AST RJ Pokroky vo vede a technike Výskumný časopis
Časopis Advances in Science and Technology Research, 2026, 20(1), 269–278
https://doi.org/10.12913/22998624/209114 ISSN 2299-8624, Licencia CC-BY 4.0

Prijaté: 01.07.2025
Prijaté: 07.09.2025
Uverejnené: 21.11.2025

Stlačený zemný plyn ako ekonomické a ekologické riešenie pre udržateľnú dopravu

Lenka Kuhnová[1*], Marián Brontvaj[2], Roland Weiss[3]

[1] Katedra ekonómie a manažmentu, Fakulta podnikového hospodárstva so sídlom v Košiciach, Ekonomická univerzita v Bratislave, Tajovského 13, 041 30 Košice, Slovenská republika
[2] Katedra kvantitatívnych metód, Fakulta podnikového hospodárstva so sídlom v Košiciach, Ekonomická univerzita v Bratislave, Tajovského 13, 041 30 Košice, Slovenská republika
[3] Katedra podnikového finančného manažmentu, Fakulta podnikového hospodárstva so sídlom v Košiciach, Vysoká škola ekonomická a podniková v Bratislave, Tajovského 13, 041 30 Košice, Slovenská republika
* E-mail zodpovedného autora: lenka.kuhnova@euba.sk

ABSTRAKT

Tento dokument prezentuje výsledky viacročnej analýzy environmentálnych a ekonomických vplyvov prevádzky vozidiel poháňaných stlačeným zemným plynom (CNG) v porovnaní s dieselovými vozidlami. Štúdia vychádza z reálnych údajov zhromaždených v rámci projektu EPIC (Environmental Performance Integrated Centre), ktorý monitoroval spotrebu paliva, emisie CO_2 a NO_x, ako aj prevádzkové náklady vozového parku v období 12/2015 – 6/2020. Cieľom článku bolo analyzovať environmentálne a ekonomické vplyvy prevádzky vozidiel na CNG v porovnaní s vozidlami na naftu na základe údajov zhromaždených počas sledovaného obdobia. Výsledky regresnej analýzy potvrdzujú, že vozidlá na CNG dosahujú výrazne nižšie emisie skleníkových plynov a zároveň prinášajú významné finančné úspory. Konkrétne, vozidlá na CNG emitovali približne o 122 504 kg menej CO_2 ako ich dieselové ekvivalenty, čo predstavuje zníženie o približne 28 %. Emisie NO_x sa znížili o 65 % a emisie tuhých častíc (PM) boli u vozidiel na CNG približne o 90 % nižšie. Okrem toho regresná analýza nákladov na palivo ukazuje, že náklady na dieselové palivo rastú výrazne rýchlejšie ako náklady na CNG, čo robí CNG nákladovo efektívnejším riešením, najmä pre mestskú dopravu s vysokým počtom najazdených kilometrov. Prognózované modely na obdobie 2015 – 2030 naznačujú 22 % zníženie emisií z vozidiel na CNG v porovnaní s iba 7 % v prípade dieselových vozidiel a očakáva sa, že prevádzkové náklady na CNG budú naďalej klesať, zatiaľ čo náklady na diesel budú naďalej rásť. CNG sa tak ukazuje ako efektívne prechodné palivo v kontexte stratégie udržateľnej mobility a energetickej transformácie v odvetví dopravy.

Kľúčové slová: stlačený zemný plyn, udržateľná doprava, emisie CO_2, alternatívne palivá, environmentálna efektívnosť.

ÚVOD

Nasadenie technológií, ako je CNG, vo verejnej doprave nie je len otázkou životného prostredia, ale súčasťou širšej transformácie obchodných procesov smerom k udržateľnosti a digitalizácii. Digitalizácia umožňuje efektívne monitorovanie spotreby paliva, sledovanie emisií v reálnom čase a optimalizáciu trás vozidiel, čím sa zvyšuje celková efektívnosť prevádzky. Doprava je jedným z hlavných zdrojov emisií skleníkových plynov v Európskej únii a zodpovedá za približne 23 % celkových emisií CO_2 v 2021 [1]. S cieľom dosiahnuť klimatickú neutralitu do roku 2050 prijala Európska únia niekoľko strategických dokumentov, ako napríklad Európsku zelenú dohodu, iniciatívu Fit for 55 a cestovnú mapu REPowerEU, ktoré zdôrazňujú potrebu transformácie odvetvia dopravy prostredníctvom alternatívnych palív a technológií. V tejto súvislosti sa CNG javí ako vhodné prechodné riešenie, ktoré môže prispieť k rýchlemu zníženiu emisií bez potreby rozsiahlych investícií do infraštruktúry alebo technickej konverzie vozového parku. CNG ako palivo má oproti tradičným fosílnym palivám viacero environmentálnych výhod, najmä

z hľadiska emisií oxidu uhličitého (CO_2), oxidov dusíka (NO_x), síry (SO_2) a tuhých častíc (PM). Podľa správy Európskej environmentálnej agentúry [2] môžu vozidlá na CNG v porovnaní s dieselovými alternatívami znížiť emisie CO_2 v priemere o 20 – 30 %. Štúdia Sahoo a Srivastava [3] dodáva, že motory poháňané CNG vykazovali až o 29 % nižšie emisie CO_2 v porovnaní s benzínom a výrazne nižšiu špecifickú spotrebu paliva. Okrem environmentálnych výhod má čisté palivo CNG aj ekonomické výhody, pretože jeho trhová cena je stabilnejšia a v mnohých krajinách, vrátane Slovenska, je podporované daňovými výhodami. Na Slovensku sa používanie CNG stáva čoraz populárnejším, najmä vo verejnej doprave. Národný politický rámec pre rozvoj trhu s alternatívnymi palivami z roku 2019 priamo uvádza potrebu rozvíjať infraštruktúru CNG a podporovať prechod vozidiel na tento typ paliva [4]. Skutočné prevádzkové údaje z projektu EPIC [5], ktorý sledoval spotrebu, náklady a emisie 33 vozidiel v období od 12/2015 do 06/2020, poskytujú cenný empirický základ pre porovnanie technológií CNG a diesel v praxi. Cieľom tohto dokumentu bolo porovnať environmentálne a ekonomické vplyvy prevádzky vozidiel na CNG a diesel na základe údajov zo štúdie EPIC a doplnkovej regresnej analýzy. Analyzovali sa nielen celkové emisie CO_2, NO_x a PM, ale aj náklady na palivo ako funkcia počtu najazdených kilometrov. Výsledky môžu prispieť k lepšiemu pochopeniu potenciálu CNG ako nástroja pre transformáciu ekologickej dopravy a slúžiť aj ako základ pre tvorbu verejnej politiky.

