UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚA ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
Școala Doctorală Ingineria Sistemelor Biotehnice
Domeniul Ingineria Mediului

REZUMAT TEZA DE DOCTORAT

EVALUAREA SUSTENABILITĂȚII TRANSPORTULUI PUBLIC PRIN ANALIZA EMISIILOR ȘI AMPRENTEI DE CARBON

Autor:
Anca-Florentina POPESCU (DIACONU)

Coordonator științific:
Prof.Dr.Habil.Chim. Ecaterina MATEI

București 2025

Cuvânt înainte

Pentru că am ajuns la finalul unui drum lung, anevoios, dar plin de satisfacții și în final de revelația autocunoașterii, pot spune că îmi va lipsi provocarea, îmi vor lipsi oamenii cu care am căutat răspunsuri la atâtea întrebări și, nu în ultimul rând, starea de frământare pentru a mă asimila mereu lucrului bine făcut și doresc să îmi exprim gratitudinea sinceră tuturor celor care s-au implicat în parcurgerea fiecărei etape prin care am trecut, cu emoție.

Doresc să-i mulțumesc în primul rând, cu recunoștință coordonatoarei me, Prof. Dr. Habil. Chim. Ecaterina Matei, pentru îndrumare, pentrù sprijin și pentru înțelegere, pentru atenția la fiecare pas pe care l-am parcurs pentru finalizarea tezei de doctorat.

Mulțumesc cu considerație doamnei Conf.Dr.Habil.Ing. Maria Râpă pentru toate sfaturile constructive, îndrumare și pentru răbdare.

Le mulțumesc tuturor celor care mi-au facilitat accesul la date, d-lui. Adrian Vîlcan, Valentin Culea, Viorel Rizea, Marius Drăguț, dar și colegei mele Alexandra Bădiceanu, alături de care am parcus o mică parte din acest drum.

Doresc să închei prin a le mulțumi familiei și prietenilor pentru încurajare, sprijin, răbdare și pentru înțelegerea fără de care nu aș fi reușit să ajung la acest final frumos. Le sunt recunoscătoare tuturor celor care au crezut în mine și m-au însoțit pe acest unic parcurs spre excelență.

„Scopul educației nu este umplerea unui vas, ci aprinderea unui foc.”

— William Butler Yeats

Cuprins

Lista abrevieri 5

Lista Figuri ..... **Error! Bookmark not defined.**

CAP.1 STADIUL ACTUAL PRIVIND POLUAREA ATMOSFERICĂ 1

1.1. Consideraţii generale privind poluarea atmosferică 6

1.2. Tipuri de poluanţi şi surse de poluare a aerului 8

1.3. Impactul poluării aerului şi efectele asupra planetei şi oamenilor 8

1.4. Măsuri privind reducerea poluării atmosferici prin implementare de soluţii sustenabile. 9

1.4.1. Sisteme de energie şi transport durabile 9

1.4.3. Modele de previzionare a poluării aerului 10

1.5. Concluzii ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.1. Situația actuală la nivelul Uniunii Europene privind activitatea din transport și calitatea mediului 11

2.2. Indicatori de performanță privind emisiile rezultate in atmosferă din sectorul transporturi 12

2.3. Impactul poluării atmosferice datorat sectorului transporturi asupra sănătății umane 12

2.4. Impactul asupra poluării atmosferice a diferitelor moduri de transport 13

2.5. Indicatori privind poluarea autobuzelor și trenurilor 13

2.6. Statistici privind sustenabilitatea sistemelor de mobilități din Europa 13

2.6.1. Transportul autoturismelor 13

2.6.2. Transportul public 13

2.6.3. Reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră generate de vehiculele grele în Europa 14

2.6.4. Aviația (internă și internațională intra-UE) 14

2.6.5. Navigația maritimă (internă și internațională intra-UE) 14

2.6.6. Alte sisteme de mobilitate 14

2.7. Transportul public în România 14

2.7.1. Situația sistemului de transport public 14

2.7.2. Strategii privind politica de decarbonizare în sectorul transporturi în România ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.8. Concluzii ..... **Error! Bookmark not defined.**

CAPITOLUL 3. OBIECTIVELE ŞI METODOLOGIA DE LUCRU 1

3.1. Scopul și obiectivele tezei de doctorat 16

3.2. Metodologia de cercetare 16

3.3. Metode de analiză 17

3.3.1. Metoda Jaspers ..... **Error! Bookmark not defined.**

3.3.2. Estimarea emisiilor GES şi calculul amprentei de carbon pentru flota de autobuze 18

CAPITOLUL 4. CERCETĂRI PRIVIND ESTIMAREA EMISIILOR FLOTEI DE AUTOBUZE ALE OPERATORULUI DE TRANSPORT BUCUREŞTI 18

4.1. Analiza situației flotei de transport public București, în perioada 2019 – 2023 în raport cu țintele de mediu 18

4.2. Utilizarea multifuncțională a infrastructurii de alimentare cu energie electrică a operatorilor de transport din București. 19

4.3. Concluzii ..... **Error! Bookmark not defined.**

CAPITOLUL 5 . ESTIMAREA EMISIILOR GES A FLOTEI DE AUTOBUZE ALE OPERATORULUI DE TRANSPORT BUCUREŞTI ŞI CALCULUL AMPRENTEI DE CARBON .. 20

5.1. Flota de autobuze existentă în momentul calculului estimativ şi factori de emisie luaţi în calcul 20

5.2. Calcule privind estimarea GES a flotei de autobuze a operatorului de transport din București pentru perioada 2021-2024 20

5.3. Calcule privind estimarea GES a flotei de autobuze pentru linia de autobuz 368 a STB-S.A. 25

5.4. Estimari privind GES in scenarii in care creste gradul de electrificare al flotei de autobuze a operatorului de transport din Bucuresti 28

5.4. Comparaţia costurilor pe LCA pentru autobuzele hibrid şi electrice din flota STB-S.A. vs. Diesel EURO VI. 29

5.5. Analiza cost – beneficiu pentru staţiile de încărcare ale autobuzelor electrice. 31

5.6. Analiza cost – eficacitate pentru staţiile de încărcare ale autobuzelor electrice. 32

5.7. Concluzii ..... **Error! Bookmark not defined.**

CAPITOLUL 6. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUŢII ORIGINALE ŞI PERSPECTIVE DE VIITOR 33

6.1. Concluzii finale 33

6.2. Contributii originale 33

Perspective de viitor 35

Diseminarea rezultatelor 39

Lista abrevieri

OMS – Organizația Mondială a Sănătății
CE – Comisia Europeană
NO_x – Oxizi de azot
O_3 – Ozon
PM – Particule în suspensie
SO_2 – Dioxid de sulf
CO – Monoxid de carbon
CO_2 – Dioxid de carbon
CH_4 - Metan
COV – Compuși organici volatili
SLCP - Short-Lived Climate Pollutants – Poluanți climatici cu durată scurtă de viață.
BC – Black Carbon – Carbonul negru
HFC – Hidroflorocarburi
GES – Gaze cu efect de seră
$PM_{2,5}$ – Particule fine în suspensie cu diametrul ≤2,5 μm
PM_{10} - Particule fine în suspensie diametrul ≤10 μm
NH_3 – Amoniac
BaP – Benzo(a)piren
GWP – Potențial de încălzire globală
CCAC - Climate and Clean Air Coalition -Alianța pentru climă și aer curat
AT – Moduri de transport active
MT – Vehicule motorizate de transport
CWC – Closed Window condition – Condiția Ferestre Închise
CWO – Car with open windows – Condiția Ferestre Deschise
UFP – Ultrafine particles – Particule ultrafine
BPOC - Bronhopneumopatia cronică obstructivă
UV -Radiații ultraviolete
CTM – Modele de transport chimic
EPA – Environmental Protection Agency – Agenția de Protecția Mediului
GATOR - Global Atmospheric Transport and Chemistry Model - Modulul de transport atmosferic global și de chimie
CMAQ - Community Multiscale Air Quality Model - Model comunitar de calitate a aerului la scară multiplă
LUR - Land Use Regression - Regresia utilizării terenurilor
V2I - Vehicle-to-Infrastructure - Conectivitate vehicul-infrastructură
UE – Uniunea Europeană
AEM – Agenția Europeană de Mediu
BEV – Vehicule electrice cu baterie
COVID-19 – Pandemia de COVID
CO_{2e} – Dioxid de carbon echivalent
PNRR - Planul Național de Redresare și Reziliență
IPPC - Integrated Pollution Prevention and Control - Prevenirea și controlul integrat al poluării
SF_6 - Hexafluorura de sulf
SCR – Sisteme de reducere catalitică selectivă
SEE – Spațiul economic european
TEN-T - Trans-European Transport Network – Rețeaua de Transport Trans-Europeană
CAGR - Rată anuală compusă de creștere
U.R.A.C. - Uzina de Reparații și Atelierele Centrale

ROCAR - Companie românească de producție a autobuzelor, troleibuzelor și vehiculelor comerciale ușoare
I.C.P.E.-S.A.E.R.P.-S.A. - Institutul de Cercetare și Proiectare pentru Electrotehnică – Societatea de Acționări Electrice și Relee de Protecție
P.M.U.D. – Planul de Mobilitate Urbană Durabilă
STL – Strategia pe termen lung
PNIESC - Planul Național Integrat în domeniul Energiei și Schimbărilor Climatice
SRE - Pondere a surselor regenerabile de energie
IPPU - Proceselor industriale și utilizarea produselor
REF – Scenariul de referință
HGV – Vehicule grele
LCV – Vehicule ușoare
SRE-T - Energie din surse regenerabile în transporturi
EwbTAG - Ghid de analiză a transporturilor bazat pe Web
BEI - Banca Europeană de Investiții
BERD - Banca Europeană pentru Reconstrucție și Dezvoltare
LEAP_ RO – Platforma pentru Analiza emisiilor scăzute în România
INS - Institutul Național de Statistică
JRS TIMES EU – Model transport pentru scenarii de decarbonizare
ELIPTIC – Electrification of Public Transport In Cities – Proiect european de Electrificare a Transportului Public Urban
PAED - Planuri de acțiune pentru energie durabilă
PACED - Planuri de acțiune pentru climă și energie durabilă
IRR - Rata financiară internă a rentabilităţii
NPV - Valoarea netă prezentă a proiectului
ACE - Analiza cost-eficacitate

CAP.1 STADIUL ACTUAL PRIVIND POLUAREA ATMOSFERICĂ

1.1. Considerații generale privind poluarea atmosferică

Efectele poluării atmosferice și ale schimbărilor climatice reprezintă fenomene cu impact global, care se potențează reciproc. Relația dintre cele două fenomene este una complexă și interdependentă, întrucât sursele principale ale poluării atmosferice, repectiv activitățile industriale, emisiile provenite din transporturi și producerea de energie pe bază de combustibili fosili contribuie simultan și la intensificarea schimbărilor climatice [1].

În 2016, poluarea aerului a fost considerată de către Organizația Mondială a Sănătății (OMS) drept cel mai mare risc pentru degradarea mediului și i s-au atribuit 7 milioane de decese premature anual [2,3]. În România, emisiile responsabile pentru deteriorarea calității aerului sunt localizate preponderent în marile aglomerări urbane și provin atât din surse staționare, precum instalațiile de ardere și activitățile industriale, cât și din surse mobile, în special transportul rutier.

Conform estimărilor OMS, peste 99% din populația globală este expusă la un aer care conține concentrații de poluanți atmosferici care depășesc valorile limită recomandate în ghidurile privind calitatea aerului [2,3].

Procesele de ardere a biocombustibililor, biomasei și biogazului pot genera emisii de compuși organici volatili (COV) și particule în suspensie, contribuind astfel la deteriorarea calității aerului [4], iar arderea incompletă a acestor tipuri de combustibili în medii închise este responsabilă anual pentru o mortalitate estimată la aproximativ 3,5 milioane de persoane la nivel global [5].

O atenție deosebită trebuie acordată și poluanților atmosferici cu durată de viață mai scurtă, cunoscuți sub denumirea de poluanți climatici cu durată scurtă de viață (SLCP, Short-Lived Climate Pollutants), incluzând metanul (CH_4), carbonul negru și anumite hidrofluorocarburi (HFC), care contribuie semnificativ la încălzirea globală pe termen scurt [6]; deși au o durată de viață semnificativ mai redusă decât a dioxidului de carbon (CO_2), prezintă un potențial de încălzire globală însemnat, contribuind în mod semnificativ la schimbările climatice pe termen scurt [7-11].

Preocupările privind identificarea unor soluții și diminuarea impactului pe care îl are poluarea atmosferică asupra calității vieții prezintă în ultimii 10 ani un interes major al cercetătorilor, datorită creșterii accelerate a nivelului emisiilor de gaze cu efect de seră, incidenței tot mai ridicate a afecțiunilor respiratorii în rândul populației urbane. În domeniul poluării atmosferice s-au remarcat 2 motoare de căutare, care au inclus transporturile și amprenta de carbon, așa cum este prezentat în figura 1.1.

