



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Centrul Universitar Pitești
Școala doctorală „Ingenieria Autovehiculelor”



AUTOVEHICULE HSV DE GABARIT GREU

Autor:
ing. **Dragoș Mihai POPA**

Coordonator științific:
Prof.univ.habil.dr.ing. **Dinel POPA**

Pitești

2024

Teza de doctorat -
Rezumat



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Centrul Universitar Pitești



Școala doctorală „Ingineria Autovehiculelor”

Autovehicule HSV de gabarit greu

Teză de doctorat

REZUMAT

Autor:

ing. **Dragoș Mihai POPA**

Coordonator științific:

Prof.univ.habil.dr.ing. **Dinel POPA**

Pitești

2024

CUPRINS - REZUMAT

1. Utilizarea energiei fotovoltaice ca sursă regenerabilă suplimentară	7
1.1. Introducere.....	7
1.2. Istoric al autovehiculelor hibride	8
1.3. Analiza soluțiilor de organizare a surselor de energie	10
1.4. Instalarea panourilor solare pe autovehicule de tonaj ridicat.....	12
1.5. Regimuri de funcționare.....	12
1.6. Panouri solare	13
1.7. Baterii	14
1.8. Controler MPPT (“Urmărirea punctului de putere maximă”)	14
1.9. Managementul energetic.....	14
1.10. Radiația solară	15
1.11. Configurarea traseului.....	15
1.12. Frânarea regenerativă.....	17
1.13. Obiectivul științific al studiului	17
1.14. Concluzii	18
2. Evaluarea analitică și numerică a consumului de combustibil	19
2.1. Introducere.....	19
2.1.1. Condițiile de rulare ale roților. Roata liberă. Roata motoare. Roata frânată.	19
2.1.2. Momentul la roata de propulsie.	20
2.1.3. Definierea condițiilor de autopropulsare.....	20
2.2. Dinamica autovehiculului în mișcare longitudinală	21
2.3. Simularea backward-facing a dinamicii longitudinale a autovehiculului	21
2.4. Simularea forward-facing a dinamicii autovehiculului	21
2.5. Analiza consumului de combustibil.....	23
2.6. Discuții	24
2.7. Analiza extinsă.....	25
2.8. Concluzii	25
3. VECTO – Modelare și simulare	26
3.1. Introducere.....	26
3.2. Prezentarea VECTO	26
3.3. Concluzii	26
4. Modelarea performanțelor consumului de consum de combustibil în cazul autotrenurilor rutiere	28

4.1. Introducere.....	28
4.2. Evaluarea performanțelor de consum de combustibil - VECTO	28
4.3. Evaluarea analitica a performanțelor de consum de combustibil	28
4.3.1. Deplasarea în condiții ideale.....	29
4.3.2. Deplasarea în condiții tehnice.....	29
4.3.3. Deplasarea în condiții de regim dinamic.....	30
4.3.4. Deplasarea în condiții de regim dinamic si tehnic.....	30
4.3.5. Deplasarea în condiții de regim dinamic si tehnic cu istoric	31
4.4. Validarea modelului de calcul	31
4.4.1. Parcurgerea ciclului Regional Delivery	31
4.4.2. Parcurgerea ciclului Urban Delivery.....	31
4.5. Concluzii	32
5. Analiza performanțelor de consum de combustibil în trafic real	33
5.1. Introducere.....	33
5.2. Prelucarea datelor experimentale	33
5.3. Concluzii	34
6. Studiul posibilităților de electrificare și utilizare a surselor alternative de energie electrică.....	35
6.1. Introducere.....	35
6.2. Model de calcul pentru autovehiculul hibrid	35
6.2.1. Relații generale de calcul pentru modelarea autovehiculului	35
6.2.2. Funcționarea autovehiculului cu mașina electrică în regim de motor pentru îndeplinirea necesarului pentru autopropulsare	36
6.2.3. Funcționarea autovehiculului cu mașina electrică în regim de generator.....	36
6.2.4. Funcționarea autovehiculului cu mașina electrică în regim de motor.....	37
6.2.5. Funcționarea autovehiculului cu echipament fotovoltaic	37
6.3. Validarea modelului de calcul pentru autovehiculul hibrid	38
6.4. Soluții pentru realizarea unei semiremorci electrificate.....	39
6.4.1. Utilizarea unei baterii cu performanță crescută (capacitate limitată la pornire).	40
6.4.2. Utilizarea unei baterii cu performanță crescută (capacitate nominală la pornire).	41
6.4.3. Utilizarea unei mașini electrice exclusiv în regim de generator.....	41
6.4.4. Utilizarea unei mașini electrice și a sistemului fotovoltaic.	42
6.4.5. Utilizarea unei mașini electrice și a sistemului fotovoltaic.	43
6.5. Concluzii	43
7. Studiul performanțelor autovehiculelor ICE, (P)HEV, (P)HEV-PV și BEV	45
7.1. Introducere.....	45
7.2. Modelarea	45

7.2.1. Vehiculul urmărește cu precizie datele de intrare (modul de conducere în regim staționar).	47
7.2.2. Vehiculul folosește un profil de accelerație și se poate adapta puterii disponibile	47
7.2.3. Autotren hibrid cu semiremorcă electrificată	48
7.2.4. Autotren hibrid cu semiremorcă electrificată și panouri fotovoltaice	48
7.3. Rezultate	48
7.3.1. Vehicul convențional	49
7.3.2. Vehicul hibrid	50
7.3.3. Vehicul hibrid cu panouri fotovoltaice	50
7.3.4. Vehicul hibrid cu capacitate extinsă a bateriei	51
7.4. Discuții	51
7.4.1. Consumul de energie și de combustibil al unui vehicul cu semiremorcă electrificată	51
7.4.2. Analiză comparativă a consumului de energie	52
7.5. Concluzii	52
8. Concluzii generale și Contribuții personale	54
8.1. Concluzii	54
8.2. Contribuții personale	56
8.3. Cercetări viitoare	57
BIBLIOGRAFIE	60
Anexa I. Calibrare	65
Anexa II. Algoritm de calcul	65

1 Notatii

Notatie	Unitate	Descriere
F_R	[N]	Forța longitudinală la roată
P_R	[W]	Puterea la roată
P_{max}	[W]	Puterea furnizată de motorul termic
η_{tr}	[-]	Randamentul transmisiei (global)
T_R	[Nm]	Momentul motor la roată
R_r	[N]	Rezistența la rulare
R_a	[N]	Rezistența aerodinamică
R_p	[N]	Rezistența la pantă
R_d	[N]	Rezistența la demarare
G_a	[N]	Greutatea autovehiculului
f_r	[-]	Coeficientul rezistenței la rulare
ρ_{aer}	[kg/m ³]	Densitatea aerului
g	[m/s ²]	Accelerația gravitațională
CDA	[m ²]	Parametru compozit
$p\%$	[%]	Unghiul de înclinare al pantei căii de rulare (tangent)
δ	[-]	Coeficientul de influență al maselor în mișcare de rotație
Δt	[s]	Intervalul de timp
v, v_a, v_{nom}	[m/s]	Viteza autovehiculului
V, V_a, V_{nom}	[km/h]	Viteza autovehiculului
a, a_a, a_u	[m/s ²]	Accelerația autovehiculului
ω_R	[rad/s]	Viteza unghiulară a roții
$s, s_{j-1,j}$	[m]	Distanța (intervalul de referință)
h	[m]	Altitudinea relativă
U_i	[J]	Energia potențială
L	[J]	Lucrul mecanic
η_{tr}	[-]	Randamentul transmisiei (între motorul termic și roată)
q, q_m	[g/kWh]	Consumul specific de combustibil (al motorului termic)
ρ_{B7}	[kg/m ³]	Densitatea combustibilului
m_c	[kg]	Masa de combustibil
$P_{eu,m}$	[W]	Puterea furnizată de motorul electric când funcționează în regim de motor
$P_{eu,g}$	[W]	Puterea furnizată de motorul electric când funcționează în regim de generator
V_{nom}	[V]	Tensiunea nominală de alimentare a motorului electric
BW_{nom}	[kWh]	Energia bateriei
A_{nom}	[Ah]	Capacitatea bateriei
I_{out}	[A]	Intensitatea curentului de alimentare a motorului electric
I_{in}	[A]	Intensitatea curentului de alimentare a bateriei (de la generator)
A_{out}	[Ah]	Curentul descărcat de baterie
$SOC\%$	[-]	Nivelul de încărcare (al bateriei)
η_{emt}	[-]	Randamentul unității electrice
n_{PV}	[-]	Numărul de panouri fotovoltaice
$P_{nom,PV}$	[W]	Puterea nominală a unui panou fotovoltaic
$V_{in,PV}$	[V]	Tensiunea nominală a sistemului de panouri fotovoltaice
η_{PFV}	[-]	Eficiența sistemului fotovoltaic
I_{PV}	[A]	Curentul nominal al sistemului de panouri fotovoltaice
CF_{PV}	[-]	Coeficientul de utilizare al sistemului de panouri fotovoltaice
$I_{DC,B-LV}$	[A]	Curentul pe partea de joasă tensiune (B-LV);
α_{DC}	[-]	reprezintă coeficient cuprins între (0,1) de control al curentului
$P_{DC,max}$	[W]	reprezintă puterea maximă a convertorului

η_{DC}	$[-]$	reprezintă coeficientul de eficiență al convertorului
$P_{DC,act}$	$[W]$	reprezintă puterea instantanee a convertorului
$V_{DC,B-HV}$	$[V]$	reprezintă tensiunea instantanee pe partea de tensiune înaltă (B-HV)

1. UTILIZAREA ENERGIEI FOTOVOLTAICE CA SURSĂ REGENERABILĂ SUPLIMENTARĂ

1.1. INTRODUCERE

Agenția de Protecție a Mediului din Statele Unite (EPA – Environmental Protection Agency) prezintă într-un studiu faptul că principala emisie de noxe provine din transportul rutier, iar dioxidul de carbon (CO₂) reprezintă aproximativ 35% din totalul surselor de emisii nocive. Conform Agenției Europene de Mediu, în anul 2016 transportul rutier a generat aproximativ 21% din totalul emisiilor de CO₂ de pe continent, echivalentul a 82% din totalul emisiilor de CO₂ din sectorul transporturilor. Creșterea prețului și diminuarea resurselor combustibilului fosil, poluarea accentuată a mediului înconjurător, sunt motive reale și determinante pentru reorientarea producătorilor de autovehicule spre identificarea unor soluții alternative pentru propulsia cu ajutorul motoarelor cu ardere internă, cum ar fi hidrogenul, gazul natural lichefiat, biocombustibilul. O soluție alternativă, aflată în plină evoluție tehnologică este reprezentată de utilizarea motoarelor electrice [1]. Această tehnologie se dezvoltă concomitent cu îmbunătățirea soluțiilor de stocare a energiei [2]. Autovehiculele electrice (**EV**) au devenit astfel o ramură a transportului modern [3].

Soluțiile actuale capătă diferite valențe astfel că, în zone ale globului, sisteme de panouri fotovoltaice sunt integrate în plafonul autovehiculului și sunt recunoscute ca tehnologie inovativă de reducere a emisiilor de dioxid de carbon. În Europa această tehnologie este recunoscută încă din anul 2009 prin Articolul 12 al Regulamentului (EC) 443/2009 pentru încărcarea unor baterii de 12V [4].

Autovehiculele care utilizează panouri fotovoltaice, atunci când sunt echipate cu un motor termic fac parte, ca și clasificare, din categoria **HEV** (hybrid electric vehicle). Când autovehiculele care utilizează panouri fotovoltaice nu sunt echipate cu motor termic, ele sunt categorisite ca și **EV** (electric vehicle). Autovehiculele **HEV**, prin combinarea motorului termic cu motorul electric, oferă o capacitate de transport ridicată și au un potențial promițător de reducere a consumului de combustibil fosil și alinierea la normele tot mai stricte privitoare la noxele din gazele de evacuare.

Autovehiculele cu propulsie hibridă și cele cu propulsie pur electrică au devenit foarte competitive la nivel global, devenind principala dezvoltare tehnologică [5] spre care se îndreaptă majoritatea constructorilor.

Prezentul este caracterizat de un avânt în dezvoltarea sectorului autovehiculelor electrice, **BEV** (battery electric vehicle), **HEV** (hybrid electric vehicle) sau **PHEV** (plug-in hybrid electric vehicle), însă infrastructura costisitoare (rețele de încărcare pentru **BEV** și **PHEV**), modalitățile de producere a energiei electrice și cerințele tot mai stricte ale convențiilor de protecție a mediului fac ca viitorul să poată fi reprezentat de autovehicule **HEV** cu panouri fotovoltaice încorporate și folosite ca sursă alternativă de energie. Denumirea acestora din urmă este Hybrid Solar Vehicle (**HSV**).

Scăderea continuă a prețului sistemelor de stocare a energiei electrice și a panourilor fotovoltaice, cât și creșterea eficienței acestora sunt factori hotărâtori în dezvoltarea industriei autovehiculelor ce folosesc energia solară ca sursă alternativă de putere.

Astfel, ca și energie regenerabilă, cea mai eficientă din punct de vedere al costurilor de conversie este energia solară. Această tehnologie de conversie a energiei solare în energie electrică a avut cea mai rapidă creștere dintre toate sursele de energie regenerabilă în multiple domenii de activitate [6].

43 Industria globală de autovehicule solare preconizează a avea o creștere anuală de aproximativ 18%
44 pe parcursul următorilor 5 ani, și se va ajunge la o valoare de 680 de milioane de dolari în 2026 și de 4
45 miliarde în 2030.

46 Figura 1.1 arată tendința investițiilor în industria de fabricare a autovehiculelor alimentate cu energie
47 solară, o ușoară stagnare observându-se pe parcursul celor 2 ani pandemici, 2020-2021.

Dimensiunea sectorului de autovehicule solare în Europa, 2016-2027, (milioane dolari)

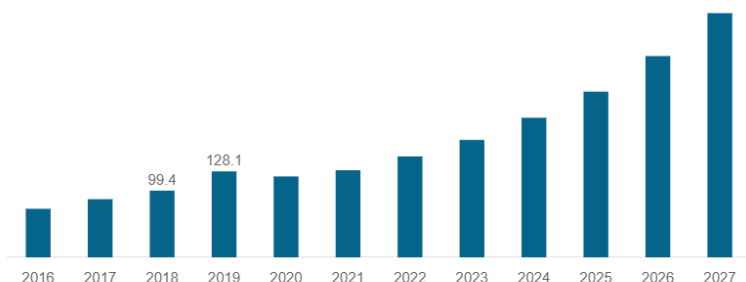


Figura 1.1. Valoarea sectorului de autovehicule solare din Europa

48 În ultimii ani, energia solară a devenit una dintre cele mai ieftine forme de energie, iar transportul
49 rutier ce folosește această sursă suplimentară de energie poate depăși nivelul autovehiculelor integral
50 electrice (plug-in hibride, **PHEV**) ce depind de infrastructura disponibilă de încărcare. Energia provenită
51 de la panourile fotovoltaice dispuse pe exteriorul autovehiculelor va deveni prioritară pentru alimentarea
52 consumatorilor electrice, reducându-se astfel consumul din bateriile de acumulare a energiei. Beneficiile
53 sunt protejarea bateriilor, reducerea consumului de combustibil, reducerea emisiilor poluante generate
54 de funcționarea motorului termic cât și extinderea autonomiei de rulare.

55 1.2. ISTORIC AL AUTOVEHICULELOR HIBRIDE

56 Pentru a prezenta energia solară ca și sursă regenerabilă ce poate susține propulsia unui autovehicul
57 în viitorul apropiat, trecem în revistă câteva modele constructive cu rezultate impresionante în testele
58 efectuate.

59 Istoria autovehiculelor electrice și hibride începe la finalul secolului al XIX-lea, anul 1898, când
60 tânărul inginer austriac Ferdinand Porsche a realizat “Semper Vivus” (Figura 1.2.), un autovehicul ce
61 avea instalate în roțile din față câte un motor electric de 2,5 cai putere dezvoltat la 120 rpm. Fiecare
62 motor cântărea 115 kg, iar ansamblul de 44 de baterii de alimentare cântărea 410 kg. Bateriile puteau
63 livra o putere de 24 kWh, capabilă să imprime autovehiculului o viteză de 50 km/h.

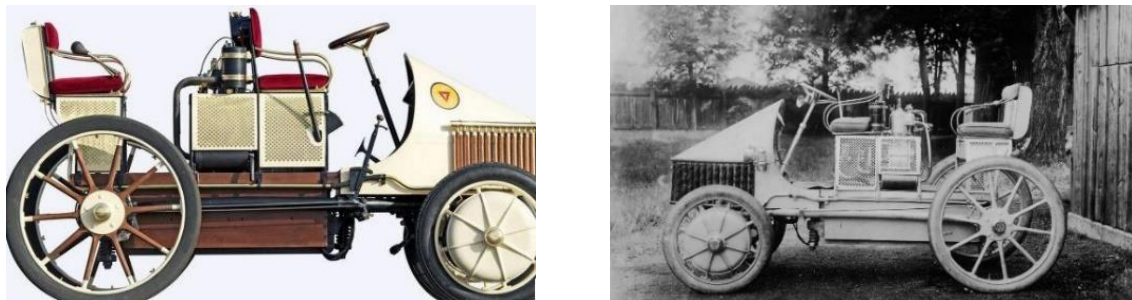


Figura 1.2. Lohner-Porsche Semper Vivus

64 Cum bateriile sunt cele mai costisitoare componente ale sistemului de propulsie electrică, o reducere
65 a capacității de stocare va duce la scăderea costului total. Suplimentarea cu energie fotovoltaică

Utilizarea energiei fotovoltaice ca sursă regenerabilă suplimentară

66 provenită de la sistemul de celule solare [11] ce acoperă suprafețele nevitrate ale autoturismului, în
67 timpul zilei, va extinde distanța ce poate fi parcursă cu o singură încărcare cu aproximativ 72 de km.

68 Lightyear One are atașate 1000 de celule fotovoltaice pe o suprafață de 5 m². Celulele au fost
69 proiectate să reziste vibrațiilor, condițiilor de vreme severă, prafului, zăpezii, chiar dacă sunt foarte
70 subțiri și flexibile. Cum unghiul de înclinare și gradul de însorire nu pot fi optime pe toată durata
71 croazierei, se consideră o pierdere de aproximativ 30% din maximum capacității de absorbție a energiei
72 solare. Parcarea este indicat să se facă în locuri neacoperite, expuse direct razelor solare pentru o optimă
73 încărcare pe timpul staționării [12].

74 Cei 5 m² de celule fotovoltaice produc 215 W/m² fiecare oră, adică aproximativ 6 kWh de energie
75 pe parcursul întregii zile considerându-se 5,5 ore de radiație solară pe zi (Figura 1.4). Cea mai mare
76 parte din nordul Europei și Canada nu pot oferi energia solară calculată anterior, dar țările din America
77 de Sud, Asia și Africa, ce nu dețin o infrastructură de alimentare plug-in, îndeplinesc condițiile perfecte
78 pentru panourile solare.

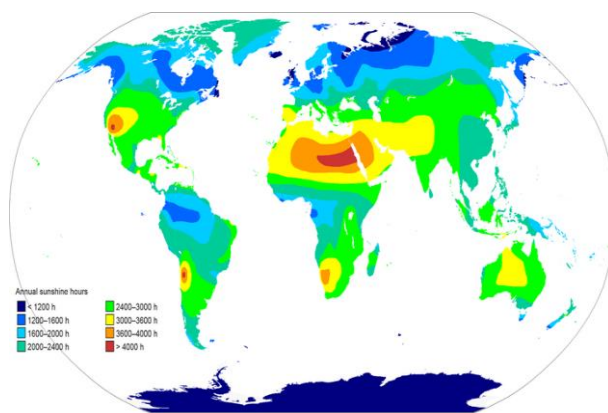


Figura 1.4. Orele cu soare pe glob pe parcursul anului

79 Panourile solare adaugă 12 km la autonomie cu fiecare oră în care mașina este expusă la soare.
80 Automobilul accelerează de la 0 la 100 km/h în mai puțin de 10 secunde.

81 În vara anului 2019, Sharp Corporation împreună cu Toyota a produs un modul de celule fotovoltaice
82 cu o eficiență de 34% pentru prototipul Prius **PHV**. Energia produsă era, inițial, de 180 W/h ce oferea o
83 autonomie de 6,1 km la finalul unei zile de încărcare solară. Ulterior s-a ajuns la 860 W/h și o autonomie
84 de 44,5 km. Aranjamentul celulelor fotovoltaice pe capota față a lui Prius **PHV** este ilustrată în Figura
85 1.9.

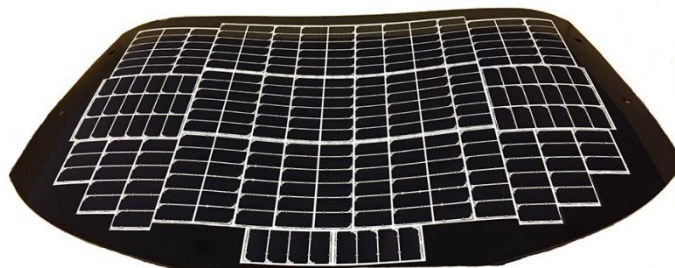


Figura 1.9. Capota față a modelului Toyota Prius PHV

86 Automobilul Hyundai Sonata hibrid a fost lansat în 2021, având plafonul acoperit cu panouri solare,
87 Figura 1.10. Acestea pot încărca bateriile până la 60% pe parcursul a 6 ore de recepție a radiației solare.
88 Extrapolarea eficienței pe 1 an de zile face ca distanța posibil parcursă de Sonata cu propulsie provenită
89 doar din energia solară să fie de 1300 km [18].



Figura 1.10. Hyundai Sonata

90 Constructorul suedez Scania a dezvoltat un camion acoperit cu panouri fotovoltaice pe lateralele și
91 pe suprafața superioară a compartimentului marfă, în total 140 m². Raportată la condițiile meteorologice
92 din Suedia, în speță radiația solară pe parcursul unui an calendaristic, această suprafață de celule solare
93 este capabilă să genereze o energie de 14.000 kWh, economia de combustibil fosil reducându-se cu 5-
94 10%. Comparativ cu Suedia, Spania are cu 80% mai multe ore însorite în cele 12 luni ale anului. Intenția
95 inovativă a constructorului este de a putea alimenta rețeaua publică de curent electric atunci când
96 autotrenul are bateriile încărcate complet (maximum SoC) și se află parcat, așa cum se întâmplă
97 îndeosebi în weekend [20].