SÚVISLOSTI

Keďže svet čelí akútnym environmentálnym výzvam a záväzkom znížiť emisie skleníkových plynov (GHG), pozornosť sa čoraz viac zameriava na alternatívne energetické riešenia v doprave. CNG si získalo popularitu ako prechodné palivo v rámci prechodu na udržateľnú dopravu, najmä vo verejnom a nákladnom sektore, kde je úplná elektrifikácia naďalej obmedzovaná obmedzeniami dojazdu, medzerami v infraštruktúre a vysokými kapitálovými nákladmi. Environmentálne výhody CNG (nižšie emisie CO_2, NO_x, SO_2 a PM) sú dobre zdokumentované v experimentálnych štúdiách aj v štúdiách životného cyklu. Empirické štúdie potvrdzujú, že CNG môže významne prispieť k transformácii odvetvia dopravy smerom k udržateľnosti.

Divekar et al. [6] preukázali, že používanie CNG v stredne ťažkých a ťažkých vozidlách so zážihovým motorom vedie k zlepšeniu energetickej účinnosti a zníženiu emisií CO_2. Ali et al. [7] stanovili v rámci analýzy environmentálnych rizík nízky index rizika (0,266) pre CNG, čím potvrdili jeho bezpečnostný potenciál pri správne navrhnutej infraštruktúre. Al-Mohannadi et al. [8] tiež poukázali na technickú vyspelosť systémov CNG v logistike a zdôraznili výhodu existujúcich distribučných sietí. Nižšie náklady na palivo a celková nákladová efektívnosť potvrdzujú Rose et al. [9], ktorí porovnali životný cyklus ťažkých zberných vozidiel (HCV) poháňaných naftou a CNG na základe skutočných prevádzkových údajov v Kanade. Ich výsledky ukázali, že vozidlá na CNG vedú k významnému zníženiu emisií skleníkových plynov (o približne 24 %) a iných znečisťujúcich látok. Okrem toho majú aj nižšie náklady na palivo, čo z nich robí nákladovo efektívnu a ekologickú alternatívu pre mestá a obce. Výzvou však naďalej zostáva potreba verejných stimulov a kapitálových investícií na vytvorenie podmienok pre ich širšie nasadenie. To je v súlade s politikou Európskej únie, kde je CNG a jeho obnoviteľná forma (biometán) výslovne uvedená ako súčasť prechodných palivových zmesí v iniciatívach ako REPowerEU, Fit for 55 a Climate Neutrality 2050, ktorých spoločným cieľom je znížiť závislosť od dovozu ropy a zemného plynu a podporovať miestnu nízkouhlíkovú výrobu.

Z ekonomického hľadiska sa CNG javí ako efektívna možnosť, najmä v prípadoch, keď nie je k dispozícii elektrifikácia vo veľkom meradle alebo nie je finančne realizovateľná.

ako efektívna voľba, najmä v prípadoch, keď nie je k dispozícii elektrifikácia vo veľkom meradle alebo nie je finančne realizovateľná. Borgosano et al. [10] ukázali, že za podmienok obmedzenej infraštruktúry predstavujú autobusy na CNG vhodný kompromis medzi investičnými nákladmi, dostupnosťou technológií a vplyvom na životné prostredie. Efektívnosť využívania CNG sa zvyšuje aj optimalizáciou infraštruktúry, ako ukázali Özcan a Kılıç [11], že správne navrhnuté čerpacie stanice CNG môžu znížiť energetickú náročnosť až o 12 % bez vplyvu na výkon, čo má priamy vplyv na prevádzkovú ekonomiku a environmentálnu stopu. V kontexte verejných financií zaujímavý pohľad prináša prípadová štúdia Fabiana a Janeka [12], ktorí analyzovali návratnosť investícií do autobusov na CNG v porovnaní s elektrickými alternatívami. Výsledky ukazujú, že CNG je ekonomicky výhodnejšie pri nižšej úrovni

štátnej podpory, zatiaľ čo elektrické vozidlá získavajú výhodu len pri dotáciách nad 50 %, čo naznačuje potrebu flexibilnej dotčnej politiky reagujúcej na miestne podmienky a technické možnosti. Technologické inovácie zároveň rozširujú možnosti nasadenia CNG v rôznych segmentoch dopravy. Dôležitým prínosom v tomto smere je výskum Majczaka a kol. [13], ktorí vyvinuli hydraulicky asistovaný vstrekovač CNG určený pre dieselové motory. Takéto riešenia umožňujú rozšíriť CNG na hybridné a konverzné systémy bez potreby úplnej výmeny spaľovacej jednotky, čím sa znižujú bariéry vstupu a zvyšuje návratnosť investícií. Tieto pokroky sú obzvlášť relevantné pre segmenty ťažkých nákladných vozidiel, kde stále prevládajú požiadavky na výkon a spoľahlivosť. Z regionálneho hľadiska je zavedenie CNG sľubné v krajinách s dostupnými zásobami zemného plynu, ale slabou elektrickou infraštruktúrou.

Hussaini et al. [14] vo svojej štúdii z Nigérie identifikovali CNG a LPG ako najrealistickejšie alternatívy nízkouhlíkovej mobility, pričom zdôraznili dôležitosť legislatívneho rámca a politickej vôle. Tento názor zodpovedá názoru Va-lavanidis [15], ktorý považuje CNG za „prechodnú technológiu" – dočasné riešenie vedúce k úplnej elektrifikácii, najmä v kontexte, kde výstavba nabíjacej siete nie je v krátkodobom horizonte ekonomicky alebo technicky realizovateľná. Tieto skutočnosti ukazujú, že CNG nie je len dočasným nástrojom, ale systémovým prvkom stratégie prechodu na udržateľnú mobilitu. Jeho životaschopnosť nie je určená len technickými parametrami, ale aj schopnosťou štátu vytvoriť fungujúci ekosystém, ktorý kombinuje výskum, inovácie, verejné investície a regulačné nástroje. V spojení s rozvojom biometánu, reverznej gazifikácie a hybridných technologických možností môže CNG tvoriť stabilný pilier transformácie odvetvia dopravy v nadchádzajúcich desaťročiach. Ak majú byť dosiahnuté klimatické ciele a zároveň zabezpečená cenovo dostupná a spoľahlivá mobilita pre všetky segmenty obyvateľstva, CNG by nemalo byť ignorované, ale malo by byť cielené a podporované ako súčasť viacúrovňového energetického mixu.

METODIKA VÝSKUMU

Táto štúdia použila reálne prevádzkové údaje z prezentácie „EPIC – Environmentálne a

Analýza ekonomických úspor vozidiel na CNG [5], ktorá sumarizuje výsledky viacročného monitorovania vozidiel na CNG za obdobie od decembra 2015 do júna 2020. Údaje obsahovali komplexný súbor informácií o spotrebe paliva (v litroch a kilogramoch), najazdených kilometroch, produkcii emisií (CO_2, NO_x, SO_2, PM), ako aj o technickom vybavení čerpacích staníc. Získané údaje boli následne extrahované z grafických výstupov a tabuliek a prevedené do bežného výpočtového formátu (CSV), pričom boli ďalej štandardizované na jednotky kg/100 km a kg CO_2.