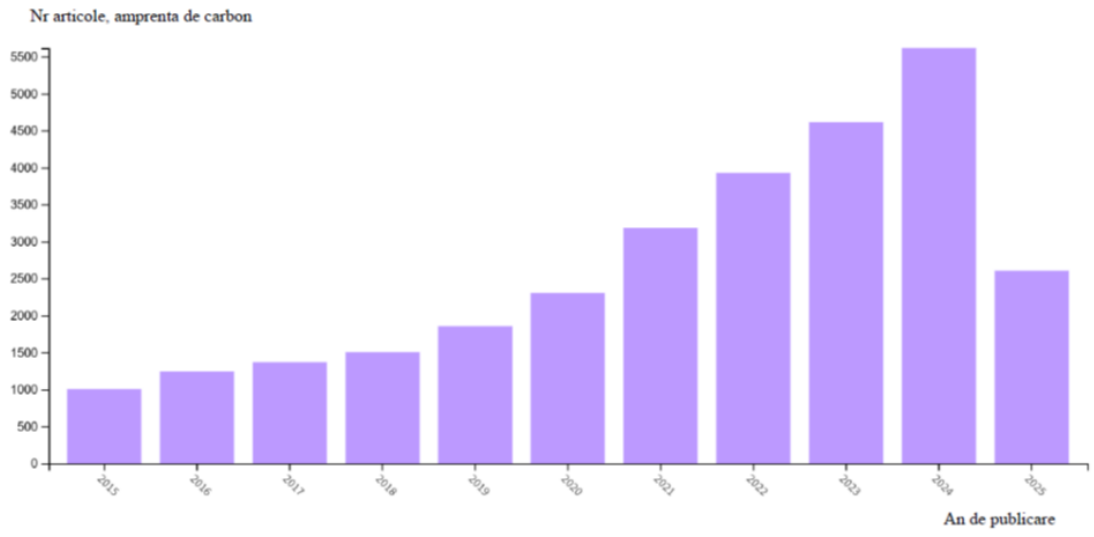


Figura 1. 1 1. Publicații conform site Web of Science utilizând cuvinte cheie "Public Transport Pollution"și "Carbon Footprint" pentru perioada 2015 - 2025

Tipuri de poluanți și surse de poluare a aerului

Poluarea atmosferică și în special emisiile de CO_2 atrag probleme de mediu grave, care au drept sursă principală activitățile antropice. Dintre activitățile generatoare de emisii de poluanți principali și secundari amintim procesele industriale, transportul și producerea energiei [12]. Toți acești poluanți care afectează sănătatea umană, reprezintă până la 8,2 % din emisiile globale de gaze cu efect de seră [13] și determină o creștere a nivelului global al emisiilor de CO_2, contribuind astfel suplimentar la intensificarea schimbărilor climatice.

Transportul rutier reprezintă o sursă semnificativă de poluanți atmosferici, fapt care indică nevoia urgentă de implementare a unor măsuri eficiente de reducere a emisiilor asociate transportului rutier, în vederea asigurării unui nivel optim de sănătate publică [14]. Pe lângă soluțiile tehnologice, strategiile de reducere a poluării aerului includ limitarea utilizării vehiculelor private și promovarea mijloacelor de transport public sustenabil.

Impactul poluării aerului și efectele asupra planetei și oamenilor

Potrivit Organizației Mondiale a Sănătății (OMS), însăși supraviețuirea umanității reprezintă, în prezent, cea mai vulnerabilă dimensiune în fața schimbărilor climatice, depășind toate celelalte forme de amenințare identificate [15]. Procesul de ardere a combustibililor fosili reprezintă principala sursă a emisiilor globale de gaze cu efect de seră, contribuind în mod substanțial la accelerarea schimbărilor climatice și generând, simultan, emisii de poluanți atmosferici cu efecte dăunătoare asupra calității aerului și sănătății publice [16].

Conform rezultatelor recente ale studiului Global Burden of Disease, ratele mortalității standardizate în funcție de vârstă, asociate principalelor cauze atribuite poluării aerului au înregistrat o scădere cu 23% în intervalul 2006–2016, evidențiind progrese semnificative în reducerea impactului acestui factor de risc asupra sănătății populației [17].

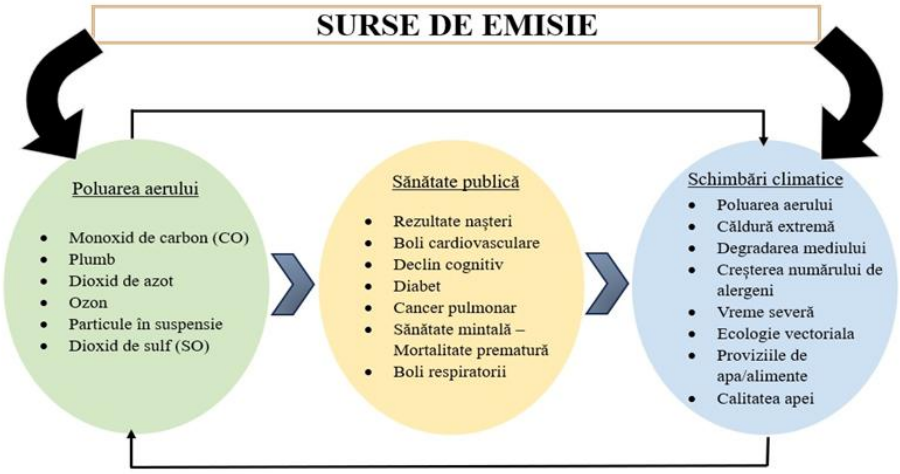


Figura 1.3.1. Legătura dintre poluarea aerului, schimbările climatice și sănătatea umană [18].

1.4.Măsuri privind reducerea poluării atmosferici prin implementare de soluții sustenabile.

La nivel global, doar aproximativ 12% din populația urbană trăiește în zone care respectă standardele de calitate a aerului stabilite de Organizația Mondială a Sănătății (OMS) [19].

1.4.1. Sisteme de energie și transport durabile

Integrarea surselor regenerabile de energie contribuie semnificativ la protecția mediului, având totodată un efect favorabil asupra economiilor prin reducerea dependenței de importuri de capital și stimularea creării de locuri de muncă în sectoare sustenabile [20]. Sursele de energie regenerabilă constituie un pilon fundamental al tranziției către un model de dezvoltare durabilă, asigurând sustenabilitatea ecologică prin reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și conservarea resurselor naturale [21]. Ponderea energiei provenite din surse regenerabile în consumul final brut de energie a înregistrat o creștere semnificativă, de la 10% în anul 2008 la 18,1% în 2017, evidențiind progresul tranziției energetice către surse sustenabile [22].

1.4.2. Infrastructura ecologică și clădiri eficiente din punct de vedere energetic

În structura consumului final de energie din multe state, sectoarele rezidențial și terțiar dețin o pondere considerabilă, contribuind împreună cu aproximativ 40% la cererea totală de energie. Infrastructura verde urbană este din ce în ce mai recunoscută ca instrument strategic în cadrul politicilor de atenuare a schimbărilor climatice [23].

Figura 1.4.2.1 prezintă modelele comparative de flux ale aerului și de dispersie a poluanților atmosferici în canioane stradale, în funcție de prezența sau absența diverselor configurații de vegetație urbană.

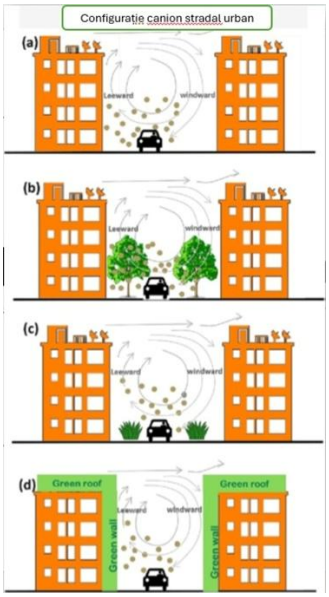


Figura 1.4.2.1. Analiza dinamicii fluxului și a dispersiei poluanților într-un canion stradal [24].

1.4.3. Modele de previzionare a poluării aerului

Simulările sunt din ce în ce mai utilizate pentru a înțelege și a prognoza modul în care se răspândește poluarea [25].

În prezent, sunt disponibile multiple modele de tip Chemical Transport Model (CTM), precum Urban Airshed Model (dezvoltat de EPA), modelul Caltech, Global Atmospheric Transport and Chemistry Model (GATOR) și Community Multiscale Air Quality Model (CMAQ). Aceste instrumente computaționale constituie componente esențiale în evaluarea și prognoza calității aerului, prin capacitatea lor de a simula procesele atmosferice de transport, transformare chimică și îndepărtare a poluanților, pe multiple scări spațiale, de la nivel local, până la scară globală. Modelele de regresie bazate pe utilizarea terenurilor LUR reprezintă o metodă eficientă pentru îmbunătățirea estimărilor concentrațiilor de poluanți atmosferici la nivelul solului.

1.4.4. Măsuri de control

Măsurile de intervenție propuse pot fi aplicate într-un spectru larg de situații, indiferent de sursa specifică a poluării aerului. Figura 1.4.4.1. ilustrează principiile fundamentale care stau la baza eficienței acestor intervenții.

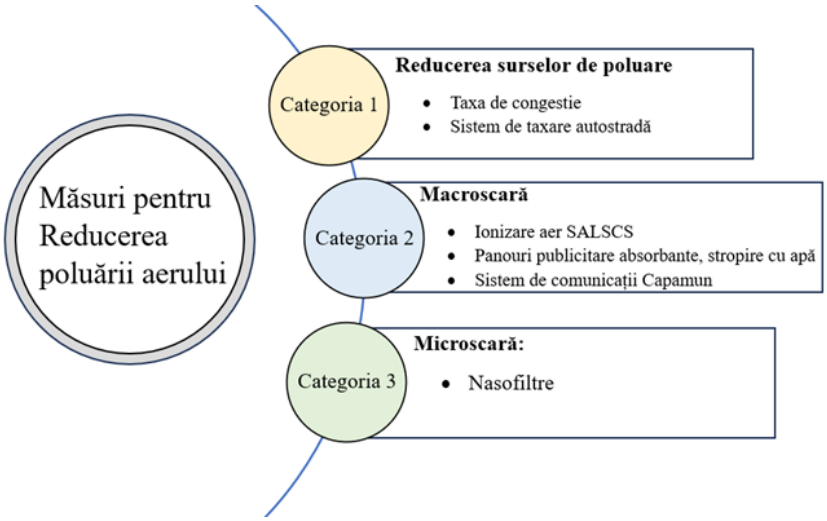


Figura 1.4.4.1. Strategii rentabile pentru controlul poluării aerului [26]

CAP.2 INFLUENȚA SECTORULUI DE TRANSPORT ASUPRA CALITĂȚII AERULUI

2.1. Situația actuală la nivelul Uniunii Europene privind activitatea din transport și calitatea mediului

Transportul reprezintă un sector esențial pentru funcționarea economiilor moderne și pentru deplasarea populației, iar tranziția către un sistem de transport mai durabil necesită politici publice coerente și investiții strategice, orientate către soluții cu impact redus asupra mediului, climei și sănătății umane [27].

România se situa, în anul 2022, printre statele membre ale Uniunii Europene cu cele mai ridicate niveluri ale emisiilor de dioxid de carbon, datorită, în mare măsură, unui regim fiscal deficitar, în ceea ce privește impozitarea emisiilor poluante, aspect evidențiat și în Figura 2.1.

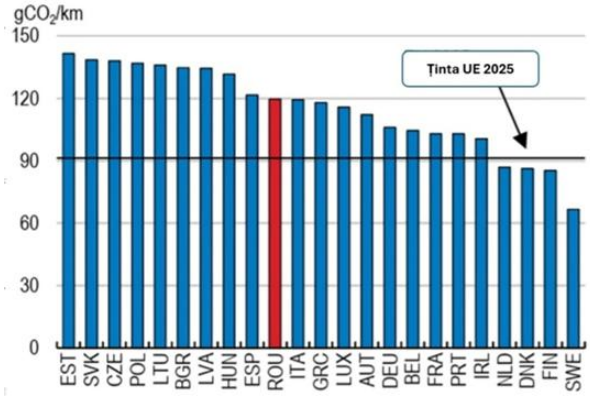


Figura 2. 1. Emisiile de CO_2 provenite de la autoturismele noi în 2022 [28].

Cu o populație estimată la 2.133.306 locuitori în anul 2024 [29], Municipiul București a înregistrat în ultimii ani o intensificare a investițiilor în infrastructura de transport, menită să răspundă cerințelor tot mai complexe de mobilitate urbană. Cu toate acestea, extinderea infrastructurii nu a fost însoțită de o reducere corespunzătoare a presiunii asupra rețelei rutiere. Municipiul București se clasează pe locul 8 la nivel global în ceea ce privește Indicele de congestie a traficului rutier, conform datelor pentru anul 2023, când nivelul mediu de congestie a fost estimat la aproximativ 55%.

