



## Istraživanje emisije štetnih materija autobusa sa pogonom na komprimovani prirodni gas

Branimir Đurić<sup>a\*</sup>, Marijana Mošić<sup>b</sup>, Aleksandar Trifunović<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka

<sup>b</sup> Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

### PODACI O RADU

DOI: 10.31075/PIS.65.01.07

Stručni rad

Primljen: 01/09/2018

Prihvaćen: 08/02/2019

#### Ključne reči:

Prirodni gas

Autobus

Životna sredina

Transportni sistem

### REZIME

Istraživanje performansi eksploatacije motornih vozila i motora sa pogonom na komprimovani prirodni gas sa stanovišta bezbednosti i uticaja na životnu sredinu, ima za cilj unapređivanje postojećih i razvoj novih modela za analizu pokazateљa bezbednosti motornih vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas – metan. Takođe i razvoj jedinstvenog modela za procenu uticaja ovih motornih vozila na životnu sredinu u drumskom saobraćaju Republike Srbije, kao i primena kompromitovanog prirodnog gasea kao alternativno pogonsko gorivo. Vrednovanje uticaja autobusa sa pogonom na kompromitovani prirodni gas na životnu sredinu izvršeno je sa stanovišta eksternih troškova u drumskom saobraćaju, odnosno troškova emisije izduvnih gasova motornih vozila. Rezultate istraživanja ovog rada karakteriše visok nivo adaptibilnosti i primenjivosti u odnosu na druge koncepcije autobusa sa alternativnim pogonskim gorivima, ali i u odnosu na druge kategorije motornih vozila u postupku ocene performansi sa stanovišta bezbednosti i uticaja na životnu sredinu tokom eksploatacije motornih vozila u drumskom saobraćaju. Takođe, rezultate je moguće primeniti u različitim fazama projektovanja motornih vozila u cilju poboljšanja karakteristika bezbednosti i postupcima strateškog donošenja odluka pri formiranju održivog transportnog sistema.

### 1. Uvod

Drumski saobraćaj pored svojih prednosti koje stvara za društvo, ima veoma velike potencijalno štetne uticaje po zdravlje čoveka i same prirode [1] i to kroz povećanje buke [2], saobraćajnih nezgoda [3] ili pak emisije štetnih izduvnih gasova. Primena gasovitih goriva za pogon motora SUS nije nova. Kada je pre oko šezdeset godina stvoren uspešan pogonski agregat sa unutrašnjim sagorevanjem, smatralo se logičnim da se za njegov rad koristi gasno gorivo zbog povoljnih karakteristika. Ipak, veoma brzo se uvidelo da su tečna goriva mnogo pogodnija za manevriranje, pogotovo za napajanje motora gorivom.

Eksploracija tečnih goriva, benzina i dizela u saobraćaju, dovela je do izvesnih neželjenih posledica. Prva posledica je smanjenje rezervi fosilnih goriva i njihov sve verovatniji deficit na svetskom tržištu.

Druga neželjena posledica je sve veće zagađenje vazduha i životne sredine, kao i uništavanje ozonskog omotača.

Najzastupljenija poznata alternativna pogonska goriva za motorna vozila su: komprimovani prirodni gas – metan (KPG ili CNG – Compressed Natural Gas), tečni prirodni gas (UPG), tečni naftni gas (TNG), metanol, etanol, vodonik, metil-estri, ulja iz uljane repice, a u skorije vreme i dobijanje metana, benzina i dizela od dotrajalih pneumatika motornih vozila, specijalnim postupcima itd. [1].

Od svih navedenih rešenja u poslednje vreme vlada povećani interes za prirodnim gasom – metanom, kao alternativnim gorivom za motore sa unutrašnjim sagorevanjem, usled suštinskih promena u nabavci, odnosno raspoloživosti prirodnog gasea, kao i tehnološkog razvoja u oblasti skladištenja.