Vzorka pozostávala z 33 vozidiel, rozdelených medzi technológie CNG a diesel, ktoré boli všetky prevádzkované v reálnych podmienkach mestskej a prímestskej verejnej dopravy na Slovensku. Vozový park zahŕňal autobusy kategórie M3 používané na pravidelnú osobnú dopravu, predovšetkým na pravidelných mestských a regionálnych linkách. Vozidlá mali na začiatku štúdie vek od 2 do 8 rokov, čo zabezpečilo realistické zastúpenie prevádzkovej flotily namiesto idealizovaných alebo laboratórnych podmienok. Autobusy na CNG aj naftu boli porovnateľné z hľadiska hmotnostnej triedy, kapacity sedadiel a denného počtu najazdených kilometrov, ktorý sa v závislosti od pridelených liniek pohyboval v priemere medzi 150 a 300 kilometrami za deň. Spotreba paliva sa merala za rôznych sezónnych a zaťažovacích podmienok, pričom sa zachytili rozdiely v používaní kúrenia, počte cestujúcich a topografii. Vozidlá podliehali aj štandardizovaným protokolom údržby v rámci tej istej prevádzkovateľskej spoločnosti, čím sa zabezpečili jednotné harmonogramy údržby a minimalizovalo sa skreslenie spôsobené technickými rozdielmi. Vozidlá na CNG boli vybavené továrenskými zážihovými motormi, zatiaľ čo dieselové autobusy používali moderné kompresné motory spĺňajúce emisné normy EURO V alebo EURO VI. Vďaka zahrnutiu vozidiel s rôznou dĺžkou prevádzky a intenzitou prevádzky umožňuje súbor údajov reprezentatívnu analýzu strednodobej environmentálnej a ekonomickej výkonnosti.

Testovanie vozidiel sa vykonávalo za štandardných podmienok mestskej a prímestskej dopravy.

štandardných podmienok mestskej a prímestskej dopravy. Spotreba paliva bola monitorovaná v rôznych prevádzkových režimoch a sezónnych obdobiach, aby sa zachytili dynamické zmeny zaťaženia a ich vplyv na emisie. Hodnoty emisií boli prepočítané z objemov paliva podľa štandardizovaných emisných faktorov v súlade s metodikami EEA a IPCC, pričom sa rozlišovali priame emisie z výfukových plynov a agregované hodnoty uhlíkovej stopy. Kľúčové

Analytickou metódou bola lineárna regresná analýza, ktorá modelovala vzťah medzi spotrebou paliva a produkciou emisií CO_2 a NO_x. Pre každý typ pohonu bola vypočítaná samostatná regresná rovnica, ktorá umožnila predpovedať emisie na základe vstupných hodnôt spotreby, pričom boli identifikované aj hodnoty R2 koeficientu determinácie, čo potvrdilo silnú závislosť medzi skúmanými premennými. Výpočty boli vykonané v programovacom prostredí Python s využitím knižníc matplotlib a statsmodels na vizualizáciu výsledkov. Získané výstupy boli spracované do grafov a prehľadných tabuliek, ktoré porovnávali vplyv CNG, nafty, biometánu a elektrických vozidiel na životné prostredie počas celého životného cyklu vozidla. Výsledky ukázali, že CNG je výrazne čistejšou alternatívou k nafte a biometán dosahuje dokonca najnižšiu uhlíkovú stopu zo všetkých skúmaných palív. Táto metodika tak poskytla objektívny základ pre porovnanie environmentálnych a ekonomických výhod rôznych technológií v reálnych prevádzkových podmienkach vozidiel.

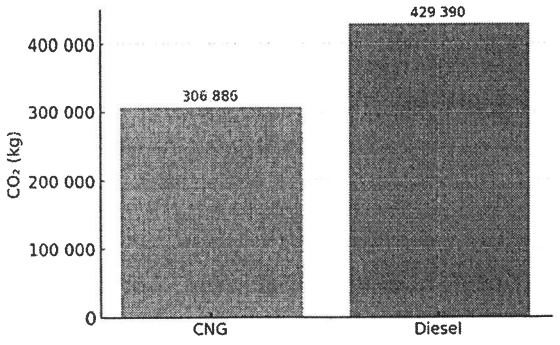
Metodika zahŕňa aj analýzu trendov v predpokladanom znížení emisií a vývoji nákladov na palivo pre vozidlá na CNG a dieselové vozidlá v rokoch 2015 až 2030, pričom sa používajú normalizované indexy, ktoré umožňujú zmysluplné relatívne porovnania v čase. Metodický návrh je založený na extrapolácii trendov, čo umožňuje vizualizáciu environmentálnych aj ekonomických trajektórií a jasne demonštruje výraznejšie zníženie emisií a prevádzkových nákladov v prípade CNG v porovnaní s dieselom. Využitím relatívneho indexového rámca namiesto absolútnych hodnôt analýza účinne zmierňuje skreslenie hodnôt a zdôrazňuje dlhodobú udržateľnosť a nákladovú efektívnosť CNG ako životaschopnej alternatívy v odvetví dopravy.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

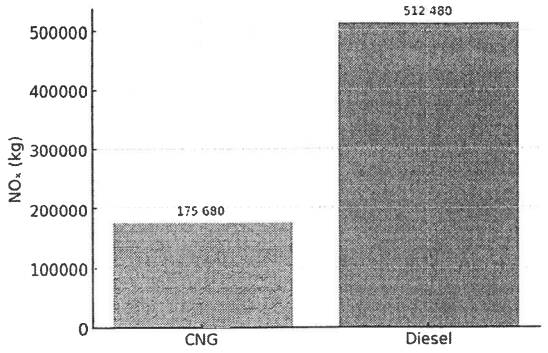
Výsledky kvantitatívnej analýzy vychádzajú z kombinácie empirických údajov a regresných modelov získaných z pozorovania reálnej prevádzky vozidiel poháňaných CNG a naftou. Nasledujúce obrázky graficky znázorňujú environmentálne parametre, ktoré umožňujú objektívne porovnanie týchto dvoch technológií. Výsledky ukazujú priamy vzťah medzi najazdenými kilometrami a množstvom emisií ako aj nákladov na palivo. Vizualizované údaje poskytujú prehľadný obraz o výhodách CNG v mestskom dopravnom prostredí a slúžia aj ako základ pre tvorbu politiky zameranej na udržateľnosť.