2.2. Indicatori de performanță privind emisiile rezultate in atmosferă din sectorul transporturi

Emisiile majorității poluanților atmosferici proveniți din sectorul transporturilor în UE-27 au înregistrat o scădere semnificativă [30], așa cum se observă în Figura 2.2.

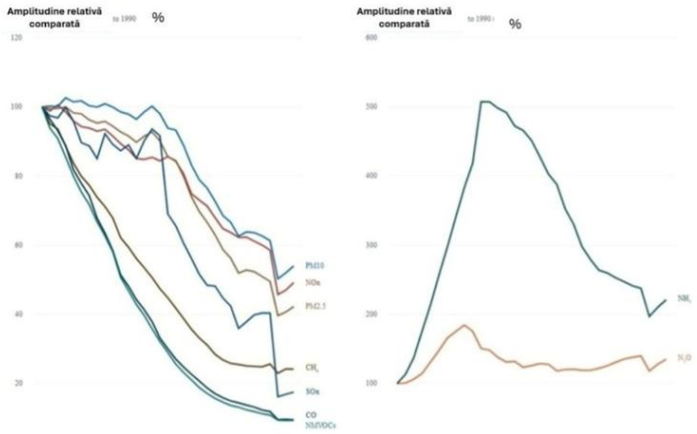


Figura 2. 2 Emisiile de poluanți provenite din transporturi în UE-27 [30].

Transportul rutier reprezintă principala sursă de emisii din sectorul transporturilor, contribuind în anul 2022 cu 73,2% [30] la totalul emisiilor de gaze cu efect de seră generate de acest sector în Uniunea Europeană, incluzând atât transportul intern, cât și cel internațional de mărfuri.

2.3. Impactul poluării atmosferice datorat sectorului transporturi asupra sănătății umane

Expunerea cronică la zgomotul generat de activitățile de transport are efecte dovedite adverse asupra sănătății umane, contribuind la apariția sau agravarea unor afecțiuni precum stresul, tulburările de somn, afecțiunile cardiovasculare și pierderea auzului. Conform datelor raportate în anul 2017 în baza Directivei privind zgomotul ambiental, se estimează că, la nivelul Uniunii Europene [31], aproximativ 18 milioane de persoane sunt puternic afectate, iar alte 5 milioane suferă perturbări semnificative ale somnului din cauza expunerii pe termen lung la zgomotul

asociat transporturilor. În acest context, Planul de acțiune al Uniunii Europene „Poluare zero” stabilește ca obiectiv reducerea, până în 2030, cu 30% a numărului de persoane afectate de zgomotul de transport, comparativ cu nivelurile din 2017.

2.4. Impactul asupra poluării atmosferice a diferitelor moduri de transport

Printre obiectivele principale ale strategiei „Acordul european pentru mediu”, se numără dublarea volumului transportului feroviar de marfă până în anul 2050, precum și creșterea cu 25% a transportului pe căi navigabile interioare și a transportului maritim pe distanțe scurte până în 2030. Comisia Europeană a lansat o serie de inițiative strategice orientate spre partea de ofertă a sistemului de transport, printre care se numără Regulamentul revizuit privind rețeaua transeuropeană de transport (TEN-T) [32], intrat în vigoare în iulie 2024.

2.5. Indicatori privind poluarea autobuzelor și trenurilor

Un instrument esențial în atingerea obiectivului de decarbonizare a transportului îl reprezintă promovarea modurilor de transport durabile, în special a transportului public, iar Strategia Uniunii Europene [33] privind mobilitatea durabilă și inteligentă, evidențiază rolul fundamental al transportului public de călători în tranziția către un sistem de transport mai sustenabil.

2.6. Statistici privind sustenabilitatea sistemelor de mobilități din Europa

Volumul total al transportului de pasageri înregistrat în UE-27 în anul 2019, a atins 6 miliarde de pasageri-kilometru, cu excepția transportului aerian internațional (extra-UE), ceea ce reflectă o creștere de 33,5% a activității de mobilitate a pasagerilor comparativ cu anul 1995 [34]. Se preconizează că activitatea globală de transport va continua să crească de la 5 618 miliarde de pasageri per km în 2015 la 6 088 miliarde de pasageri per km în 2025 (98,4% față de 2015), respectiv la 6 487 miliarde de pasageri-km în 2030 (15,5% față de 20215), conform scenariului recent MIX-FF55 al Comisiei Europene [35].

2.6.1. Transportul autoturismelor

În anul 2022 s-au parcurs cu autoturismul circa 4 100 de miliarde de pasageri per km, iar în perioada 1995-2022 ponderea acestei creșteri a fost de 24,8%. Pandemia de COVID-19 a influențat semnificativ mobilitatea cu autoturismul, în anul 2019 fiind aproximativ 4,299 miliarde de călători-km, deci o creștere de 30,9%, comparativ cu 1995. În anul 2022, autoturismele au reprezentat circa 73% din pasageri per km, pondere care s-a diminuat doar cu 1,4% în perioada 1995-2019.

2.6.2. Transportul public

În anul 2022, comparativ cu 1995, activitatea de transport exprimată în pasageri/kilometru s-a diminuat cu 13,2% pentru autobuze, 28,7% pentru trenuri și 8,4% pentru tramvaie și metrou.

2.6.3. Reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră generate de vehiculele grele în Europa

Datele privind transportul feroviar de călători indică o creștere semnificativă a activității în segmentul trenurilor de mare viteză, de la 32,5 miliarde pasageri/kilometru în 1995 la un vârf de 134,0 miliarde pasageri/kilometru în anul 2019, când acest mod de transport a reprezentat 31,8% din totalul traficului feroviar de călători în UE-27 [33]. Conform previziunilor, activitatea de transport de pasageri cu autobuze și autocare este estimată să atingă 542 miliarde pasageri-kilometri până în anul 2030.

2.6.4. Aviația (internă și internațională intra-UE)

Transportul aerian intern și internațional în interiorul Uniunii Europene (UE-27) a înregistrat un maxim de aproximativ 575 miliarde pasageri-kilometri în anul 2019, corespunzător unei cote modale de 9,6% din activitatea totală de transport de pasageri, iar în timpul pandemiei de COVID-19, s-a diminuat cu peste 50% (în 2020), până la aproximativ 176 miliarde pasageri/kilometru [36]. Conform proiecțiilor, activitatea de transport aerian intern și internațional intra-UE-27 este estimată să atingă 612 miliarde de pasageri-kilometri până în anul 2030.

2.6.5. Navigația maritimă (internă și internațională intra-UE)

În anul 2019, transportul maritim de pasageri, atât pe rute interne cât și internaționale intra-UE, a înregistrat un volum de aproximativ 21 miliarde pasageri/kilometru, corespunzând unei cote modale de 0,4% din totalul activității de transport de pasageri. Acest mod de transport a fost printre cele mai afectate de impactul pandemiei de COVID-19, înregistrând în 2020 un declin semnificativ până la 11 miliarde pasageri/kilometru, iar până în 2022 [36].

2.6.6. Alte sisteme de mobilitate

Vehiculele motorizate pe două roți au reprezentat circa 2,0% din totalul pasagerilor/kilometru înregistrați în anul 2022, menținând în timp, o pondere relativ constantă în structura generală a activității de transport, de 2%, corespunzătoare unui volum estimat de circa 110 miliarde pasageri/kilometru[36].

2.7. Transportul public în România

2.7.1. Situația sistemului de transport public

România deține o tradiție industrială solidă în domeniul transportului urban, evidențiată prin activitatea unor unități producătoare de material rulant precum URAC București, Electroputere

Craiova și Electro Timiș. Una dintre direcțiile strategice ale PMUD vizează reconfigurarea distribuției modale în favoarea utilizării vehiculelor electrice în transportul public, astfel încât acestea să reprezinte 77,1% din flota totală până în 2030 [37].

În primăvara anului 2015, cu sprijinul Primăriei Municipiului București s-au testat la STB-S.A., două tipuri de autobuze electrice [38,39], autobuzul marca SOR EBN 10.5 și autobuzul marca BYD EBUS -12 model K9.

2.7.2. Strategii privind politica de decarbonizare în sectorul transporturi în România

În România, Strategia pe termen lung (STL) privind reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră – „România Neutră", a fost aprobată prin Hotărârea Guvernului nr. 1215/2023 [40].

Strategia pe termen lung (STL) se fundamentează pe analiza comparativă a trei scenarii de evoluție: Scenariul de referință (REF), Scenariul intermediar (Mediu) și Scenariul „România Neutră" (RO Neutră). Conform scenariului RO Neutră, reducerea emisiilor de GES în sectorul Transporturi va fi de 82% în 2050. Prin comparație, scenariul RO Neutră este cu 88% mai ambițios decât scenariul REF.

În cadrul scenariului RO Neutră, se anticipează o reducere semnificativă a ponderii vehiculelor destinate transportului de marfă (HGV și LCV) alimentate cu motorină, de la un nivel de aproximativ 90% în anul 2019, la circa 55% în anul 2030, urmând ca aceste vehicule să fie complet eliminate din parcul auto până în anul 2050.

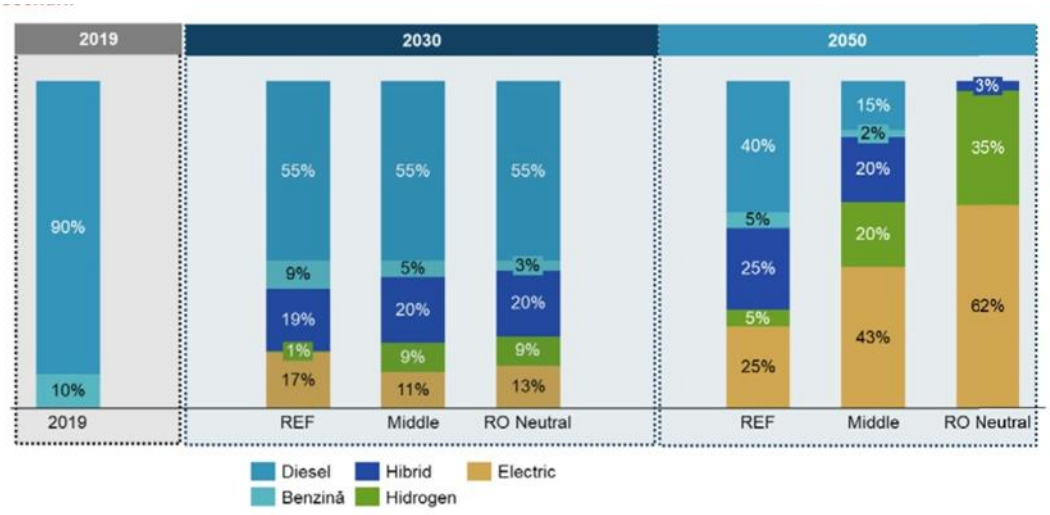


Figura 2. 7 Evoluția tipurilor de autovehicule transport marfă în funcție de combustibilul utilizat conform celor 3 scenarii [41].

CAPITOLUL 3. OBIECTIVELE ȘI METODOLOGIA DE LUCRU

3.1. Scopul și obiectivele tezei de doctorat

În cadrul tezei de doctorat au fost considerate următoarele obiective științifice și tehnice:

1. Estimarea emisiilor de gaze cu efect de seră (GES) pentru autobuzele clasice, hibrid și electrice, prin aplicarea metodei JASPERS pentru cuantificarea și compararea emisiilor specifice fiecărui tip de autobuz.
2. Identificarea factorilor determinanți ai amprentei de carbon
3. Compararea eficienței ecologice și economice, evaluând beneficiile de mediu și economice ale electrificării transportului public, în raport cu soluțiile clasice.
4. Modelarea scenariilor de optimizare, pentru estimarea emisiilor GES și respectiv a amprentei de carbon prin utilizarea metodei JASPERS, în conformitate cu politicile naționale și regionale privind protecția mediului.
5. Formularea unor recomandări pentru decidenți, propunerea unor măsuri de optimizare a transportului public în vederea reducerii amprentei de carbon și alinierii la obiectivele de sustenabilitate urbană.
6. Sustenabilitatea sistemului de transport public prin calculul CO_{2e}, cu accent pe cazul liniei de autobuz 368.

3.2.Metodologia de cercetare

Metodologia de cercetare a fost dezvoltată în direcția calculului emisiilor și amprentei de carbon, s-a realizat pentru prima dată în orașul București, în cazul autobuzelor clasice, hibrid și electrice. Autobuzele electrice au intrat în exploatare în anul 2024.

Schematic, abordarea cercetărilor în vederea stabilirii cantitative a emisiilor GES și amprentei de carbon, este sintetizată în Figura 3.2.1.