98 1.3. ANALIZA SOLUȚIILOR DE ORGANIZARE A SURSELOR DE ENERGIE

99 Modalitatea de conectare între motorul termic și motorul electric ce echează un ansamblu hibrid
100 de propulsie clasifică autovehiculele hibride ca având două configurații :

- 101 – Configurația hibridă serie, la care motorul electric este direct conectat la puntea motoare, iar
102 motorul termic funcționează ca un generator electric ce alimentează direct motorul electric.
103 Reprezintă o soluție constructivă rară în industria auto.
- 104 – Configurația hibridă paralelă, unde atât motorul termic cât și cel electric sunt conectate printr-o
105 transmisie comună la puntea motoare asupra căreia pot acționa separat sau împreună.

106 Autovehiculele de mare tonaj au intrat și ele în era propulsiei hibride după ce au fost stabilite norme
107 mai aspre referitoare la nivelul emisiilor de CO₂.

108 O configurație hibridă paralelă optimizată, care să îndeplinească toate cerințele viitoare de nivel
109 scăzut al emisiilor poluante pentru un vehicul rutier de mare tonaj, este alcătuită din următoarele
110 componente :

- 111 – **motor termic diesel (ICE)** conform standardelor de emisii Euro VI;
- 112 – **motor electric (EM/ME)** asemănător autovehiculelor de clasă mai mică, dar care poate
113 dezvolta o putere suficient de mare pentru a propulsa autovehiculul de mare tonaj fără ajutorul
114 motorului termic atunci când acesta se află deja în rulare. Puterea motorului electric nu va fi
115 întotdeauna suficientă pentru deplasarea din poziția de repaus (depinde de gradul de încărcare
116 cu marfă/pasageri, condițiile de rulare, gradul de înclinare al căii de rulare);
- 117 – **grup de baterii** modulare litiu-ion de tensiune înaltă;
- 118 – **convertor AC/DC** între motorul electric și bateriile de tensiune ridicată atunci când motorul
119 funcționează ca generator de curent (propulsia este dată doar de motorul termic);
- 120 – **invertor DC/AC** între bateriile de tensiune înaltă și motorul electric când acesta din urmă
121 contribuie la propulsia autovehiculului (singur sau împreună cu motorul termic);

Utilizarea energiei fotovoltaice ca sursă regenerabilă suplimentară

- 122 – **compresor de aer**, echipament ce alimentează frânele autovehiculului de mare tonaj. Pentru
- 123 funcționarea compresorului în toate modurile de propulsie ale autovehiculului, nefiind angrenat
- 124 direct la motorul termic, acesta va fi acționat electric, alimentarea fiind asigurată continuu de
- 125 către baterii;
- 126 – **pompă de direcție** electro-hidraulică, sursa de alimentare fiind tot bateriile;
- 127 – **panouri fotovoltaice** ca sursă alternativă suplimentară de energie regenerabilă, panourile solare
- 128 producând putere de curent continuu. Un inverter dedicat DC/DC este necesar pentru transferul
- 129 energiei în bateriile dedicate de înmagazinare;
- 130 – **baterii de joasă tensiune (B-LV)** (12V, 24V, 48V, 60V), baterii ce primesc energia solară din
- 131 celulele solare. Aceste baterii alimentează magistrala de joasă tensiune, alternatorul și pompa
- 132 de direcție putând fi deservite cu tensiune de 24 V;
- 133 – **controler MPPT** (“Urmărirea punctului de putere maximă” cu care ar putea panourile solare să
- 134 alimenteze grupul de baterii de joasă tensiune). Acesta este un convertor DC/DC electronic
- 135 “smart”, un încărcător/regulator ce controlează și reglează energia ce se transmite dinspre
- 136 sistemul fotovoltaic spre acumulatori, contribuind astfel la o eficiență a conversiei de 97-98%;
- 137 – **transformator** de curent continuu ce face legătura între magistrala de tensiune joasă și cea de
- 138 tensiune înaltă;
- 139 – **echipamentul pentru managementul termic** al grupului de **baterii** de tensiune înaltă (**B-HV**);
- 140 – **compresorul de aer condiționat** care, opțional, poate fi angrenat direct la motorul termic sau
- 141 cu alimentare electrică, în funcție de calculul optimizării funcționării celor două motoare,
- 142 menținerea lor în zona de consum minim de combustibil/energie;
- 143 – **computerul de bord ce gestionează distribuția** energiei pentru menținerea motorului termic
- 144 și a celui electric în zona eficienței maxime de funcționare.

145 Componentele enumerate anterior sunt reprezentate schematic în Figura 1.11.

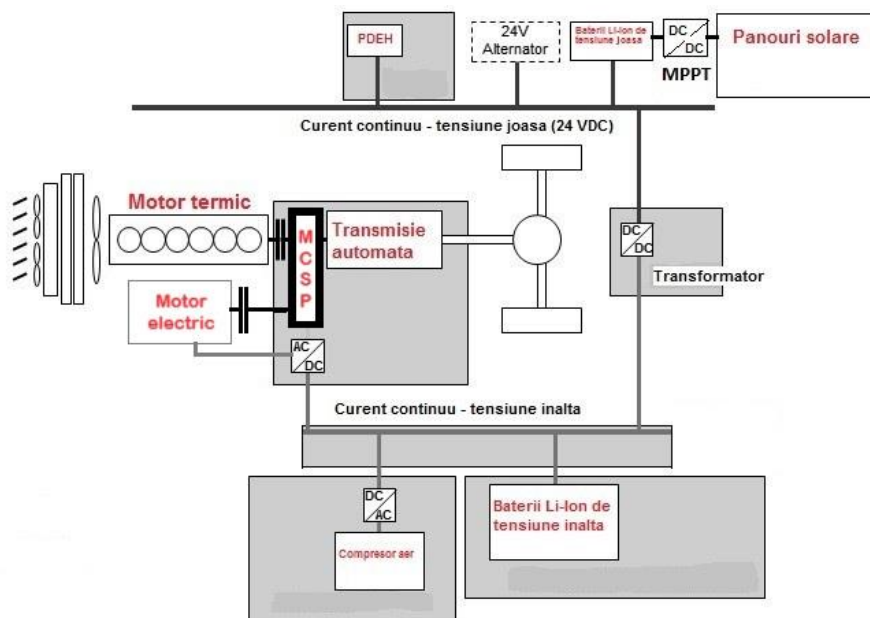


Figura 1.11. Schemă bloc autovehicul de tonaj greu cu propulsie hibridă și panouri fotovoltaice

146 În Figura 1.11 sunt ilustrate componentele arhitecturii hibride ale unui cap-tractor DAF CF Hybrid
 147 prezentat la IAA Commercial Vehicles în septembrie 2018 [21], [22]. Motorul diesel PACCAR de 10,8
 148 litri de 450 CP conlucrează cu un motor electric de 100 CP. Grupul de baterii are o capacitate de 85 de

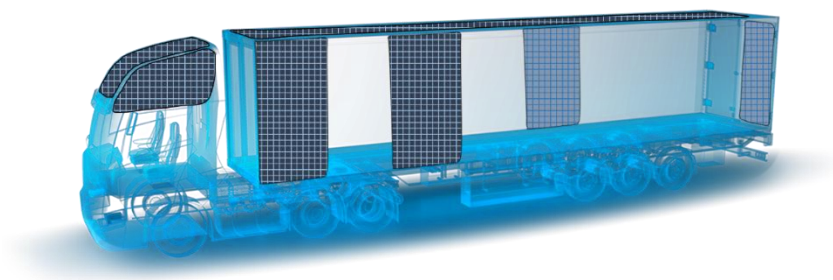
149 kW ce oferă o autonomie maximă de 50 de km parcurși în modul electric. Frânarea regenerativă, fie prin
150 frânare mecanică sau frână de motor, încarcă pachetul de baterii în timpul deplasării autotrenului.

151 1.4. INSTALAREA PANOURILOR SOLARE PE AUTOVEHICULE DE TONAJ RIDICAT

152 Concomitent cu dezvoltarea industriei de autoturisme hibride, remarcăm și o evoluție a celorlalte
153 segmente de transport rutier : autotrenuri, autobuze, camioane, autoutilitare (Figura 1.13).



Figura 1.13. Tipuri de autovehicule cu panouri fotovoltaice integrate



154

155

Figura 1.16. Autocamion de mare tonaj (cap-tractor și semiremorcă)

156

157

158

159

160

Aceste autovehicule pot fi echipate cu sistem hibrid compus din motor cu ardere internă ce conlucrează cu un motor/generator electric alimentat dintr-o magazie de baterii de mare capacitate. Încărcarea bateriilor se face din frânarea regenerativă (frână de motor și frânarea fizică) și din sistemul de panouri fotovoltaice. Fluxul energetic necesar este controlat de un sistem electronic de management energetic.

161

1.5. REGIMURI DE FUNCȚIONARE

162

163

Autovehiculele comerciale, prin suprafața lor exterioară, captează o mare cantitate de energie solară în timpul rulării pe autostradă, pe drumuri urbane sau în timpul staționării în parcuri neacoperite.

164

Studiul nostru va lua în calcul toate regimurile de funcționare, anume:

165

166

167

168

- Pornire de pe loc.** Se face cu motorul electric, se va apăsa ușor și progresiv pedala de accelerație, Figura 1.19;
- Deplasare în regim normal de mers urban** (mișcare uniformă la viteză redusă). Motorul termic și cel electric funcționează alternativ, majoritar motorul electric, iar cel termic la

- 169 accelerări sau când nivelul încărcării din baterii scade la minimul setat (SOC_{min}), Figura
170 1.18;
- 171 c) **Accelerare puternică sau deplasare în rampă** (mișcare accelerată). Motorul termic
172 pornește instantaneu pentru a acoperi necesarul de putere cerut prin apăsarea bruscă a pedalei
173 de accelerație. Motorul termic este suplinit de motorul electric, Figura 1.18;
- 174 d) **Deplasare în pantă**. Are loc încărcarea bateriilor prin frânarea regenerativă, coborârea
175 pantei se face prin apăsarea ușoară a pedalei de frână, ambele motoare sunt oprite, Figura
176 1.19;
- 177 e) **Deplasare cu viteză superioară, pe autostradă**. Motorul termic funcționează singur atâta
178 timp cât pedala de accelerație este menținută apăsată, Figura 1.17;
- 179 f) **Decelerare** (viteza scade). Se face similar mersului în pantă, bateriile se încarcă din sursă
180 regenerativă. Acest regim poate fi realizat prin rulare liberă, când regimul decelerat este
181 datorat încetării acțiunii forței de tracțiune și prin frânare, când regimul decelerat este datorat
182 acțiunii forței de frânare dezvoltate la roțile automobilului, Figura 1.20;
- 183 g) **Staționare**. Ambele motoare sunt oprite. În cazul staționării prelungite și în condițiile
184 prezenței unor consumatori la bord (încălzire scaune, aer condiționat, radio, ștergătoare
185 parbriz, lumini în habitacul, faruri aprinse, etc), motorul termic va porni și va încărca
186 bateriile, după care se va opri. Panourile solare vor continua să încarce bateriile, Figura 1.21.

187 1.6. PANOURI SOLARE

188 Cea mai importantă componentă a sistemului fotovoltaic este panoul solar. La baza acestuia stă celula
189 fotovoltaică ce transformă energia luminoasă în energie electrică, mai multe celule înseriate formând un
190 modul, iar mai multe module formează un panou solar. Materialul semiconductor din care este făcută
191 celula fotovoltaică este siliciul, un material a cărui conductivitate crește în condiții de luminozitate
192 ridicată.

193 Celulele fotovoltaice pot fi:

- 194 – **celule monocristaline**: acestea au cea mai mare eficiență la conversia luminii în energie
195 electrică și se comportă foarte bine în condiții de luminozitate scăzută;
- 196 – **celule policristaline**: Eficiența acestora este inferioară celor monocristaline;
- 197 – **celule cu peliculă subțire** (thin-film solar cells): Tehnologia de fabricație inovatoare oferă
198 acetui tip de celule fotovoltaice o flexibilitate mărită, o greutate și un cost de producție scăzute,
199 dar și o eficiență a conversiei energiei solare mai redusă comparativ cu celelalte 2 tipuri sus-
200 amintite.

201 Se întâlnesc 3 tipuri de **celulele cu peliculă subțire**:

- 202 1. celule cu **CdTe**, ce are în componență telura de cadmiu, material cu o proprietate de absorbție
203 foarte mare;
- 204 2. celule cu **CIS** ($CuInSe_2$), ce are în componență cupru, indiu și seleniu, materiale caracterizate
205 printr-o absorbție și o stabilitate excelente sub acțiunea iluminării;
- 206 3. celule cu **CIGS**, similare celor CIS, având însă ca particularitate alierea indiumului cu galiul pentru
207 îmbunătățirea performanțelor fotovoltaice.

208

209 1.7. BATERII

210 Eficiența medie a unui motor cu ardere internă evaluată la doar 25% reprezintă un factor ce exprimă
 211 cât de mult combustibil se risipește prin radiația termică și frecarea dintre componentele motorului.
 212 Autovehiculele electrice au o eficiență de aproape 80%, dar suferă la capitolul distanței posibil parcurse
 213 cu un plin de baterii, mai ales în zonele extraurbane unde infrastructura de alimentare cu energie este
 214 încă precară. De aceea, o combinație între autovehiculul convențional și cel electric reușește să
 215 convingă. Implementarea și a unor surse alternative de energie regenerabilă, ca frânarea mecanică sau
 216 de motor și energia solară, crește complexitatea sistemului de propulsie dar reduce și mai mult consumul
 217 de combustibil fosil. Extra energia primită de către sistemul de propulsie trebuie înmagazinată [31].
 218 Există mai multe tipuri de acumulare a energiei: stocare chimică (baterii litiu-ion, baterii cu plumb,
 219 baterii hibride de nichel-metal, baterii de nichel-cadmium, baterii de nichel-zinc), stocare electrică
 220 (capacitor și supercapacitor), stocare mecanică (volantă). Sursele de energie regenerativă sunt : celulele
 221 fotovoltaice, celulele de combustie, energia eoliană, energia din frânare.

222 Bateriile de **litium-ion** sunt cele mai indicate pentru a echipa autovehiculele hibride datorită duratei
 223 lungi de viață, ratei reduse de auto-descărcare, densității ridicate și eficienței. Catodul (electrodul
 224 pozitiv) este un oxid de metal acoperit cu straturi de litium-mangan (LiMn_2O_4) sau fosfat de litium-fier
 225 (LiFeO_4), iar anodul (electrodul negativ) este făcut din grafit/carbon. Bateriile de litium-ion oferă
 226 performanța optimă în plaja de temperaturi 20°C ... 50°C, și funcționează și în plaja lărgită -10°C ...
 227 50°C.

228 1.8. CONTROLER MPPT (“URMĂRIREA PUNCTULUI DE PUTERE MAXIMĂ”)

229 Numărul panourilor fotovoltaice din sistemul integrat în caroseria autovehiculului de tonaj greu face
 230 ca gruparea acestora (cablarea în serie și/sau în paralel) să fie făcută astfel încât valoarea tensiunii de
 231 ieșire și valoarea curentului de scurt-circuit să poată fi compatibile, prin intercalarea unui **MPPT**
 232 controler și regulator de flux energetic, cu grupul de baterii de joasă tensiune (**B-LV**). Acest **MPPT**
 233 (urmărirea punctului de putere maximă) previne supraîncărcarea bateriilor, menține durata de viață a
 234 bateriilor conform specificațiilor producătorului, protejează instalația solară și eficientizează asimilarea
 235 de energie produsă de panourile fotovoltaice. Regulatorii **MPPT** de încărcare a bateriilor controlează
 236 și reglează automat tensiunea de alimentare a bateriilor, asigurând protecție la subtensiune și
 237 suprasarcină, măbind eficiența de conversie la aproximativ 98%. Acest tip de controler de încărcare nu
 238 condiționează ca tensiunea de ieșire din sistemul panourilor solare să fie identică cu tensiunea grupului
 239 de baterii, așa cum face controlerul **PWC** (pulse width modulation). Așa cum îi este și denumirea,
 240 controlerul **MPPT** urmărește punctul maxim de alimentare al panourilor fotovoltaice și reglează ulterior
 241 tensiunea de intrare a sistemului pentru a oferi bateriilor voltajul corect conform cu caracteristicile
 242 constructive ale bateriilor. În acest fel se realizează o alimentare optimă, rolul **MPPT**-ului începând
 243 cu verificarea tensiunii de ieșire a panourilor solare și compararea acesteia cu voltajul bateriilor de joasă
 244 tensiune. Apoi stabilește care este punctul de putere maximă cu care panourile pot alimenta grupul de
 245 baterii, reușind să le ofere acestora cel puțin 20% mai multă putere în timpul iernii și minim 10% extra
 246 în timpul verii.

247 1.9. MANAGEMENTUL ENERGETIC

248 Managementul energetic pentru interacțiunea optimă dintre toate componentele sistemului
 249 autovehiculului solar hibrid (**HSV** – hybrid solar vehicle) reprezintă o provocare pentru industria

250 modernă de autovehicule comerciale. Acest sistem de management al energiei stocate în baterii
251 monitorizează și controlează continuu performanța (tensiunea, curentul și temperatura) și nivelul de
252 încărcare al bateriilor pentru a evita supraîncărcarea și descărcarea excesivă, jucând un rol important în
253 funcționarea sigură și eficientă a acestora, cât și prelungirea duratei de viață. În același timp, identifică
254 în timp real, corectează și face o evaluare a erorilor ce pot surveni pentru a evita din timp eventuale
255 disfuncționalități [33].

256 Prezența panourilor solare în diagrama energetică crește gradul de complexitate și de dificultate la
257 care trebuie să funcționeze modulul de control energetic, diferit față de cel cu care este echipat un
258 autovehicul hibrid electric fără motor termic. Panourile fotovoltaice produc energie electrică și în
259 perioada când autovehiculul este parcat, managementul încărcării bateriilor rămânând activ până se
260 atinge nivelul maxim de încărcare (SOC_{max}) al bateriilor de **B-LV** și de **B-HV**. Valorile nivelurilor
261 minim și maxim de încărcare ale bateriilor sunt stabilite astfel încât să asigure primirea fluxului energetic
262 continuu de la sistemul fotovoltaic în timpul deplasării autovehiculului, dar mai ales în timpul parcării
263 acestuia. Scopul primordial este funcționarea motorului termic doar în plaja sa de eficiență maximă,
264 când consumul de combustibil este optim și cantitatea de noxe evacuate este minimă.

265 1.10. RADIAȚIA SOLARĂ

266 Valorile instantanee ale radiației solare captată de suprafețele orizontală și verticale pot fi măsurate
267 prin instalarea a câte unui piranometru pe fiecare suprafață a autovehiculului acoperită cu panouri solare.
268 Piranometrul este un instrument ce măsoară densitatea fluxului radiație solare globale [W/m^2],
269 funcționează pe principiul unei termopile ce măsoară diferența de temperatură între o suprafață clară și
270 una întunecată (neagră), plaja este de 0-2000 [W/m^2] și are un câmp vizual de 180° (emisfera de deasupra
271 termopilei). Piranometrul transformă intensitatea radiației solare în semnal electric de 4..20 mA sau
272 0..20 mV. În funcție de model, piranometrul poate necesita tensiune de alimentare pentru a funcționa
273 (9...24 VDC). Energia luminoasă este absorbită de suprafața neagră a pilei termoelectrice, dând naștere
274 unei diferențe de temperatură între centrul suprafeței și corpul piranometrului. Datorită efectului
275 Seebeck, diferența de temperatură este convertită într-o diferență de potențial și interpretată ca semnal
276 electric.

277 Componentele radiației solare se află în următoarea relație:

$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos \theta \quad (1.11)$$

278 unde:

- 279 – GHI este radiația orizontală globală;
- 280 – DHI este radiația orizontală difuză;
- 281 – DNI este radiația normală directă;
- 282 – θ este unghiul solar de zenit (unghiul de 0 grade este pe verticala punctului unde se măsoară
283 radiația solară, iar unghiul de 90 de grade este făcut de radiația orizontală).

284 1.11. CONFIGURAREA TRASEULUI

285 Pentru estimarea aportului de energie regenerabilă provenită de la sistemul fotovoltaic către sistemul
286 energetic al autovehiculului cu propulsie hibridă și extinderea distanței parcurse, implicit scăderea
287 consumului de combustibil fosil, introducem date referitoare la traseu (distanță, elevație, durata
288 deplasării, radiația solară pe parcursul deplasării conform orelor când are loc deplasarea), anotimpul,

289 luna, ziua deplasării, suprafața acoperită de panourile fotovoltaice, unghiul la care sunt instalate
 290 panourile, sarcina necesară deplasării (incluzând toți consumatorii ce echipează autovehiculul), puterea
 291 dezvoltată de motorul termic în regim de funcționare economică, plaja de funcționare a bateriilor de **B-**
 292 **LV** și **B-HV** (nivelurile minim și maxim de încărcare, *SoC*), puterea dezvoltată de motorul electric în
 293 regim de funcționare ideală [39].

294 În cazul autovehiculelor hibride solare (**HSV**), suprafața exterioară acoperită cu panouri fotovoltaice
 295 flexibile ce se modelează după geometria caroseriei generează cu atât mai multă energie către bateriile
 296 de stocare cu cât traseul ales pentru deplasare are mai puține obstacole ce ar întrerupe radiația directă
 297 solară pe suprafața autovehiculului [40].

298 Alegerea corectă a rutei de deplasare, din punct de vedere al evitării obstacolelor de umbrire, duce la
 299 o economie a consumului de combustibil prin asimilarea unei energii regenerative solare ridicate.
 300 Informarea asupra traficului face parte din planificarea traseului ideal, alegere ce influențează numărul
 301 de porniri-opriri și, implicit, numărul de accelerări și frânări [41], [42].

302 Transportul rutier în marile așezări urbane dominate de clădiri înalte trebuie analizat cu atenție din
 303 punct de vedere al traseului pe parcursul căruia gradul de umbrire să fie limitat la minim [43]. Astfel
 304 putem defini 3 tipuri de artere rutiere :

- 305 – străzi înguste, cu regim de viteză scăzut, cu o singură bandă pe sens sau chiar de sens unic.
 306 Înălțimea clădirilor dispuse de o parte și de alta a străzilor depășește distanța dintre autovehicule
 307 și clădire;
- 308 – străzi largi cu regim de viteză de 50 km/h, chiar cu câte două benzi pe sens. Distanța dintre
 309 autovehiculele din trafic și clădirile laterale este mai mare decât înălțimea clădirilor.
- 310 – străzi largi cu regim de viteză de 80 km/h, marile bulevarde sau șosele de ocolire. Clădirile sunt
 311 la distanță considerabilă față de carosabil, neinfluențând negativ radiația solară interceptată de
 312 sistemul fotovoltaic instalat în caroseria autovehiculelor **HSV**.

313 Figurile 1.35 și 1.36 prezintă un exemplu al variației radiației solare [W/m^2] și a temperaturii [$^{\circ}C$] pe
 314 parcursul unei zile în orașul Constanța, grafice realizate pe pagina de internet a PVGIS
 315 (www.pvgis.com).