\* Corresponding author: branimirjuric@hotmail.rs

U svetu, osim osnovnih, postoji i niz drugih ekoloških, ekonomskih, transportnih i bezbednosnih kriterijuma pomoću kojih se može izvršiti procena pogodnosti alternativnih pogonskih goriva za upotrebu u transportnom sektoru i uopšte u eksploataciji motornih vozila. Prirodni gas – metan, pre svega zbog povoljnih karakteristika i velikih rezervi u mnogim državama sveta, privlači izuzetnu pažnju. U gradskim urbanim sredinama se sve više koriste autobusi sa prirodnim gasom kao pogonskim gorivom, tako da je danas u eksploataciji prisutno i zastupljeno oko 150.000 autobusa, koji se koriste i u Republici Srbiji. Sa sve progresivnjom realizacijom strategija održivog transporta u drumskom saobraćaju i povećanjem transportnih zahteva u budućem vremenu, primena prirodnog gasa kao alternativnog pogonskog goriva za pogon motornih vozila u ekološkom smislu, odnosno za očuvanje životne sredine, dobija sve više na značaju. Ako se uzme činjenica da su problemi zagađenja vazduha izraženiji u urbanim i gradskim sredinama, gde se prosečna brzina saobraćajnog toka kreće u rasponu od oko 20 km/h do 40 km/h, primena motornih vozila i vozila javnog prevoza putnika, sa pogonom na prirodni gas je karakteristična baš za pomenute sredine. Veliki broj stručnih radova usmeren je prema istraživanju eksploatacije motornih vozila u urbanim gradskim sredinama [1, 2, 3]. Međutim, imajući u vidu navedene prednosti motornih vozila sa prirodnim gasom kao alternativnim pogonskim gorivom, očigledno je da ova rešenja mogu naći svoju primenu i u ruralnim područjima. Takođe, prema delu istraživanja sprovedenih u okviru projekta finansiranog od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije uočeno je da na osnovu ostvarenog transportnog rada, broja prevezenih putnika i robe, potrošnje goriva i drugih pokazatelja u prigradskom transportu putnika na teritoriji Republike Srbije, primena motornih vozila i autobusa sa prirodnim gasom kao alternativnim pogonskim gorivom, nikako ne bi bila zanemarljiva ili manje značajna sa stanovišta uticaja na životnu sredinu.

## 2. Testovi za ispitivanje emisije izduvnih gasova autobusa

Da bi se dala eksplisitna ocena ekološke povoljnosti autobusa sa pogonom na komprimovani prirodni gas, bilo u odnosu na propisane emisione standarde ili u poređenju sa autobusom čiji je pogonsko gorivo dizel, neophodno je uzeti u obzir određene činjenice:

- emisija štetnih materija zavisi od sistema napajanja motora gasom, odnosno načina obrazovanja radne smeše i tretmana izduvnih gasova,
- emisija štetnih materija zavisi od uslova eksploatacije, odnosno vrste propisanih emisionih testova kojima su podvrgнутa vozila tokom ispitivanja,
- emisija štetnih materija zavisi od sastava prirodnog gasa (%Vol CH4).

Ispitivanje izduvnih gasova autobusa se najčešće izvodi u laboratorijama gde se vrši simulacija uslova eksploatacije kojima su vozila izložena u toku realne vožnje. Simulacija se realizuje na dva načina i to pomoću motorskog ili šasijskog dinamometra. Uslovi eksploatacije se definišu odgovarajućim test ciklusima, čiji je broj veoma veliki. Svaki test ciklus je opisan sa odgovarajućim parametrima, kao što su: vreme trajanja ciklusa, dužina pređenog puta, maksimalna brzina autobusa, prosečna brzina, broj zaustavljanja po kilometru, prosečna brzina bez zaustavljanja, srednje i maksimalno ubrzanje itd. Emisija izduvnih gasova svakako zavisi od svih ovih parametara, tako da je direktno i uslovljena od vrste testa kome se vozilo podvrgava. Za ispitivanje emisije izduvnih gasova gradskih autobusa i poređenje emisija autobusa sa različitim sistemima napajanja, posebno su povoljni CBD, NYBus, Braunschweig ciklus. Pored usko specijalizovanih testova, postoje i univerzalni, kod kojih se ispituju izduvni gasovi pri simulaciji kretanja vozila u gradskoj, prigradskoj i međugradskoj sredini. Jedan od njih je evropski ETS test ciklus (u primeni od 1999. godine). Rezultati dobijeni pomoću ovog testa predstavljaju osnovu za rangiranje vozila u odnosu na EURO standarde.

## 3. Sastav prirodnog gasa

Sastav gase je promenljiv. U zavisnosti od sastava menjaju se i njegove karakteristike kao goriva za pogon motornog vozila. Promene karakteristika gase imaju za direktnu posledicu promenu performansi vozila, a kao indirektnе posledice javljaju se povećana ili smanjena emisija štetnih materija. Na veličinu svih promena najveći uticaj imaju toplotna moć, potrebna količina vazduha za sagorevanje (za obe vrste smeše  $\lambda=1$  i  $\lambda>1$ ), radne karakteristike (oktanski broj, metanski odnosno cetanski broj). Varijacije u sastavu gase (posmatrano kroz smanjenje % Vol.CH4) mogu da izazovu izostanak paljenja i pojavu negativnog „back-fire“ efekta, što se takođe negativno odražava na okolinu u ekološkom smislu. Potreban kvalitet prirodnog gasa kao pogonskog goriva motornog vozila prema CARB i EPA prikazan je u tabeli 1.