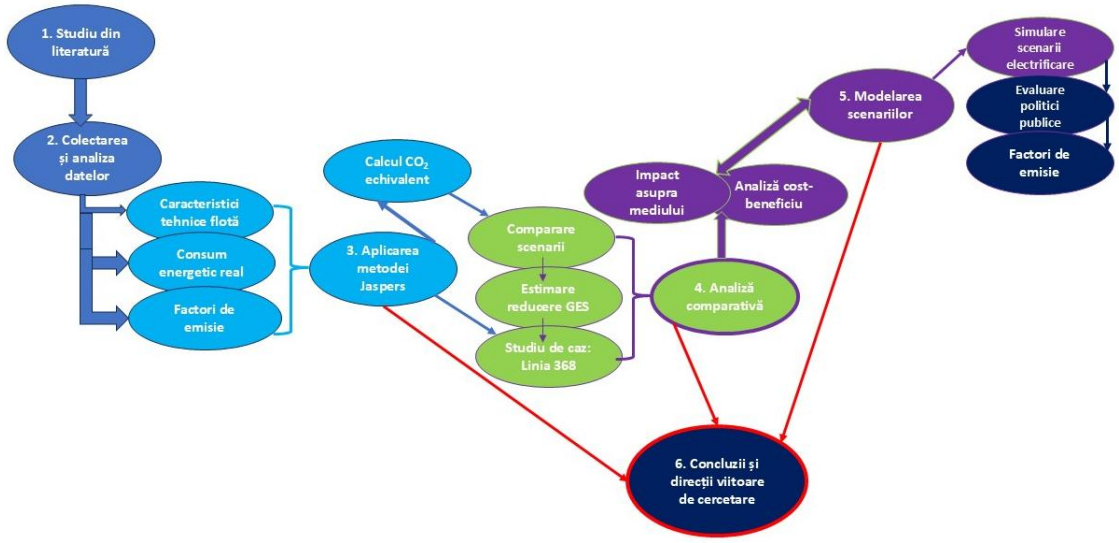


Figura 3. 1. 1.

Reprezentarea schematică a planului de lucru

3.3.Metode de analiză

În vederea evaluării cantitative a emisiilor GES și a amprentei de carbon, a fost utilizată metoda agregată specifică sectorului transporturilor, Jaspers (Joint Assistance to Support Projects in European Regions) [42]. Informațiile utilizate provin din modelul de transport, incluzând: anul de evaluare (ca referință pentru proiecții), rulajul anual al vehiculelor, detaliat pe categorii tehnologice (autobuze EURO III, EURO IV, EURO VI, hibrid și electrice). Pentru vehiculele electrice, a fost preluat consumul specific de energie (kWh/km) din baza de date WebTAG (Transport Analysis Guidance, Regatul Unit). Rata de emisie aferentă consumului de energie electrică reflectă cantitatea de gaze cu efect de seră (GES) emisă pe unitate de energie (kWh) utilizată din rețeaua națională de electricitate.

Etapele de utilizare a instrumentului de lucru folosit sunt prezentate în Figura 3.2.2.

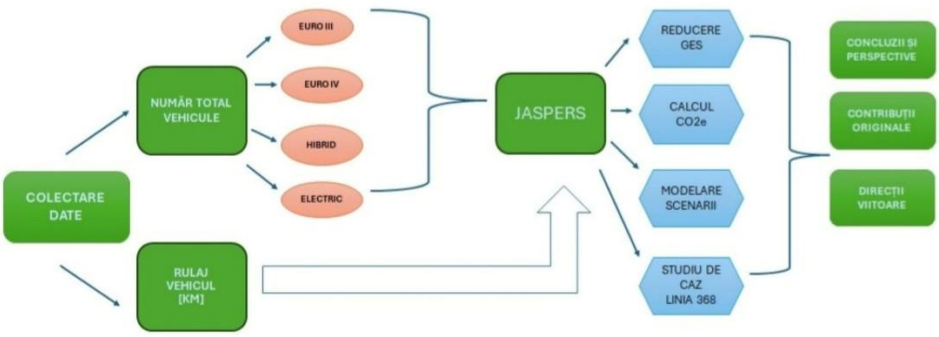


Figura 3. 2.2. Etapele de utilizare a instrumentului de lucru

3.3.1. Estimarea emisiilor GES și calculul amprentei de carbon pentru flota de autobuze

S-a realizat estimarea emisiilor GES, pornind de la datele privind consumul anual de combustibil și energia electrică, specifice fiecărui tip de vehicul din flotă. Analiza a inclus câteva tipuri principale de autobuze: autobuze diesel convenționale, autobuze hibrid și autobuze electrice alimentate din rețeaua națională.

Pentru fiecare categorie de vehicul au fost luați în considerare următorii parametri: consumul specific anual de combustibil (litri) sau de energie electrică (kWh); factorii de emisie (kg CO_2e/unitate de combustibil); numărul de kilometri parcurși anual și eficiența energetică specifică a vehiculelor.

Pentru energia electrică, emisiile au fost estimate în funcție de mixul energetic național al României, considerând un factor mediu de 0,29 kg CO_2e/kWh. În cazul autobuzelor diesel, au fost considerate și emisiile non-CO_2 (CH_4 și N_2O), convertite în echivalenți CO_2 pe baza potențialului de încălzire globală (GWP), astfel:

- 1 kg CH_4 = 23 kg CO_2e
- 1 kg N_2O = 298 kg CO_2e

CAPITOLUL 4. CERCETĂRI PRIVIND ESTIMAREA EMISIILOR FLOTEI DE AUTOBUZE ALE OPERATORULUI DE TRANSPORT BUCUREȘTI

4.1. Analiza situației flotei de transport public București, în perioada 2021 – 2024, în raport cu țintele de mediu

În vederea estimării emisiilor GES generate de activitatea flotei STB, o primă etapă în cadrul acestui stagiu doctoral a constituit-o analiza situației actuale și corelarea acesteia cu țintele de mediu. Perioada de studiu pentru care au fost culese și prelucrate datele a fost între anii 2021-2024, având în vedere că reprezintă perioada de modernizare a STB.

Operatorul de transport public din municipiul București acoperă o suprafață totală de 1.335 km², dintre care 240 km² se află în zona urbană. Societatea de Transport București (STB S.A.) asigură mobilitatea a aproximativ 1,071 milioane de călători zilnic, printr-o structură operațională ce include: o rețea de autobuze compusă din 1.640 de vehicule, o rețea de troleibuze formată din 265 de vehicule și o rețea de tramvaie, alcătuită din 527 de vehicule [38]. În ultimii patru ani, flota

STB-S.A. a fost modernizată in proportie de 43%, prin achiziționarea a 130 de autobuze hibrid și 100 de autobuze electrice.

4.2. Utilizarea multifuncțională a infrastructurii de alimentare cu energie electrică a operatorilor de transport din București.

Din 2006, România se numără printre principalii beneficiari ai asistenței tehnice JASPERS pentru dezvoltarea proiectelor, cu accent pe abordarea provocărilor sectoriale intersectoriale și consolidarea capacității instituționale a beneficiarilor.

În cadrul proiectului european Eliptic, s-a constatat faptul că, după modernizarea sistemelor de acționare instalate pe vehicule electrice, consumul de energie a scăzut și am calculat consumul mediu orar și consumul maxim orar pentru cele 38 de substații electrice existente.

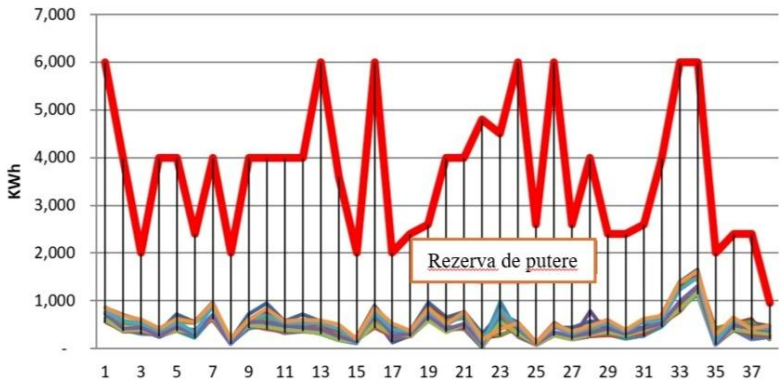


Figura 4. 1.1. Consumul maxim orar şi puterea instalată (KWh) / (KVA).

Pentru utilizarea acestei resurse de energie, la încărcarea bateriilor vehiculelor electrice se pot înregistra pierderi de energie suplimentară, care pot ajunge la aproximativ 40% din energia totală utilizată, de aceea se recomandă efectuarea unui bilanţ energetic pentru determinarea fezabilităţii acestei soluţii în condiţiile infrastructurii de transport ce urmează a fi modernizată.

În acest scop, in anul 2023 s-au realizat studiile de fezabilitate pentru deservirea a 3 depouri de tramvaie Bujoreni, Berceni și Bucureștii Noi pentru stațiile de încărcare ale autobuzelor electrice, în vederea asigurării infrastructurii necesare unui transport ecologic, conform normelor europene în vigoare - Directiva Europeana 2009/33/CE [43] privind promovarea transportului curat și sustenabil, iar în 2024 au început efectiv lucrările de amenajare propriu-zisă.

CAPITOLUL 5 . ESTIMAREA EMISIILOR GES A FLOTEI DE AUTOBUZE ALE OPERATORULUI DE TRANSPORT BUCUREȘTI ȘI CALCULUL AMPRENTEI DE CARBON

5.1. Flota de autobuze existentă în momentul calculului estimativ și factori de emisie luați în calcul

În vederea calculului emisiilor, au fost luați în considerare mai mulți factori de emisie specifici, în conformitate cu metodologia JASPERS și cu liniile directoare ale Ghidului IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

În momentul calculului pentru estimarea GES cu Metoda Jaspers, datele pentru flota existentă de autobuze au fost cele din decembrie 2024, după modernizarea parcului auto. Acestea sunt prezentate în Tabelul 5.1.

Tabel 5. 1 Flota de autobuze a STB – S.A. în decembrie 2024 [38].

Categorie	Tip autobuz	Parc total	Parc activ
Euro III	MERCEDES E3	498	319
Euro IV	MERCEDES E4	500	407
Euro VI	OTOKAR	400	375
Hybrid	MERCEDES HYBRID	130	124
Electric	ZTE GRANTON	100	59
Fără categorie	DAF, ROCAR, VOLVO	10	-
TOTAL		1638	1284

Rata emisiilor GES pentru energia electrică în România este de 0,517 kgCO_2/kWh. Factorii GES echivalenți utilizați pentru conversia fiecărui gaz cu efect de seră în CO_{2e} sunt prezentați în Tabelul 5.3. Pentru autobuzele electrice, s-au luat în considerare kilometrajul (km) și consumul de energie (kWh), utilizând factori de conversie din tabelul 5.3. [44].

Tabel 5. 2 Factorii GES echivalenți pentru conversia fiecărui gaz cu efect de seră în CO_{2e} [44].

Gaz	Factor de conversie
CO_2	1
N_2O	298
CH_4	23

5.2. Calcule privind estimarea GES a flotei de autobuze a operatorului de transport din București pentru perioada 2021-2024.

În vederea realizării unui calcul estimativ al emisiilor de CO_2, CH_4, N_2O și CO_{2e} pentru anii 2021-2024, s-a utilizat metodologia Jaspers, cu factorii de conversie corespunzători gazelor GES

asociate. Emisiile de GES ale flotei de autobuze și kilometrajul autobuzelor deținute de operatorul de transport din București în 2021, 2022, 2023 și 2024 sunt prezentate în tabelele 5.2.1 – 5.2.4.

Tabel 5.2.1. Emisiile de GES și rulajul în 2021 pentru flota de autobuze STB S.A. [38].

Tip autobuz	Număr de kilometri parcurși în anul 2021 [km]	Consum de combustibil 2021 [l]	Consum mediu de combustibil în anul 2021 [l/100 km]	CO_2 [kg]	N_2O [kg]	CH_4 [kg]	CO_{2e} [kg]
Mercedes E3	18,226,110	7,774,928.57	42.66	20,681,310.00	1,088.49	1,088.49	21,030,715.29
Mercedes E4	20,135,777	9,234,892.85	45.86	24,564,814.98	1,292.88	1,292.88	24,979,831.07
Mercedes E6	26,090,771	11,702,904.76	44.85	31,129,726.66	1,638.41	1,638.41	31,655,655.20
Mercedes Hibrid	8,438,313	3,662,690.47	43.41	9,742,756.65	512.78	512.78	9,907,357.96
Total 2021	**72,890,971.00**	**32,375,416.65**		**86,118,608.29**	**4,532.56**	**4,532.56**	**87,573,559.51**

Emisiile GES pentru flota de autobuze deținute de operatorul de transport din București în 2022 sunt estimate în tabelul 5.2.2.

Tabel 5.2.2. Emisiile GES și rulajul în 2022 pentru flota de autobuze STB S.A. [38].