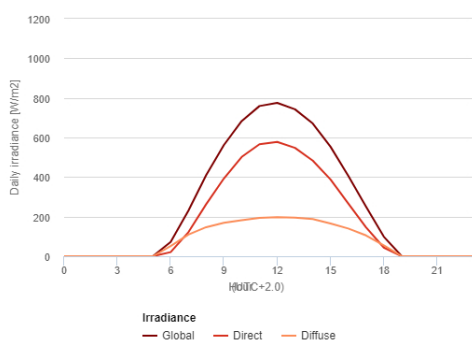


Figura 1.35. Radiația solară a lunii August în Constanța

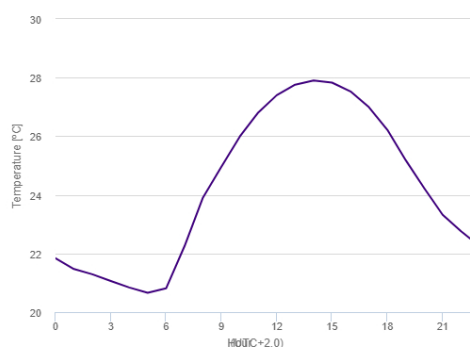


Figura 1.36. Temperatura lunii August în Constanța

316 S-a demonstrat experimental, din punct de vedere al valorii radiației solare captată de suprafața
 317 fotovoltaică integrată în caroseria autovehiculelor, că orientarea clădirilor de la marginea traseelor
 318 rutiere afectează această valoare astfel: clădirile orientate pe direcție nord-sud au un impact mai redus
 319 asupra gradului de umbrire decât cele orientate est-vest. Această informație este indicat a fi luată în
 320 considerație când se planifică traseul unui **HSV**. În timpul deplasării autovehiculului crește și viteza de

321 tranziție între condițiile de însorire/luminozitate puternică și umbrire bruscă. Acest fenomen are impact
322 mărit în zilele însorite și mai redus în zilele înnorate. Trecherile bruște de la însorire puternică la umbrire
323 accentuată influențează în mod negativ eficiența sistemului fotovoltaic prin crearea de dificultăți în
324 ajustarea rapidă a capacității de conversie a energiei produse. Acest fenomen este mai pronunțat în lunile
325 de vară, când valoarea maximă a radiației solare este ridicată, astfel diferența între zona însorită și cea
326 umbră este, de asemenea, ridicată. Nu este cazul în perioada celorlalte anotimpuri, iarna fiind chiar
327 neglijabilă diferența aceasta.

328 1.12. FRÂNAREA REGENERATIVĂ

329 Conceptul de frânare regenerativă este foarte bine apreciat de către toți constructorii de autovehicule
330 concepute să utilizeze surse de energie regenerabilă pentru propulsia hibridă. Energia cinetică era risipită
331 la autovehiculele cu propulsie exclusiv termică prin frecarea mecanică din frânele roților de rulare, prin
332 frânarea datorată pierderilor aerodinamice și prin contactul cu calea de rulare [44], [45], [46], [47].

333 Managementul energetic [48] trebuie să ia în calcul și maximizarea energiei regenerative obținută
334 din frânare până la limita de activare a ABS-ului (sistem ce evită alunecarea roților de pe puntea față
335 prin blocarea roților la frânare excesivă).

336 Vehiculele hibride sunt capabile să absoarbă energie din mișcarea decelerată chiar dacă pedala de
337 frână nu este acționată de către conducător.

338 1.13. OBIECTIVUL ȘTIINȚIFIC AL STUDIULUI

339 Obiectivul acestei lucrări îl constituie configurarea unui sistem de energie alternativă care să
340 suplinească și să completeze sursa tradițională de putere, în speță motorul cu ardere internă, ce echipează
341 un vehicul rutier de tonaj ridicat. Configurarea implică și crearea unui algoritm de calcul al consumului
342 specific de combustibil pentru o distanță standardizată a unui ciclu de testare.

343 Cu ajutorul programului de simulare, certificare și omologare VECTO, prezentat pe larg în cadrul
344 capitoului 3, se va configura un autotren cu masa totală admisă de 40 tone cu propulsie paralel-hibridă
345 al cărui consum va fi calculat pentru un ciclu de testare Long Haul de 100 km.

346 Vor fi analizate toate condițiile de încărcare și calculate toate valorile consumului de combustibil
347 corespunzătoare fiecărei situații în parte. Acest calcul și toate graficele de puteri sunt realizate cu ajutorul
348 programului Matlab.

349 Totodată se vor analiza posibilitățile de optimizare a parametrilor constructivi ai sistemului
350 fotovoltaic ce va fi instalat pe suprafețele semiremorcii cât și analiza soluției inovatoare de implementare
351 a unei punți electrificate a semiremorcii cu rol de producere a energiei regenerative adițională sistemului
352 de energie solară.

353 Economia de combustibil calculată pe distanța ciclului Long Haul de testare va fi analizată și
354 interpretată în capitolele tezei.

355 Studiul acestei teze vine în contextul tendinței universale de reducere a poluării pentru limitarea
356 impactului nociv asupra mediului. Schimbările climatice determină industria globală de transport rutier
357 să promoveze și să dezvolte autovehicule propulsate cu ajutorul surselor de energie regenerabilă astfel
358 încât emisia de noxe să fie la un nivel cât se poate de redus.

359 Obținerea unei soluții constructive fiabile ar reprezenta un pas înainte în ceea ce privește diminuarea
360 dependenței transportului rutier de arderea exclusivă a combustibilului fosil. Utilizarea surselor de

361 energie regenerabilă și dezvoltarea tehnologiei de stocare a acesteia la bordul autovehiculelor rutiere,
362 indiferent de tonaj, reprezintă un factor esențial pentru viitorul acestei industrii. Cum autovehiculele
363 convenționale de tonaj greu existente nu satisfac tendințele în reducerea emisiilor de noxe (hidrocarburi,
364 monoxid și dioxid de carbon, oxizi de azot), reducerea nivelului de zgomot în tranzitarea zonelor urbane
365 sau adaptarea la criza energetică, cercetarea acestei lucrări are ca obiectiv încurajarea și confirmarea
366 soluțiilor constructive ce includ una sau mai multe surse de energie regenerabilă în propulsia
367 autovehiculelor rutiere de mare tonaj.

368 1.14. CONCLUZII

369 În cadrul acestui capitol au fost identificate și analizate cerințele actuale legate de realizarea
370 autovehiculelor care utilizează în procesul de autopropulsare energia electrică. Au fost identificate
371 soluțiile bazate pe autovehicule hibride, electrice care utilizează preponderent energie electrică provenită
372 din sistemul de furnizare a energiei electrice. Au fost cercetate și construcțiile de autovehicule care
373 folosesc resurse regenerabile – energia fotovoltaică.

374 De asemenea sunt indicate direcțiile generale și obiectivele specifice care fac obiectul acestei lucrări.
375

2. EVALUAREA ANALITICĂ ȘI NUMERICĂ A CONSUMULUI DE COMBUSTIBIL

2.1. INTRODUCERE

În acest capitol se face o scurtă prezentare a forțelor ce iau naștere din momentul începerii deplasării unui autovehicul autopropulsat pe o distanță longitudinală standardizată a unui ciclu de testare omologat și până în momentul opririi la final de ciclu. Se face și o trecere în revistă a tuturor ciclurilor de testare existente la nivel global și parametrii acestora.

O comparație a consumului de combustibil calculat pe distanța aceluiași ciclu de testare ne arată diferențele ce apar între un model analitic și un model de simulator. Astfel, se va face o descriere a simulării simpliste, backward-facing, folosită pe modelul analitic și a celei mai complexe, forward-facing, folosită pe modelul de simulator.

2.1.1. Condițiile de rulare ale roților. Roata liberă. Roata motoare. Roata frânată.

În funcție de modul de organizare a tracțiunii și regimul de deplasare al automobilului, roata poate fi:

- liberă: roata de sprijin a automobilului care se rostogolește pe cale sub acțiunea unei forțe de tragere dezvoltată de automobil;
- motoare: roata care primește fluxul de putere pentru autopropulsare și care se rostogolește pe cale sub acțiunea momentului la roata de propulsie;
- frânată: roata care se rostogolește pe cale sub acțiunea unui moment de frânare dezvoltat de mecanismul de frânare al roților.

Pentru studiul condițiilor de rulare a roților se folosește metoda izolării corpurilor. Corespunzător acestei metode, roata este desfăcută din legăturile ei cu automobilul prin intermediul fuzetei și cu calea prin intermediul petei de contact, iar aceste legături fizice se înlocuiesc cu reacțiunile corespunzătoare. Astfel modele dinamice de calcul ale roților sunt echivalente modelului fizic real al automobilului [49].

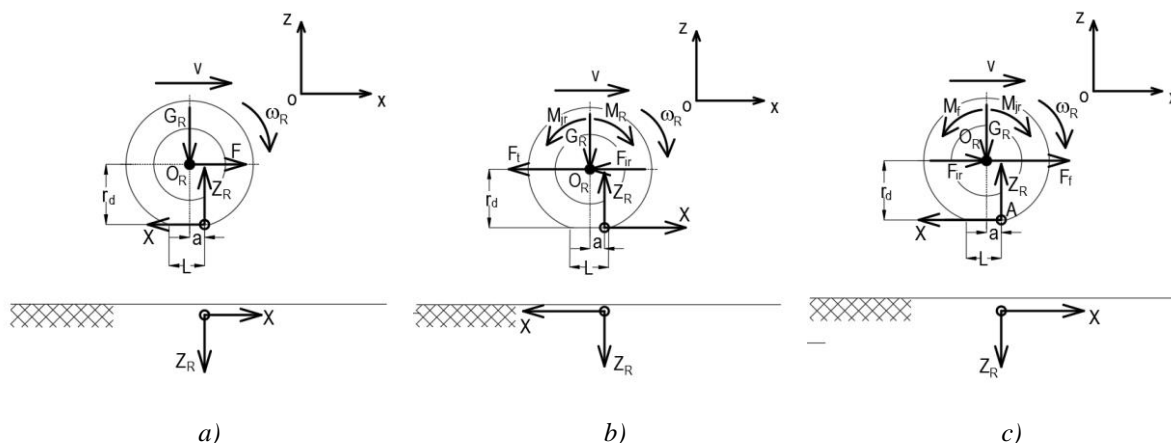


Figura 2.1. Modele dinamice pentru studiul roților: a) roata liberă; b) roata motoare; c) roata frânată.

2.1.2. Momentul la roata de propulsie.

Schema de principiu a autovehiculului cu transmisie mecanică este prezentată în Figura 2.2.

Motorul dezvoltă momentul motor M la viteza unghiulară ω a arborelui cotit furnizând o putere $P = M \cdot \omega$. Prin intermediul *ambreiajului*, care realizează cuplarea sau decuplarea comandată a motorului față de transmisie, puterea se transmite la *cutia de viteze*. În cutia de viteze, mișcarea de rotație a arborelui cotit este demultiplicată sau multiplicată cu un raport de transmitere i_V a cărui valoare poate fi schimbată în trepte sau continuu.

Transmisia longitudinală face legătura între cutia de viteze și *transmisia principală* permițând o oscilație relativă a acestora. Transmisia principală [49], având un raport de transmitere constant i_0 , are rolul de a transmite mișcarea la *roțile motoare*.

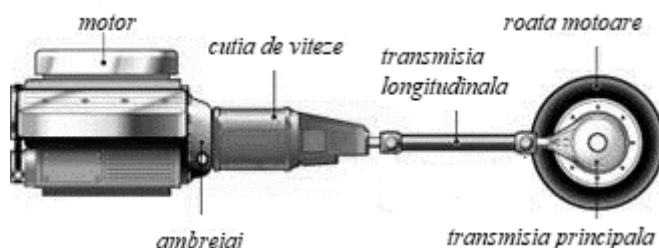


Figura 2.2. Schema de principiu a autovehiculului cu transmisie mecanică.

2.1.3. Definirea condițiilor de autopropulsare.

Definirea condițiilor face referire la precizarea, funcție de tipul, caracteristicile și destinația autovehiculului, a cauzelor fizice pentru forțele de rezistență ce acționează asupra autovehiculului, a factorilor specifici de influență și stabilește relațiile analitice de evaluare cantitativă a acestor forțe [50], [51].

În procesul autopropulsării autovehiculului, asupra acestuia acționează, după direcția vitezei de deplasare, două tipuri de forțe:

- **forțele active** – forțele care au același sens cu cel al vitezei de deplasare;
- **forțele de rezistență** – forțele care sunt de sens opus sensului vitezei de deplasare.

Forțele de rezistență, cunoscute sub denumirea de *rezistențe la înaintare* sunt următoarele:

- *rezistența la rulare* – este o forță ce se opune înaintării autovehiculului și este determinată de fenomenele ce se produc la rulare a roților pe calea de rulare;
- *rezistența aerului* – este o forță ce se opune înaintării autovehiculului și este datorată interacțiunii dintre automobilul în mișcare și aerul considerat în repaus;
- *rezistența pantei* – este o forță datorată înclinării longitudinale a drumului și reprezintă o forță de rezistență la urcarea pantelor, și o forță activă la coborârea pantelor;
- *rezistența la demaraj* – este o forță datorată inerției autovehiculului în mișcare și reprezintă o forță de rezistență în timpul mișcării accelerate și o forță activă în regimul mișcării decelerate.

Mișcarea autovehiculului, consecință a acțiunii asupra lui a forțelor active și de rezistență poate fi:

- *mișcare uniformă* (cu viteză constantă);
- *mișcare accelerată* (viteza crește) – regim numit “regimul demarării”;
- *mișcare decelerată* (viteza scade); aceste regim poate fi realizat prin rulare liberă, când regimul decelerat este datorat încetării acțiunii forței de tracțiune și prin frânare, când regimul decelerat este datorat acțiunii forței de frânare dezvoltate la roțile automobilului.

2.2. DINAMICA AUTOVEHICULULUI ÎN MIȘCARE LONGITUDINALĂ

Procesul de simulare a vehiculului începe cu definirea dinamicii de bază. Ciclul de rulare definește un scenariu de conducere care consideră vehiculul în mișcare longitudinală. Astfel, dinamica vehiculului este simplificată substanțial. Următoarea formulă reprezintă ecuația mișcării în direcția longitudinală:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + \frac{G_a}{g} \cdot \delta \cdot a \quad (2.12)$$

Termenii ecuației (2.12) [81] sunt:

- forța longitudinală la roată (F_R);
- rezistența la rulare (R_r);
- rezistența aerodinamică (R_a);
- rezistența la pantă (R_p);
- accelerația (a);
- accelerația gravitațională (g);
- greutatea vehiculului (G_a);
- coeficientul (δ) ce influențează masele în mișcare de rotație asupra efectului de translație al forței de inerție.

2.3. SIMULAREA **BACKWARD-FACING** A DINAMICII LONGITUDINALE A AUTOVEHICULULUI

În simularea **backward-facing** [83], [84], setul de date care definește ciclul specific de rulare este utilizat pentru a calcula, printr-un set de ecuații empirice, forța longitudinală la roată ($F_{R,X}$). Modelul de calcul este simplificat, deoarece nu este nevoie de un model de conducător auto sau de o buclă reactivă pentru a controla parametrii trenului de rulare (Figura 2.3).

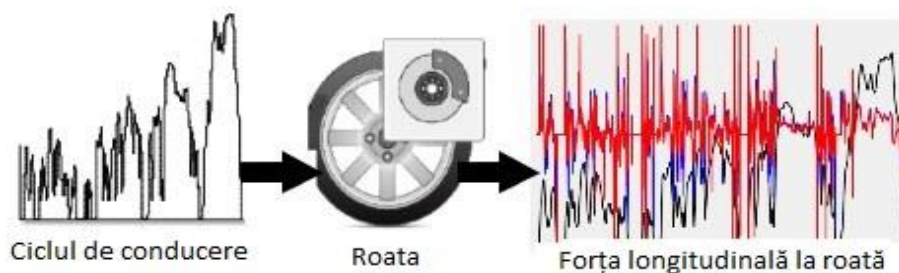


Figura 2.3. Strategia simulării inverse (backward-facing)

2.4. SIMULAREA **FORWARD-FACING** A DINAMICII AUTOVEHICULULUI

Simularea **forward-facing** [83] este mai complexă și conține o schemă logică necesară controlului sistemului de propulsie și al transmisiei vehiculului pentru a asigura forța longitudinală la roată superioară ca valoare numerică forțelor de rezistență ale ciclului de rulare definite anterior. Pentru analiza curentă, a fost utilizat un model MATLAB/Simulink. Acest model este predefinit ca o aplicație de referință pentru vehicule convenționale, Conventional Vehicle Reference Application. Figura 2.9 prezintă configurația generală a autovehiculului ales ca model pentru simulare.

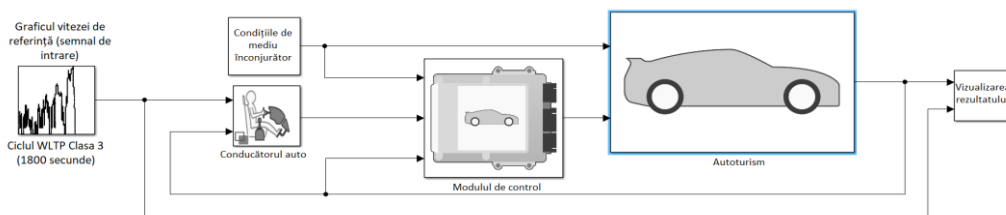


Figura 2.9. Configurația generală a schemei de simulare în MATLAB/Simulink

Modelul supus simulării este complex și permite modificarea multor parametri constructivi. Utilizând programul Variant Manager, s-a selectat modelul SimpleEngine cu toate sub-sistemele sale pentru a oferi similitudine cu cel supus setului de ecuații analitice. Figura 2.10 prezintă sub-sistemele modelului simulat.

Name	Submodel Configuration	Variant Control	Condition
SiCIPtReferenceApplication			
Controllers			
Drive Cycle Source			
Longitudinal Driver			
Passenger Car			
Drivetrain (Submodel: DrivetrainConVeh)			
DCT			
Differential and Compliance			
All Wheel Drive		2	(N/A)
Front Wheel Drive		0	(N/A)
Rear Wheel Drive		1	(N/A)
Vehicle			
Vehicle Body 3 DOF Longitudinal			
Wheels and Brakes			
Engine			
CIEngine (Submodel: CIEngine)		CIEngine	(N/A)
CIMappedEngine (Submodel: CIMapped...)		CIMappedEngine	(N/A)
SiDLEngine (Submodel: SiDLEngine)		SiDLEngine	(N/A)
SiEngine (Submodel: SiEngine)		SiEngine	(N/A)
SiMappedEngine (Submodel: SiMapped...)		SiMappedEngine	(N/A)
SimpleEngine (Submodel: SimpleEngine)		SimpleEngine	(N/A)

Figura 2.10. Configurația unui Autovehicul convențional din programul Variant Manager

Figura 2.11 ne prezintă o configurație generală a unui vehicul folosit în simularea **forward-facing**. Simbolul → roșu indică fluxul de putere, iar → verde indică aportul componentelor electrice la transmisia vehiculului:

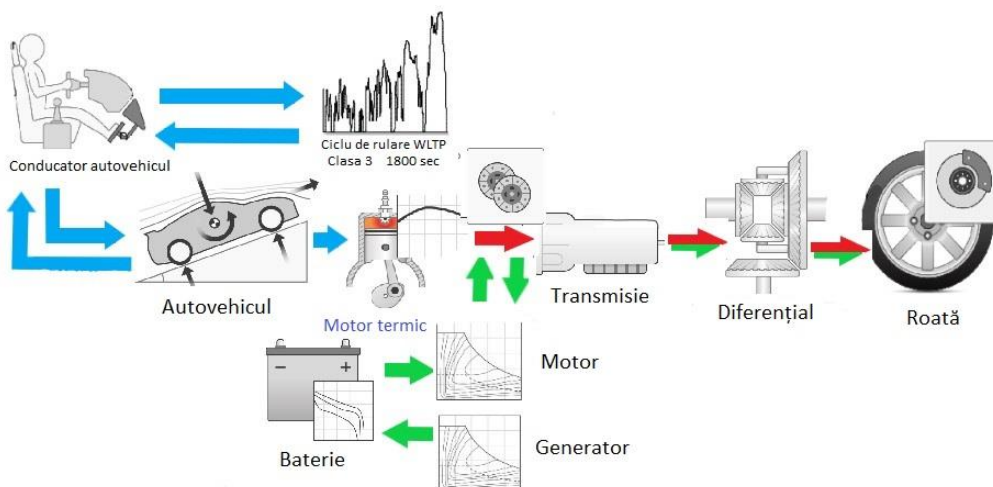


Figura 2.11. Schema de simulare **forward-facing**. Conducătorul auto virtual urmează ciclul impus prin controlul pedalei de accelerație, pedalei de frână și prin alegerea treptei de viteză ca și parametri de intrare.

Răspunsul vehiculului este permanent monitorizat și adaptat cerințelor ciclului de testare. Ambele configurații (vehicul conventional – săgeți de culoare roșie și vehicul hibrid – săgeți de culoare verde) sunt prezentate.

Parametrii folosiți pentru modelul de simulator (**forward-facing**) și pentru modelul analitic (**backward-facing**) [83] sunt prezentați în Tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Parametrii modelelor teoretic și simulat.

Parametru	Simbol și Unitate	Valoare
Modelul teoretic		
Masa vehiculului	m [kg]	1200
Coeficientul de alunecare	c_x [-]	0.2
Suprafața frontală	A_f [m ²]	2.0
Randamentul motorului termic	η_{MAI} [-]	0.24
Randamentul transmisiei	η_T [-]	0.92
Randamentul conversiei de energie	η_{ME} [-]	0.65
Densitatea combustibilului (E10)	ρ_{E10} [kg/m ³]	754
Valoarea calorică a combustibilului (GCV)	GCV_{E10} [MJ/kg]	46.4
Modelul MATLAB		
Consumul specific de combustibil	$BSFC$ [g/kWh]	275
Capacitatea bateriei	[Ah]	5.2
Nivelul de încărcare al bateriei	[-]	80%
Cuplul maxim în regim de generator	[Nm]	100

2.5. ANALIZA CONSUMULUI DE COMBUSTIBIL

Cel mai important parametru referitor la performanța autovehiculului este consumul de combustibil. Acest parametru poate fi direct corelat cu cantitatea de emisii poluante, iar aceste aspecte ar trebui abordate în special având în vedere soluțiile tehnice utilizate pentru tratarea gazelor de eșapament.

O abordare corectă a evaluării consumului de combustibil al unui autovehicul este de a converti lucrul mecanic necesar propulsiei autovehiculului în căldură.