**Tabela 1.** Potreban kvalitet prirodnog gasa za pogon motornih vozila

Sastav [%]	CARB Referentno gorivo	CARB Potrebni kvalitet	EPA Referentno gorivo
Metan CH <sub>4</sub>	90.1±1.0	88.0(min)	89.0
Etan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.0±0.5	6.0 (max)	4.5 (max)
C <sub>3</sub> i viši C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	2.0±0.3	3.0 (max)	2.3 (max)
C <sub>3</sub> i viši C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	0.2 (max)	0.2 (max)	0.2 (max)
H <sub>2</sub>	0.1 (max)	0.1 (max)	---
CO	0.1 (max)	0.1 (max)	---
O <sub>2</sub>	0.5±0.1	1.0 (max)	0.6 (max)
CO <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	3.5±0.5	1.5÷4.5	4.0 (max)

#### 4. Komparacija emisije штетних материја autobusa sa pogonom na prirodni gas i autobusa sa pogonom na konvencionalно гориво

У оквиру овог дела истраживања, анализа емисије издувних гасова аутобуса са погоном на природни гас је извршена на основу неколико испитивања, која су реализована у иностранству.

У оквиру Internacionalne agencije za energiju (IEA) врšени су тестови о емисији четири vrste polutanata (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i токсиčних угљоводоника) према различитим концепцијским решењима напајања мотора гасом и према различитим test procedurama [2]. Такође иста мерења су спроведена и за аутобус са погоном на конвеницијално дизел гориво.

За истраживање су била изабрана три solo градска аутобуса дужине 12 метара са бруто масом од око 19 тона. Снага погонског агрегата се кретала од 150÷210 kW. Сви менјачки преносници су аутоматски, али са различитим бројем степена преноса.

**Prvi autobus:** belgijski „Van Hool A600“, нископодни са „DAF“ дизел мотором, снаге 160 kW. Систем напајања горивом: - директно убрзгавање са помпом високог притиска. Ниједан уређај за третман издувних гасова nije instaliran. Менјачки преносник је аутоматски petostepeni „ZF5HP500“. У даљем тексту биће назван као дизел аутобус.

**Drugi autobus:** италијански „IVECO City Class“, нископодни са IVECO kpg мотором, снаге 161 kW. Систем напајања горивом: - multipoint убрзгавање са припремом стехиометријске смеше гаса и ваздуха ( $\lambda=1$ ). Издувни гасови су прецишавани трошмernim катализатором. Менјачки преносник је аутоматски четворостепени „VOITH D581.3“. У даљем тексту биће назван као KPG $\lambda=1$  аутобус.

**Treći autobus:** канадски „ORION V“ са kpg мотором, снаге 206 kW. Систем напајања горивом: - centralni mikser са припремом сировашне смеше гаса и ваздуха ( $\lambda>1$ ). Ниједан уређај за третман издувних гасова nije instaliran. Менјачки преносник је аутоматски шестостепени „Allison B400R“. У даљем тексту биће назван као KPG $\lambda>1$  аутобус.

Аутобуси су тестирали у односу на градске експлоатационе услове према два временски базираних тест циклуса и то: Америчком „CBDC“ тесту (Central Business District Cycle), Холандском „DUBDC“ (Dutch Urban Bus Driving Cycle) и једном далијинском базираном циклусу „DE LIJN“ с тим што возило nije постављено на шасијски динамометар већ се кретало по огледном полигону. Осим тога аутобуси су проверавани и у реалном градском и међуградском саобраћају, монтиранjem мрног уредјаја на аутобусе.

За мерење на возилу употребљен је „VOEM“ мрни систем (VITO On-the-road Energy & Emission Measurement System) специјализован за одређивање концентрације SO, SO<sub>2</sub>, NOX и токсичних угљоводоника у издувним гасовима. Тестови су изведени у три солуције са аспекта оптерећења: ниско оптерећење (у аутобусу су само осoblje и систем за мерење), средње оптерећење и пуно оптерећење.

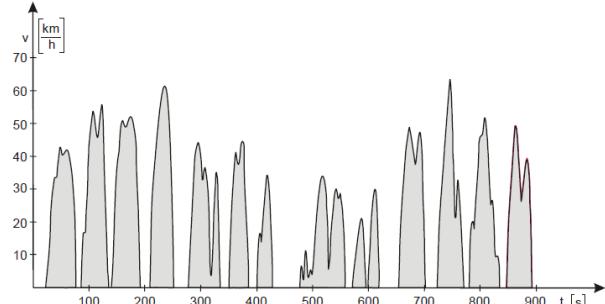
„CBDC“ процедура представља „testerasti“ модел испитивања аутобуса, подразумевајући 14 понављања основног циклуса који обухвата 4 режима рада мотора [2]:

- 4.- рад на празном ходу,
- 5.- убрзано кретање до trenutka постизања krstareće brzine (временски ограничено),
- 6.- кретање константном брзином Vmax = 32[km/h],
- 7.- usporeno кретање до V = 0 [m/s] (временски ограничено).

Параметри теста су:

- vreme trajanja ukupnog циклуса: t = 560 s,
- prosečna brzina vozila: Vsr = 20.7 km/h,
- maksimalna brzina vozila: Vmax = 32.18 km/h,
- prosečno убрзјање: asr = 0.89 m/s<sup>2</sup>,
- maksimalno убрзјање: amax = 1.79 m/s<sup>2</sup>

DUBDC временски базиран циклус, приказан на Слици 1, намењен је за испитивање градских аутобуса. Параметри рада линије су статистичким методама обрађивани и на основу тога је nastao DUBDC.