Na obrázku 1 je porovnanie celkových emisií CO_2 počas prevádzky vozidiel na CNG a dieselových vozidiel. Výsledky ukazujú, že dieselové vozidlá vyprodukovali približne 429 390 kg CO_2, zatiaľ čo vozidlá na CNG len 306 886 kg, čo predstavuje úsporu viac ako 122 000 kg CO_2 v prospech CNG. Tento rozdiel poukazuje na výrazne nižšiu uhlíkovú stopu CNG a jeho environmentálnu výhodu v boji proti zmene klímy. Tieto čísla potvrdzujú, že zavádzanie technológií CNG je nielen rozumné z hľadiska klimatickej politiky, ale aj praktickým krokom k zníženiu uhlíkovej stopy dopravy. Štúdia Jamrozika a kol. [16] potvrdzuje, že zvýšenie podielu CNG vedie k zníženiu emisií CO_2 a takmer úplnému zníženiu emisií$_{CO_2}$v porovnaní s čistým dieselovým režimom. Význam tohto rozdielu je ešte naliehavejší v kontexte záväzkov Európskej únie v rámci klimatickej stratégie Fit for 55, ktorá stanovuje 55 % zníženie emisií skleníkových plynov do roku 2030 [17]. Vzhľadom na nižšie emisie CO_2 a existujúce možnosti infraštruktúry je CNG životaschopným prechodným palivom, ktoré môže zohrávať kľúčovú úlohu v dekarbonizácii odvetvia dopravy.

Obrázok 2 ukazuje porovnanie emisií NO_x v kilogramoch medzi vozidlami na CNG a dieselovými vozidlami. Výsledky jasne ukazujú, že dieselové vozidlá emitovali 512 480 kg NO_x, zatiaľ čo vozidlá na CNG emitovali len 175 680 kg, čo predstavuje zníženie o 336 800 kg, t. j. približne 65 %. Tento rozdiel má významný vplyv na životné prostredie a zdravie, pretože NO_x prispieva k tvorbe prízemného ozónu, kyslým dažďom a súvisí s respiračnými



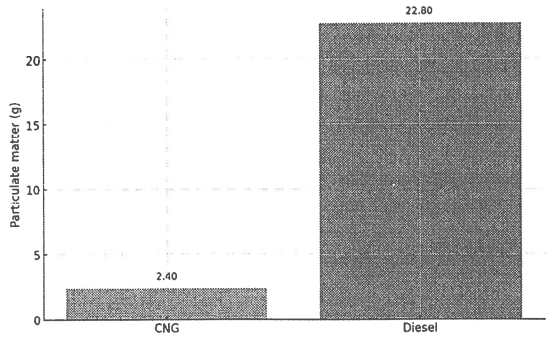
Obrázok 1. Emisie oxidu uhličitého (CO_2) v kilogramoch



Obrázok 2. Porovnanie oxidov dusíka (NO_x) v kilogramoch

ochorenia, najmä u citlivých skupín obyvateľstva, ako sú deti a starší ľudia. Yasar et al. [18] poukázali na to, že prechod z nafty na CNG vedie k významnému zníženiu emisií HC, NO_x a opacity výfukových plynov. Štúdia autorov Kumar et al. [19] uvádza, že pri používaní CNG dochádza k zníženiu emisií CO_2, NO_x a dymu. Autori vykonali experiment, ktorý preukázal, že používanie CNG v kombinácii s dieselovým palivom má významný vplyv na výkon motora a najmä na emisie. V kontexte európskej environmentálnej politiky, kde sú emisné limity NO_x regulované smernicou o kvalite ovzdušia (smernica 2008/50/ES), technológia CNG predstavuje skutočný príspevok k zlepšeniu kvality ovzdušia a splneniu cieľov Zeleného dohovoru pre Európu.

V prípade tuhých častíc, ktoré sú jedným z najnebezpečnejších znečisťujúcich látok pre ľudské zdravie, sa ukázalo (obrázok 3), že dieselové vozidlá emitovali 22,8 g, zatiaľ čo CNG emitovalo len 2,4 g. To zodpovedá 90 % zníženiu, čo zdôrazňuje kľúčovú úlohu CNG pri zlepšovaní kvality ovzdušia v mestách a ochrane verejného zdravia. Štúdia Lejda et al. [20] ukázala výsledky, že CNG



Obrázok 3. Porovnanie emisií PM v gramoch

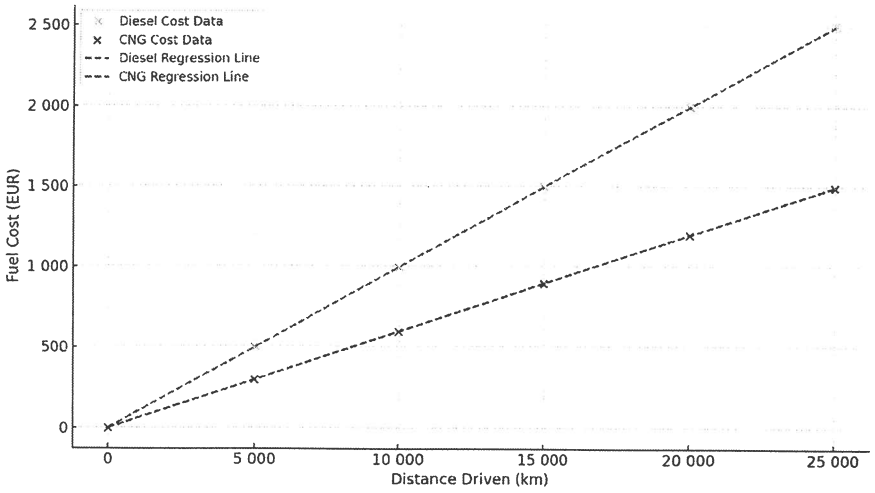
vozidlo malo výrazne nižšie emisie CO_2 a CO, najmä v mestských podmienkach. Emisie boli merané počas testovania v novom európskom jazdnom cykle (NEDC) a v reálnych cestných testoch. Vysoké koncentrácie $PM_{2.5}$ a PM_{10} sú úzko spojené so zvýšenou úmrtnosťou, výskytom kardiovaskulárnych ochorení, astmy a iných chronických respiračných ochorení. Svetová zdravotnícka organizácia preto odporúča prísne obmedzenia vystavenia obyvateľstva týmto časticiam a podporuje zavádzanie nízkouhlíkových technológií, vrátane CNG, najmä v oblastiach s hustou dopravou a ohrozenými skupinami obyvateľstva [21].

V prípade emisií síry vozidlá na CNG vypúšťali do ovzdušia len 2 400 g, zatiaľ čo vozidlá na naftu vypúšťali až 2 468 000 g, čo je viac ako 1 000-násobný rozdiel. Toto množstvo síry prispieva k okysľovaniu atmosféry a vodných zdrojov, čo má za následok degradáciu pôdy, koróziu infraštruktúry a nepriaznivé vplyvy na biodiverzitu. Podľa európskej legislatívy je obsah síry v palivách prísne obmedzený (na 10 mg/kg), čo robí CNG jedným z najčistejších palív z hľadiska znečistenia sírou [22].