Consumul de combustibil de referință $Q_{l/100km}$ este calculat pentru ciclul ales ca:

$$Q_{l/100km} = Q_i \cdot \frac{100 \text{ [km]}}{d_{cycle} \text{ [km]}} \quad (2.28)$$

Figura 2.13 prezintă, pe același grafic, diagramele consumului de combustibil obținute folosind metoda analitică (graficul de culoare roșie) și cea de simulator (graficul de culoare albastră).

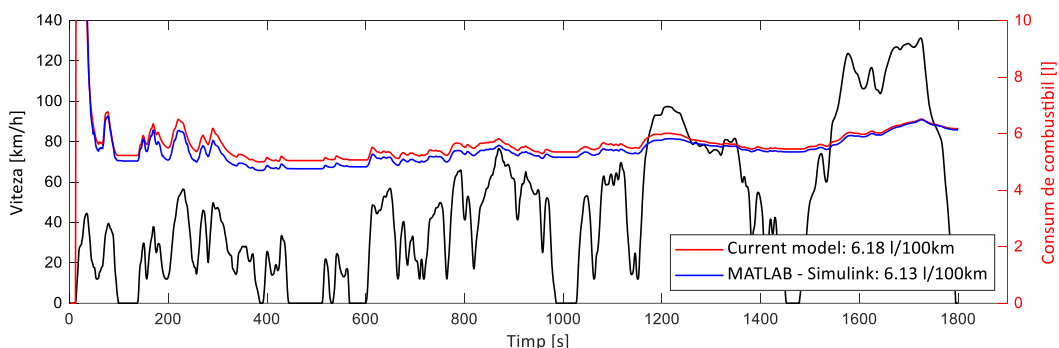


Figura 2.13. Analiza consumului de combustibil pentru un model de autovehicul conventional (sus: vedere detaliată a secvenței de viteză redusă; jos: ciclul complet de testare)

Figura 2.14 prezintă evoluția grafică a consumului de combustibil folosind metoda analitică și cea de simulator pentru un vehicul hibrid.

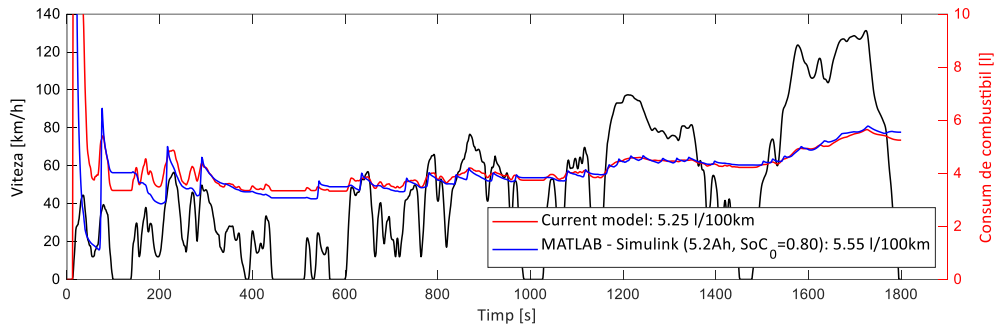


Figura 2.14. Analiza consumului de combustibil pentru un model de autovehicul hibrid (sus: vedere detaliată a secvenței de viteză redusă; jos: ciclul complet de testare)

2.6. DISCUȚII

Există avantaje pentru fiecare dintre cele două metode de interpretare prezentate în această lucrare. Simularea “backward-facing” poate fi implementată în mod convenabil în diferite limbaje de programare și aplicații de calcul.

Simularea “forward-facing” este complexă și poate să ofere multiple informații legate de performanța sistemelor integrate în modelul vehiculului. Este nevoie de un efort suplimentar pentru a le dezvolta și valida înainte de a utiliza rezultatele. Figura 2.15 prezintă sub-sistemul Drivetrain (trenul de rulare) al modelului simulat, cu o serie de parametri rezultați.

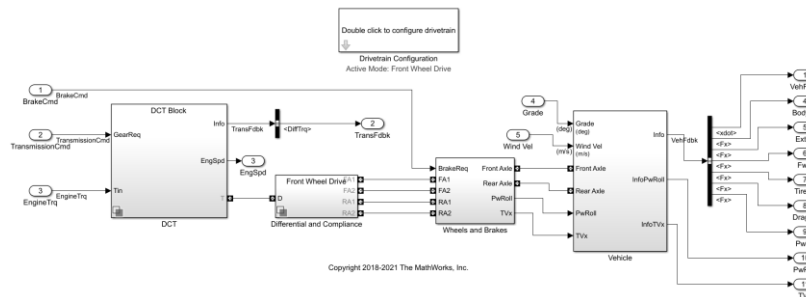


Figura 2.15. Sub-sistemul trenului de rulare. Valori suplimentare ale parametrilor au fost selectate pentru afișare din Info Bus pentru vehiculul simulat.

Parametrii suplimentari afișați în simulare sunt prezentați în Figura 2.16.

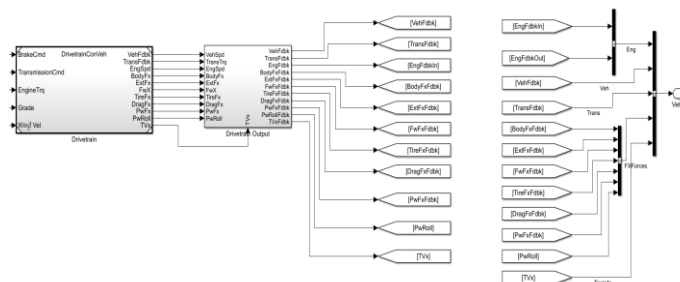


Figura 2.16. Schema parametrilor opționali rezultați în urma simulării.

2.7. ANALIZA EXTINSĂ

Statele Unite ale Americii aplică 5 cicluri diferite de testare pentru a determina consumul de combustibil și emisiile de noxe declarate în fișa tehnică a autovehiculului. În Europa, ciclul WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicle Cycle) a înlocuit, începând din septembrie 2017, NEDC (New European Driving Cycle) aflat în vigoare din anul 1992. Astfel, toate autovehiculele vândute din luna septembrie 2018 se supun acestui nou standard armonizat de testare.

NEDC este folosit în continuare de către China. Japonia folosește propria procedură de testare, JC08, caracteristică traficului congestionat din orașe, cu accelerări și decelerări repetate.

Ciclul ARTEMIS este folosit pentru o ilustrare mai exactă a condițiilor de trafic, acest ciclu nefiind omologat în certificarea autovehiculelor.

2.8. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol sunt analizate metodele ce pot fi aplicate pentru calculul consumului de combustibil. Forța longitudinală la roată necesară pentru deplasarea vehiculului de-a lungul unui anumit ciclu de rulare este evaluată în secvențe de timp în funcție de setul de date de intrare. Lucrul mecanic este calculat și transformat în consum de combustibil folosind anumiți parametri predefiniți. În același timp, analiza forței longitudinale la roată poate oferi informații despre potențialele economii de combustibil. Metoda este directă și utilizează parametri de eficiență extrași din modelele de simulare.

Pentru a elabora metoda prezentată mai sus, au fost utilizate și analizate modele în MATLAB/Simulink. S-a constatat că rezultatele sunt în bună corelație, dovedind potențialul metodei propuse ca un prim pas în dezvoltare.

În plus, au fost investigate componentele separate ale rezistențelor de drum. Pe de o parte, s-a demonstrat procesul de extragere a datelor din modelele complexe de simulare, iar pe de altă parte, au fost evaluate diferențele dintre metodele de simulare **backward-facing** și **forward-facing**. Diferențele găsite sunt minore.

Se pot face ușor comparații între autovehicule în ceea ce privește performanța aerodinamică. S-au depus eforturi pentru a demonstra eficiența acestui model de simulare în comparație cu alte modele complexe de simulare. Acest lucru demonstrează aplicabilitatea unei metode simple de calcul capabilă să prelucreze inserări suplimentare de parametri pentru a simula motoare cu ardere internă, motoare electrice sau o combinație a celor două motoare. Modelul de simulare poate fi utilizat cu ușurință pentru identificarea anumitor limite (de exemplu, masa) care afectează performanța combustibilului.

3. VECTO – MODELARE ȘI SIMULARE

3.1. INTRODUCERE

Pe parcursul acestui capitol se prezintă pașii configurării autovehiculului de tonaj greu în cadrul programului de omologare VECTO [80]. Se introduc datele de intrare începând cu tonajul și tipul de vehicul, dimensiunea anvelopelor, aria frontală și continuând cu sistemele auxiliare, incluzând, în final, componentele ce transformă vehiculul convențional în vehicul hibrid. Toate dimensiunile autotrenului, cap-tractor și semiremorcă, sunt stabilite conform regulamentelor europene în vigoare.

Rularea programului VECTO va genera niște parametri de funcționare care, introduși în Matlab, vor crea grafice ce reprezintă variația puterii la roată necesară învingerii tuturor forțelor de rezistență ce apar de-a lungul ciclului de testare LongHaul. La finalul capitolului vom ilustra graphic consumul de combustibil instantaneu și cel cumulativ după parcurgerea ciclului selectat.

3.2. PREZENTAREA VECTO

Uniunea Europeană a dezvoltat un program de simulare ce determină emisiile de CO₂ și consumul de combustibil al vehiculelor cu un GVW (masa maximă admisă incluzând toate componentele, încărcătura și șoferul) mai mare de 3,5 tone, categorie în care se încadrează și autotrenurile ce fac subiectul acestui studiu. Începând cu data de 1 ianuarie 2019, acest program, VECTO (Vehicle Energy Consumption calculation Tool), a devenit obligatoriu pentru toate vehiculele noi. De la această dată, pentru certificare și omologare, producătorii de vehicule de tonaj ridicat trebuie să determine și să declare emisiile de CO₂ și consumul de combustibil pentru toate vehiculele nou produse, determinări ce se pot face utilizând ultima variantă VECTO disponibilă. Aceste teste trebuie efectuate înaintea înregistrării, vânzării sau ieșirii în trafic a vehiculului.

Programul VECTO a fost dezvoltat de Comisia Europeană pentru vehiculele de tonaj mare, program ce poate fi accesat, descărcat și rulat de către producătorii de astfel de vehicule. Software-ul folosește, ca date de intrare, parametrii ce definesc caracteristicile componentelor și sistemelor care influențează semnificativ emisiile de CO₂ și consumul de combustibil: motorul termic, cutia de viteze, componentele suplimentare ale transmisiei, osiile, pneurile, elemente ce țin de aerodinamică și alte echipamente auxiliare.

3.3. CONCLUZII

VECTO prelucrează datele de intrare și calculează consumul de combustibil, implicit cantitatea de noxe emise, printr-un algoritm propriu complex având ca rezultat omologarea și certificarea autovehiculului configurat. S-a ilustrat variația puterii la roată dezvoltată de motorul termic ales astfel încât forțele rezistive din timpul deplasării pe cei 100 km ai ciclului LongHaul să fie învinse cu respectarea cerințelor de viteză impuse de program.

Prin introducerea motorului electric în configurarea hibrid-paralel a autotrenului, consumul de combustibil a scăzut cu 1,14 litri/100km.

Până la implementarea sursei suplimentare regenerativă reprezentată de sistemul de panouri fotovoltaice, această diferență de consum este integrată în valoarea consumului cumulat la final de ciclu de testare pentru vehiculul hibrid-paralel configurat.

În capitolele ce urmează, se va lua în calcul și integrarea sistemului de panouri fotovoltaice dar și a punții electrificate P4 a semiremorcii. Avem astfel două noi surse de energie regenerabilă ce vor avea un aport în ceea ce privește economia de combustibil a autovehiculului deservit.

4. MODELAREA PERFORMANTELOR CONSUMULUI DE COMBUSTIBIL ÎN CAZUL AUTOTRENURILOR RUTIERE

4.1. INTRODUCERE

În cadrul acestui capitol vor fi analizate o serie de modele de calcul dezvoltate pentru evaluarea analitică a consumului de combustibil. Modelele de calcul au la bază *ecuația generală de mișcare a autovehiculului* care va fi analizată în funcție de o serie de ipoteze formulate pentru modul de furnizare a *forței la roată* determinată conform necesarului de *autopropulsare* al autovehiculului.

Rezultatele calculului dinamic sunt comparate cu rezultate obținute în urma simulării procesului de deplasare a autovehiculului cu ajutorul programului VECTO.

4.2. EVALUAREA PERFORMANTELOR DE CONSUM DE COMBUSTIBIL - VECTO

Pentru stabilirea unor mărimi de referință pentru consumului de combustibil a fost realizat un scenariu de simulare în programul VECTO, program prezentat în capitolul 3. Pentru obținerea unor date relevante a fost selectat modul de analiză Declaration Mode, specific procesului de validare al unui autotren rutier cu masa totală de 40 tone.

În Figura 4.1. este prezentat meniul general pentru configurarea autovehiculului de test.

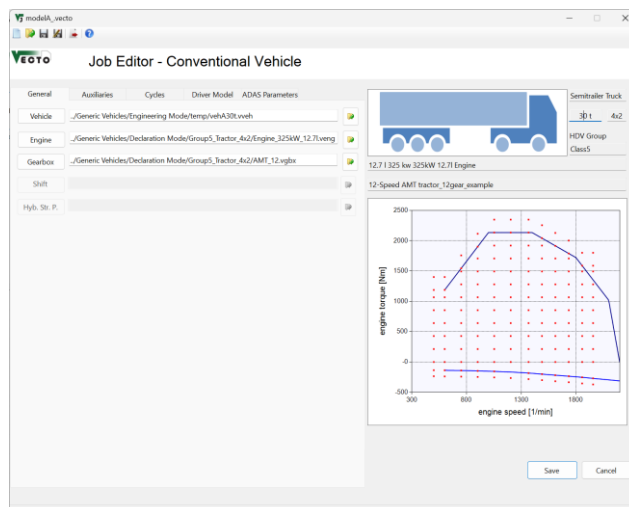


Figura 4.1. VECTO - Meniul general pentru configurare

4.3. EVALUAREA ANALITICA A PERFORMANTELOR DE CONSUM DE COMBUSTIBIL

În cadrul acestei secțiuni se vor evidenția o serie de modele pentru calculul consumului de combustibil prin adaptarea corespunzătoare a *ecuației generale de mișcare* și prin precizarea unor condiții specifice regimului de funcționare al motorului.

4.3.1. Deplasarea în condiții ideale

În cazul acestui scenariu de lucru se consideră faptul că parcursul autovehiculului este realizat ca o sumă de stări staționare, astfel că nu se evaluează modul în care autovehiculul ajunge să se deplaseze cu o anumită viteză sau pe un drum cu o anumită înclinare longitudinală.

De asemenea, puterea motorului nu este limitată. În funcție de necesarul de autopropulsare, este oferită puterea necesară pentru efectuarea procesului.

În acest caz, ecuația generală de mișcare scrisă sub forma [51], [95]:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + R_d \quad (4.4)$$

devine:

$$F_R = R_r + R_a + R_p \quad (4.5)$$

Condițiile de deplasare ale autovehiculului sunt indicate în Figura 4.8

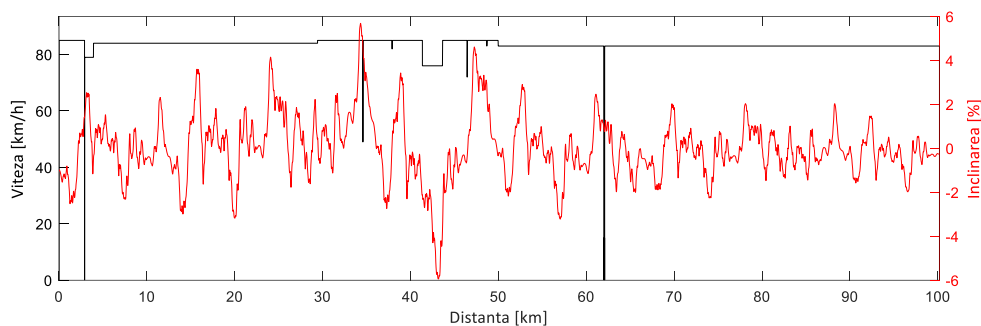


Figura 4.8. Caracteristicile specifice ale drumului

În Figura 4.13 sunt prezentate grafic puterea motorului (P_m) și puterea la roată (P_R) necesară în condițiile relației 4.5.

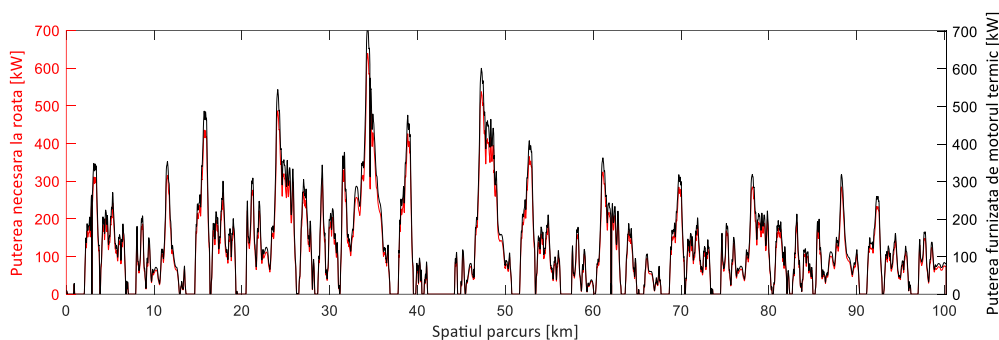


Figura 4.13. Puterea necesară și puterea furnizată de motorul termic

4.3.2. Deplasarea în condiții tehnice

În acest caz puterea motorului este limitată, astfel că sunt necesare acțiuni de adaptare la specificul drumului. De asemenea, se consideră deplasarea autovehiculului ca o sumă de procese staționare [51].

În acest caz ecuația generală de mișcare scrisă sub forma:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + \frac{G_a}{g} \cdot \delta \cdot a \quad (4.11)$$

devine:

$$F_R = R_r + R_a + R_p \quad (4.12)$$

Puterea necesară la roată se scrie sub forma:

$$P_R = P_r + P_a + P_p = F_R \cdot v \quad (4.13)$$

de unde puterea necesară a motorului termic:

$$P_{m,nec} = F_R \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_{tr}} \quad (4.14)$$

4.3.3. Deplasarea în condiții de regim dinamic

În acest caz ecuația generală de mișcare este scrisă sub forma:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + \frac{G_a}{g} \cdot \delta \cdot a \quad (4.23)$$

Accelerația este definită de utilizator in concordanță cu specificul și performanțele autovehiculului analizat (v_f reprezintă viteza finală și v_i reprezintă viteza inițială).

$$a = (v_f^2 - v_i^2) \cdot \frac{1}{2 \cdot s} \quad (4.35)$$

Accelerația (a) se calculează sau se determină cu ajutorul diagramelor accelerației capabile a autovehiculului.

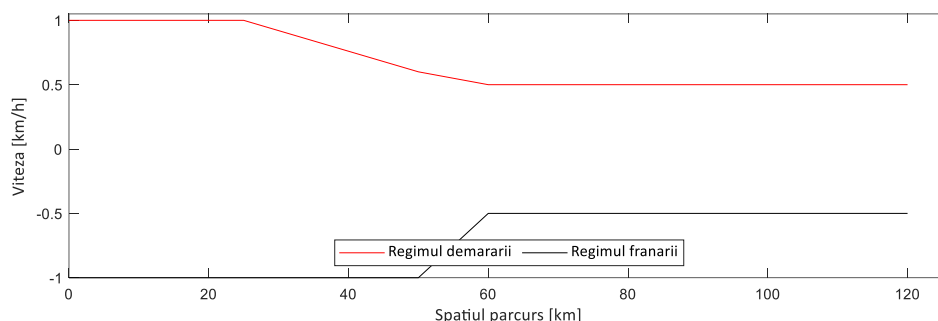


Figura 4.20. Diagramele accelerației capabile

4.3.4. Deplasarea în condiții de regim dinamic si tehnic

În acest caz, ecuația generală de mișcare este scrisă sub forma:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + \frac{G_a}{g} \cdot \delta \cdot a \quad (4.39)$$

Pentru determinarea consumului de combustibil se determină accelerația necesară pentru deplasarea cu viteza precizată în specificația tehnică a ciclului.

$$a_{i,\Delta v} = (v_{t,i}^2 - v_{n,i-1}^2) \cdot \frac{1}{2 \cdot s_{i,i-1}} \quad (4.40)$$

Se determină puterea necesară pentru autopropulsare și se compară cu puterea disponibilă.

$$P_{R,disp} = P_{max} \cdot \eta_{tr} \quad (4.41)$$

4.3.5. Deplasarea în condiții de regim dinamic și tehnic cu istoric

În acest caz ecuația generală de mișcare este scrisă sub forma:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + \frac{G_a}{g} \cdot \delta \cdot a \quad (4.42)$$

Energia potențială a autovehiculului la un moment dat pe durata parcurgerii ciclului indicat este:

$$U = \frac{G_a}{g} \cdot g \cdot h_{rel} \quad (4.43)$$

Unde altitudinea relativă h_{rel} se calculează cu relația:

$$h_{rel} = \sum_{i=1}^j s_{i-1,i} \cdot \frac{p_{i-1,i}}{100} \quad (4.44)$$

4.4. VALIDAREA MODELULUI DE CALCUL

În cadrul acestei secțiuni vor fi analizate două cazuri suplimentare, analizate pentru validarea modelului de calcul în care sunt evidențiate regimul dinamic al autovehiculului și configurația longitudinală a drumului.

4.4.1. Parcurgerea ciclului Regional Delivery

În Figura 4.35 este prezentat graficul de variație a vitezei de deplasare a autovehiculului. Analiza datelor relevă faptul că ciclul este definit ca o succesiune de regimuri de deplasare cu viteze medii (~50 km/h) și viteze ridicate de deplasare (> 80 km/h).

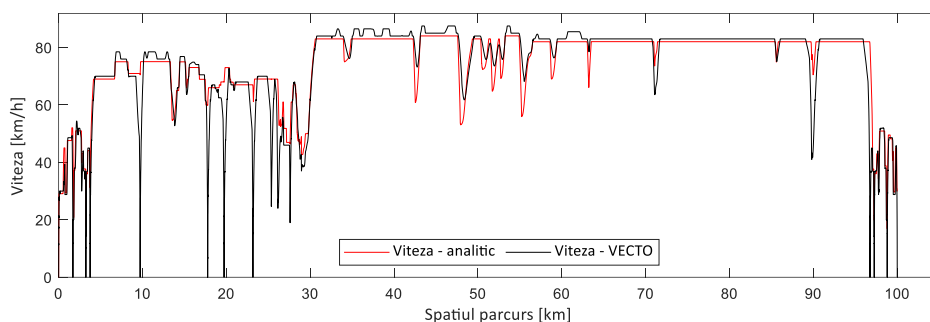


Figura 4.35. Viteza de deplasare

4.4.2. Parcurgerea ciclului Urban Delivery

În Figura 4.41 este prezentat graficul de variație a vitezei de deplasare a autovehiculului. Analiza datelor relevă faptul că ciclul este definit ca o succesiune de regimuri de deplasare cu variații semnificative ale vitezei de deplasare a autovehiculului.

