-367, 2020.
- [11] Stojanović N. *Identifikacija termičkih naprezanja disk kočnice za različite radne parametre kočenja*, doktorska disertacija, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2021.
- [12] 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*, Vol. 131, pp 269–278, 2016.
- [13] Diesel Net, Japanese JE05 Cycle [Internet]. [citirano: 19.9.2021]. Dostupno na: [https://dieselnet.com/standards/cycles/jp\\_je05.php](https://dieselnet.com/standards/cycles/jp_je05.php)
- [14] Volkswagen, A New Standard - An overview of WLTP for passenger cars and light commercial vehicles [Internet]. Wolfsburg, Germany; 2017 [citirano: 18.11.2021]. Dostupno na: [https://www.volkswagenag.com/presence/konzern/group-fleet/dokumente/WLTP\\_Basic\\_Knowledge.pdf](https://www.volkswagenag.com/presence/konzern/group-fleet/dokumente/WLTP_Basic_Knowledge.pdf)
- [15] Agudelo C. Thermal regimes during proving ground measurements using WLTP-Brake cycle [Internet]. LINK, 2018 [citirano: 20.09.2021]. Dostupno na: <https://wiki.unece.org/download/attachments/73924923/PMP-48-04%20-%20Thermal%20Regimes-%20During%20PG%20Using%20WLTP%20Cycle%2006NOV2018%20Public.pdf?api=v2>
- [16] Mathissen M, Grochowicz J, Schmidt C, Vogt R, Farwick zum Hagen FH, Grabiec T, Steven H, Grigoratos T. A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions, *Wear*, Vol. 414-415, pp. 219-226, 2018.
- [17] Grigoratos T, Agudelo C, Grochowicz J, Gramstat S, Robere M, Perricone G, Sin A, Paulus A, Zessinger M, Hortet A, Ansaloni S, Vedula R, Mathissen M. Statistical Assessment and Temperature Study from the Interlaboratory Application of the WLTP-Brake Cycle, *Atmosphere*, Vol. 11, No. 12, pp. 1309, 2020.
- [18] Agudelo C, Vedula Ravi T, O'Hare Q, Grochowicz J, Grigoratos T. Experimental Validation of the PMP Air Cooling Adjustment for Brake Emissions Measurements, in Proc.: *Eurobrake 2021 conference*, Mainz, Germany, pp. EB2020-STP-018, 18 - 20 May 2021.
- [19] Niemann H, Winner H, Asbach C, Kaminski H, Frentz G, Milczarek R. Influence of Disc Temperature on Ultrafine, Fine, and Coarse Particle Emissions of Passenger Car Disc Brakes with Organic and Inorganic Pad Binder Materials, *Atmosphere*, Vol. 11, No. 10, pp. 1060, 2020.
- [20] Perricone G, Alemani M, Metinöz I, Matějka V, Wahlström J, Olofsson U. 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*, Vol. 231, No. 6, pp. 781–797, 2016.
- [21] Environmental Protection Agency, EPA Federal Test Procedure (FTP) [Internet]. Washington; United