Tip autobuz	Număr de kilometri parcurși în anul 2022 [km]	Consum de combustibil 2022 [l]	Consum mediu de combustibil în anul 2022 [l/100 km]	CO_2 [kg]	N_2O [kg]	CH_4 [kg]	CO_{2e} [kg]
Mercedes E3	12,776,333	5,936,630.00	46.46	15,791,435.80	831.13	831.13	16,058,227.95
Mercedes E4	22,141,716	9,710,440.47	43.86	25,829,771.65	1,359.46	1,359.46	26,266,158.84
Mercedes E6	28,856,728	13,604,726.20	47.15	36,188,571.69	1,904.66	1,904.66	36,799,968.09
Mercedes Hibrid	3,483,087	1,477,369.04	42.42	3,929,801.65	206.83	206.83	3,996,194.61
Total 2022	**67,257,864.00**	**30,729,165.71**		**81,739,580.79**	**4,302.08**	**4,302.08**	**83,120,549.50**

Tabel 5.2.3. Emisiile de gaze cu efect de seră și rulajul pentru flota de autobuze STB S.A. în anul 2023[38].

Tip autobuz	Număr de kilometri parcurși în anul 2023 [km]	Consum de combustibil 2023 [l]	Consum mediu de combustibil în anul 2023 [l/100 km]	CO_2 [kg]	N_2O [kg]	CH_4 [kg]	CO_{2e} [kg]

Mercedes E3	11,181,123.18	5,404,561.81	48.34	14,376,134.41	756.64	756.64	14,619,015.42
Mercedes E4	22,602,869.62	10,414,273.80	46.08	27,701,968.31	1,458.00	1,458.00	28,169,985.77
Mercedes E6	25,847,518.17	12,252,853.42	47.40	32,592,590.10	1,715.40	1,715.40	33,143,233.33
Mercedes Hibrid	7,690,672.00	3,493,423.34	45.42	9,292,506.08	489.08	489.08	9,449,500.53
Total 2023	**67,322,182.97**	**31,565,112.37**		**83,963,198.90**	**4,419.12**	**4,419.12**	**85,381,735.05**

Tabel 5.2.4. Emisiile gazelor cu efect de sera estimate pentru flota de autobuze a STB-S.A. în anul 2024[38].

Tip autobuz	**Număr de kilometri parcurși în anul 2024[km]**	**Consum de combustibil 2024 [l]**	**Consum mediu de combustibil în anul 2024 [l/100 km]**	**CO_2 [kg]**	**N_2O [kg]**	**CH_4 [kg]**	**CO_{2e} [kg]**
Mercedes E3	7,729,288	3,736,066.05	48.33	9,937,935.70	523.05	523.05	10,105,834.51
Mercedes E4	21,302,756	9,815,246.36	46.08	26,108,555.31	1,374.13	1,374.13	26,549,652.48
Mercedes E6	20,790,982	9,855,834.25	47.40	26,216,519.11	1,379.82	1,379.82	26,659,440.30
Mercedes Hibrid	8,204,755	3,726,941.24	45.42	9,913,663.69	521.77	521.77	10,081,152.43
Total 2024	**58,027,781**	**27,134,087.90**		**72,176,673.81**	**3,798.77**	**3,798.77**	**73,396,079.72**

Emisiile de CO_{2e} pentru întreaga flotă de autobuze emise în 2024 sunt estimate în Tabelul 5.2.5.

Tabel 5.2.4. Estimarea emisiilor de CO_{2e} ale STB-S.A. în 2024, după modernizarea flotei cu vehicule electrice

Tip autobuz	**Număr de kilometri parcurși în anul 2024[km]**	**CO_{2e} [kg]**
GRANTON	2,081,429	1.090
Total flotă autobuze STB-S.A.	**60,109,210**	**74,485,933.81**

Emisiile totale de CO_{2e}, estimate în 2024 sunt de 74,5 kilotone, ceea ce reprezintă o reducere substanțială de aproape 13% față de 2023; această îmbunătățire se datorează scăderii kilometrajului

întregului parc de autobuze, dar și introducerii autobuzelor electrice. Emisiile generate de autobuzele care funcționează exclusiv cu motoare diesel au scăzut cu aproximativ 12 milioane kg CO_2e în perioada analizată, indicând începutul unei tranziții către un sistem de transport urban mai durabil.

Evoluția rulajului anual total și a rulajului atribuit în mod specific autobuzelor hibrid și electrice pentru flota de autobuze STB S.A. între anii 2021 și 2024 este prezentat în figura 5.2.1.

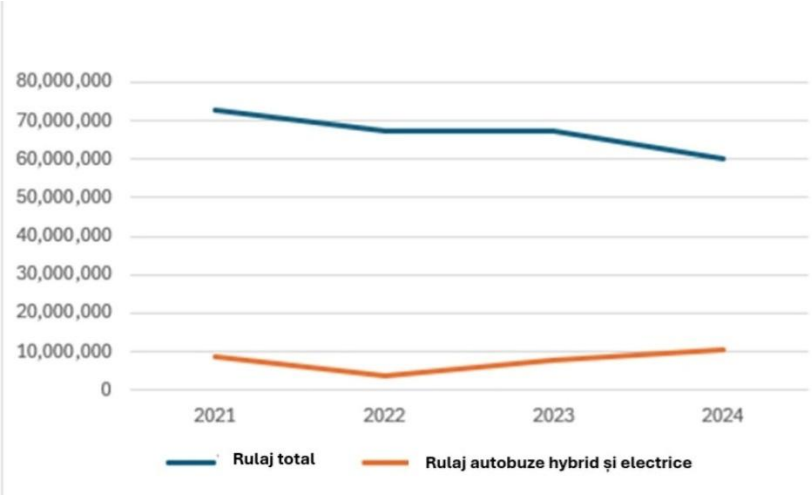


Figura 5. 2. 1 Rulajul autobuzelor din flota STB S.A. între 2021 și 2024. Linia albastră reprezintă rulajul total al tuturor autobuzelor, iar linia portocalie reflectă kilometrajul vehiculelor hibrid și electrice.

Deși vehiculele electrice și hibrid dețin o pondere relativ redusă din totalul kilometrilor parcurși, traiectoria ascendentă a acestora reflectă o evoluție pozitivă în direcția reducerii emisiilor și a îmbunătățirii eficienței energetice în transportul public de călători urban. Figura 5.2.2. ilustrează ponderea rulajului pentru autobuze electrice și hibrid în raport cu întreaga flotă între 2021 și 2024.

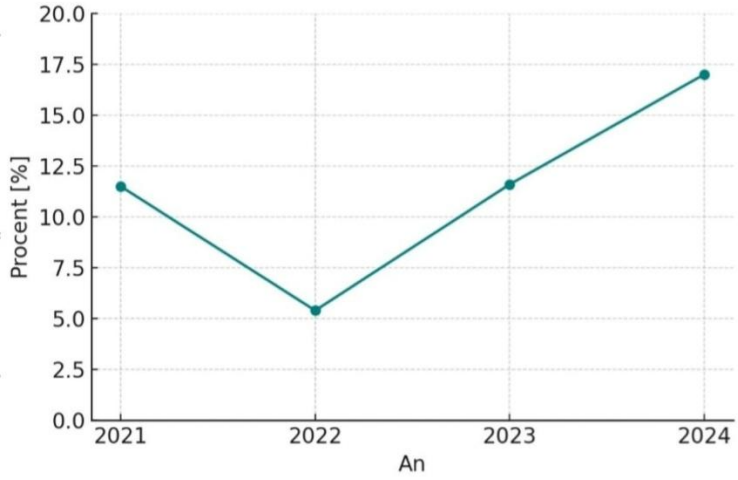


Figura 5.2.2. Ponderea rulajului autobuzelor hibrid și electrice ale STB S.A. între anii 2021 și 2024.

În 2024, rulajul autobuzelor electrice reprezentau aproximativ 3,47 % din totalul distanței parcurse de parcul auto.

O comparație relevantă poate fi observată între anii 2023 și 2024: emisiile specifice pe kilometru sunt foarte apropiate ca valoare între acești ani, fiind de 1,268 kg/km în 2023 și 1,264 kg/km în 2024, numai pentru cele diesel (Figura 5.2.3). Odată cu introducerea autobuzelor electrice în circulație în anul 2024, emisiile specifice pe kilometru au înregistrat o reducere de 2,68 % față de anul precedent.

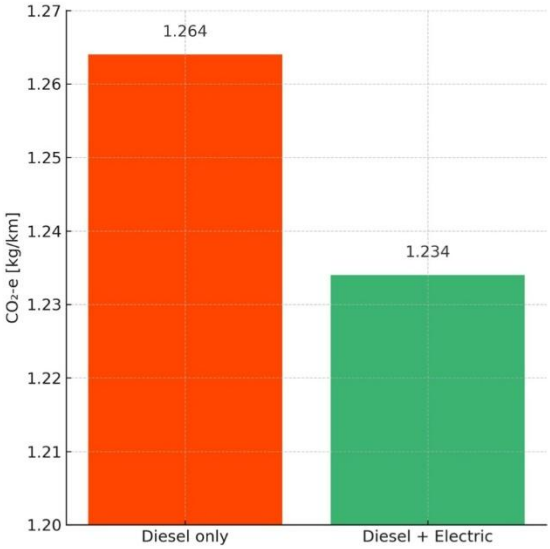


Figura 5.2.3. Emisiile specifice de CO_{2e} per km ale flotei de autobuze aparținând STB-S.A. în anul 2024.

Evoluția estimată a emisiilor de gaze cu efect de seră pentru flota de autobuze STB-S.A. în perioada 2021-2024 este prezentata în figura 5.2.4.

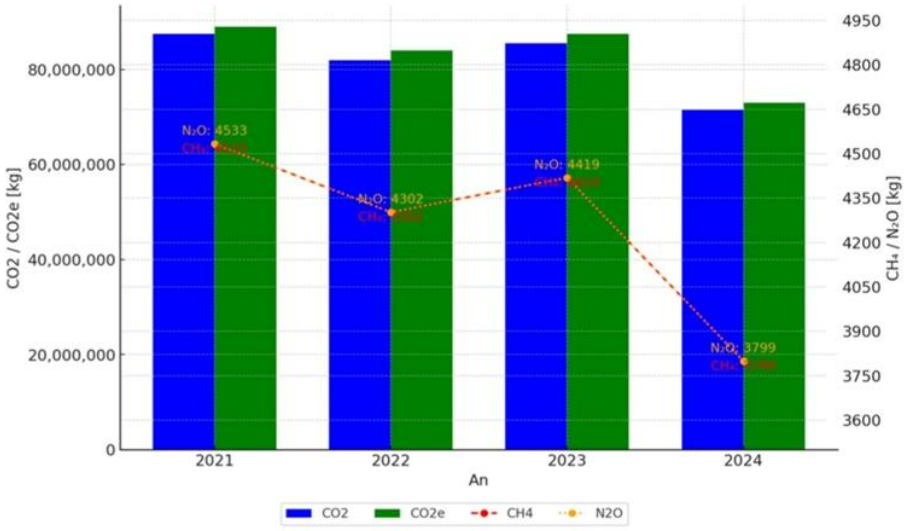


Figura 5.2.3 .Emisii estimate GES pentru autobuzele din flota STB-S.A. în perioada 2021 -2024.

Reducerea estimată a amprentei de carbon pentru întreaga flotă de autobuze este de aproximativ 11 kilotone CO_2e, confirmată de performanțele anterioare Am considerat că trecerea de la un scenariu exclusiv diesel la unul cu vehicule electrice în 2024 poate reduce emisiile totale cu peste 12%. Această diminuare oferă dovezi ale potențialului real al electromobilității în realizarea ambițiilor de decarbonizare. Totodată, tranziția către mobilitate electrică implică și beneficii colaterale, cum ar fi reducerea poluării fonice și îmbunătățirea calității aerului la nivel local, ceea ce contribuie la sănătatea publică per total și la creșterea calității vieții în oraș.

5.3. Calcule privind estimarea GES a flotei de autobuze pentru linia de autobuz 368 a STB-S.A.

Linia 368 a STB-S.A. este o linie de autobuz omogenă și fluidă, care deservește o porțiune importantă din Municipiul București, așa cum se poate observa în Figura 5.3.1.

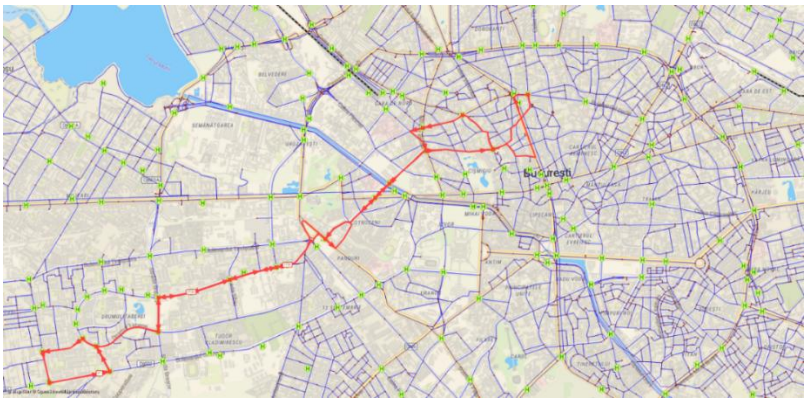


Figura 5.3.1. Harta traseului liniei de autobuz 368 al STB-S.A.

Pentru a evalua impactul introducerii autobuzelor electrice asupra performanței de mediu a transportului urban, a fost analizată linia 368, care operează cu un total de 15 autobuze, dintre care 7 sunt electrice.