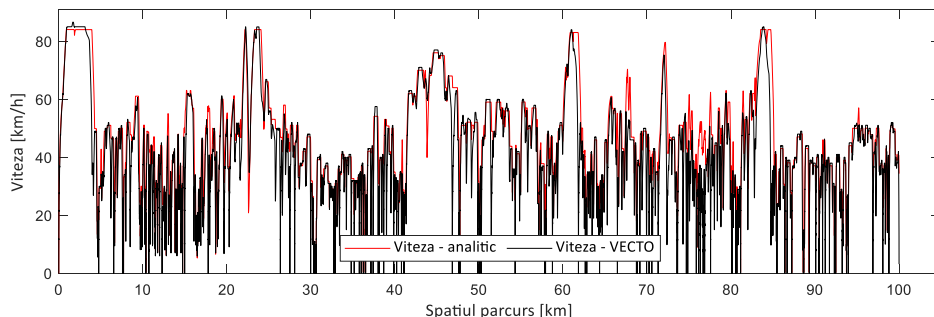


Figura 4.41. Viteza de deplasare

4.5. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol au fost analizate o serie de modele analitice elaborate pentru evaluarea consumului de combustibil al autovehiculului. Rezultatele simulărilor care au fost realizate cu ajutorul acestor seturi de relații sunt comparate cu rezultate obținute prin simulare VECTO.

Se relevă faptul că se poate utiliza ca model primar de simulare cel în care se face adaptarea vitezei prin modularea accelerației autovehiculului (III). În acest caz se înregistrează valori ale puterii necesare care depășesc disponibilul, însă consumul de combustibil este în concordanță cu cel determinat prin simularea VECTO.

Modelul de calcul a fost adaptat pentru a evidenția caracteristica dinamică a deplasării autovehiculului. Modelul de calcul elaborat (V) urmează specificul simulării VECTO.

Pentru validarea acestui model au fost realizate simulări suplimentare. Rezultatele sunt în concordanță cu cele determinate prin simulare VECTO.

Scopul dezvoltării unui model analitic este acela de a construi un model matematic cu arhitectură deschisă care să permită studiul unor autovehicule care utilizează surse multiple de energie.

5. ANALIZA PERFORMANȚELOR DE CONSUM DE COMBUSTIBIL ÎN TRAFIC REAL

5.1. INTRODUCERE

În cadrul acestui capitol sunt analizate o serie de mărimi înregistrate cu ajutorul programelor de monitorizare în timp real.

Valorile au fost înregistrate pentru autotrenuri rutiere care au parcurs drumuri în România.

5.2. PRELUCAREA DATELOR EXPERIMENTALE

Datele de intrare au fost prelucrate sub forma unui fișier Excel și procesate cu ajutorul unui program Matlab. Structura fișierului cu date de intrare relevă parametrii care au fost analizați.

```
structure_ =  
  
12×1 cell array  
  
    {'Timpul_plecarii'      }  
    {'Plecare'            }  
    {'Carburant_la_pornire' }  
    {'Carburant_la_oprire' }  
    {'Durata_calatoriei'   }  
    {'Distanța_parcursa'   }  
    {'Distanța_totala_parcursa'}  
    {'Viteza_medie'        }  
    {'Viteza_maxima'       }  
    {'Timpul_sosirii'      }  
    {'Durata_parcarii'     }  
    {'Sosire'              }
```

Figura 5.1 Mărimile indicate în fișierul Excel.

Din setul cu date de intrare au fost extrase călătoriile a căror lungime a fost mai mare sau egală cu 100 km (parametrul *Distanța_parcursa*).

Din totalul de 362 de înregistrări cuprinse în datele de intrare, au fost selectate un număr de 67 de înregistrări care corespund acestui criteriu.

Parametrul ID (numărul de ordine) este utilizat pentru a corela înregistrările extrase cu setul de date inițial.

Conform raportărilor primite de la administratorul parcului de autovehicule, masa totală a autotrenului rutier în cazul parcurgerii unui drum cu o lungime de cel puțin 100 km a fost de aproximativ 40 tone. Acest criteriu este important pentru verificarea rezultatelor obținute cu cele raportate prin utilizarea programelor de simulare.

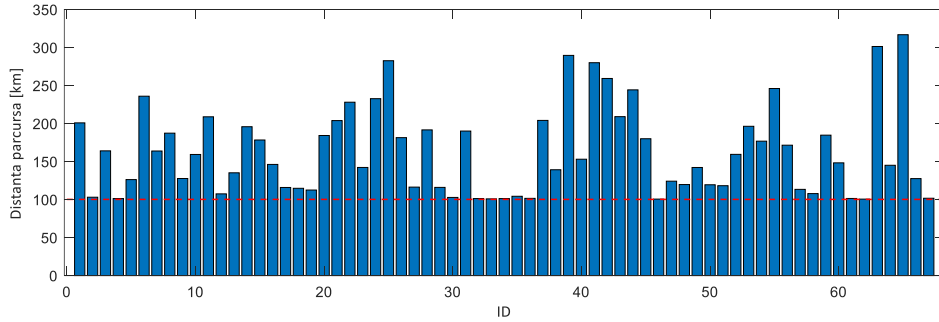


Figura 5.2. Consumul de combustibil

Conform intervalului definit, se aleg valorile reprezentative, reprezentate în Figura 5.7.

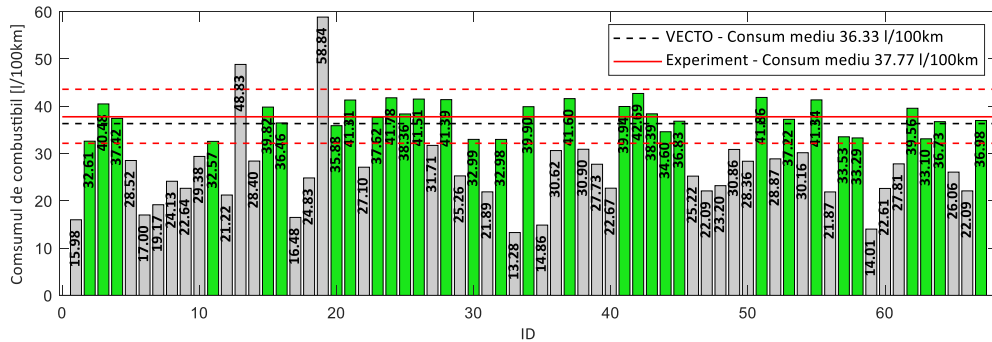


Figura 5.7. Date reprezentative

5.3. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol este prezentată o analiză dezvoltată pe baza unor date reale obținute în trafic, pentru evaluarea consumului de combustibil al autovehiculului. Rezultatele sunt comparate cu rezultate obținute prin simulare VECTO. Față de valoarea consumului de combustibil obținută pentru autotrenul convențional în programul VECTO, reprezentând valoarea cumulată a consumurilor instantanee pe parcursul celor 100 km ai ciclului de testare Long Haul, valoarea rezultată din raportările autotrenurilor ce au parcurs trasee reale în traficul din România arată o diferență de aproximativ trei procente mai mare.

6. STUDIUL POSIBILITĂȚILOR DE ELECTRIFICARE ȘI UTILIZARE A SURSELOR ALTERNATIVE DE ENERGIE ELECTRICĂ

6.1. INTRODUCERE

Acest capitol prezintă condiții de funcționare ale mașinii electrice ce echipează autovehiculul hibrid-paralel, algoritmul de calcul pentru această configurare și compararea cu rezultatele programului VECTO.

Recenta inovație tehnologică, puntea electrificată, și aplicabilitatea ei ca și parte componentă a autotrenurilor actuale este descrisă succint în cea de-a doua parte a acestui capitol.

Introducerea punții electrificate ca sursă suplimentară de energie regenerabilă determină o creștere a capacității bateriilor de stocare a energiei. Se adaugă și sistemul de panouri fotovoltaice și se aleg seturi de parametri diferiți ai status-ului bateriei, urmărindu-se valorile reducerii consumului de combustibil comparativ cu modelul calculat de VECTO.

6.2. MODEL DE CALCUL PENTRU AUTOVEHICULUL HIBRID

6.2.1. Relații generale de calcul pentru modelarea autovehiculului

În acest caz ecuația generală de mișcare este scrisă sub forma (secțiunea 4.2.5):

$$F_R = R_r + R_a + R_p + \frac{G_a}{g} \cdot \delta \cdot a \quad (6.1)$$

Pentru tronsonul de drum $s_{i-1,i}$ se poate scrie ecuația de bilanț de energie al autovehiculului:

$$E_{p,i-1} = L_{R,in} - L_{i-1,i} \quad (6.2)$$

sau

$$E_{p,i-1} = L_{R,in} - (R_{r,i} + R_{a,i} + R_{p,i} + R_{d,i}) \cdot s_{i-1,i} \quad (6.3)$$

O variantă echivalentă este dată de relația:

$$L_{R,in} = \Delta U_{p,i-1,i} + (R_{r,i} + R_{a,i} + R_{d,i}) \cdot s_{i-1,i} \quad (6.4)$$

Se determină puterea necesară la roată:

$$P_{R,in} = L_{R,in} \cdot \frac{v_i}{s_{i-1,i}} \quad (6.5)$$

Autovehiculul este echipat cu un sistem electric format din:

- baterie de stocare a energiei electrice capabilă să înmagazineze energia BW_{nom} ;
- mașină electrică care funcționează în regim de motor sau generator;
- sistem de management electronic.

Cunoscându-se tensiunea nominală de lucru a instalației electrice a mașinii pentru tracțiune V_{nom} , se calculează capacitatea bateriei ($BW_{Ah,nom}$):

$$A_{nom} = \frac{BW_{nom}}{V_{nom}} \quad (6.6)$$

Se poate astfel stabili valoarea maximă a curentului de încărcare a bateriei:

$$I_{inc,0} = 0.5 \cdot A_{nom} \quad (6.7)$$

Starea de încărcare a bateriei este definită prin intermediul a trei parametri utilizați în modelul de simulare:

- SOC_{min} care definește energia minimă disponibilă în baterie;
- SOC_{max} care definește energia maximă disponibilă în baterie;
- SOC_{ref} care definește valoare de referință care trebuie să fie disponibilă în baterie.

6.2.2. Funcționarea autovehiculului cu mașina electrică în regim de motor pentru îndeplinirea necesarului pentru autopropulsare

În cazul în care $P_{R,in} > P_{mot,max}$ și $SOC > SOC_{min}$ se utilizează motorul electric care furnizează o putere suplimentară P_{me} .

$$P_{me} = M_{me,nom} \cdot \frac{v_i}{r_r} \quad (6.8)$$

Se verifică condiția:

$$P_{mot} + P_{me} \geq P_{R,in}$$

În cazul îndeplinirii acestei condiții, se parcurge traseul conform parametrilor indicați. În cazul în care puterea necesară la roată depășește puterea disponibilă, furnizată de echipamentul de tracțiune, se inițiază procesul de adaptare prin inițierea procesului de frânare.

Pentru intervalul de parcurs $s_{i-1,i}$ se calculează timpul necesar:

$$t_{i-1,i} = \frac{s_{i-1,i}}{0.5 \cdot (v_{i-1} + v_i)} \quad (6.9)$$

Se calculează curentul debitat în intervalul de timp:

$$I_{i-1,i} = \frac{P_{eu,m}}{V_{nom}} \quad (6.10)$$

Se determină starea de încărcare a bateriei:

$$SOC_{i-1,i} = \left(A_i - I_{i-1,i} \cdot t_{i-1,i} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{\eta_{me}} \right) / A_{nom} \quad (6.11)$$

Se determină energia disponibilă în baterie:

$$A_{i+1} = A_i - I_{i-1,i} \cdot t_{i-1,i} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{\eta_{me}} \quad (6.10)$$

6.2.3. Funcționarea autovehiculului cu mașina electrică în regim de generator

În cazul în care $P_{R,in} < 0$ și $SOC_i \leq SOC_{max}$ se inițiază procesul de încărcare a bateriei:

$$I_{in} = \min(I_{in,0}, I_{i-1,i}) \quad (6.11)$$

Unde:

$$I_{i-1,i} = \frac{P_{eu,g} \cdot \eta_{me}}{V_{nom}} \quad (6.12)$$

Se determină puterea disponibilă în regimul de regenerare:

$$P_{eu,g} = \min(P_{R,in}, P_{me}) \quad (6.13)$$

Se determină starea de încărcare a bateriei:

$$SOC_{i-1,i} = \left(A_i + I_{i-1,i} \cdot t_{i-1,i} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \eta_{me} \right) / A_{nom} \quad (6.14)$$

6.2.4. Funcționarea autovehiculului cu mașina electrică în regim de motor

În cazul în care $P_{R,in} < P_{max}$ și $SOC_i \leq SOC_{ref}$ se inițiază procesul de cuplare a surselor de putere [96]:

$$P_{mot} = P_{R,in} - M_{me,nom} \cdot \frac{v_i}{r} \quad (6.15)$$

Se calculează curentul debitat în intervalul de timp:

$$I_{i-1,i} = \frac{P_{me}}{V_{nom}} \quad (6.16)$$

Se determină starea de încărcare a bateriei:

$$SOC_{i-1,i} = \left(A_i - I_{i-1,i} \cdot t_{i-1,i} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{\eta_{me}} \right) / A_{nom} \quad (6.17)$$

Se determină energia disponibilă în baterie:

$$A_{i+1} = A_i - I_{i-1,i} \cdot t_{i-1,i} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{\eta_{me}} \quad (6.18)$$

6.2.5. Funcționarea autovehiculului cu echipament fotovoltaic

Autovehiculul poate fi prevăzut cu un sistem de generare a curentului electric care utilizează panouri fotovoltaice. Pentru un număr de panouri fotovoltaice (n_{PFV}), fiecare cu o capacitate de producere a energiei ($P_{PFV,nom}$) se calculează puterea maximă disponibilă:

$$P_{PFV,0} = P_{PFV,nom} \cdot n_{PFV} \quad (6.19)$$

Dacă se analizează condițiile specifice mediului precum gradul de însorire și cantitatea de energie solară disponibilă se determină puterea capabilă a sistemului fotovoltaic:

$$P_{PFV} = P_{nom,PV} \cdot \eta_{PFV} \quad (6.20)$$

unde η_{PFV} definește eficiența procesului de generare a energiei cu ajutorul sistemului fotovoltaic.

Tensiunea nominală de funcționare a sistemului fotovoltaic este definită de:

$$V_{in,PV} = P_{PV,nom} \cdot n_{PFV} \quad (6.21)$$

și se calculează curentul ce poate fi debitat de sistem:

$$I_{PV} = \frac{P_{PV}}{V_{in,PV}} \quad (6.22)$$

Se determină curentul de încărcare:

$$I_{in,PV} = \min(I_{in,0}, I_{PV}) \quad (6.23)$$

Se actualizează starea de încărcare a bateriei:

$$SOC_{i-1,i} = \left(A_i + I_{in,PV} \cdot t_{i-1,i} \cdot \frac{1}{3600} \right) / A_{nom} \quad (6.24)$$

6.3. VALIDAREA MODELULUI DE CALCUL PENTRU AUTOVEHICULUL HIBRID

În cadrul acestei secțiuni se vor analiza rezultatele obținute prin simularea cu programul VECTO și prin utilizarea algoritmului prezentat.

Ca date de intrare se definesc:

- autovehiculele parcurg ciclul *Long-Haul*;
- bateria implementată în sistemul electric este de 4 kWh;
- capacitatea bateriei este de 25 Ah;
- momentul motor disponibil este de 900 Nm;
- tensiunea nominală este de ~640 V;
- starea de încărcare a bateriei la începutul parcurgerii drumului este de 50%;
- starea minimă de încărcare a bateriei este 30%;
- valoarea de referință a stării de încărcare este de 50%.

În Figura 6.2 este prezentat graficul de variație a vitezei de deplasare a autovehiculului determinat cu ajutorul setului de ecuații prezentat în cadrul acestei secțiuni și a vitezei de deplasare determinată cu ajutorul programului VECTO.

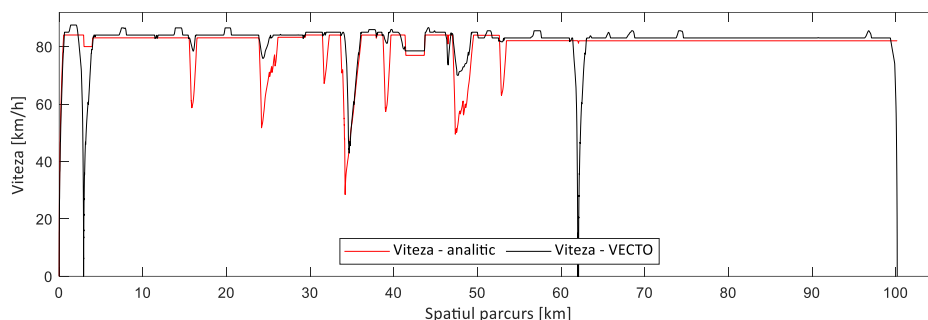


Figura 6.2. Viteza autovehiculului

Datele prezentate în Figura 6.2 arată o bună similitudine, dovedind faptul că starea dinamică a autovehiculului este relevantă în simularea procesului de autopropulsare a autovehiculului (în absența unor informații concrete referitoare la accelerația impusă).

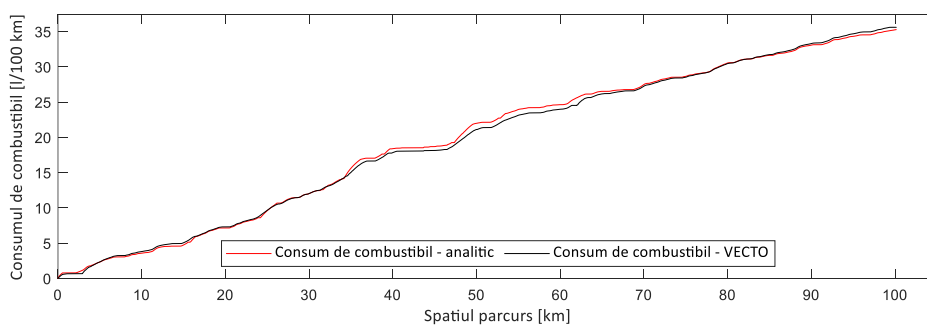


Figura 6.7. Consumul de combustibil

Tabelul 6.1. Valorile consumului de combustibil

Model	Consum [l/100 km]	Diferența [%]
Analitic	35.29	-0.89
VECTO	35.61	

Rezultatele prezentate în Tabelul 6.1. indică o bună corelare a celor două modele de calcul, astfel că pot fi extinse cercetările legate de posibilitatea de implementare a unei semiremorci electrificate.

6.4. SOLUȚII PENTRU REALIZAREA UNEI SEMIREMORCI ELECTRIFICATE.

În cadrul acestei secțiuni se vor analiza rezultatele obținute prin simularea cu programul VECTO și prin utilizarea algoritmului prezentat.

Semiremorcă electrificată reprezintă o semiremorcă a cărei punte centrală (P4, considerând P1 și P2 punțile capului-tractor) să aibă un dublu rol, atât regenerativ cât și motor. Pionieratul utilizării acestui tip de punte electrificată s-a făcut pe autotrenurile frigorifice.

În cele ce urmează, vom face o succintă prezentare a unui autotren transportator de produse refrigerate și congelate a cărui punte P4 este electrificată și deservește unitatea frigorifică atașată semiremorcii dedicate.

Așadar, această inovație tehnologică, puntea electrificată, recuperează energia care s-ar fi risipit în timpul frânării autotrenului sau când vehiculul coboară o pantă. Prin acest aport de energie “verde”, se reduce consumul de combustibil și emisiile de noxe prin reducerea consumului de combustibil al motorului cu combustie internă ce ar antrena agregatul frigorific (compresorul frigorific). Acest motor ar avea un tanc de combustibil special destinat, diferit de rezervorul de combustibil al motorului capului-tractor. Însă scopul principal al acestei punți electrificate este de a anula motorul termic de antrenare a compresorului frigorific și de a alimenta unitatea de răcire doar în modul electric cu energie produsă de această punte. Puntea constă în două generatoare/motoare asincrone ce produc energie electrică la viteze mai mari de 15 km/h.

Producătorul german BPW a creat o punte electrificată (Fig.6.8) destinată semiremorcii autotrenurilor care, în modul propulsor, poate dezvolta o putere de până la 75 kW și un cuplu de până la 3250 Nm pe fiecare dintre cele două roți.



Figura 6.8. Punte centrală cu funcție regenerativă și motoare dezvoltată de BPW

TRAKE este o punte motoare de semiremorcă (Fig. 6.12) similară ca principiu de funcționare cu cele prezentate anterior, ce folosește energia stocată în grupul de baterii pentru a ajuta parțial sau total motorul cu ardere internă al capului-tractor printr-un sistem propriu de management al energiei, îmbunătățind totodată dinamica autotrenului. Având un cap-tractor în configurație 4x2, prin adăugarea acestei punți motoare (puntea din mijloc a semiremorcii), autotrenul este transformat într-un vehicul 4x4, siguranța și stabilitatea în trafic în condiții alunecoase crescând simțitor. Puterea maximă a acestei punți este de 147 kW (200 CP), similară ca putere cu cea BPW.



Figura 6.12. Punte centrală TRAKe cu funcții regenerativă și motoare dezvoltată de SAF Holland

TRAKr folosește un generator de tensiune înaltă de 400 VDC pentru recuperarea energiei prin frânarea vehiculului la cele 2 roți ale punții. Energia este dirijată spre grupul de baterii de înaltă tensiune. Unitatea frigorifică a semiremorcii își ia alimentarea din acest grup de baterii.

Thermo King și BPW au dezvoltat împreună un sistem frigorific cu alimentare pur electrică ce constă dintr-o unitate frigorifică, un pachet de baterii și o punte electrificată, toate la bordul unui autotren pentru transportul produselor refrigerate și congelate. Acest sistem își manageriază și își optimizează singur energia produsă de puntea BPW, stocarea energiei în magazia de baterii și alimentarea unității frigorifice (compresor, ventilatoare, automatizare).