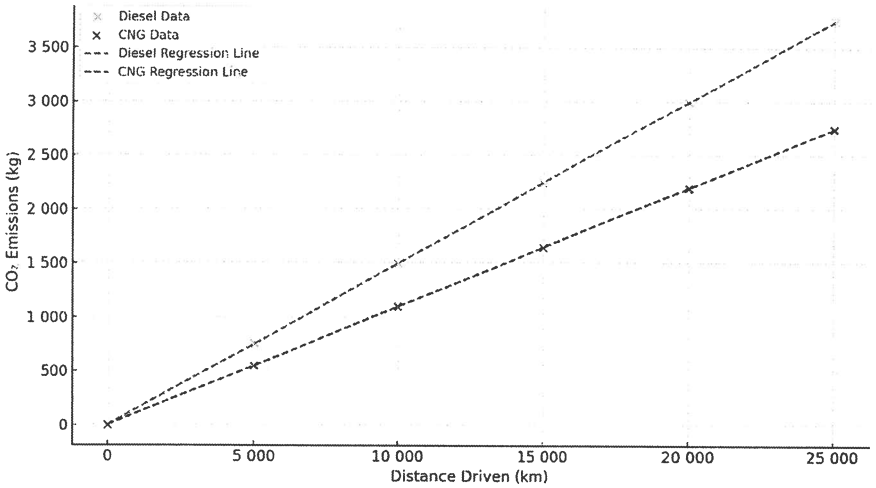
Tieto výsledky spolu poukazujú na výhody CNG nielen z hľadiska klimatických cieľov, ale aj z hľadiska ochrany verejného zdravia, čo z neho robí dôležitý nástroj environmentálnej a dopravnej politiky, najmä pri prechode na mobilitu s nulovými emisiami.

Obrázok 4 ukazuje regresnú analýzu nákladov na palivo (CNG vs. nafta) v porovnaní s počtom najazdených kilometrov. Obe palivá majú lineárny vzťah medzi najazdenými kilometrami a nákladmi, pričom nárast nákladov na naftu je výrazne strmší. To potvrdzuje, že CNG predstavuje ekonomicky výhodnejšiu alternatívu, najmä pri dlhšom prevádzkovaní. K podobným výsledkom dospeli aj Do et al. [23] vo svojom tvrdení, ktoré vyplýva z ich štúdie, že vozidlá na CNG môžu byť efektívnou náhradou za vozidlá na naftu a zároveň ponúkajú nižšie prevádzkové náklady.

Regresná analýza znázornená na obrázku 5 jasne dokumentuje lineárny vzťah medzi počtom najazdených kilometrov a emisiami CO_2 u vozidiel s dieselovým motorom a vozidiel na CNG. Vozidlá s dieselovým motorom, znázornené červenou regresnou krivkou, vykazujú výrazne vyšší nárast emisií CO_2 v porovnaní s vozidlami na CNG, znázornenými modrou regresnou krivkou. Tento rozdiel je spôsobený nižšou uhlíkovou náročnosťou CNG, vďaka čomu je jeho používanie šetrnejšie k životnému prostrediu. Výsledky sú v súlade so zisteniami Európskej environmentálnej agentúry, ktorá uvádza, že



Obrázok 4. Regresná analýza nákladov na palivo podľa počtu najazdených kilometrov



Obrázok 5. Regresná analýza emisií CO_2 podľa počtu najazdených kilometrov

Vozidlá na CNG dosahujú v priemere o 20 – 30 % nižšie emisie CO_2 v porovnaní s dieselovými alternatívami [2]. Tong et al. [24] zistili, že vozidlá na CNG môžu dosiahnuť až 20 % zníženie emisií CO_2 v porovnaní s benzínovými vozidlami na základe regresnej analýzy porovnávajúcej emisie skleníkových plynov počas životného cyklu medzi vozidlami na CNG a benzínovými vozidlami. Pomocou analýzy Monte Carlo chceli autori ukázať, že sa zohľadňuje variabilita a neistota emisií počas celého životného cyklu zemného plynu. Vo svojej štúdii Pijoan et al. [25] vyvinuli regresné modely na kvantifikáciu emisií CO_2 z rôznych typov vozidiel, vrátane vozidiel poháňaných CNG. Ich analýza tiež ukazuje a potvrdzuje tvrdenia, že vozidlá na CNG produkujú nižšie emisie CO_2 v porovnaní s tradičnými palivami, ako je diesel alebo benzín.

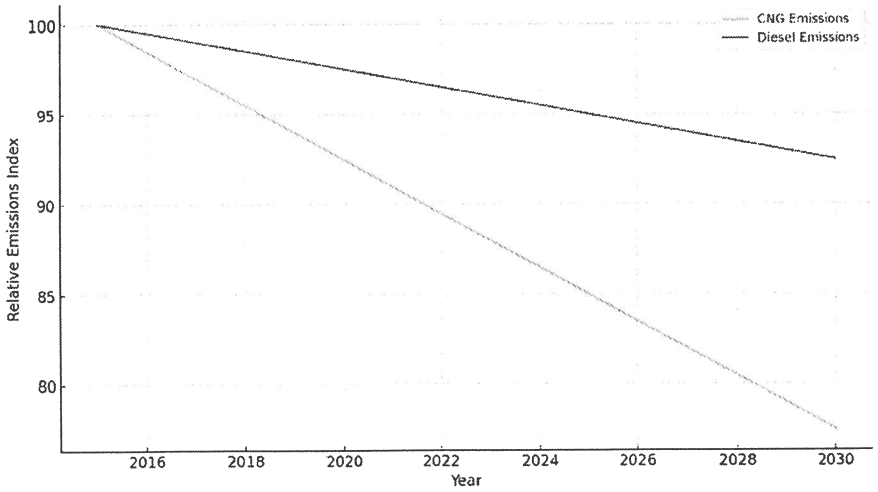
Podobné závery prináša aj experimentálna štúdia Sahoo a Srivastava [3], podľa ktorej boli u motorov na CNG namerané až o 29 % nižšie emisie CO_2 v porovnaní s benzínom a tiež výrazné zníženie v porovnaní s dieselom. Lee et al. [26] vo svojej štúdii ukazujú, že vozidlá produkovali približne o 20 % menej emisií CO_2 a výrazne nižšie emisie NO_x v porovnaní s dieselovými vozidlami. Praktický vplyv skúmali aj Igwe et al. [27], ktorí preukázali, že prechod osobných vozidiel z benzínu na CNG vedie k merateľným úsporám a nižším emisiám. Tieto zistenia sú v súlade s vykonanou regresnou analýzou, ktorá potvrdzuje lineárny vzťah medzi počtom najazdených kilometrov a kumulatívnymi nákladmi aj úsporami CO_2. Vo svojej štúdii Mądziel [28] uplatnil

a implementovala vývoj presného modelu predikcie emisií CO_2 pre vozidlá na CNG v kontexte prísnych environmentálnych politík. Modely emisií CO_2 navrhnuté pre vozidlá na CNG podporujú globálne úsilie o zníženie uhlíkovej stopy dopravy. Štúdia tiež potvrdzuje získané zistenia, že vozidlá poháňané CNG emitujú menej CO_2 ako konvenčné vozidlá, čím významne prispievajú k zníženiu emisií skleníkových plynov.