În tabelul 5.3.1. sunt prezentate emisiile GES în ambele scenarii, diesel-only și diesel + electrice.

Tabel 5.3.1. GES cu si fara autobuze electrice pe linia 368 în anul 2024.

Scenariu	**CO_2 [kg]**	**CH_4 (kg)**	**N_2O [kg]**	**CO_{2e} [kg]**	**CO_{2e} specific (kg/km)**
Diesel only	1,192,481	63	63	1,213,000	1.25
Diesel+electrice	636,000	33	33	904,000	0.93

Prin introducerea celor 7 autobuze electrice emisiile au scăzut semnificativ: reducerea totală a amprentei de carbon este de 309 t CO_2e, asa cum se poate observa in Figura 5.3.2.

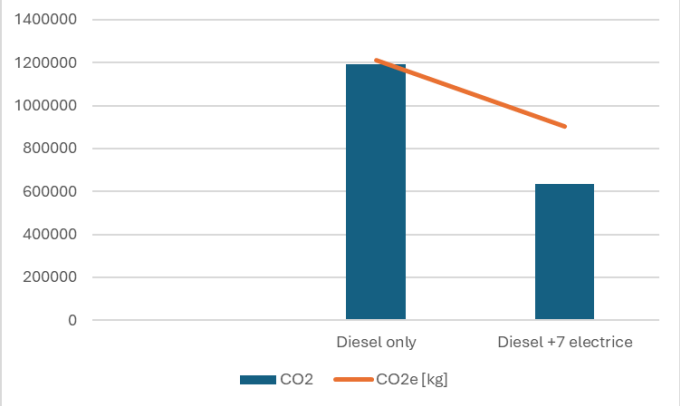


Figura 5.3.2. Evoluția GES în cele două scenarii pentru linia 368, cu și fără cele 7 autobuze electrice GRANTON.

Prin raportarea emisiilor totale la distanța parcursă, se obține o valoare a emisiilor specifice de 1,25 kg CO_2e/km în scenariul diesel only, respectiv 0,93 kg CO_2e/km în scenariul cu cele 7 vehicule electrice. Această reducere a emisiilor evidențiază impactul pozitiv al electrificării parțiale asupra calității aerului urban și asupra diminuării amprentei de carbon asociate transportului public, așa cum se poate observa în Figura 5.3.3.

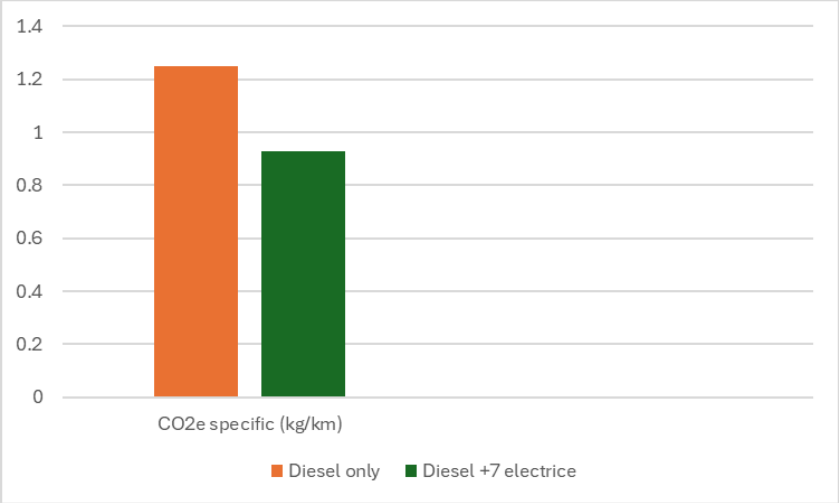


Figura 5.3.3. CO_{2e} specific pentru cele doua scenarii ale liniei 368, cu și fără autobuze electrice.

În continuare a fost proiectat un scenariu, în care, în anul 2025 se mai introduc înca 5 autobuze electrice pe linia 368. Scenariile includ: operare exclusiv diesel, integrarea a 7 autobuze electrice și extinderea la 12 autobuze electrice dintr-un total de 15. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 5. 3.1., Figurile 5.3.4 si 5.3.5., presupunând că toate cele 15 autobuze parcurg în 2025 aceeași distanță ca în anul 2024.

Tabel 5.3.2.. Emisii GES pentru scenariu cu și fără introducerea a încă 7 autobuze electrice pe linia 368 față de anul 2024.

Scenariu	**Autobuze electrice**	**Autobuze diesel**	**CO_2 [kg]**	**CH_4 [kg]**	**N_2O [kg]**	**CO_{2e} [kg]**	**CO_{2e} specific [kg/km]**
Diesel only	0	15	1,192,48	63	63	1,213,000	1.25
Diesel+7 electrice	7	8	636,000	33	33	904,000	0.93
Diesel+ electrice	12	3	238,495	13	13	683,000	0.70

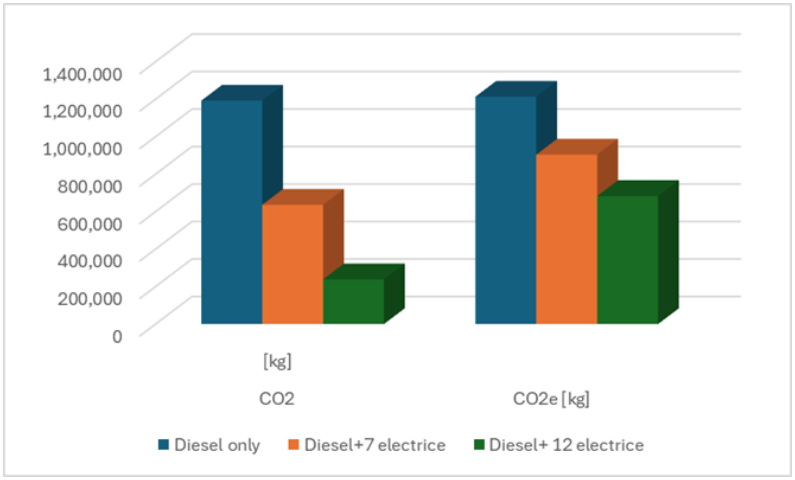


Figura 5.3.4. Emisii GES pentru scenariu cu și fără introducerea a încă 7 autobuze electrice pe linia 368, față de anul 2024.

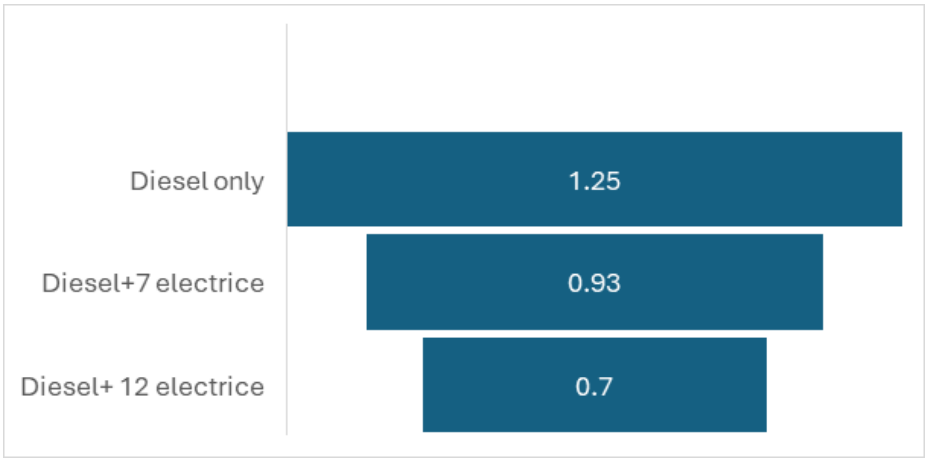


Figura 5.3.5. CO_{2e} specific pentru scenariu cu și fără introducerea a încă 7 autobuze electrice pe linia 368, față de anul 2024.

CO_{2e} specific reflectă cel mai fidel eficiența ecologică a fiecărui scenariu: de la 1,25 kg/km în scenariul de bază la 0,70 kg/km în scenariul avansat.

5.4. Estimări privind GES in scenarii in care creste gradul de electrificare al flotei de autobuze a operatorului de transport din București

Pentru anul 2025, a fost realizat un scenariu în care s-au înlocuit 50 de autobuze diesel EURO III și EURO IV cu 50 autobuze electrice, iar emisiile totale estimate de CO_{2e} ale întregii flote sunt de aproximativ 71 kt CO_{2e}, rezultând o reducere de circa 3 kt CO_{2e} față de 2024 (Figura 5.4.1). Pentru acest scenariu a fost utilizată o valoare de referință constantă pentru autobuzele diesel only, estimată la 74,5 kilotone CO_{2e}, similară pentru 2024.

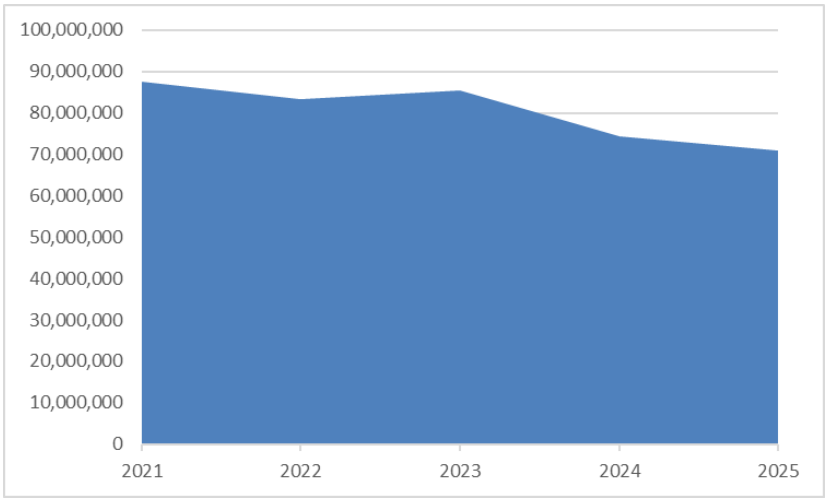


Figura 5.4.1. Amprenta de carbon în scenariul cu înlocuirea a 50 de autobuze diesel cu autobuze electrice în 2025.

Scenariul pentru perioada 2025-2030 a fost extins, prin înlocuirea a 50 de autobuze diesel cu 50 de autobuze electrice/an. Până în anul 2030, emisiile totale estimate de CO_2e ale întregii flote se vor diminua cu peste 11 kt CO_2e față de 2024. Estimările privind emisiile de CO_2 și CO pentru perioada 2025-2030 sunt prezentate în Figura 5.4.2.

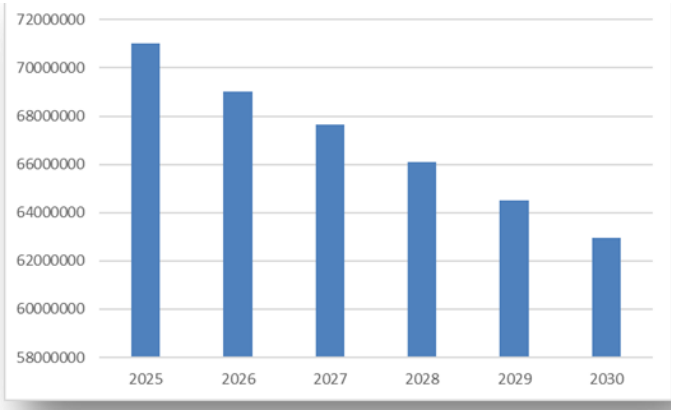


Figura 5.4.2. Estimarea emisiilor de CO_2 și CO_{2e} în scenariul pentru perioada 2025-2030, cu înlocuirea a 50 de autobuze diesel/an cu autobuze electrice.

Reducerea anuală progresivă și semnificativă a emisiilor de CO_2e în perioada 2025–2030 evidențiază impactul direct al procesului de decarbonizare a flotei de autobuze, precum și al integrării tehnologiilor curate, pentru spre atingerea neutralității climatice până în anul 2050.

5.5. Comparația costurilor pe LCA pentru autobuzele hibrid și electrice din flota STB-S.A. vs. Diesel EURO VI.

S-a studiat o analiză economică prin comparație a costului pe durata ciclului de viață a autobuzelor diesel EURO VI, hibrid și electrice din flota operatorului de transport din București, iar autobuzele electrice prezintă avantaje clare în ceea ce privește costurile de operare și impactul asupra mediului, în timp ce autobuzele hibrid oferă un compromis eficient între investiția inițială și reducerea parțială a emisiilor. Pe termen lung, tranziția spre mobilitate electrică este justificată economic și strategic, mai ales dacă sunt luate în considerare externalitățile și sursele de finanțare disponibile (fonduri europene, scheme de sprijin pentru infrastructură verde etc.).