Acest sistem Thermo King – BPW este ilustrat în Fig. 6.15:

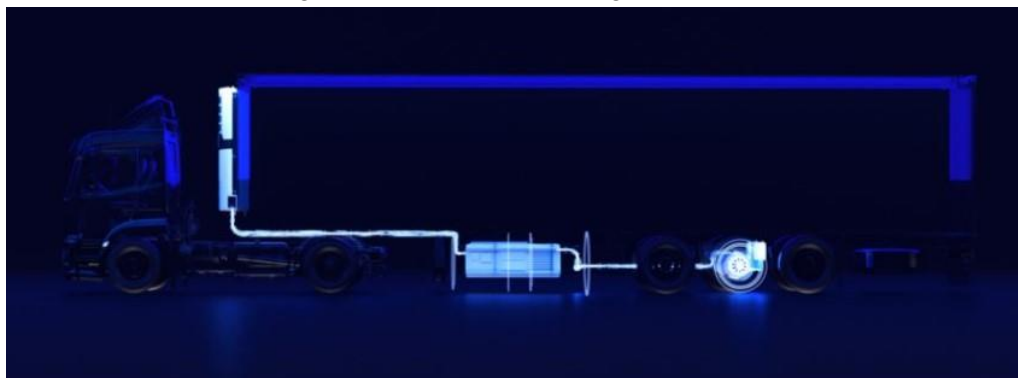


Figura 6.15. Sistemul Advancer AxlePower dezvoltat de Thermo King și BPW

6.4.1. Utilizarea unei baterii cu performanță crescută (capacitate limitată la pornire).

Ca date de intrare se definesc:

- autovehiculele parcurg ciclul *Long Haul*;
- bateria implementată în sistemul electric este de 100 kWh;
- capacitatea bateriei este de 156 Ah;
- momentul motor disponibil este de 900 Nm;
- tensiunea nominală este de ~640 V;
- starea de încărcare a bateriei la începutul parcurgerii drumului este de 50%;
- starea minimă de încărcare a bateriei este 30%;
- valoarea de referință a stării de încărcare este de 50%.

În Figura 6.16 este prezentat graficul de variație a energiei disponibile și bateria care echipază autovehiculul.

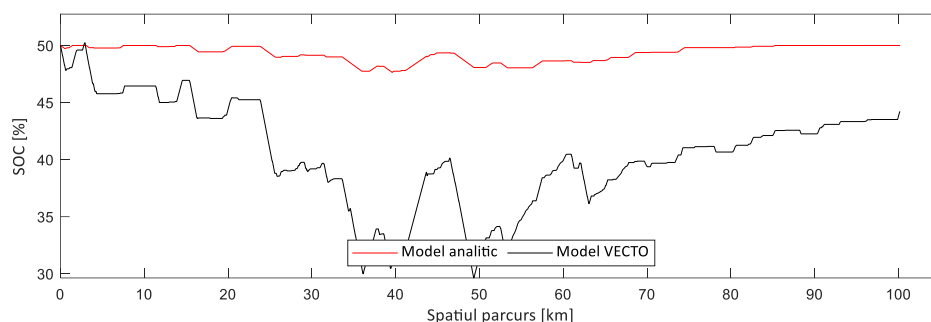


Figura 6.16. Starea de încărcare a bateriei

6.4.2. Utilizarea unei baterii cu performanță crescută (capacitate nominală la pornire).

Ca date de intrare se definesc:

- autovehiculele parcurg ciclul *Long Haul*;
- bateria implementată în sistemul electric este de $100 kWh$;
- capacitatea bateriei este de $156 Ah$;
- momentul motor disponibil este de $900 Nm$;
- tensiunea nominală este de $\sim 640 V$;
- starea de încărcare a bateriei la începutul parcurgerii drumului este de 90%;
- starea minimă de încărcare a bateriei este 20%;
- valoarea de referință a stării de încărcare este de 50%.

În Figura 6.18 este prezentat graficul de variație a energiei disponibile și bateria care echipază autovehiculul.

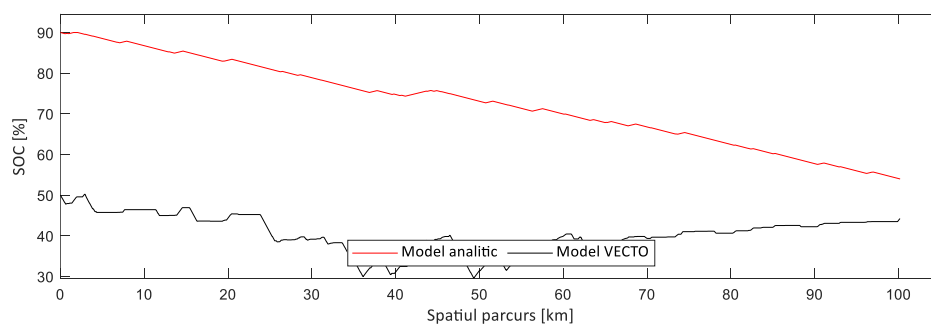


Figura 6.18. Starea de încărcare a bateriei

Se constată faptul că este permisă utilizarea energiei disponibile și pentru a compensa regimul de funcționare a motorului cu ardere internă.

6.4.3. Utilizarea unei mașini electrice exclusiv în regim de generator.

Ca date de intrare se definesc:

- autovehiculele parcurg ciclul *Long Haul*;
- bateria implementată în sistemul electric este de $100 kWh$;
- capacitatea bateriei este de $156 Ah$;

- momentul motor disponibil este de 900 Nm ;
- tensiunea nominală este de $\sim 640 \text{ V}$;
- starea de încărcare a bateriei la începutul parcurgerii drumului este de 20%;
- starea minimă de încărcare a bateriei este 30%;
- valoarea de referință a stării de încărcare este de 90%.

În Figura 6.21 este prezentat graficul de variație a energiei disponibile și bateria care echipază autovehiculul.

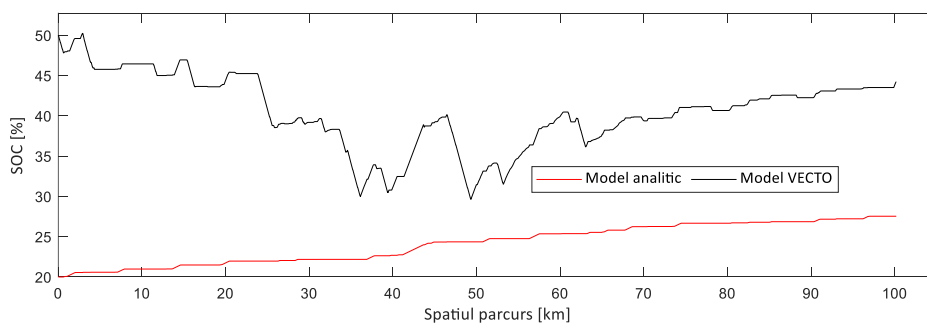


Figura 6.21. Starea de încărcare a bateriei

6.4.4. Utilizarea unei mașini electrice și a sistemului fotovoltaic.

Ca date de intrare se definesc:

- autovehiculele parcurg ciclul *Long Haul*;
- bateria implementată în sistemul electric este de 100 kWh ;
- capacitatea bateriei este de 156 Ah ;
- momentul motor disponibil este de 900 Nm ;
- tensiunea nominală este de $\sim 640 \text{ V}$;
- starea de încărcare a bateriei la începutul parcurgerii drumului este de 20%;
- starea minimă de încărcare a bateriei este 50%;
- valoarea de referință a stării de încărcare este de 50%.

În Figura 6.24 este prezentat graficul de variație a energiei disponibile și bateria care echipază autovehiculul.

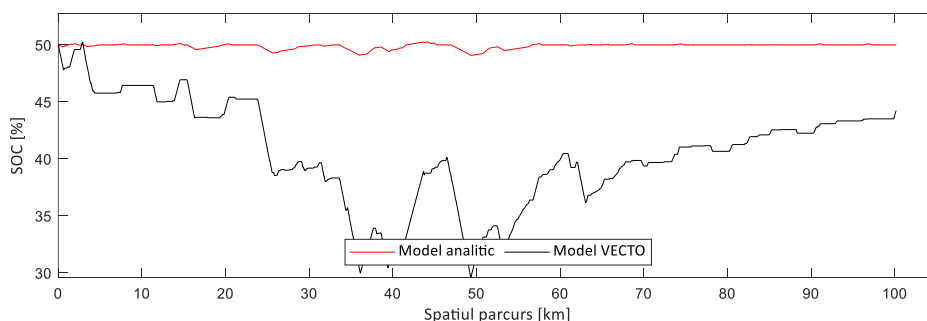


Figura 6.24. Starea de încărcare a bateriei

Se constată faptul că este permisă utilizarea energiei disponibile și pentru a compensa regimul de funcționare a motorului cu ardere internă.

În Figura 6.25 este prezentat graficul de variație a curentului furnizat la bornele mașinii electrice.

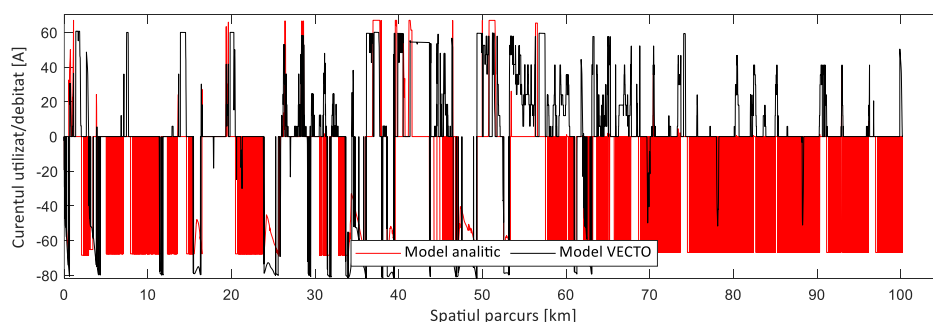


Figura 6.25. Curentul consumat/debitat de mașina electrică

6.4.5. Utilizarea unei mașini electrice și a sistemului fotovoltaic.

Ca date de intrare se definesc:

- autovehiculele parcurg ciclul *Long Haul*;
- bateria implementată în sistemul electric este de 200 kWh;
- capacitatea bateriei este de 250 Ah;
- momentul motor disponibil este de 1280 Nm;
- tensiunea nominală este de ~800 V;
- starea de încărcare a bateriei la începutul parcurgerii drumului este de 80%;
- starea minimă de încărcare a bateriei este 20%;
- valoarea de referință a stării de încărcare este de 50%.

În Figura 6.27 este prezentat graficul de variație a energiei disponibile și bateria care echează autovehiculul.

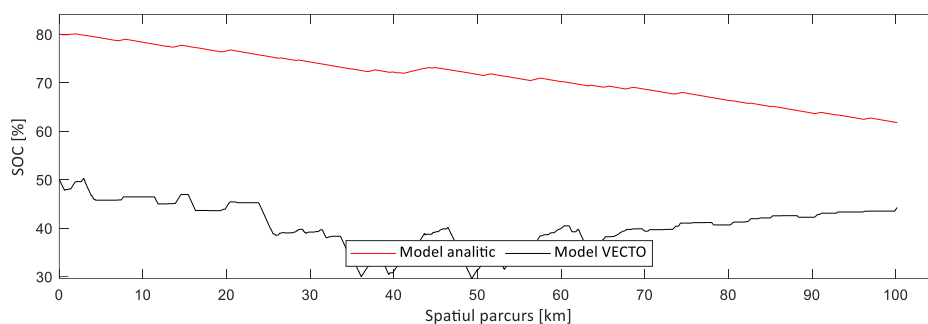


Figura 6.27. Starea de încărcare a bateriei

Se constată faptul că este permisă utilizarea energiei disponibile și pentru a compensa regimul de funcționare a motorului cu ardere internă.

6.5. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol au fost analizate o serie de modele analitice elaborate pentru evaluarea consumului de combustibil al autovehiculului. Rezultatele simulărilor care au fost realizate cu ajutorul acestor seturi de relații sunt comparate cu rezultate obținute prin simulare VECTO.

Se relevă faptul că se poate utiliza ca model primar de simulare cel în care se face adaptarea vitezei prin modularea accelerației autovehiculului (III). În acest caz se înregistrează valori ale puterii necesare

care depășesc disponibilul, însă consumul de combustibil este în concordanță cu cel determinat prin simularea VECTO.

Modelul de calcul a fost adaptat pentru a evidenția caracteristica dinamică a deplasării autovehiculului. Modelul de calcul elaborat (V) urmează specificul simulării VECTO.

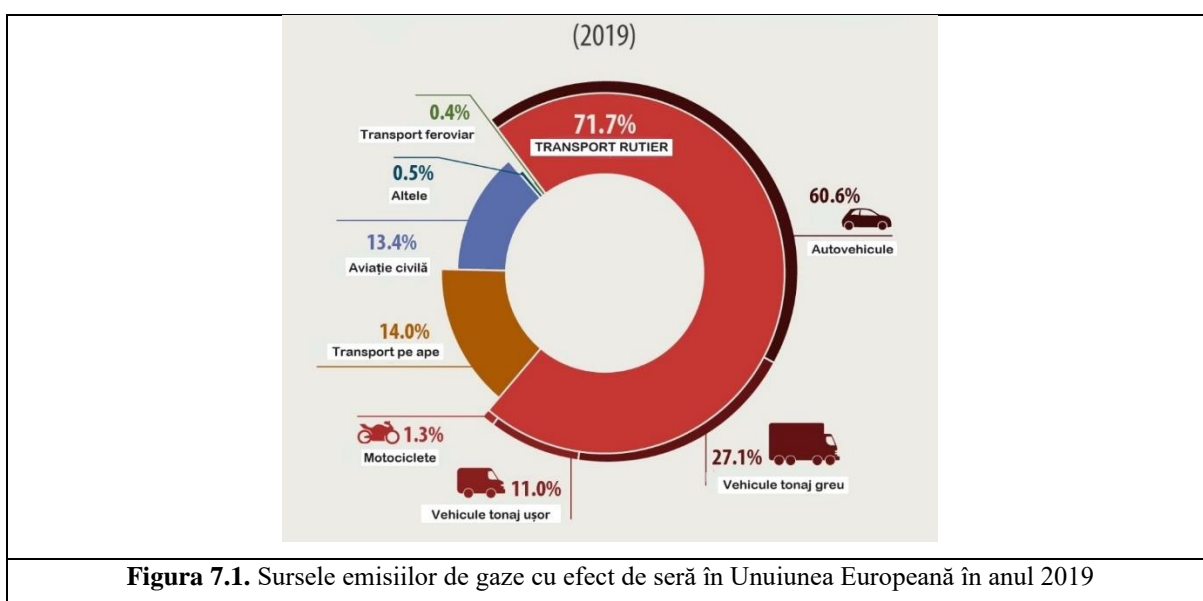
Pentru validarea acestui model au fost realizate simulări suplimentare. Rezultatele sunt în concordanță cu cele determinate prin simulare VECTO.

Scopul dezvoltării unui model analitic este acela de a construi un model matematic cu arhitectură deschisă care să permită studiul unor autovehicule care utilizează surse multiple de energie.

7. STUDIUL PERFORMANTELOR AUTOVEHICULELOR ICE, (P)HEV, (P)HEV-PV ȘI BEV

7.1. INTRODUCERE

Transportului rutier are cel mai semnificativ efect asupra mediului (Figura 7.1), și reprezintă cea mai mare sursă de poluare, statistică realizată la finalul anului 2019. Sectorul transportului rutier efectuat cu vehicule de tonaj ridicat generează 27,1% din totalul emisiilor de gaze cu efect de seră (GES) înregistrat în Uniunea Europeană. În 2019, emisiile de gaze cu efect de seră eliberate în atmosferă de vehiculele grele au fost cu 44 % mai mari decât cele generate de transportul aerian și cu 37 % mai mari decât cele generate de transportul maritim.



Hibridizarea reprezintă un pas obligatoriu în construcția noilor vehicule de tonaj greu, atât prin implementarea unui motor electric ce funcționează în paralel cu motorul termic, cât și înmagazinarea energiei produsă prin regenerare la frânarea mecanică sau de motor, prin implementarea punții electrificate pe semiremorcă, prin încărcarea plug-in la rețeaua electrică accesibilă infrastructurii rutiere, cât și prin conversia energiei solare la bordul vehiculului în cadrul sistemului fotovoltaic instalat în structura semiremorcii. Eficiența energetică este optimizată printr-un sistem de management (EMS) care reduce astfel la minim consumul de combustibil fosil, consum ce este direct proporțional cu emisiile nocive eliberate în atmosferă. EMS reglează fluxul de energie între baterie, motorul electric și motorul termic de propulsie, controlează timpii și nivelurile de încărcare-descărcare a bateriei, garantând o eficiență maximă prin alegerea optimă a modului de operare în funcție de condițiile de drum și de trafic.

7.2. MODELAREA

Ciclul de testare [69] consideră vehiculul aflat în mișcare longitudinală, deplasându-se cu o viteză impusă, calea de rulare putând fi orizontală sau cu pante cu diferite grade de înclinare [67]. În unele cazuri, profilul accelerației este, de asemenea, definit [54]. Astfel, dinamica vehiculului este substanțial simplificată. Relația de mai jos exprimă ecuația generală de mișcare longitudinală:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + R_d \quad (7.1)$$

Dezvoltată, ecuația (7.1) devine:

$$F_R = f_r \cdot G + \frac{1}{2} \cdot \rho_{aer} \cdot CDA \cdot v^2 + G \cdot p_{\%} + \frac{G}{g} \cdot \gamma \cdot a \quad (7.2)$$

Termenii ecuațiilor (7.1) și (7.2) reprezintă forța rezultantă la roată (F_R), forța rezultantă a rezistenței la rulare (R_r), forța rezultantă a rezistenței aerodinamice (R_a), forța rezultantă a rezistenței la pantă (R_p), forța rezultantă a rezistenței la demarare (R_d), accelerația (a), accelerația gravitațională (g), masa vehiculului (G), coeficientul (γ) al influenței maselor de rotație asupra efectului de translație al forței de inerție. Ceilalți termeni sunt: coeficientul rezistenței la rulare (f_r), coeficientul compozit (CDA) al suprafeței frontale a vehiculului și înclinarea căii de rulare ($p_{\%}$).

Ciclul de testare, prezentat în Figura 7.2, este standardizat pentru evaluarea performanțelor de consum de combustibil pentru autotrenurile rutiere ce parcurg distanțe lungi (Long-Haul).

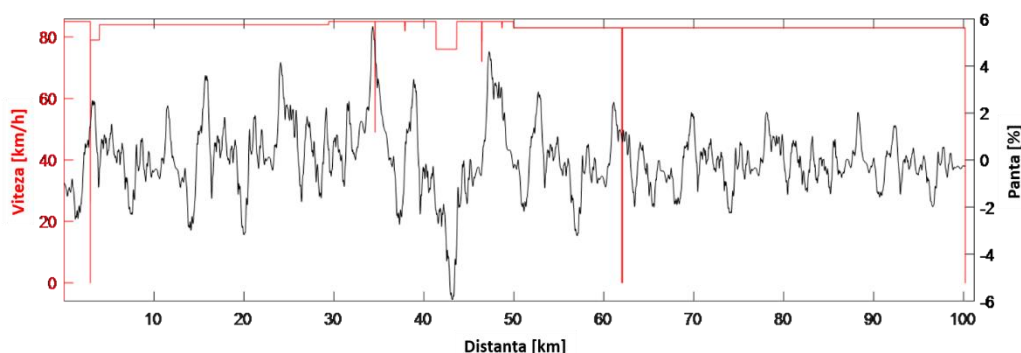


Figura 7.2. Ciclul de testare Long-Haul

Așadar, trebuie să îndeplinească concomitent următoarele trei condiții [100]:

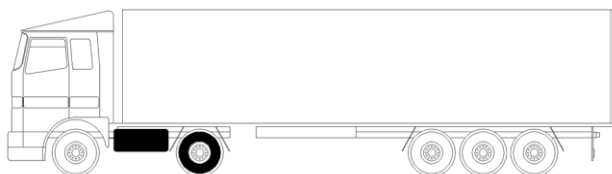
$$\begin{cases} v \approx v_{req.} \\ \alpha_a = \alpha_{req.} \\ P_R \leq P_{max} \end{cases} \quad (7.3)$$

Prima condiție provine din cerința deplasării cu viteză maximă pentru reducerea timpului de parcurgere a ciclului. Semnul ‘aproximativ’ a fost adăugat din considerente de dinamică ce implică perioade de accelerare și frânare de-a lungul ciclului parcurs.

Cea de-a doua condiție este obligatorie și depinde de configurația traseului. Spre deosebire de viteză care poate fi ajustată, acest parametru nu poate fi modificat, modificarea acestuia însemnând deplasarea pe un traseu diferit.

Cea de-a treia condiție ne arată că vehiculul se deplasează doar dacă puterea furnizată roților motoare depășește puterea necesară învingerii forțelor rezistive ale traseului (puterea necesară la roată).

Rezultatele obținute utilizând aceste modele de simulare au fost comparate și calibrate în raport cu rezultatul furnizat de o analiză VECTO [79],[103]. Programul VECTO a fost setat la "Declaration mode" și a fost configurat un vehicul cu parametri definiți în Figura 7.3. Datele de calibrare pentru modelele actuale sunt prezentate în Anexa I. Configurația vehiculului de încercare este prezentată în Figura 7.3.



Masa totală a vehiculului: $m_a = 40.000 \text{ kg}$
 Puterea maximă a motorului termic: $P_{max} = 325 \text{ kW}$
 Randamentul transmisiei: $\eta_{tr} = 0.94 \cdot 0.95$

Figura 7.3. Autotren Long-Haul cu configurație convențională

7.2.1. Vehiculul urmărește cu precizie datele de intrare (modul de conducere în regim staționar).

În acest caz, forțele de inerție ($\frac{G}{g} \cdot \delta \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v$) nu sunt incluse în analiză, presupunându-se că roțile motoare sunt capabile să furnizeze puterea necesară deplasării vehiculului conform cerințelor (v_{req}, α_{req}). Ciclul de testare este format dintr-o succesiune de poziții staționare. Puterea necesară deplasării vehiculului poate fi direct determinată folosind ecuația (7.4).

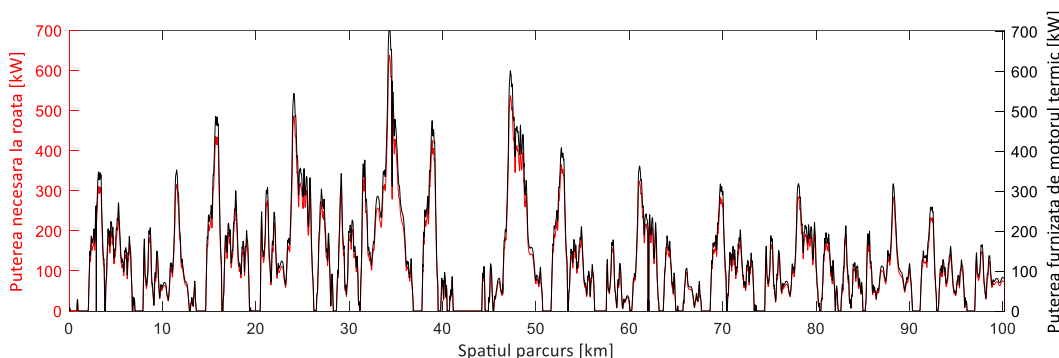


Figura 7.4. Puterea la roată și puterea dezvoltată de motorul termic necesară deplasării vehiculului

Rezultatele prezentate în Figura 7.4 ne arată că vehiculul nu poate parcurge traseul prestabilit folosind sursa de putere existentă (motorul termic).