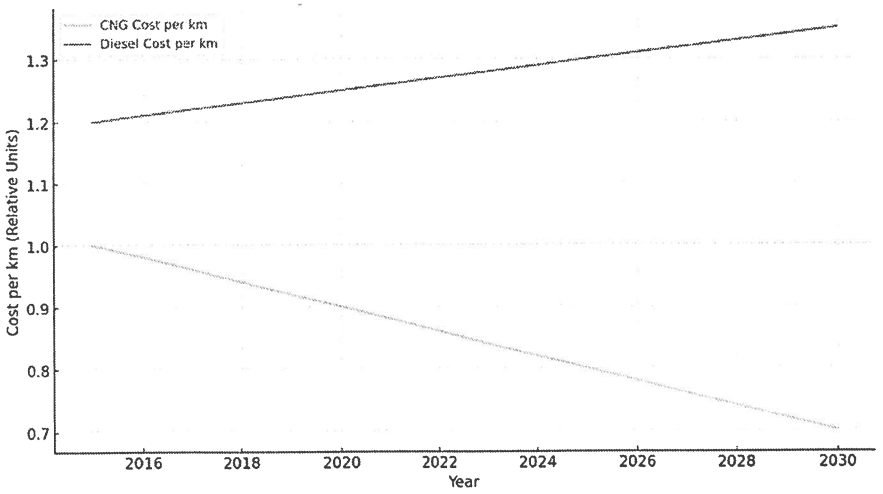
Obrázok 6 znázorňuje predpokladaný vývoj emisií pre dve rôzne palivá (CNG a nafta) v rokoch 2015 – 2030. Vertikálna os znázorňuje relatívny emisný index, ktorý začína v roku 2015 pre obe palivá na hodnote 100 a postupne klesá. Tento index umožňuje porovnať mieru poklesu emisií medzi týmito dvoma technológiami, pričom sa nezohľadňujú absolútne množstvá emisií, ale zmena v čase. Analýza trendov ukazuje, že emisie CNG klesajú rýchlejšie ako emisie nafty. Kým nafta vykazuje mierny pokles emisií o približne 7 % za 15 rokov, CNG zaznamenalo výraznejšie zníženie o približne 22 %. Tento rozdiel podčiarkuje environmentálnu výhodu CNG, ktorá vyplýva z jeho nižšej uhlíkovej stopy a čistejšieho spaľovania v porovnaní s dieselom. Na záver, ak sa predpokladaný trend naplní, CNG bude v roku 2030 z hľadiska emisií výrazne čistejším riešením ako diesel, čo podporuje jeho uplatnenie v politike udržateľnej mobility a ekologických dopravných systémoch.

Obrázok 7 znázorňuje predpokladaný vývoj nákladov na palivo na kilometer pre vozidlá na CNG a dieselové vozidlá v rokoch 2015 až 2030. Vertikálna os znázorňuje relatívne jednotky nákladov, ktoré predstavujú vývoj trendu (nie absolútne ceny v eurách), zatiaľ čo horizontálna os znázorňuje jednotlivé roky. Prevádzkové náklady vozidiel na CNG majú klesajúci trend, pričom v roku 2015 dosahovali 1,0 jednotky a do roku 2030 klesnú približne na 0,7 jednotky. Tento vývoj odzrkadľuje technologický pokrok, zvyšujúcu sa účinnosť spaľovania CNG a priaznivý vývoj cien nafty v doprave. Naopak, náklady na naftu postupne rastú, a to z 1,2 jednotky v roku 2015 na viac ako 1,3 jednotky v roku 2030. Tento nárast môže súvisieť s rastom cien nafty, prísnejšou legislatívou v oblasti emisií, zvýšením daní a nákladmi na údržbu starších naftových motorov. Porovnanie oboch trendov jasne ukazuje, že CNG sa z dlhodobého hľadiska stáva nákladovo efektívnejším riešením v doprave. Táto skutočnosť posilňuje jeho uplatnenie v automobilovej doprave a logistických službách, kde rozhodujúcu úlohu zohrávajú dlhodobé náklady. Analýza trendov na obrázku 7 potvrdzuje nielen ekologickú, ale aj ekonomickú výhodu CNG v období do roku 2030.

Napriek jasným environmentálnym a ekonomickým výhodám, ktoré táto štúdia preukázala, má používanie CNG vo verejnej a komerčnej doprave aj niekoľko obmedzení, ktoré si zaslúžia kritické zváženie. Jednou z hlavných výziev zostáva obmedzená dostupnosť čerpacích staníc, najmä vo vidieckych oblastiach a menších mestách. Hoci niektoré krajiny, vrátane Slovenska, dosiahli pokrok v budovaní CNG staníc, sieť je stále nedostatočná na ich široké nasadenie. To obmedzuje prevádzkovú flexibilitu vozidiel na CNG a môže odradiť súkromných prevádzkovateľov alebo samosprávy od prechodu na tento druh paliva.



Obrázok 6. Predpokladaný vývoj emisií (2015–2030)



Obrázok 7. Predpokladaný vývoj nákladov na palivo (2015–2030)

vozové parky bez zaručeného prístupu k palivu. Ďalšou prekážkou sú počiatočné investičné náklady, najmä v prípade dodatočnej montáže do existujúcich dieselových vozidiel alebo nákupu nových modelov kompatibilných s CNG. Hoci prevádzkové náklady sú vo všeobecnosti nižšie, počiatočné výdavky na konverzné súpravy, výmenu vozidiel a potrebné školenia v oblasti údržby môžu predstavovať významnú záťaž, najmä pre menších dopravcov. Bez cielených verejných dotácií alebo stimulov nemusí byť návratnosť investícií do technológie CNG vo všetkých kontextoch priaznivá. Bezpečnostné obavy, hoci sú do veľkej miery zmiernené modernými konštrukčnými normami, pretrvávajú vo verejnom vnímaní. CNG sa skladuje pod vysokým tlakom (zvyčajne 200 – 250 barov), čo môže predstavovať riziko v prípade nehôd alebo nesprávnej manipulácie. Potreba prísnych bezpečnostných protokolov, pravidelných kontrol a vyškoleného personálu zvyšuje zložitosť prevádzky. Nedostatočná údržba alebo zastarané skladovacie systémy môžu ďalej zvyšovať zraniteľnosť, najmä v prípade modernizovaných alebo starších vozidiel. Okrem toho klimatické a výkonnostné obmedzenia technológie CNG môžu ovplyvniť účinnosť motora v chladnom počasí alebo pri vysokom zaťažení. Na rozdiel od nafty, ktorá spoľahlivo funguje v širokom rozsahu teplôt a nadmorských výšok, motory na CNG môžu vykazovať znížený výkon v náročných podmienkach, čo si vyžaduje dodatočné technologické úpravy. Nakoniec, z dlhodobého hľadiska je CNG (hoci je čistejšie ako diesel) stále palivom na báze fosílnych palív a jeho zavedenie treba považovať za dočasné opatrenie. Bez integrácie obnoviteľných foriem, ako je biometán, je potenciál dekarbonizácie CNG v kontexte dosiahnutia cieľov čistých nulových emisií zostávajú obmedzené. Hoci výsledky tejto štúdie potvrdzujú environmentálne a ekonomické výhody CNG v porovnaní s naftou, vyvážené hodnotenie musí zohľadňovať aj tieto obmedzenia. Ich prekonanie si bude vyžadovať nielen technické inovácie, ale aj podporné politické rámce, cielené investície a koordinované plánovanie infraštruktúry na národnej aj regionálnej úrovni.