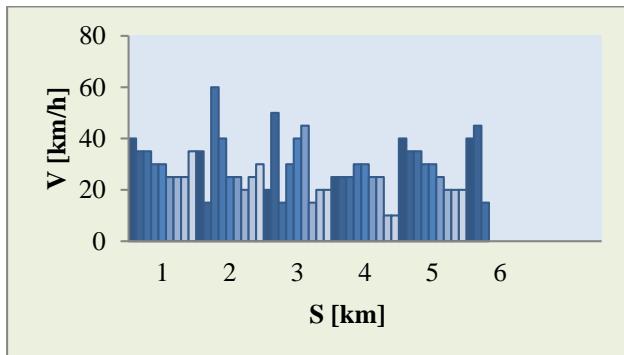
Slika 12. DUBDC циклус [2]

Параметри теста су:

- vreme trajanja ukupnog циклуса: t = 900 s,
- prosečna brzina vozila: Vsr = 20.8 km/h,
- maksimalna brzina vozila: Vmax = 60.15 km/h,
- prosečno убрзјање: asr = 0.84 m/s<sup>2</sup>,
- maksimalno убрзјање: amax = 1.78 m/s<sup>2</sup>.

„De Lijn“ далијински базиран циклус, развијен од стране белгијске компаније за јавни транспорт. Користи се за поређење потрошње горива и емисије издувних гасова градских аутобуса. Обухвата 25 понављања и постизање krstarećih brzina u opsegu od V = 15 km/h do V = 60 km/h, што је приказано на Слици 2. Убрзјање до постизања одређене брзине, за разлику од претходна два теста, nije limitirano, односно obezbeđuje se pun dotok смеше или дизел горива до коморе за sagorevanje.

Vremenski zastoj između dva ponavljanja ograničen je na 1 s. Ukupan put koji pređe autobus je 5.8 km, a prosečna brzina se kreće u granicama od  $V=21$  km/h do  $V=23$  km/h, što zavisi od snage pogonskog agregata.



Slika 2. De Lijn ciklus [2]

Rezultati koji slede, predstavljaju prosečne vrednosti izvršenih 6 merenja po autobusu (za svaku od tri vrste opterećenja autobusa, a merenje je vršeno u dva navrata).

U tabelama 2, 3 i 4 prikazani su rezultati emisije štetnih materija po vrsti ciklusa za svaki tip autobusa.

Tabela 2. Emisija polutanata – dizel autobus [2]

DIZEL AUTOBUS	Potrošnja goriva [l/100km]	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	THC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]
Realni gradski saobraćaj	62.8	1633	3.5	1.7	15.2
CBDC	50.2	1301	4.5	1.4	12.5
DUDBC	55.1	1435	3.1	1.2	12.8
DE LIJN	48.3	1252	5.1	1.9	11.5
Realni međugradski saobraćaj	36.0	937	2.1	1.0	8.9

Prilikom računanja emisije polutanata potrošnja goriva za autobus KPG  $\lambda=1$  i autobus KPG  $\lambda>1$  izračunata je prema toplotnoj moći od 37500 KJ/l

Tabela 3. Emisija polutanata – KPG  $\lambda=1$  autobus [2]

KPG AUTOBUS	$\lambda=1$	Potrošnja goriva [l/100km]	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	THC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]
Realni gradski saobraćaj	73.5	1475	0.7	0.15	1.8	
CBDC	69.0	1386	0.9	0.04	0.5	
DUDBC	76.0	1527	0.7	0.07	2.5	
DE LIJN	65.8	1322	0.4	0.12	1.9	
Realni međugrads ki saobraćaj	54.9	1102	1.0	0.09	1.3	

Tabela 4. Emisija polutanata – KPG  $\lambda>1$  autobus [2]

KPG AUTOBUS	$\lambda>1$	Potrošnja goriva [l/100km]	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	THC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]
Realni gradski saobraćaj	83.2	1634	0.8	7.5	25.1	
CBDC	80.5	1580	0.8	7.	21.7	
DUDBC	82.5	1602	0.8	12.	25.5	
DE LIJN	73.9	1445	0.6	8.0	18.8	
Realni međugradski saobraćaj	67.8	1332	0.6	5.4	23.7	

Analiza podataka prikazanih u prethodnim tabelama data je u narednim tačkama ovog poglavlja.