7.2.2. Vehiculul folosește un profil de accelerație și se poate adapta puterii disponibile

În acest caz, sarcinile de inerție sunt incluse în calcul. În plus, vehiculul poate modula accelerația pentru a reduce sarcina motorului termic la puterea maximă pe care o poate furniza. Este necesară o a doua verificare. Conform datelor prezentate în Figura 7.5a), odată ce viteza vehiculului scade, accelerația crește. Cu toate acestea, accelerația nu poate fi mărită. Accelerația poate fi, cel mult, redusă atunci când sunt furnizate rezerve de putere.

Traseul ales pentru evaluarea consumului de combustibil prezintă o serie de variații ale profilului longitudinal. Pe baza acestor variații, altitudinea relativă este evaluată prin:

$$h_i = \sum_{j=2}^i s_{j-1,j} \cdot \frac{p_j}{100} \quad (7.6)$$

unde $s_{j-1,j}$ este distanța parcursă de la punctul $j - 1$ la punctul j și p_j este înclinarea traseului pentru intervalul definit.

Așadar, energia potențială a vehiculului este:

$$U_i = G \cdot h_i \quad (7.7)$$

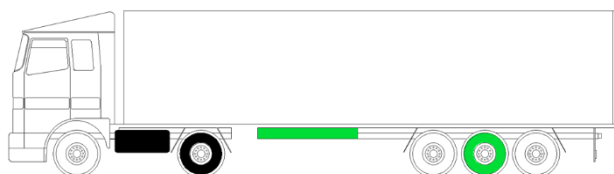
În aceste condiții, puterea necesară deplasării vehiculului (P_R) de la punctul $i - 1$ la punctul i este:

$$\Delta U_{i-1,i} = P_R \cdot \frac{S_{i-1,i}}{v_a} - (R_r + R_a + R_d) \cdot S_{i-1,i} \quad (7.8)$$

Ecuția este foarte versatilă și poate fi adaptată la o gamă largă de cicluri de conducere [104],[105].

7.2.3. Autotren hibrid cu semiremorcă electrificată

Pentru vehiculul hibrid a fost selectată o soluție constructivă de semiremorcă electrificată. Unitatea electrică este montată pe o punte a semiremorcii (puntea centrală), iar bateria este, de asemenea, montată pe structura semiremorcii, în fața celor 3 punți. Soluția permite o autonomie extinsă a vehiculului în ansamblu sau pe componente. Parametrii echipamentului electric sunt prezentați în Figura 7.7.

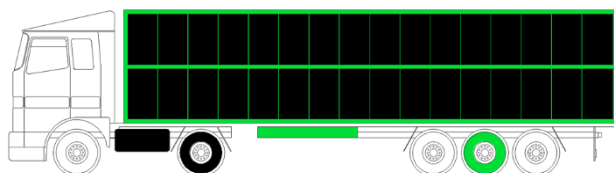


Masa totală a vehiculului: $m_a = 40.000 \text{ kg}$
 Puterea maximă a motorului termic: $P_{max} = 325 \text{ kW}$
 Randamentul transmisiei: $\eta_{tr} = 0.94 \cdot 0.95$
 Energia bateriei: $BW_{nom} = 6 \text{ kW}$
 Capacitatea bateriei: $A_{nom} = 25 \text{ Ah}$
 Tensiunea nominală: $V_{nom} = 600 \text{ V}$
 Cuplul motor al punții electrificate: $T_{nom} = 900 \text{ Nm}$
 Randamentul unității electrice: $\eta_{emt} = 0.98$
 Nivelurile de încărcare ale bateriei:
 $SOC_{max} = 50\%; SOC_{min} = 35\%; SOC_{ref} = 50\%$

Figura 7.7. Autotren Long-Haul hibrid

7.2.4. Autotren hibrid cu semiremorcă electrificată și panouri fotovoltaice

În acest caz, semiremorca are panouri fotovoltaice montate pe suprafața superioară și pe cele două suprafețe laterale ale semiremorcii [106]. Numărul de panouri fotovoltaice este determinat de suprafața totală descrisă anterior și de dimensiunile unui panou individual. Pentru a ține cont de suprafața reală expusă, se definește coeficientul de utilizare. Acest coeficient CF_{PV} ia în considerare suprafața totală a panourilor expuse la soare în același timp. Configurația unui astfel de vehicul este prezentată în Figura 7.8.



Masa totală a vehiculului: $m_a = 40.000 \text{ kg}$
 Configurația hibridă
 Numărul panourilor fotovoltaice: $n_{PV} = 36$
 Puterea panoului fotovoltaic: $P_{nom,PV} = 580 \text{ W}$
 Tensiunea panoului fotovoltaic: $V_{nom,PV} = 24 \text{ V}$
 Coeficientul de utilizare a sistemului fotovoltaic:
 $CF_{PV} = 0.60$

Figura 7.8. Autotren Long-Haul hibrid cu panouri fotovoltaice

7.3. REZULTATE

Pentru a valida rezultatele obținute utilizând modelul propus, instrumentul VECTO a fost folosit pentru a dezvolta și simula modele de vehicule având configurație convențională și hibridă. Rezultatele au fost obținute cu VECTO rulând în "Declaration Mode". Vehiculul simulat face parte din categoria N3 (vehicule din categoria N având o masă maximă care depășește 12 tone), sub-categoria 5-LH (Long-Haul), cu o masă totală de 40.000 kg (masa unui autotren rutier este limitată la 40 tone conform Directivei 96/53/EC a Consiliului European) și cu o configurație 4 x 2 a capului-tractor. Această sub-categorie reprezintă 62% din producția noilor vehicule grele rutiere. Modelul utilizează motorul termic standard de 325 kW și o transmisie automată cu 12 trepte. Parametrul compozit ($C_D \cdot A$) are valoarea de

5.3 m². Vehiculul este echipat cu anvelope 315/70 R22.5 pentru puntea față și anvelope duble 385/55 R22.5 pentru puntea motoare. Controlul anticipativ al vitezei de croazieră este dezactivat.

Vehiculul hibrid este definit ca o combinație între un cap-tractor convențional și o semiremorcă electricată. A doua axă a semiremorcii este motorizată. Motorul electric poate furniza o putere de 140 kW și un cuplu de 900 Nm. Variantele grupului de baterii vor fi discutate pentru a evalua performanța vehiculului hibrid. În plus, pe lângă vehiculul hibrid, semiremorca este echipată cu panouri fotovoltaice încastate pe cele trei mari suprafețe ale sale expuse la Soare.

Se face o analiză comparativă pentru patru scenarii de parcurgere a ciclului de testare de 100 km folosit de VECTO.

7.3.1. Vehicul convențional

În acest caz, vehiculul se deplasează folosind doar motorul cu ardere internă. Profilul de viteză determinat în urma analizei este comparat cu rezultatele obținute prin programul de simulare VECTO.

Figura 7.9 prezintă graficul de viteză al vehiculului determinat prin modelul analitic și cel simulat în VECTO.

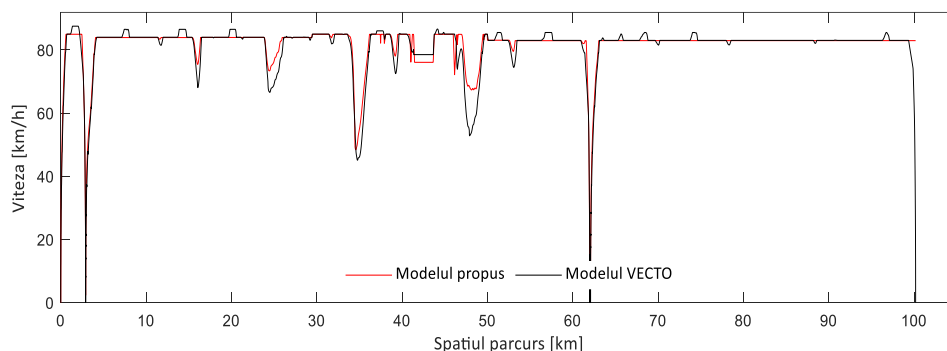


Figura 7.9. Graficul variației vitezei. Vehicul convențional

Rezultatele obținute arată o similaritate rezonabilă între cele două seturi de date. Alte seturi de date reprezentative sunt accelerația vehiculului în funcție de viteză și în funcție de altitudinea relativă a traseului. Se obțin informații legate de adaptarea accelerației – deci a puterii furnizată de motorul termic – la sarcinile de drum (urcări și coborâri).

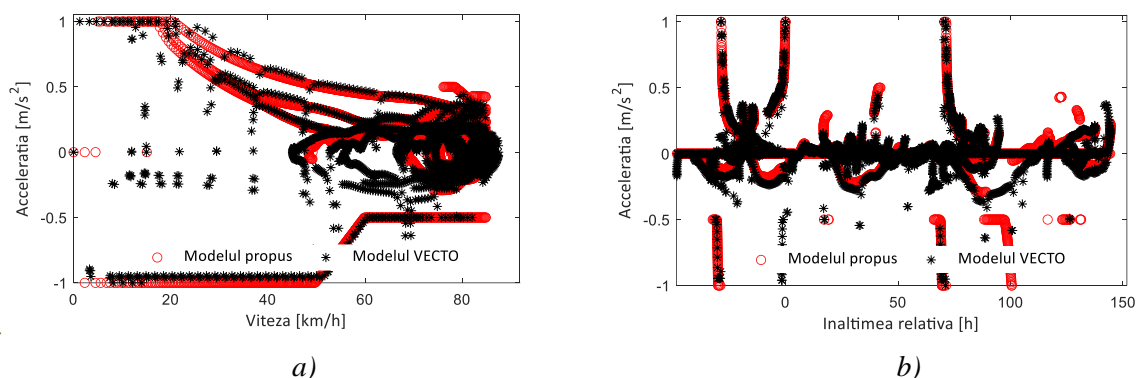


Figura 7.10. Valorile accelerației. Vehicul convențional

7.3.2. Vehicul hibrid

Vehiculul hibrid[111],[112] este configurat cu o baterie a cărei energie inițială este 8 kWh , corespunzătoare unui nivel de încărcare inițial maxim de $SOC_{max} = 50\%$. Capacitatea bateriei este setată la $A_{nom} = 25\text{ Ah}$, iar tensiunea bateriei este $V_{nom} = 600\text{ V}$. Figura 7.12 prezintă graficul vitezei vehiculului hibrid pentru modelul analitic și cel simulat în VECTO.

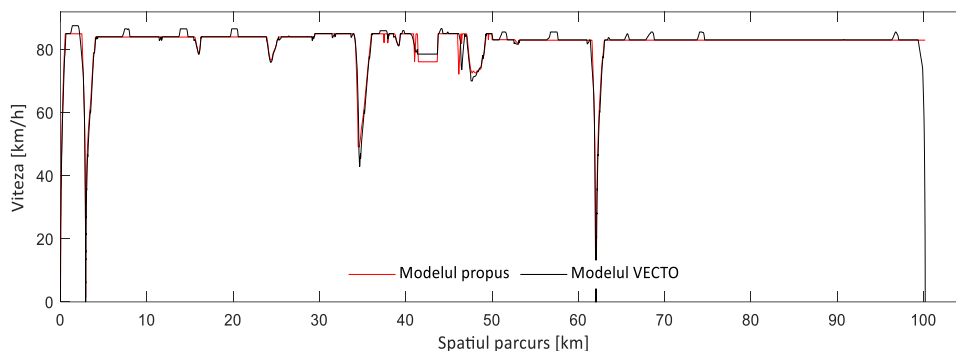


Figura 7.12. Graficul variației vitezei. Vehicul hibrid

Graficele accelerației în funcție de viteză și altitudine relativă a traseului sunt prezentate în Figura 7.13.

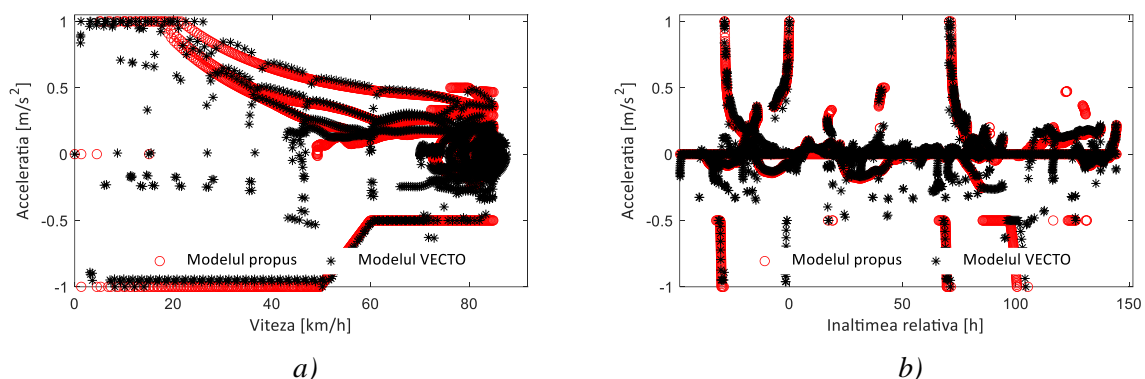


Figura 7.13. Graficele accelerației. Vehicul hibrid

7.3.3. Vehicul hibrid cu panouri fotovoltaice

Prin folosirea panourilor fotovoltaice [106][115], consumul de combustibil poate fi îmbunătățit [115]. Figura 7.16 prezintă variația nivelului de încărcare SOC al bateriei pe parcursul ciclului de testare pentru o setare inițială de $SOC_{max} = 50\%$, $SOC_{min} = 30\%$ și $SOC_{ref} = 50\%$.

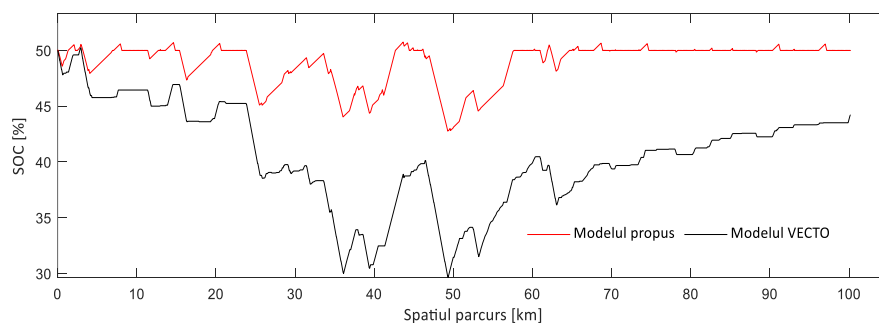


Figura 7.16. Nivel de încărcare al bateriei. Vehicul hibrid

7.3.4. Vehicul hibrid cu capacitate extinsă a bateriei

Capacitatea bateriei vehiculului hibrid este mărită la valoarea de 200 kWh . Economia de combustibil este de 28% pentru un consum de combustibil raportat de $25.61\text{ l}/100\text{ km}$. Figura 7.20 prezintă valorile consumului de combustibil și variația nivelului de încărcare al bateriei SOC. Pentru a beneficia de această modificare a capacității bateriei, tensiunea nominală a fost crescută la $V_{nom} = 800\text{ V}$.

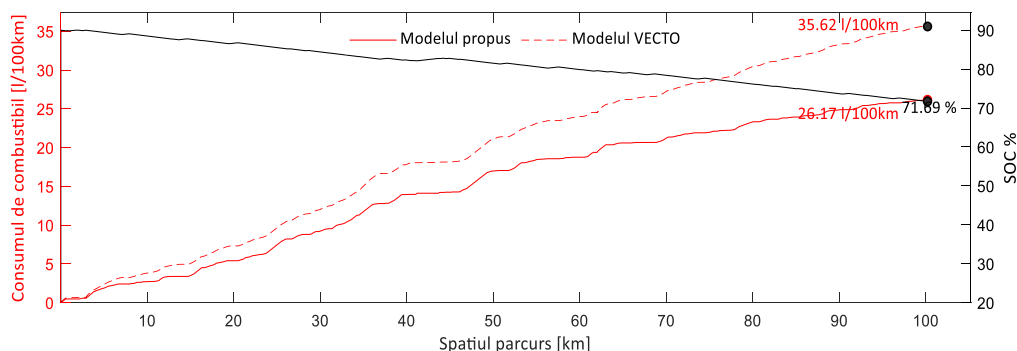


Figura 7.20. Consumul de combustibil cumulat la final de ciclu de testare. Vehicul hibrid

7.4. DISCUȚII

7.4.1. Consumul de energie și de combustibil al unui vehicul cu semiremorcă electrificată

Semiremorca este echipată cu panouri fotovoltaice, conform specificațiilor exprimate în Figura 7.8. Distanța de rulare în regim de vehicul hibrid este astfel extinsă la 350 km , corespunzătoare unei călătorii de 4,3 ore. Economia de combustibil, în acest scenariu, este de $33.77\text{ l}/100\text{ km}$. 100 kWh de energie se poate încărca într-o perioadă cuprinsă între 15 și 40 minute, depinde de puterea stației de încărcare (de la 350 kW până la 120 kW). Figura 7.22 prezintă graficele consumului de combustibil și al energiei pe o distanță de 500 km .

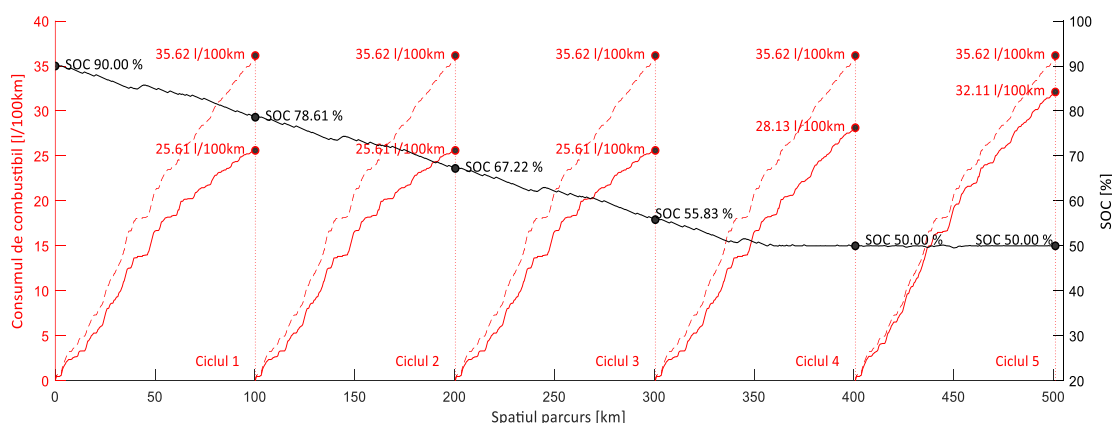


Figura 7.22. Deplasare extinsă. Consumul de combustibil. Vehicul hibrid cu panouri fotovoltaice

Costul pentru încărcarea rapidă a 100 kWh este 29 € (0.29 €/kWh) [100] comparativ cu prețul combustibilului de 43.7 € ($\sim 1.4\text{ €/l}$) [100], rezultă o economie anuală de 5828 € (considerând o distanță parcursă anual de 116000 km) [117].

7.4.2. Analiză comparativă a consumului de energie

Acest sub-capitol este destinat analizei impactului economic potențial al unei semiremorci electrificate. Configurațiile actuale ale vehiculului au fost adăugate pentru a include un autotren BEV Long-Haul. Pentru acest vehicul, energia bateriei a fost mărită la 450 kWh și puterea furnizată de motorul electric a fost setată a fi de 325 kW. Analiza a fost făcută pentru un autotren cu încărcătură (masa utilă) de 19300 kg. Rezultatele obținute în această simulare sunt prezentate în Tabelul 7.4.

Tabelul 7.4. Parametrii pentru vehicule ICE, PHEV, PHEVpv, BEV

	ICE	PHEV	PHEVpv	PHEV	PHEVpv	BEV
Masă cap-tractor [kg] [114]	7500	7500	7500	7500	7500	9000
Masă semiremorcă [kg] [114]	7500 ¹⁾	7800 ²⁾	8800 ³⁾	8500 ⁵⁾	9500 ⁵⁾	7500 ¹⁾
Masă utilă (marfă) [kg] [114]	19300	19300	19300	19300	19300	19300
Masă totală vehicul [kg]	34300	34600	35600	35300	36300	35800
BATERIE [kWh]	n.a.	8	8	200	200	450
SOC _{max} [%]	n.a.	50	50	90	90	90
SOC _{min} [%]	n.a.	47.5	50	71.1	78.2	59.8
PV 580 W [nr. panouri]	n.a.	n.a.	36	n.a.	36	n.a.
Consum de combustibil [l/100km]	31.83	31.5	30.4	22.84	23.31	0
Consum de energie [kWh]	n.a.	0.20	0.0	37.82	23.64	135.8
Cost ⁶⁾ €/100 km	44.56	44.15	42.56	41.43	38.54	33.85
Economii €/100 km	0	0.41	2.00	3.13	6.02	10.60
Economii anuale €/116000 km	0	477.9	2322.3	3631.9	6980.9	12293.9
Consum de energie [MJ]	1415.8	1401.8	1352.2	1152.1	1121.9	489.1
Scăderi echivalente ale consumului de energie [%/100km]	0	1.0	4.5	18.6	20.8	65.1

¹⁾ Semiremorcă convențională [114].

²⁾ Semiremorcă electrificată: + Motor electric (77 kg); DC/DC controler (40 kg); Invertor (75 kg); Sistem de răcire a bateriei (25 kg); Sistemul bateriei (carcasă, sistemul de răcire, etc.) (125 kg) [114]

³⁾ Semiremorcă electrificată: + Motor electric (77 kg); DC/DC controler (40 kg); Invertor (75 kg); Sistem de răcire a bateriei (25 kg); Sistemul bateriei (carcasă, sistemul de răcire, etc.) (75 kg; 265 Wh/kg); Panourile fotovoltaice (1000 kg; 580 W; 2.278 m · 1.134 m; 27.6 kg)

⁴⁾ Semiremorcă electrificată: + Motor electric (77 kg); DC/DC controler (40 kg); Invertor (75 kg); Sistem de răcire a bateriei (25 kg); Sistemul bateriei (carcasă, sistemul de răcire, etc.) (750 kg; 265 Wh/kg);

⁵⁾ Semiremorcă electrificată: + Motor electric (77 kg); DC/DC controler (40 kg); Invertor (75 kg); Sistem de răcire a bateriei (25 kg); Sistemul bateriei (carcasă, sistemul de răcire, etc.) (750 kg; 265 Wh/kg); Panouri fotovoltaice (1000 kg; 580 W; 2.278 m · 1.134 m; 27.6 kg)

⁶⁾ Prețul unui litru de motorină 1.4 €/l; Încărcarea lentă 0.25 €/kWh

Rezultatele arătate în Tabelul 7.4 demonstrează o reală economie de combustibil.