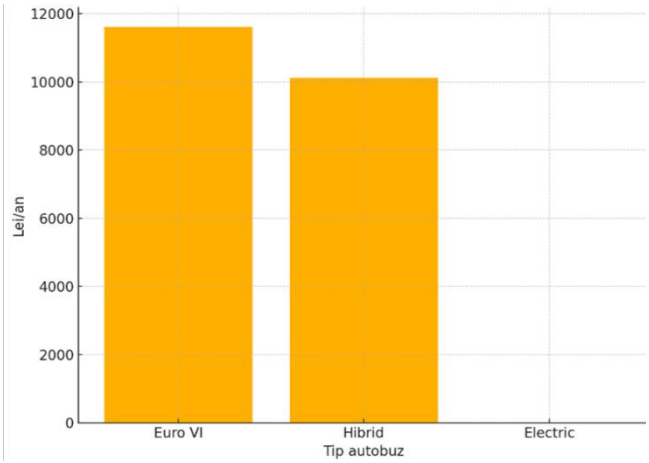


Figura 5.5.1 Cost anual de operare/vehicul flota autobuze STB-S.A.

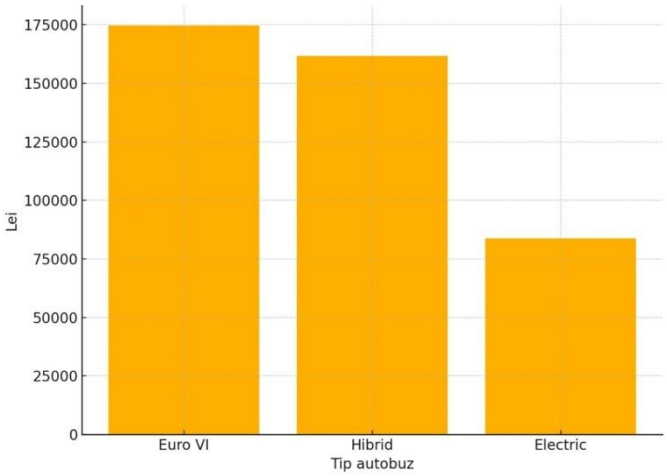


Figura 5.5.2. Costul anual pentru emisiile de CO_2/vehicul pentru flota de autobuze STB-S.A.

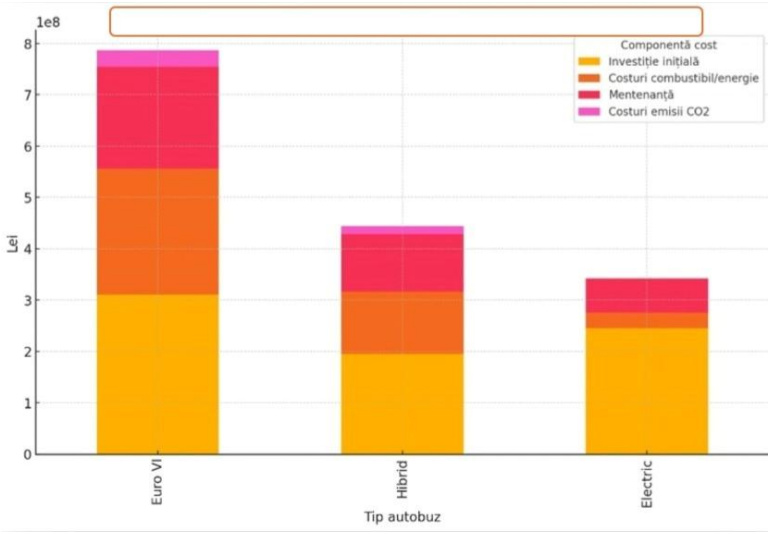


Figura 5.5.3. Structura costurilor pe durata de viață în funcție de tipul de vehicul.

Se poate observa faptul că autobuzul electric are costuri zero cu emisiile CO_2 și cele mai mici cheltuieli energetice, dar presupune o investiție inițială semnificativ mai mare.

Din punct de vedere al economiilor cumulative față de Euro VI, flota mixtă de 130 autobuze hibrid și 100 autobuze electrice reduce semnificativ costurile operaționale și de emisii astfel:

- Configurația cu 130 autobuze hibride aduce economii de aproximativ 7 milioane lei.
- Configurația cu 100 autobuze electrice generează economii de peste 22 milioane lei.

5.6. Analiza cost – beneficiu pentru stațiile de încărcare ale autobuzelor electrice.

Achiziționarea autobuzelor electrice implică și costuri cu amenajarea stațiilor de încărcare aferente. S-au realizat studiile de fezabilitate pentru modernizarea a 3 depouri – Berceni, Bujoreni și București Noi și au început propriu zis lucrările, dar se pierde foarte mult timp pentru obținerea de avize, aprobări, etc. A fost ales un scenariu optim, deoarece are o rată internă de rentabllitate şi o valoare netă actualizată sensibil mai mare. Prestația (numărul de kilometri anuali) crește de la 38 milioane la peste 42 milioane km, iar economiile din mentenanță apar din 2025 și cresc progresiv, semnalând eficiența noii infrastructuri.

Indicatori financiari:

- FIRR: 24,5% → rentabilitate financiară foarte bună.
- NPV: 15.669.535 lei → valoare adăugată pozitivă.
- Raport beneficiu/cost: 1,04 → proiectul aduce mai multe beneficii decât costuri.

În concluzie, proiectul este fezabil din punct de vedere economic, cu un cash flow pozitiv în toți anii operaționali și indicatori financiari care confirmă oportunitatea investiției.

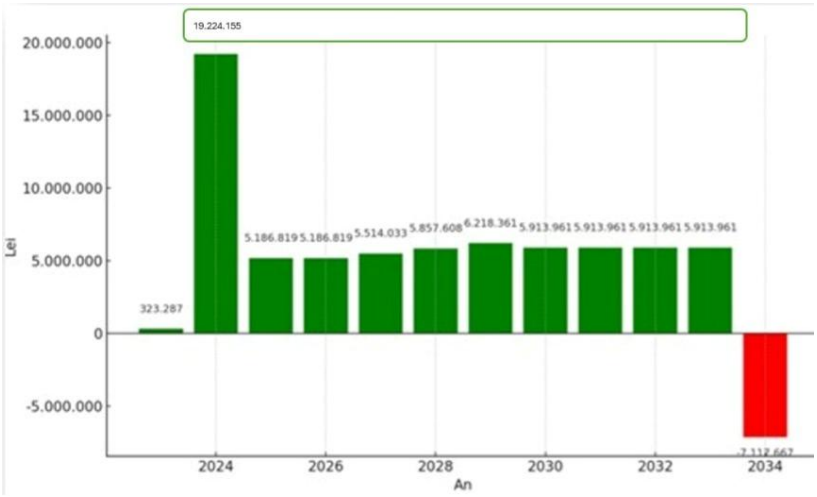


Figura 5.6.1.4 Analiza cost – beneficiu pentru achiziționarea de vehicule nepoluante de către STB-S.A.

5.6.Analiza cost – eficacitate pentru stațiile de încărcare ale autobuzelor electrice.

Având în vedere specificitatea și obiectul investiției de față, se recomandă realizarea unei analize cost-eficacitate (ACE) în locul unei analize economice tradiționale, care presupune compararea diferitelor opțiuni de proiect ce vizează obținerea unui singur rezultat sau efect, care poate varia ca intensitate. Acesta reprezintă un scenariu specific, focalizat doar pe componenta de infrastructură de încărcare pentru autobuze electrice.

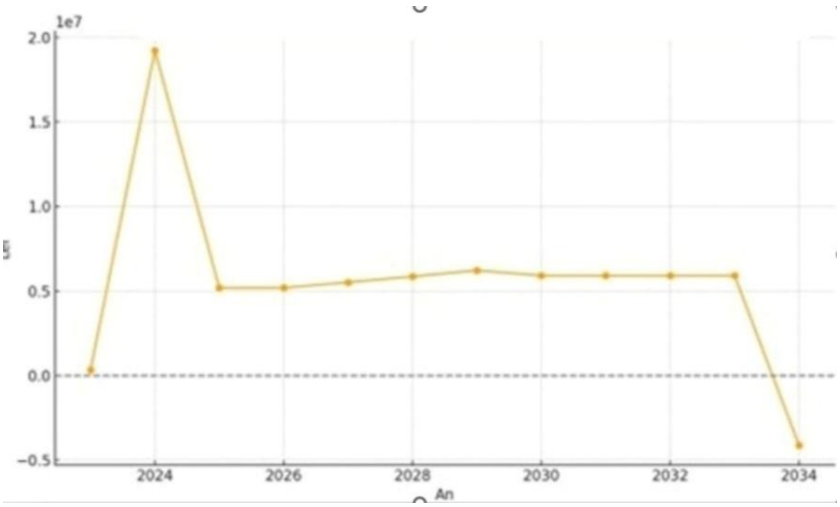


Figura 5.6.1. Analiza cost – Scenariul Optim 4x2000kVA

CAPITOLUL 6. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE DE VIITOR

6.1.Concluzii finale

În cadrul tezei de doctorat cu tema " Evaluarea sustenabilității transportului public prin analiza emisiilor și amprentei de carbon" au fost realizate cercetări privind modalitățile de estimare a emisiilor de gaze cu efect de seră (GES) caracteristice transportului public urban, cu accent pe flota de autobuze clasice, hibride și electrice a Municipiului București, prin analiza comparativă a tehnologiilor existente, cât și prin identificarea metodologiilor adecvate de cuantificare a emisiilor asociate fiecărui tip de autobuz, în raport cu consumul specific de energie, mixul energetic utilizat, gradul de încărcare și caracteristicile operaționale.

Introducerea autobuzelor electrice în București a reprezentat un catalizator strategic pentru extinderea și consolidarea dimensiunii sustenabile a mobilității urbane. Totodată, investițiile în infrastructura de încărcare dau certitudinea unei tranziții coerente și sustenabile din perspectiva atingerii neutralității climatice și alinierii la obiectivele europene.

6.2.Contribuții originale

Activitățile proprii de cercetare și modelare desfășurate în cadrul acestui stagiu doctoral susțin contribuțiile originale aduse domeniului ingineriei mediului, cu impact asupra calității aerului prin evaluarea emisiilor GES rezultate din activitatea de transport public. Contribuțiile personale sunt:

- Aplicarea pentru prima dată a metodologiei JASPERS pentru estimarea emisiilor de gaze cu efect de seră (GES) generate de flota de autobuze urbane din București, pe baza datelor reale de consum și rulaj pentru perioada 2021–2024, în special după introducere autobuzelor electrice în anul 2024, unde rulajul autobuzelor electrice a reprezentat aproximativ 3,47 % din totalul distanței parcurse de parcul auto. Reducerea de CO_{2e} față de anul 2023 a fost de aproape 12 kt CO_{2e}, respectiv de 13% față de anul precedent.
- Adaptarea cadrului de calcul JASPERS la contextul național, prin utilizarea factorilor de emisie specifici mixului energetic din România și caracteristicilor flotei locale de transport. Astfel, în studiul de caz pentru linia 368 de autobuz, a fost modelat un scenariu prin introducerea a încă 5 autobuze electrice în anul 2025, și s-a constatat o variație a amprentei de carbon specifice de la 1,25 kg/km în scenariul de bază la 0,70 kg/km, în scenariul avansat.

- Realizarea unui studiu aplicat privind infrastructura de încărcare pentru autobuzele electrice, cu accent pe dimensionarea stațiilor, cerințele tehnice și integrarea cu rețeaua electrică urbană.
- Determinarea consumului mediu și maxim orar de energie electrică pentru autobuzele electrice, inclusiv dimensionarea puterii instalate și a cerințelor pentru posturile de transformare aferente stațiilor de încărcare, unde s-a identificat o rezervă de putere și a fost recomandată efectuarea unui bilanț energetic în vedere amplasării stațiilor de încărcare ale autobuzelor electrice.
- Analiza evoluției consumului de energie electrică la nivelul operatorului de transport STB-S.A., cu scopul de a corela necesarul energetic viitor cu strategia de electrificare a flotei.
- Elaborarea unor scenarii pentru perioada 2025–2030, care evaluează impactul decarbonizării flotei de autobuze prin introducerea progresivă a vehiculelor electrice. Astfel, pentru scenariul 2025-2030, prin înlocuirea a 50 de autobuze Euro III, IV, sau VI cu autobuze electrice, s-a constatat o reducere estimată a amprentei de carbon cu 11 kt CO_{2e} față de scenariul inițial.
- Determinarea și analiza emisiilor specifice de CO_2e (kg/km) pentru fiecare an studiat, cu evidențierea tendințelor și a reducerilor potențiale obținute în scenariile de tranziție energetică. Astfel, amprenta de carbon s-a diminuat de la circa 85 kt CO_{2e} în anul 2023, la 74,5 kt CO2e în 2024.
- Compararea performanțelor de mediu ale autobuzelor diesel, hibrid și electrice, pe baza calculelor standardizate, oferind o bază de evaluare pentru politici de achiziție publică durabilă, astfel a fost înregistrată o reducere de **2,68 %** a amprentei de carbon specifice, prin introducerea autobuzelor electrice în anul 2024. De asemenea, eficiența climatică specifică este de aproximativ 1,25 kg CO_{2e} evitate per kilometru autobuz electric.
- Estimarea reducerilor cumulative de emisii GES în funcție de gradul de electrificare a flotei, oferind repere cantitative utile pentru decidenți și strategiile de mobilitate urbană.