#### 4.1. Emisija ugljendioksida (CO<sub>2</sub>)

Emisija CO<sub>2</sub> od strane autobusa sa pogonom na prirodnji gas je veća u odnosu na emisiju CO<sub>2</sub> koja potiče od autobusa sa pogonom na klasično dizel gorivo i to u sva tri simulaciona test ciklusa, a takođe i u međugradskom saobraćaju. U realnom gradskom saobraćaju emisija ugljendioksida je veća kod dizel autobusa za oko 11%. Uzrok treba tražiti u ostvarenoj većoj vrednosti relativnog pozitivnog ubrzanja  $a_{pa}$  definisanog kao (1):

$$a_{pa} = \frac{\int_0^T (V_i \cdot a_i) dt}{s} \quad (1)$$

Gde su:

$V_i$  – trenutna brzina,  
 $a_i$  – trenutno ubrzanje,  
 $T$  – ukupno vreme.

Veće vrednosti relativnog pozitivnog ubrzanja ukazuju na vremenski dužu izloženost pogonskog agregata radu u oblasti do postizanja maksimalnog ubrzanja od minimalnog, što utiče na povećanje specifične potrošnje energije izražene u kWh/km i na kraju rezultira većom potrošnjom goriva i produkcijom SO<sub>2</sub> [2].

Takođe, sam kvantitet promene opterećenja (važi samo za realne gradske uslove) utiče na povećanu emisiju SO<sub>2</sub>. Što je ta promena veća, izraženija je emisija SO<sub>2</sub> kod dizel autobusa u odnosu KPG  $\lambda>1$  autobus, a pogotovo u odnosu na KPG  $\lambda=1$  autobus.

Prednost obe vrste autobusa u odnosu na dizel autobus sa aspekta manje emisije SO<sub>2</sub> (u odnosu na simulacione testove) se može uočiti ako se posmatra emisija SO<sub>2</sub> po jedinici utrošene energije. U slučaju iste energetske efikasnosti KPG agregat bi imao manju emisiju SO<sub>2</sub> za 25 % od dizel agregata za slučaj testa u realnom gradskom saobraćaju. Kako je energetska efikasnost KPG autobusa manja (zbog manjeg koeficijenta punjenja cilindra) u odnosu na klasičan dizel autobus, ova prednost ima ipak fiktivni karakter.

## 4.2. Emisija ugljenmonoksida (CO)

Emisija ugljenmonoksida је код оба аутобуса на природни гас много мања него код дизел аутобуса. Умање се креће у границама од 4 до 5 пута у реалном градском саобраћају, а од 8.5 до 12.75 пута према De Lijn циклусу. Мања емисија SO је последица високе ефикасности конверзије у тростепеном катализатору (TWC, код KPG  $\lambda=1$  аутобуса) и контроле састава смеши уз потпуније сагоревање исте (код KPG  $\lambda>1$  аутобуса).

Улога TWC-а се своди на редукцију емисије три врсте полутаната издувних гасова у исто време и то: угљенмоноксида, азотног оксида и угљоводоника.

## 4.3. Emisija угљен-водоника (THC)

KPG  $\lambda=1$  аутобус има око 10 пута нижу емисију укупне количине угљоводоника од дизел аутобуса, што је повезано са високом ефикасношћу конверзије у тростепеном катализатору. KPG  $\lambda>1$  аутобус са друге стране има 4 пута већу емисију TNS од дизел аутобуса, међутим уколико се посматра емисија само неметанских угљоводоника и у овом случају је KPG аутобус повољнији од дизел аутобуса 4.

## 4.4. Emisija азотних оксида (NO<sub>x</sub>)

Емисија азотних оксида код дизел аутобуса већа је у односу на емисију KPG  $\lambda=1$  аутобуса око 7.5 пута али је мања од емисије KPG  $\lambda>1$  аутобуса за око 60%. Узрок пovećane емисије NO<sub>x</sub> код KPG  $\lambda>1$  аутобуса је саја технологија рада мотора са сиромашном смеши гаса и ваздуха. Због пovećanog степена компресије долази до пovećanja температуре у комори за сагоревање, што погодује већој емисији укупне количине NO<sub>x</sub> у односу на рад мотора са стехиометријском смеши [4]. Да би се смањила емисија азотних оксида код KPG  $\lambda>1$  аутобуса, потребно је одрžавати кофицијент  $\lambda$  у границама од 1.35-1.80 уз истовремено примену турбо пунjača са меđuhlađenjem. Улога турбо пунjača се своди на пovećanje снаге мотора али и смањење температуре услед појаве вишког ваздуха.

## 3.5. Emisija CO<sub>2</sub>, CO, THC и NO<sub>x</sub> по преvezеним putniku

Примарна функција аутобуса је превоз путника са једног на друго место, тако да је свакако један од важнијих параметара емисија штетних материја по путнику у зависности од броја преvezених путника. На сликама 3, 4, 5 и 6 дат је pregled емисија штетних материја по путнику за податке који су добијени тестирањем претходна три аутобуса у реалним градским условима. Помоћу овог параметра могуће је вршити упоређивање еколошког потенцијала не само између аутобуса са различитим погонским агрегатима, већ и са другим категоријама drumskih vozila за превоз путника.