- States: 2020 [citirano: 01.10.2021]. Dostupno na: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>
- [22] Environmental Protection Agency, Dynamometer drive schedules [Internet]. Washington; United States: 2021 [citirano: 01.10.2021]. Dostupno na: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>
- [23] Woo SH, Kim Y, Lee S, Choi Y, Lee S. Characteristics of brake wear particle (BWP) emissions under various test driving cycles, *Wear*, Vol. 480-481, pp. 203936, 2021.
- [24] Tecsa RD. What is Los Angeles city traffic test – How to test LACT cycle [Internet]. Torino; Italy; 2021. [citirano: 15.10.2021]. Dostupno na: <https://www.tecsa-rd.it/en/losangeles-city-traffic-test-lact-cycle/>
- [25] Mathissen M, Evan C. Lowbrasys brake wear cycle - 3h LACT [Internet]. Mendeley data, 2019, [Citirano: 17.11.2021]. Dostupno na: <https://data.mendeley.com/datasets/4cgs6myx9d/1>
- [26] Mathissen M, Evans C. Lowbrasys brake wear cycle - 3h LACT, Mendeley Data, V1, 2019, doi: 10.17632/4cgs6myx9d.1
- [27] Sanders PG, Dalka TM, Xu N, Maricq MM, Basch RH. Brake Dynamometer Measurement of Airborne Brake Wear Debris, *SAE Technical Paper Serie*, pp. 2002-01-1280, 2002.
- [28] Alemani M, Perricone G, Olofsson U, Söderberg A, Wahlström J, Ciotti A. A proposed dyno bench test cycle to study particle emissions from disc brakes, in Proc.: *Eurobrake 2014 conference*, Lille, France, pp. EB2014-SE-001, 13–15 May 2014.
- [29] Metinöz I, Matějka V, Alemani M, Wahlström J, Perricone G. A proposed dyno bench test cycle to study particle emissions from disc brakes, in Proc.: *Eurobrake 2016 conference*, Milan, Italy, pp. EB2016-MDS-010, 13–15 June 2016.
- [30] Almirall F. B, Cabre M. R. Study of the chinese brake durability patterns and comparison with the main worldwide programmes, in Proc.: *Eurobrake 2018 conference*, Hague, Netherlands, pp. EB2018-VDT-020, 22 - 24 May 2018.
- [31] Gramstat S, Mertens T, Waninger R, Augsburg K, Hamatschek C, Hesse D. Functional Coatings of Gray-Cast Iron Brake Discs – Impact on the Tribology, In book: *Berichte aus dem  $\mu$ -Club 2020*, Reports from the  $\mu$ -Club, 2021.
- [32] Klaus A, Hasse D. (2020) Comparative study of brake particle emissions, in Proc.: *11. Internationales AVL Forum Abgas - und Partikelemissionen*, Ludwigsburg, Germany, 3. - 4. March 2020.
- [33] SAE J2522, Dynamometer Global Brake Effectiveness, 2003
- [34] United Nations, Regulation No. 90 [Internet]. 2017 [Citirano: 15.10.2021]. Dostupno na: <https://www.6thgearautomotive.com/wp-content/uploads/2016/06/ECE-R90-version-august-2017.pdf>
- [35] Thais RG, Marcos RFS, Carlos PB. The size effect of silicon carbide particles on the wear of brake pad materials, in Proc.: *Eurobrake 2020 conference*, Barcelona, Spain, pp. EB2020-FBR-024, 2 - 4 June 2020.
- [36] Perricone G, Alemani M, Wahlström J, Olofsson U. A proposed driving cycle for brake emissions investigation for test stand, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 234, No. 1, pp. 122-135, 2019.
- [37] Wahlström J, Leonardi M, Tu M, Lyu Y, Perricone G, Gialanella S, Olofsson U. A Study of the Effect of Brake Pad Scorching on Tribology and Airborne Particle Emissions, *Atmosphere*, Vol. 11, No. 5, pp. 488, 2020.
- [38] Hagino H, Oyama M, Sasaki S. Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating, *Wear*, Vol. 334-335, pp. 44–48, 2015.
- [39] Iijima A, Sato K, Yano K, Kato M, Kozawa K, Furuta N. Emission Factor for Antimony in Brake Abrasion Dusts as One of the Major Atmospheric Antimony Sources, *Environmental Science & Technology*, Vol. 42, No. 8, pp. 2937–2942, 2008.
- [40] Iijima A, Sato K, Yano K, Tago H, Kato M, Kimura H, Furuta N. Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne particulate matter, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 23, pp. 4908–4919, 2007.
- [41] Augsburg K, Sachse H, Krischok S. Horn R, Rieker M, Scheder D. Brake dust measurement, in Proc.: *Eurobrake 2012 conference*, Dresden, Germany, pp. EB2012-TM-13, 16-18 April 2012.
- [42] Langhof N, Alber-Laukant B, Greuel C, Hilpert M, Kozub A, Voigt R, Krenkel W. (2012) Fiber reinforced ceramic friction pads for automotive applications – the dependence of friction and wear on speed and braking pressure, in Proc.: *Eurobrake 2012*

- conference*, Dresden, Germany, pp. EB2012-FM-06, 16-18 April 2012.
- [43] Młodzikowski M, Banach D, Orłowski T. Wear of friction material in function of mechanical load and speed during real scale dynamometer tests, in Proc.: *Eurobrake 2017 conference*, Dresden, Germany, pp. EB2017-SVM-0112-4, May 2017.
- [44] Gramstat S, Cserhati A, Lugovyy D, Schröder M. Investigations of brake particle emissions – testing method, vehicle peculiarities and friction material influence, in Proc.: *Eurobrake 2017 conference*, Dresden, Paper EB2017-VDT-016, Germany., 2-4 May 2017.
- [45] Naotaka N, Toru M. Moan noise generating mechanism and development of reduction technology, in Proc.: *Eurobrake 2018 conference*, Hague, Netherlands, pp. EB2018-BSY-002, 22 - 24 May 2018.
- [46] Sanuddin A, Kosarieh S, Gilkeson C, Brooks P, Barton D, Shrestha S. (2020) Preliminary comparisons of particulate emissions generated from different disc brake rotors, in Proc.: *Eurobrake 2020 conference*, Barcelona, Spain, EB2021-STP-020, 21 - 23 May 2020, 2020.

## SUMMARY

### ANALYSIS OF BRAKING PARAMETERS IN TESTING OF BRAKE WEAR AND PARTICLES FORMATION ON INERTIAL BRAKE DYNAMOMETER

*In parallel with the significant reduction of the impact of vehicles on the environment, the development of modern propulsion systems that have less and less harmful impact, new pollutants are being identified on the vehicle. One of the such pollutants is the brakes, which wear out and lead to the formation of particles that are released into the air, i.e. generally into the environment. Investigation of the mechanism of particle formation during braking, and thus the brake wear is today becoming one of the important areas of research. The most common tests in this area are performed using initial brake dynamometers and pin-on-disc machines. An overview of the influence of some operation parameters (initial vehicle speed, braking pressure, and deceleration) that varies frequently during testing on an inertial brake dynamometer is performed in this paper. There are a number of tests and cycles that are applied during research, but they are not specifically prescribed for testing the particle formation during braking. The UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) has included it in its plan and is in the development phase of introducing standardized cycles that will prescribe the braking cycle, the purpose of which will be to examine the formation of particles. This kind of review paper can be important for researchers who are engaged in this field, and the develop their own cycles or tests to examine the concentration or mass of particles formed during braking.*

**Key Words:** *tests, braking, inertial, dynamometer, particles*