Rezultatele au fost sintetizate sub forma unor indicatori comparativi (ex. kgCO_2/km, echivalent CO_2/pasager-km), relevând contribuția fiecărui tip de flotă la reducerea amprentei de carbon și la atingerea obiectivelor climatice locale.

Sustenabilitatea devine astfel un cadru integrator pentru politici publice inteligente, orientate pe reziliență și inovare.

Prin această abordare multidimensională, teza a contribuit la fundamentarea deciziilor strategice privind modernizarea transportului public în București și la identificarea celor mai eficiente opțiuni de tranziție către mobilitatea urbană cu emisii reduse, amplificând astfel procesul de decarbonizare urbană, în scopul construirii unui viitor sustenabil și durabil pentru generațiile viitoare.

Perspective de viitor

- Extinderea calculului emisiilor GES prin metoda JASPERS pentru întreg transportul public electrificat din București.
- Cuantificarea consumurilor de energie electrică pentru stațiile de încărcare ale autobuzelor electrice în vederea estimării amprentei de carbon pentru acestea.
- Estimarea emisiilor de Black Carbon (BC) care includ și $PM_{2.5}$ și poluanți climatici cu durată de viață scurtă (SLCP) care include și CH_4 utilizând metode de calcul adecvate.
- Analiza de scenarii pentru utilizarea variantelor alternative, cum ar fi hidrogenul, ca sursă de energie pentru autobuze, care reprezintă o soluție promițătoare pentru electrificarea clasică, în special pentru rute lungi sau în condiții de exploatare intensă, unde infrastructura de încărcare electrică este dificil de implementat.

BIBLIOGRAFIE

[1] Munsif, R., Zubair, M., Aziz, A., & Zafar, M. N. (2021). Industrial air emission pollution: Potential sources and sustainable mitigation. In Environmental Emissions. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.100153

[2] World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

[3] World Health Organization. (2022). Air pollution. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1

[4] Carreras-Sospedra, M., Williams, R., & Dabdub, D. (2016). Assessment of the emissions and air quality impacts of biomass and biogas use in California. Journal of the Air & Waste Management Association, 66(2), 134–150. https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1114042

[5] Ali, M.U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M.A.M., Ullah, S., Zheng, C., Wong, M.H., 2021. Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. J. Hazard. Mater. 416, 126127

[6] Xu, Y., Zaelke, D., Velders, G. J. M., & Ramanathan, V. (2013). The role of HFCs in mitigating 21st century climate change. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(12), 6083–6089. https://doi.org/10.5194/acp-13-6083-2013

[7] Zhao, C.-N., Xu, Z., Wu, G.-C., Mao, Y.-M., Liu, L.-N., Qian, W., & Zhang, Q. (2019). Emerging role of air pollution in autoimmune diseases. Autoimmunity Reviews, 18(6), 607–614. https://doi.org/10.1016/j.autrev.2018.12.010

[8] Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Koch, D.J.J., o. g. r. A., 2013a. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. 118 (11), 5380–5552.

[9] Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Zender, C.S., 2013b. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. J. Geophys. Res. Atmos. 118 (11), 5380–5552 https://doi.org/ 10.1002/jgrd.50171.

[10] Jacobson, M.Z., 2002. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. J. Geophys. Res. Atmos. 107 (D19). ACH 16-11-ACH 16-22

[11] Xiaopu, S., Pu, W., Ferris, T., Hui, L., Dreyfus, G., Bai-He, G., Yi, W.J.A., i. C. C. R., 2022. Fast action on short-lived climate pollutants and nature-based solutions to help countries meet carbon neutrality goals. 13 (4), 564–577.

[12] European Environment Agency (EEA). (2022). Air pollution sources. Retrieved July 28, 2022, from https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1

[13] Eguiluz-Gracia, I., Mathioudakis, A.G., Bartel, S., Vijverberg, S.J., Fuertes, E., Comberiati, P., Vestbo, J.J.A., 2020b. The need for clean air: the way air pollution and climate change affect allergic rhinitis and asthma. 75 (9), 2170–2184.

[14] Public Health England. (2019). Review of interventions to improve outdoor air quality and public health. UK Government. https://www.gov.uk/government/publications/improving-outdoor-air-quality-and-health-review-of-interventions

[15] World Health Organization. (2021). COP26 special report on climate change and health: The health argument for climate action. Geneva: World Health Organization. Disponibil la: https://www.who.int/publications/i/item/9789240036727

[16] Murray, C. J. L., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi-Kangevari, M., Abdollahpour, I., et al. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. The Lancet, 396(10258), 1223–1249. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2

[17] Gakidou, E., Afshin, A., Abajobir, A. A., Abate, K. H., Abbafati, C., Abbas, K. M., Aboyans, V., et al. (2017). Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. The Lancet, 390(10100), 1345–1422. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32366-8

[18] Keswani, A., Akselrod, H., & Anenberg, S. C. (2022). Health and clinical impacts of air pollution and linkages with climate change. NEJM Evidence, 1(7), EVIDra2200068. https://doi.org/10.1056/EVIDra2200068

[19] World Health Organization. (2015). Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. Geneva: World Health Organization

[20] Yildirim, E., Saraç, S¸., Aslan, A., 2012. Energy consumption and economic growth in the USA: evidence from renewable energy. Renew. Sustain. Energy Rev. 16 (9), 6770–6774

[21] Riti, J. S., Song, D., Shu, Y., Kamah, M., & Atabani, A. A. (2018). Does renewable energy ensure environmental quality in favour of economic growth? Empirical evidence from China's renewable development. *Quality & Quantity*, *52*, 2007–2030. https://doi.org/10.1007/s11135-017-0575-1

[22] Kusch-Brandt, S. (2019). Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21's "Renewables 2019 Global Status Report". *Resources*, *8*(3), 139.

[23] Neogi, S., Sharma, V., Khan, N., Chaurasia, D., Ahmad, A., Chauhan, S., Bhargava, P.C.J. C., 2022. Sustainable biochar: A facile strategy for soil and environmental restoration, energy generation, mitigation of global climate change and circular bioeconomy. 293, 133474

[24] Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., ... Pulvirenti, B. (2017). A review of air pollution abatement performances of green infrastructure in the open road and built-up street canyon environments. *Atmospheric Environment*, *162*, 71–86. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014

[25] Dauxois, T., Peacock, T., Bauer, P., Caulfield, C.-C. P., Cenedese, C., Gorlé, C., & Meiburg, E. (2021). Confronting grand challenges in environmental fluid mechanics. *Physical Review Fluids*, *6*(2), 020501. https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.020501

[26] Cao, Q., Kuehn, T. H., Shen, L., Chen, S.-C., Zhang, N., Huang, Y., & Pui, D. Y. (2018). Urban-scale SALSCS, part I: Experimental evaluation and numerical modeling of a demonstration unit. *Aerosol and Air Quality Research, 18*(11), 2865–2878. https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0108

[27] European Environment Agency. (n.d.). *Transport and mobility*. https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/transport-and-mobility

[28] Organization for Economic Co-operation and Development. (2024). *Decarbonising Romania's economy*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/decarbonising-romania-s-economy_256205df-en.html

[29] Direcția Regională de Statistică a Municipiului București. (n.d.). *Site-ul oficial*. Institutul Național de Statistică. https://bucuresti.insse.ro/

[30] European Environment Agency. (n.d.). *Emissions of air pollutants from transport*. Retrieved June 9, 2025, from https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-of-air-pollutants-from

[31] European Environment Agency (EEA). (2020). Environmental noise in Europe — 2020. EEA Report No 22/2019. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Retrieved from https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe

[32] Council of the European Union. (2024, June 13). *Trans-European transport network (TEN-T): Council gives final green light to new regulation ensuring better and sustainable connectivity in Europe*. https://www.consilium.europa.eu/ro/press/press-releases/2024/06/13/trans-european-transport-network-ten-t-council-gives-final-green-light-to-new-regulation-ensuring-better-and-sustainable-connectivity-in-europe/

[33] Comisia Europeană. (2020). *Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future* (COM (2020) 789 final). Eur-Lex.

[34] European Environment Agency. (2024). *Passenger transport activity*. In Sustainability of Europe's mobility systems. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems/passenger-transport-activity

[35] European Commission. (2021). *Recovery and Resilience Plan for Romania*. https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/recovery-coronavirus/recovery-and-resilience-facility/romania-recovery-and-resilience-plan_en

[36] Statistical Office of the European Union (Eurostat). (2024, August). *Share of buses and trains in inland passenger transport [SDG_09_50]* [Data set]. Eurostat. Retrieved June 10, 2025, from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_09_50

[37] JASPERS, Ministerul Transporturilor, Primăria Municipiului București & Consiliul Județean Ilfov. (2016). *Planul de Mobilitate Urbană Durabilă București–Ilfov 2016–2030*. București. Retrieved from https://pmb.ro/assets/files/pmud/PMUD_BI_2016_2030_FINAL.pdf

[38] STB SA. (n.d.). *Despre STB SA*. Societatea de Transport București. Retrieved June 11, 2025, from https://www.stbsa.ro/

[39] Primăria Municipiului București. (2018). *Strategia de dezvoltare durabilă a Municipiului Bucureşti 2018–2030*. https://www.pmb.ro/documents/strategia_de_dezvoltare_2018_2030.pdf

[40] Guvernul României. (2023, 29 noiembrie). *Hotărârea nr. 1 215 privind aprobarea Strategiei pe termen lung a României pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră – România Neutră în 2050*. Monitorul Oficial al României, Partea I, nr. 1 103, 7 decembrie 2023. Recuperat de la https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocument/277052

[41] Parlamentul European și Consiliul Uniunii Europene. (2018). *Directiva (UE) 2018/2001 privind promovarea utilizării energiei din surse regenerabile și de abrogare a Directivei 2009/28/CE*. Jurnalul Oficial al Uniunii Europene, L 328, 82–209. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001

[42] JASPERS. (2014). *Guidance note: GHG emissions assessment for transport projects*. European Investment Bank (EIB). *https://jaspers.eib.org/library/details.asp?parent=1055&id=7847* (accessed on 28 February 2025)

[43] Parlamentul European & Consiliul Uniunii Europene. (2009). *Directiva 2009/33/CE privind promovarea vehiculelor de transport rutier nepoluante și eficiente din punct de vedere energetic*. Jurnalul Oficial al Uniunii Europene, L 120, 5.5.2009, pp. 5–12. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0033

[44] Ministerul Transporturilor din România. (2015). *Ghidul național de evaluare a proiectelor aferent Master Planului General de Transport (MPGT) pentru România – Volumul 2, Partea C: Ghidul pentru analiza cost-beneficiu economică și financiară și analiza riscului*. București. *https://www.mt.ro/documents/20181/112196/Ghid_Evaluare_MPGT_vol2_parteaC.pdf* (accessed on 28 February 2025)

Diseminarea rezultatelor

1. Articole publicate în jurnale cotate ISI

1. Matei E., Râpă M., Mateș I.M., Popescu A.-F., Bădiceanu A., Balint A.I., Covaliu-Mierlă C.I., Heavy Metals in Particulate Matter—Trends and Impacts on Environment, (2025) Molecules, 30 (7), art. no. 1455, DOI: 10.3390/molecules30071455, IF 4.6, CO-AUTOR
2. Badiceanu, A, Popescu, AF, Balint, AI, Matei, E, Impact of PM10 emissions from transport sector on air quality in the Bucharest-Ilfov area, (2025) University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series B-Chemistry and Materials Science, VL 87, IS 1, 227-236, WOS:001488435000001, IF 0.3, CO-AUTOR
3. Popescu, A.F., Matei, E., Bădiceanu A., Balint, A.I., Râpă M., Coman G., Predescu C., An optimistic vision for public transport in Bucharest city after the bus fleet upgrades, (2025), Environments, publicat, IF 3.7, ID : environments-3695062; DOI:

10.3390/environments12070242, Environments 2025, 12, 242, AUTOR PRINCIPAL – nominalizat la premiul “Best Researcher Award” de către Global Research pe 17.07.2025.

4. Popescu, A.F., Matei, E., Bădiceanu, A., Urban Transport decarbonisation strategies: Scenario analysis on route bus 368 in city of Bucharest, U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 87, Iss. 3, 323-334, ISSN 1454-2331, AUTOR PRINCIPAL
5. Participări la conferințe
    - Popescu, A.F., Bădiceanu A., Matei, E., PM10 emissions impact on air quality from transport activities (2024), International Conference of Science and Technology Materials ROMAT, 14-15 Noiembrie, 2024, prezentare orală.
    - Popescu, A.F, Matei, E., Bădiceanu, A. - Environmental Impact of Renewable Energy and Electric Propulsion Systems in Public Transport: A Case Study on Bucharest e-Buses (2025) , acceptat la International Conference on Advanced Automotive Systems ICAAS, 13-14 Noiembrie, 2025 –prezentare orală.