У ту сврhu узет је пример путниčkog automobila (дизел мотор) са карактеристичном емисијом штетних материја у градским условима када се у њему налазе четири путника, што је приказано у табели 5.

**Tabela 5. Емисија путниčkog возила (дизел мотор)**

PV	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	THC [g/km]
<b>4 путника</b>	315	2	1.2	0.6

Izvor: Department of Energy 2002.

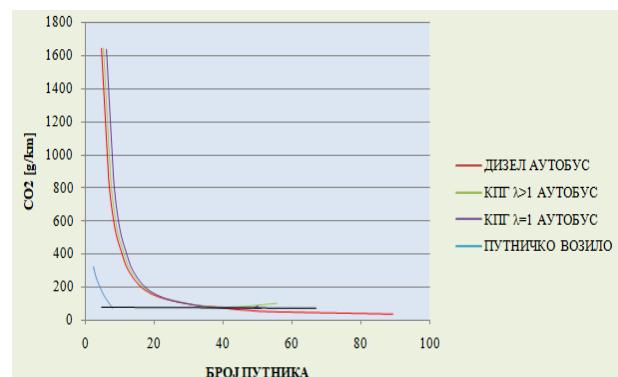
На основу диграма добијена је табела 6 у којој је приказан минималан број путника који би требало да се налази у сваком од три аутобуса како би емисија по путнику била једнака или нижа у односу на емисију по путнику, карактеристичну за путниčko возило.

**Tabela 6. Минималан потребан број путника по аутобусу да би се остварила емисија по путнику еквивалентна емисији путниčkog возила**

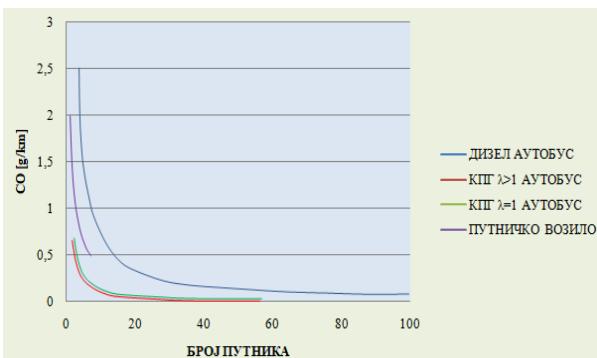
	Dizel аутобус	KPG $\lambda=1$ аутобус	KPG $\lambda>1$ аутобус
CO <sub>2</sub>	20	20	20
CO	7	2	2
THC	10	1	51
NO <sub>x</sub>	52	6	84

Izvor: WMATA 2002.

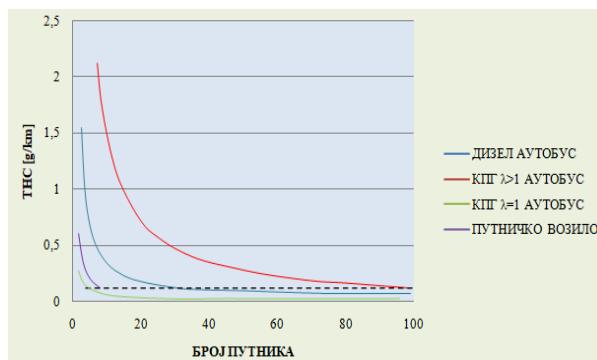
Подаци покazuju да са пovećanjem броја преvezених путника значајно расте и еколошка предност аутобуса у односу на путниčko возило. У случају KPG  $\lambda=1$  аутобуса при потпуно искоришћеном капацитetu од 97 путника, емисија угљенмоноксида по путнику је мања преко 48 пута, угљоводоника преко 95 пута и азотних оксида преко 16 пута у односу на путниčko возило. Овакве чинjenice govore да је примена аутобуса са погоном на компримовани природни гас са еколошког аспекта posebno повољна u neposrednom prisustvu visoke koncentracije ljudi, односно тамо где постоје velike потребе за korišćenjem аутобуса.



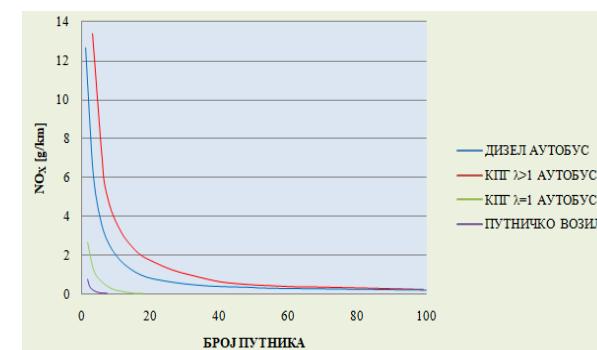
**Slika 3. Емисија CO<sub>2</sub> по путнику (у зависности од броја путника који се налазе у аутобусу), реални градски услови**



Slika 4. Emisija CO po putniku (u zavisnosti od broja putnika koji se nalaze u autobusu), realni gradski uslovi