ZÁVERY

Výsledky tejto štúdie potvrdzujú, že CNG predstavuje efektívnu alternatívu k tradičným fosílnym palivám v odvetví dopravy, najmä z hľadiska environmentálnych a ekonomických výhod. Údaje ukázali, že vozidlá na CNG majú výrazne nižšie emisie CO_2 a v porovnaní s vozidlami na naftu prinášajú aj výrazné úspory prevádzkových nákladov. Tieto zistenia sú v súlade s medzinárodnými štúdiami, ktoré poukazujú na environmentálne výhody CNG. Vozidlá na CNG vypúšťajú menej skleníkových plynov a znečisťujúcich látok v porovnaní s tradičnými palivami, čo prispieva k zlepšeniu kvality ovzdušia a zníženiu uhlíkovej stopy. Okrem toho analýza nákladovej efektívnosti ukazuje, že CNG môže byť ekonomicky výhodnejšie, najmä pri dlhodobej prevádzke vozidiel v mestskom prostredí. Z environmentálneho hľadiska predstavuje CNG palivo s nižším emisným faktorom, ktoré má tiež potenciál synergicky spolupracovať s obnoviteľnými zdrojmi, ako je biometán. Štúdia uvádza, že integrácia obnoviteľného zemného plynu do existujúcej infraštruktúry CNG môže ďalej

znížiť emisie skleníkových plynov a podporiť prechod na udržateľnejšiu dopravu. V kontexte klimatických cieľov Európskej únie a potreby okamžitého zníženia emisií v odvetví dopravy je CNG relevantnou súčasťou palivového mixu.

Aby sa však mohol plne rozvinúť jeho potenciál, je nevyhnutná cielená podpora zo strany štátu, najmä vo forme stimulov, investícií do infraštruktúry a flexibilnej politiky dotácií. Na dosiahnutie systematického zníženia emisií uhlíka v sektore dopravy je tiež potrebné venovať pozornosť zavádzaniu prelomových technológií alebo hodnoteniu súčasne dostupných riešení zameraných na zníženie počtu vozidiel. Súčasná éra digitalizácie a využívania umelej inteligencie sa čoraz viac uplatňuje aj na účely odstraňovania skleníkových plynov. Výsledky zdôrazňujú význam moderných technológií pri vytváraní udržateľných a efektívnych riešení, ako sú najmä elektrické a hybridné vozidlá, ktoré významne prispievajú k zníženiu emisií skleníkových plynov, pretože elektrické vozidlá neprodukujú žiadne emisie (CO_2) a emisie CO_2 z hybridných vozidiel sú nízke, čo vedie k re-
zníženie emisií v porovnaní s vozidlami poháňanými benzínom a naftou. Zároveň by sa mal podporovať výskum hybridných riešení, aby sa táto technológia mohla vo väčšej miere uplatňovať v náročnejších segmentoch dopravy. Analýza predpokladaných trendov emisií a nákladov na palivo v rokoch 2015 až 2030 poukazuje na CNG ako na udržateľnejšiu a ekonomicky životaschopnejšiu alternatívu k nafte. CNG vykazuje výrazne väčšie zníženie emisií, čo posilňuje jeho environmentálne výhody a súlad s politikami nízkouhlíkovej dopravy. Klesajúci trend prevádzkových nákladov CNG v porovnaní s rastúcimi nákladmi naftových motorov potvrdzuje jeho dlhodobú nákladovú efektívnosť. Tieto zistenia podporujú strategickú integráciu technológií CNG do dopravných systémov a logistiky s cieľom podporiť čistejšie a cenovo dostupnejšie dopravné riešenia.

Poďakovanie

Táto výskumná práca je čiastočným výstupom projektu VEGA 1/0713/24 Digitálna ekonomika ako kľúčová výzva pre transformáciu podnikov na Slovensku, financovaného Ministerstvom školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky.

ODKAZY

1. Európska agentúra pre životné prostredie Environment Agency. *Emisie skleníkových plynov podľa krajín a* sektorov. 2022. (Dostupné: 03.06.2025) https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/ greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-2
2. Európska environmentálna agentúra. Kvalita ovzdušia v Európe – správa za rok 2020 (správa EEA č. 9/2020). (Dostupné: 03.06.2025) https://www.eea.europa.eu/ publications/air-quality-in-europe-2020-report
3. Sahoo, S. a Srivastava, D. K. *Environmentálne a ekonomické hodnotenie motorov na CNG a benzín: Experimentálna analýza* (číslo dokumentu: ICEF2021-66772, V001T04A001). ASME. 2021. https://doi. org/10.1115/ICEF2021-66772
4. Európska komisia. Národný politický rámec pre rozvoj trhu s alternatívnymi palivami v odvetví dopravy a zavádzanie príslušnej infraštruktúry – Správa Slovenska. 2019. (Dostupné: 03.06.2025) https://transport.ec.europa.eu/document/ download/773ed6ef-0667-47f5-8ca9-97b298ef227d_ en?filename=Slovakia-NPF-Report-2019.pdf
5. EPIC. Analýza environmentálnych a ekonomických úspor vozidiel na CNG (2015–2020). 2020. [Interný dokument, M.B.M. Group].
6. Divekar, P., Han, X., Zhang, X., Zheng, M. a Tjong, J. Zlepšenie energetickej účinnosti a zníženie emisií CO_2 použitím CNG v stredne ťažkých a ťažkých zážihových motoroch. En-ergy. 2022; 263, 125769. https://doi.org/10.1016/j. energy.2022.125769
7. Ali, Y., Younus, A., Khan, A. U. a Alrefai, A. H. Stlačený zemný plyn (CNG) ako palivo a súvisiace riziká: Kvantitatívna analýza v scenári rozvojovej krajiny. Journal of Safety Science and Resilience. 2024; 5, 306–316. https:// doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.05.001
8. Al-Mohannadi, A. A., Ertogral, K. a Erkoc, M. Alternatívne palivá v udržateľnej logistike – aplikácie, výzvy a riešenia. Udržateľnosť; 2024. 16(8484). https://doi.org/10.3390/ su16198484
9. Rose, L., Hussain, M., Ahmed, S., Malek, K., Costanzo, R. a Kjeang, E. Porovnávacie hodnotenie životného cyklu vozidiel na zber odpadu poháňaných naftou a stlačeným zemným plynom v kanadskom meste. Energetická politika. 2012; 52, 453–461. https:// doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.064
10. Borgosano, S., Saldarini, A., Longo, M., Zaninelli, D. a Astori, V. Analýza nákladov a optimalizácia verejných autobusových flotíl s využitím genetického algoritmu zohľadňujúceho rôzne technológie. Zborník z konferencie AEIT 2024. Politecnico di Milano. https://ieeex-plore.ieee.org/xpl/conhome/10736529/proceeding