Slika 5. Emisija THC po putniku (u zavisnosti od broja putnika koji se nalaze u autobusu), realni gradski uslovi



Slika 6. Emisija NO<sub>x</sub> po putniku (u zavisnosti od broja putnika koji se nalaze u autobusu), realni gradski uslovi

### 3.6. Emisija čestičnog zagađenja (PM)

Primenom prirodnog gasa kao pogonskog goriva autobusa, emisija čestičnog zagađenja se svodi na najmanju moguću meru u odnosu na klasično dizel gorivo. Redukcija, prema istraživanjima WMATA (Washington Metropolitan Area Transit Authority), dostiže vrednost i do 90% [5]. Komparacija je vršena za dva gradska autobusa (klasičan dizel bez tretmana izduvnih gasova i KPG  $\lambda>1$  autobus sa oksidacionim katalizatorom) u odnosu na CBDC ciklus. U tabeli 7 prikazane su kvantitativne vrednosti emisije čestičnih materija za dva gradska autobusa:

- KPG  $\lambda>1$  autobus (Orion KPG, Detroit Diesel-Series 50G) bez oksidacionog katalizatora,
- dizel autobus (Nova Diesel, Detroit Diesel-Series 50) takođe bez katalizatora.

Ispitivanje je vršeno u odnosu na CBD ciklus.

Tabela 7. Emisija PM za dizel i KPG  $\lambda>1$  autobus [5]

AUTOBUS	PM [g/milji]
Nova diesel, Detroit diesel-series 50	0.21
Orion KPG, Detroit diesel-series 50	0.022
procenat redukcije %	89.55

## 4. ZAKLJUČAK SA DISKUSIJOM

U radu je razmatrana problematika istraživanja eksploatacije i performansi motornih vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, konkretno autobusa, uzimajući u obzir specifičnosti po pitanju konstrukcije i emisije izduvnih gasova sa ciljem da se razviju modeli za analizu pokazatelja bezbednosti i procenu uticaja ovih autobusa na životnu sredinu na putnoj mreži, zatim prednosti i nedostaci primene KPG u odnosu na primenu drugih pogonskih goriva, konstruktivne karakteristike pogonskih agregata motornih vozila koja koriste KPG, eksploatacionalo tehničke karakteristike motornih vozila koja koriste KPG, eksploatacionala ispitivanja autobusa sa KPG, uporedna ispitivanja autobusa sa KPG i drugih energetika za pogon autobusa, analiza dobijenih rezultata ispitivanja.

Kada se govori o ekološkim pogodnostima primene prirodnog gaza kao pogonskog goriva autobusa, ocena ekološke prihvatljivosti se ne može generalizovati. U užem smislu posmatrajući prirodni gas u odnosu na konvencionalno dizel gorivo, zahvaljujući pre svega sastavu i osobinama prirodnog gaza (odsustvo čestičnih materija i sumpora, potpunije sagorevanje bez ostataka i pepela, veća otpornost na detonaciju itd.) eksplicitna ocena ekološke povoljnosti se može sigurno dati da je ona daleko na strani prirodnog gasa, pogotovo ako se u obzir uzmu sledeći faktori:

- primena ekološki tretiranih i prihvatljivih varijanti dizel goriva (LSD i ULSD),
- optimizacija sistema napajanja motora gorivom,
- optimizacija procesa sagorevanja,
- tretman izduvnih gasova pomoću različitih katalitičkih konvertora i filtera (i za prirodni gas i za dizel gorivo).

Procena stepena ekološke povoljnosti je kompleksan posao i ne može se dati, a da se pri tome zanemari bilo koja od navedenih činjenica. Prirodni gas i dizel gorivo su energenti sa različitim emisionim osobinama. Konvencionalni dizel autobuski motori emituju niži nivo ukupnih ugljovodonika u odnosu na KPG  $\lambda>1$  autobuski motor, nezavisno od korišćenja ili nekorišćenja gasnog oksidacionog katalizatora. Uticaj gasnog oksidacionog katalizatora (GOC) se u ovom slučaju svodi u najvećoj meri na redukciju nemetanskih toksičnih ugljovodonika čiji je sadržaj u odnosu na metan ionako mali (ispod 2% kada se ne koristi GOC).

Pripremom stehiometrijske smeše goriva i vazduha ( $\lambda=1$ ) uz tretman izduvnih gasova помоћу TWC, emisija TNS se може смањити у односу на конвентионални дизел мотор али не и у односу на дизел мотор који користи ULSD са DOC или DPF filterom. Емисија угљениксуда је приближно иста (у односу на укупно емитовану количину) за концепцијска решења дизел и KPG погоњских агрегата, узимајући у обзир све relevantне факторе који утичу на процену еколошке повољности једног или другог горива. KPG  $\lambda=1$  аутобуски погоњски агрегат (уз примену TWC) и KPG  $\lambda>1$  (без GOC) аутобуски погоњски агрегат, емитују знатно мању количину угљенмоноксида (око 5 пута) од конвентионалног дизел погоњског агрегата. Значајан степен redukcije у slučaju дизел горива се може ostvariti primenom ULSD u kombinaciji sa DPF filterom, dok u slučaju KPG концепције, na redukciju utiče primena GOC-a.

Емисија азотних оксида је дaleко мања за KPG концепције (изузев KPG  $\lambda>1$  без GOC) у односу на све варијанте дизел мотора. У slučaju KPG  $\lambda>1$  без GOC zbog povećanja stepena kompresије у комори за sagorevanje dolazi do povećanja temperature, što pogoduje većoj производњи NOX. Upotreбом катализатора може се ostvariti smanjenje emisije preko 20 puta.

Еколошка повољност KPG аутобуса ( $\lambda>1$  и  $\lambda=1$ ) у односу на конвентионални дизел варијанту, највише долази до израђаја када се посматра емисија честиčних материја како у kvantitativном тако и у kvalitativnom аспекту. Kvantitativan аспект се ogleda u smanjenju emisije od preko 90[%], a kvalitativan u samom сastavu ove vrste polutanata kroz nepostojanje честиčних материја као nosioca kancerogenih jedinjenja usled odsustva sumpora iz prirodnog гаса (posmatranog као горива за motore SUS). Upotreba ULSD u kombinaciji sa DPF filterom omogућује smanjenje производње RM на ниво који је чак мањи у односу на емисију KPG погоњских агрегата (ipak u malom procentu), али takođe zbog nepovoljnog сastava nikako се ne може govoriti o eventualnoj pogодности ULSD u односу на KPG.

Na osnovу у раду приказане анализе, може се zaključiti да су аутобуси са KPG  $\lambda=1$  погоњским агрегатом најбоље решење, по пitanju емисије штетних издувних гасова. Dalji правци истраживања треба бити usmereni ka испитивању примене dodatnih uredjaja који smanjuju emisiju izduvних гасова kod svih погоњских агрегата.

#### ***The research on the environmental impact of buses and engines powered by compressed natural gas***

**Branimir Đurić, M.Sc.ME**

Faculty of Engineering, University of Kragujevac, branimirdjuric@hotmail.rs

**Marijana Mošić, student,**

Faculty of Traffic and Transport Engineering, University of Belgrade,  
marijanamosic7@gmail.com

**Aleksandar Trifunović, M. Sc. TE,**

Faculty of Traffic and Transport Engineering, University of Belgrade,  
a.trifunovic@sf.bg.ac.rs

**Abstract:** The research on the performance of motor vehicles and engines powered by compressed natural gas from a safety and environmental perspective is aimed at improving the existing and developing new models for analyzing the safety indicators of motor vehicles with compressed natural gas methane and developing a unique model for assessment of the impact of these motor vehicles on the environment in the road transport of the Republic of Serbia, as well as the use of alternative fuel.

Evaluation of the impact of these buses on the environment was carried out from the point of view of external costs in road traffic, or the cost of emission of exhaust gases of motor vehicles.

The research results of this work are characterized by a high level of adaptability and applicability in relation to other concepts of buses with alternative propellants, but also in relation to other categories of motor vehicles in the process of performance evaluation from the point of view of safety and environmental impact during the exploitation of motor vehicles in road traffic. Also, the results can be applied at different stages of designing motor vehicles in order to improve safety features and strategic decision-making processes when forming a sustainable transport system.

**Keywords:** natural gas, bus, environment, transport system.

#### **LITERATURA**

- [1] Bakic, D. (2018). Kriterijumi za ocenu uticaja puteva ii ii reda na zaštićena prirodna i kulturna dobra. Put i saobraćaj, 64(2), 29-37.
- [2] Đurić, B., Trifunović, A., Čičević, S., Josić, A., & Stokić, I. (2018). Merenje emisije buke motornih vozila na teritoriji grada kragujevca. Put i saobraćaj, 64(1), 61-66.
- [3] Markovic, N., Antic, B., Pešić, D., Lipovac, K., & Lazarević, M. (2018). Determinisanje faktora put kao uticajnog faktora na saobraćajne nezgode primenom dubinskih analiza. Put i saobraćaj, 64(2), 55-64.
- [4] Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes, R., & Kinoshita, E. (2008). The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. Fuel, 87(7), 1014-1030.
- [5] Painuly, J. P. (2001). Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. Renewable energy, 24(1), 73-89.
- [6] Lin, B. F., Huang, J. H., & Huang, D. Y. (2009). Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions. Fuel, 88(9), 1779-1785.
- [7] Koebel, M., Elsener, M., & Kleemann, M. (2000). Urea-SCR: a promising technique to reduce NOx emissions from automotive diesel engines. Catalysis today, 59(3-4), 335-345.
- [8] Chandler, K., Eberts, E., & Melendez, M. (2006). Washington metropolitan area transit authority: compressed natural gas transit bus evaluation. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.