11. Özcan, F. a Kılıç, M. Dynamické modelovanie čerpacej stanice stlačeného zemného plynu a multi-objektívna optimalizácia prostredníctvom metódy Gray Relational Analysis. Aplikované vedy. 2025; 15(4908). https:// doi.org/10.3390/app15094908

12. Fabianová, J. a Janekova, J. Ekonomické hodnotenie investícií do elektrických autobusov a autobusov na CNG – Prípadová štúdia spoločnosti verejnej dopravy. Advances in Science and Technology Research Journal. 2022; 16(4), 96–105. https://doi. org/10.12913/22998624/151801

13. Majczak, A., Barański, G., Sochaczewski, R. a Siadkowska, K. Výskum vstrekovača CNG pre dvojité palivové motory. Advances in Science and Technology Research Journal. 2017; 11(1), 212–219. https://doi. org/10.12913/22998624/68458

14. Hussaini, M., Babagana, M., Jibrin, I., Haliru, M. M., Ugoamadi, C. E., Hamid, A. T., Yauri, A. M. a Aba, M. M. Hodnotenie vyhliadok a scenára prechodu na nízkouhlíkovú energetiku v sektore cestnej dopravy v metropole Maiduguri. Bayero Journal of Engineering and Technology. 2024; 19(1), 22–40. https://www.academia.edu/120741192/APPRAISNG_THE_PROSPECTS_AND_SCENARIO_OF_LOW_CARBON_ENERGY_TRANSITION_FOR_ROAD_TRANSPORT_SECTOR_IN_MAIDUGURI_METROPOLIS

15. Valavanidis, A. Dopravné systémy a obnoviteľné zdroje energie: Kľúčová úloha pri zmierňovaní klimatických zmien. Vedecké recenzie. 2024. https:// www.researchgate.net/publication/380899466

16. Jamrozik, A., Tutak, W., Pyrc, M., Grab-Rogaliński, K. a Gruca, M. Experimentálna komparatívna štúdia o využívaní vodíka a amoniaku v dieselovom motore s dvojitým palivom. 2025. Dostupné na SSRN: https:// ssrn.com/abstract=5200527

17. Európska komisia. *Fit for 55: Dosiahnutie klimatického cieľa EÚ na rok 2030 na ceste k klimatickému neutrálnemu stavu.* Brusel: Európska komisia. (Dostupné: 03.06.2025) https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550

18. Yasar, A., Haider, R., Tabinda, A., Kausar, F. a Khan, M. Porovnanie emisií motorov ťažkých, stredných a ľahkých vozidiel na CNG, naftu a benzín. Poľský časopis pre environmentálne štúdie. 2013; 22(4): 1277–1281. https://www.pjoes.com/pdf-89090-22949?filename=22949.pdf

19. Kumar, N., Arora, B. a Maji, S. Hodnotenie vplyvu dieselového motora poháňaného CNG na životné prostredie. Archívy ochrany životného prostredia. 2023. https://doi.org/10.24425/aep.2023.144740

20. Lejda, K., Jaworski, A., Mądziel, M., Balawender, K., Ustrzycki, A. a Savostin-Kosiak, D. Hodnotenie emisií oxidov uhlíka z vozidiel poháňaných benzínom a zemným plynom v laboratórnych a cestných testoch. Energies. 2021; 14(6), 1631. https://doi. org/10.3390/en14061631

21. Svetová zdravotnícka organizácia. *Globálne usmernenia WHO pre kvalitu ovzdušia: Častice ($PM_{2,5}$ a PM_{10}), ozón, oxid dusičitý, oxid siričitý a oxid uhoľnatý.* 2021. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

22. Európska komisia. *Vykonávacie nariadenie Komisie (EÚ) 2022/631 z 13. apríla 2022.* (Dostupné: 03.06.2025) https://eur-lex.europa.eu/ legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022R0631

23. Do, S., Taa, M. a Far, F. Hodnotenie výkonu a spotreby paliva ťažkých úžitkových vozidiel s motormi na CNG v reálnej prevádzke. Technické dokumenty SAE na CD-ROM/Séria technických dokumentov SAE. 2023; https://doi.org/10.4271/2022-36-0116

24. Tong, F., Jaramillo, P. a Azevedo, I. M. L. Porovnanie skleníkových plynov v životnom cykle zo zdrojov zemného plynu pre stredné a ťažké úžitkové vozidlá. Environmental Science & Technology. 2015; 49(12), 7123–7133. https://doi.org/10.1021/ es5052759

25. Pijoan, A., Oribe-Garcia, I., Kamara-Esteban, O., Genikomsakis, K. N., Borges, C. E. a Alonso-Vicario, A. Regresné modely emisií pre príspevok vozidiel ku zmene klímy. Pokroky v inteligentných systémoch a výpočtovej technike. 2016; 47–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43991-4_5

26. Lee, D., Zietsman, J., Farzaneh, M. a Johnson, J.. Charakteristika emisií stlačeného zemného plynu a dieselových smetiarskeho vozidiel na cestách. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2011; 2233(1), 80–89. https:// doi.org/10.3141/2233-10

27. Igwe, I., Amadichuku, N., Ibanga, V. S. a Alere-chi, U. Ekonomické dôsledky prechodu z automobilov na benzín na automobily na zemný plyn. Medzinárodný časopis pre vedu, inžinierstvo a technológiu. 2024. https://www.ijset.in/wp-content/uploads/IJSET_V12_issue1_567.pdf

28. Mądziel, M. Modelovanie emisií CO_2 z vozidiel poháňaných stlačeným zemným plynom na základe testov na ceste a na dynamometri podvozku. Energies. 2024; 17(8), 1850. https://doi.org/10.3390/en17081850