7.5. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol sunt analizate din punct de vedere economic configurațiile unor autotrenuri rutiere. Sunt comparate soluțiile unui autotren rutier convențional și cele în care sunt utilizate autovehiculele cu semiremorca electrificată, semiremorcă electrificată cu instalație fotovoltaică și un autovehicul complet electric.

Analiza economică cuprinde rezultate referitoare la costul electrificării unui autotren rutier în raport cu beneficiul obținut în cazul în care se modifică sarcina utilă transportată de la valoarea maximă de 25.000 kg la valoarea de referință de 19.300 kg.

Rezultatele arată faptul că pentru o sarcină utilă de 19.300 kg se justifică costul electrificării autotrenului rutier. În cazul în care se aplică limita de masă a autotrenului rutier de 40.000 kg este benefică soluția utilizării unui tractor convențional. Varianta de electrificare devine fezabilă doar în

cazul în care se poate aplica derogarea de la masa totală egală cu masa echipamentului utilizat pentru realizarea electrificării autotrenului rutier.

Rezultatele justifică soluția unei semiremorci electrificată din punct de vedere al beneficiului obținut dar și din punct de vedere al convențiilor și reglementărilor în vigoare care fac referire la timpul de conducere și timpul de odihnă al conducătorilor auto.

8. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

8.1. CONCLUZII

În cadrul Capitolului I – **Utilizarea energiei fotovoltaice ca sursă regenerabilă suplimentară**, au fost identificate și analizate cerințele actuale legate de realizarea autovehiculelor care utilizează în procesul de autopropulsare energia electrică. Au fost identificate soluțiile bazate pe autovehicule hibride, electrice care utilizează preponderent energie electrică provenită din sistemul de furnizare a energiei electrice. Au fost cercetate și construcțiile de autovehicule care folosesc resurse regenerabile – energia fotovoltaică.

De asemenea sunt indicate direcțiile generale și obiectivele specifice care fac obiectul acestei lucrări.

În cadrul Capitolului II – **Evaluarea analitică și numerică a consumului de combustibil**, sunt analizate metodele ce pot fi aplicate pentru calculul consumului de combustibil. Forța longitudinală la roată necesară pentru deplasarea vehiculului de-a lungul unui anumit ciclu de rulare este evaluată în secvențe de timp în funcție de setul de date de intrare. Lucrul mecanic este calculat și transformat în consum de combustibil folosind anumiți parametri predefiniți. În același timp, analiza forței longitudinale la roată poate oferi informații despre potențialele economii de combustibil. Metoda este directă și utilizează parametri de eficiență extrași din modelele de simulare.

Pentru a elabora metoda prezentată mai sus, au fost utilizate și analizate modele în MATLAB/Simulink. S-a constatat că rezultatele sunt în bună corelație, dovedind potențialul metodei propuse ca un prim pas în dezvoltare.

În plus, au fost investigate componentele separate ale rezistențelor de drum. Pe de o parte, s-a demonstrat procesul de extragere a datelor din modelele complexe de simulare, iar pe de altă parte, au fost evaluate diferențele dintre metodele de simulare **backward-facing** și **forward-facing**. Diferențele găsite sunt minore.

Se pot face comparații între autovehicule în ceea ce privește performanța aerodinamică. S-au depus eforturi pentru a demonstra eficiența acestui model de simulare în comparație cu alte modele complexe de simulare. Acest lucru demonstrează aplicabilitatea unei metode simple de calcul capabilă să prelucreze inserări suplimentare de parametri pentru a simula motoare cu ardere internă, motoare electrice sau o combinație a celor două motoare. Modelul de simulare poate fi utilizat cu ușurință pentru identificarea anumitor limite (de exemplu, masa) care afectează performanța combustibilului.

Capitolul III – VECTO – **Modelare și simulare**, prezintă standardul actual utilizat pentru evaluarea performanțelor de consum ale autotrenurilor rutiere.

VECTO prelucrează datele de intrare și calculează consumul de combustibil, implicit cantitatea de noxe emise, printr-un algoritm propriu complex având ca rezultat omologarea și certificarea autovehiculului configurat. S-a ilustrat variația puterii la roată dezvoltată de motorul termic ales astfel încât forțele rezistive din timpul deplasării pe cei 100 km ai ciclului LongHaul să fie învinse cu respectarea cerințelor de viteză impuse de program.

Prin introducerea motorului electric în configurarea hibrid-paralel a autotrenului, consumul de combustibil a scăzut cu 1,14 litri/100km.

Până la implementarea sursei suplimentare regenerativă reprezentată de sistemul de panouri fotovoltaice, această diferență de consum este integrată în valoarea consumului cumulat la final de ciclu de testare pentru vehiculul hibrid-paralel configurat.

În Capitolul IV - **Modelarea performanțelor consumului de consum de combustibil în cazul autotrenurilor rutiere**, au fost analizate o serie de modele analitice elaborate pentru evaluarea consumului de combustibil al autovehiculului. Rezultatele simulărilor care au fost realizate cu ajutorul acestor seturi de relații sunt comparate cu rezultate obținute prin simulare VECTO.

Se relevă faptul că se poate utiliza ca model primar de simulare cel în care se face adaptarea vitezei prin modularea accelerației autovehiculului (III). În acest caz se înregistrează valori ale puterii necesare care depășesc disponibilul, însă consumul de combustibil este în concordanță cu cel determinat prin simularea VECTO.

Modelul de calcul a fost adaptat pentru a evidenția caracteristica dinamică a deplasării autovehiculului. Modelul de calcul elaborat (V) urmează specificul simulării VECTO.

Capitolul V – **Analiza performanțelor de consum de combustibil în trafic real**, conține o analiză dezvoltată pe baza unor date reale obținute în trafic, pentru evaluarea consumului de combustibil al autovehiculului. Rezultatele sunt comparate cu rezultate obținute prin simulare VECTO. Față de valoarea consumului de combustibil obținută pentru autotrenul convențional în programul VECTO, reprezentând valoarea cumulată a consumurilor instantanee pe parcursul celor 100 km ai ciclului de testare Long Haul, valoarea rezultată din raportările autotrenurilor ce au parcurs trasee reale în traficul din România arată o diferență de aproximativ trei procente mai mare.

În cadrul Capitolului VI - **Studiul posibilităților de electrificare și utilizare a surselor alternative de energie electrică**, au fost analizate o serie de modele analitice elaborate pentru evaluarea consumului de combustibil al autovehiculului. Rezultatele simulărilor care au fost realizate cu ajutorul acestor seturi de relații sunt comparate cu rezultate obținute prin simulare VECTO.

Se relevă faptul că se poate utiliza ca model primar de simulare cel în care se face adaptarea vitezei prin modularea accelerației autovehiculului (III). În acest caz se înregistrează valori ale puterii necesare care depășesc disponibilul, însă consumul de combustibil este în concordanță cu cel determinat prin simularea VECTO.

Modelul de calcul a fost adaptat pentru a evidenția caracteristica dinamică a deplasării autovehiculului. Modelul de calcul elaborat (V) urmează specificul simulării VECTO.

Pentru validarea acestui model au fost realizate simulări suplimentare. Rezultatele sunt în concordanță cu cele determinate prin simulare VECTO.

Scopul dezvoltării unui model analitic este acela de a construi un model matematic cu arhitectură deschisă care să permită studiul unor autovehicule care utilizează surse multiple de energie.

În Capitolul VII - **Studiul performanțelor autovehiculelor ICE, (P)HEV, (P)HEV-PV și BEV** sunt analizate din punct de vedere economic configurațiile unor autotrenuri rutiere. Sunt comparate soluțiile unui autotren rutier convențional și cele în care sunt utilizate autovehicule cu semiremorca electrificată, semiremorcă electrificată cu instalație fotovoltaică și un autovehicul complet electric.

Analiza economică cuprinde rezultate referitoare la costul electrificării unui autotren rutier în raport cu beneficiul obținut în cazul în care se modifică sarcina utilă transportată de la valoarea maximă de 25.000 kg la valoarea de referință de 19.300 kg.

Rezultatele arată faptul că pentru o sarcină utilă de 19.300 kg se justifică costul electrificării autotrenului rutier. În cazul în care se aplică limita de masă a autotrenului rutier de 40.000 kg este

benefică soluția utilizării unui tractor convențional. Varianta de electrificare devine fezabilă doar în cazul în care se poate aplica derogarea de la masa totală egală cu masa echipamentului utilizat pentru realizarea electrificării autotrenului rutier.

Rezultatele justifică soluția unei semiremorci electrificată din punct de vedere al beneficiului obținut dar și din punct de vedere al convențiilor și reglementărilor în vigoare care fac referire la timpul de conducere și timpul de odihnă al conducătorilor auto.

8.2. CONTRIBUȚII PERSONALE

Rezultatele obținute în urma simulărilor au fost comparate cu rezultatele furnizate de programul VECTO în cazul în care s-a utilizat un model de autovehicul convențional și un model de autovehicul hibrid-paralel. Se constată faptul că există o bună corelare între rezultatele obținute prin rularea programului VECTO, un program complex de calcul, și utilizarea algoritmilor simplificați, utili în cazul în care se dorește o estimare rapidă a performanțelor de consum de combustibil.

Pentru validarea suplimentară a modelelor de calcul propuse, după analiza pe ciclul identificat, de tip Long-Haul, a fost efectuată o evaluare a modelelor de calcul propuse pentru alte două cicluri specifice, respectiv Regional Delivery și Urban Delivery. Se constată că și în aceste situații rezultatele sunt mulțumitoare dar, în același timp, se identifică faptul că este necesară o completare a modelului analitic dezvoltat astfel încât să se obțină un mai bun control al accelerației în cazul în care condițiile de drum impun o creștere bruscă a puterii disponibile la roată.

Apoi am colectat, prelucrat și analizat o serie de date statistice obținute prin utilizarea în condiții de drum reale de la autovehicule de tonaj apropiat cu cel al autotrenului studiat, care au circulat pe drumuri din România. Din setul inițial de date au fost stabilite filtre și criteriile pentru extragerea rezultatelor semnificative. Un prim criteriu de eliminare a fost cel dat de lungimea drumului parcurs. Au fost astfel identificate, în final, 67 de cazuri.

Se constată faptul că rezultatele astfel alese sunt în concordanță cu rezultatele obținute prin simulare, ceea ce arată că, în condiții reale de trafic, autovehiculul are un comportament similar celui simulat. Diferențele de consum de combustibil înregistrate sunt consecința faptului că drumul simulat în VECTO este un drum ce presupune viteze mari de deplasare atât în ceea ce privește viteza maximă cât și viteza medie. Rezultatele înregistrate pentru autovehiculele care au circulat pe drumuri din România indică viteze maxime de deplasare pentru că există posibilitatea deplasării pe o anumită secțiune de drum cu viteza respectivă, însă vitezele medii sunt inferioare vitezei medii a ciclului VECTO. Această diferență de viteză nu face altceva decât să adauge un consum de combustibil suplimentar, având în vedere faptul că sunt necesare mai multe secvențe de accelerare a autovehiculului, despre care s-a demonstrat în cadrul elaborării modelelor analitice că reprezintă secvența cea mai consumatoare de putere la roată. Rezultatele obținute experimental sunt semnificative pentru acest studiu.

Având în vedere politicile existente la nivel european și nu numai, referitoare la reducerea emisiilor poluante, în special cele generate de transportul greu, o soluție ce poate fi utilizată este cea a electrificării autovehiculelor. Electrificarea autovehiculelor poate fi văzută ca o etapă intermediară între construcția convențională actuală a transportului rutier greu, autovehicule echipate cu motoare cu ardere internă, și soluția de viitor când autovehiculele de transport de tonaj ridicat vor fi echipate cu motoare cu hidrogen, motoare electrice sau cu pile de combustie și au posibilitatea stocării energiei în baterii.

În acest sens am completat modelul dinamic cu opțiunea cuplării în paralel a motorului termic cu motorul electric. Performanțele motorului electric sunt similare celor ale motorului termic care a fost

folosit pentru simularea în VECTO. Am definit o serie de relații matematice prin care se face evaluarea curentului consumat, a capacității bateriei și a energiei disponibile în baterie. Simularea cu modelul hibrid dezvoltat cu setul de relații analitice furnizează rezultate ce sunt în concordanță cu rezultatele obținute prin simulare cu ajutorul programului VECTO. Mai mult decât atât, au fost dezvoltate o serie de simulări care au avut ca parametri de intrare energia disponibilă în baterie, starea de încărcare a bateriei și diferite modalități de programare a unității electrice care echipează autotrenul rutier.

Unitatea electrică poate fi programată să funcționeze în regim de motor, în regim de generator sau exclusiv doar într-un singur regim de funcționare. Pentru fiecare dintre aceste cazuri a fost evaluat consumul de energie pentru a se evalua, în final, economia de consum de combustibil și, implicit, modalitatea în care se poate face reducerea emisiilor poluante.

Având în vedere construcția semiremorcii de tip rigid, a fost adăugată o nouă construcție, anume cea prin care se utilizează panouri fotovoltaice ce acoperă integral suprafațele semiremorcii.

Pentru a evidenția modalitatea de expunere la radiația solară, s-a considerat un anumit parametru, anume că doar 60% din întreaga suprafață acoperită cu panouri fotovoltaice este exploatată efectiv în producerea de energie și s-a analizat modalitatea prin care energia produsă prin intermediul panourilor solare participă la reducerea consumului de combustibil al autotrenului rutier.

Concomitent cu intensificarea discuțiilor la nivel european și global privind schimbările climatice, se impun în cel mai scurt timp reglementări stricte referitoare la tipul de combustibil folosit pentru propulsia transportului de mărfuri și de persoane atât rutier cât și maritim.

Eforturile limitării încălzirii globale și a reducerii emisiilor de gaze nocive rezultate în urma arderii combustibililor convenționali se concretizează prin apariția unor prototipuri de autovehicule rutiere, indiferent de tonajul acestora, care reușesc, prin implementarea unor surse de energie regenerabilă, să satisfacă cerințele actuale. Industria constructoare de autovehicule rutiere de tonaj greu se află într-un constant proces de inovații tehnologice care să crească gradul de hibridizare prin configurații ale surselor alternative de putere care să preia cât mai mult din sarcina motorului cu ardere internă care, în prezent, rămâne indispensabil.

Categoric că integrarea sistemului de panouri fotovoltaice în caroseria semiremorcii și înlocuirea punții centrale a semiremorcii cu o punte electricată ale cărei motoare electrice (unul pentru fiecare roată) pot lucra atât în rol de generator cât și în rol de motor sunt doar primii pași spre viitorul în care, cu siguranță, se îndreaptă transportul rutier greu de cursă lungă.

Totodată, având în vedere tendințele actuale de dezvoltare prin care tot mai mulți constructori propun astfel de soluții tehnice de utilizare a unor semiremorci electrificate echipate cu panouri fotovoltaice, rezultatele obținute și prezentate sunt în concordanță cu performanțele expuse de constructorii unor astfel de semiremorci.

Lucrarea cuprinde și o analiză economică în care sunt evidențiate costurile aferente electrificării unui autotren rutier în raport cu beneficiul obținut. Se relevă de aici faptul că prin utilizarea unei semiremorci electrificate echipată cu panouri fotovoltaice se obțin economii care justifică investiția. De asemenea soluția propusă este în concordanță cu reglementările referitoare la timpul de condus și cel de odihnă impuse conducătorului auto,

8.3. CERCETĂRI VIITOARE

Îmbunătățirea programelor de calcul prin includerea unor module care să facă o evaluare și o simulare a comportamentului conducătorului auto în ceea ce privește procesul de frânare și de accelerare a

autovehiculului și, eventual, modalitatea prin care se pot include caracteristici tehnice ale unor motoare. Aici vorbim despre utilizarea unor caracteristici complexe de tip moment motor – turație, respectiv consum specific de combustibil – turație, caracteristici de eficiență ale motoarelor (motorul termic și cel electric), caracteristici de eficiență ale componentelor transmisiei, posibilitatea includerii unor modele de transmisie mecanice în trepte sau, în cazul în care este necesar pentru motoarele electrice, utilizarea unor transmisii cu variație continuă a rapoartelor de transmisie.

Transmisiile CVT (Continuous Variable Transmission) ar permite motoarelor termic și electric să funcționeze la un regim de turații mai eficiente, ajutând menținerea turației la o valoare optimă în timpul accelerațiilor, reducând astfel consumul de combustibil. În prezent, aceste CVT-uri nu au capacitatea de a transmite cupluri sau puteri mari, nefiind folosite la echiparea autovehiculelor rutiere de tonaj greu.

O contribuție importantă asupra parametrului final de interes maxim, consumul de combustibil la final de ciclu de testare sau la final de drum parcurs în trafic real, o reprezintă gestionarea condițiilor de drum, evitarea obstacolelor neștiute întâlnite de-a lungul traseului stabilit inițial, reconfigurarea traseului în funcție de traficul întâlnit și în funcție de sectoarele de drum însorite, de frecvența accelerațiilor bruște și a sectoarelor de drum ce favorizează decelerarea, implicit producerea de energie regenerabilă. Producătorul german Mercedes a inițiat implementarea sistemului PPC (Predictive Powertrain Control), ce reprezintă o direcție spre care se va îndrepta transportul rutier greu pentru reducerea noxelor, respectiv reducerea consumului energetic al autotrenurilor hibride.

Plecând de la cercetările realizate în cadrul acestei lucrări, se va analiza oportunitatea implementării unor astfel de sisteme hibride și în cazul unor alte mijloace [118] de transport, cum ar fi transportul naval [119] care permite, prin suprafețele generoase expuse la soare [120], [121], [122], [123], [124], [125], utilizarea unor mini-ferme de panouri fotovoltaice care să adauge un aport de energie. După cum este prezentat în Fig.7.1, conform statisticii Agenției Europene de Mediu, la finalul anului 2019 sectorul transportului pe apă se afla pe locul trei, cu un procent de 14% din totalul emisiilor poluante generate din transporturi, la o distanță de doar 5,4% sub sectorul transportului efectuat cu autovehicule de tonaj greu. Importanța reducerii noxelor din acest sector explică cerințele moderne ale transportului naval în ceea ce privește înlocuirea combustibilului convențional fosil cu alți combustibili care să polueze mai puțin și chiar implementarea unor norme tehnice specifice care să permită operarea navelor în port folosind doar energie “verde” provenită de la infrastructura portuară (shore energy supply) [126], [127].

Figura 8.1 prezintă densitatea ridicată la nivel global a sectorului de transport maritim.

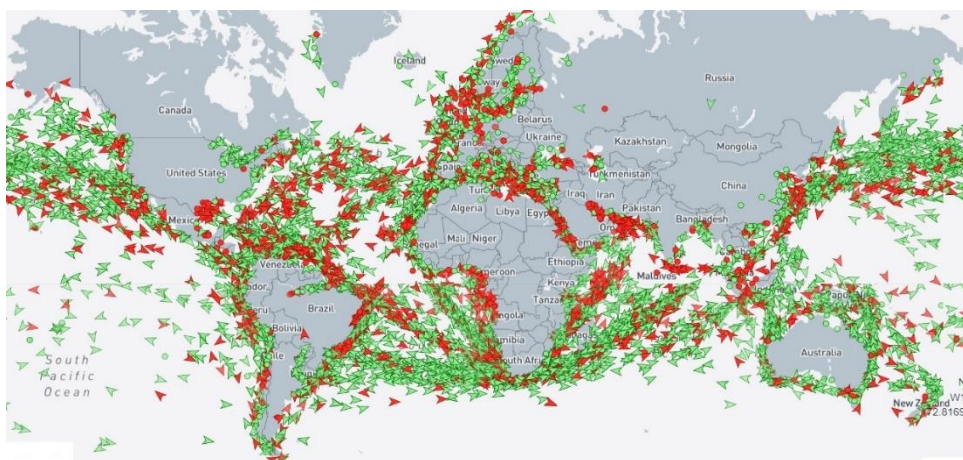


Figura 8.1. Transportul maritim la nivel global

Sunt evidențiate doar navele transportatoare de mărfuri lichide sau solide în vrac, acestea reprezentând ponderea cea mai mare din totalul navelor de transport pe apă. Rutele cu densitate mare de

nave beneficiază de valori ridicate ale radiației solare în cea mai mare parte a anului, iar singurele obstacole ce cauzează umbrirea sunt reprezentate de condițiile meteorologice și perioadele nocturne.

În condițiile de scădere majoră a prețului bateriilor și al panourilor fotovoltaice, ce a determinat implementarea energiei solare ca energie regenerabilă suplimentară în cadrul programelor de dezvoltare din industriile constructoare de vehicule rutiere, viitorul sectorului de transport maritim va beneficia, de asemenea, de această sursă adițională de energie.

Normele din ce în ce mai stricte în ceea ce privește reducerea globală a emisiilor de noxe vor iniția noi descoperiri tehnologice privitoare la folosirea cât mai eficientă, din toate punctele de vedere, a energiei solare. Toate domeniile de transport vor adopta energia solară ca energie alternativă suplimentară altor surse mai mult sau mai puțin regenerabile.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Rizzo G, Sorrentino M, Speltino C, Arsie I, Fiengo G, Vasca F. Converting conventional cars in mild hybrid solar vehicles. vol. 44. IFAC; 2011. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03319>.
- [2] Ud-Din Khan S, Wazeer I, Almutairi Z, Alanazi M. Techno-economic analysis of solar photovoltaic powered electrical energy storage (EES) system. *Alexandria Engineering Journal* 2022;61:6739–53. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.025>.
- [3] EPA regulations for heavy-duty vehicles Phase 3 n.d. <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines> (accessed February 12, 2022).
- [4] Capasso C, Notti E, Veneri O. Design of a hybrid propulsion architecture for midsize boats. *Energy Procedia* 2019;158:2954–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.958>.
- [5] Meskani A, Haddi A. Modeling and Simulation of an Intelligent Hybrid Energy Source based on Solar Energy and Battery. *Energy Procedia* 2019;162:97–106. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.011>.
- [6] Boström T, Babar B, Hansen JB, Good C. The pure PV-EV energy system – A conceptual study of a nationwide energy system based solely on photovoltaics and electric vehicles. *Smart Energy* 2021;1. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100001>.
- [7] History of Hybrid Vehicles 2011. www.autoguide.com/auto-news/2011/06/history-of-hybrid-vehicles/ (accessed February 16, 2022).
- [8] A history of hybrid vehicles 2007. www.motortrend.com/features/hybrid-history/ (accessed February 16, 2022).
- [9] Aaron Smith & Daren Moss. Hybrid cars history n.d. <https://www.autocar.co.uk/car-news/frankfurt-motor-show/brief-history-hybrid-and-electric-vehicles-picture-special> (accessed February 12, 2022).
- [10] Lightyear’s solar car prototype drives over 440 miles on a single battery charge 2022. <https://lightyear.one/>.
- [11] Thiel C, Gracia Amillo A, Tansini A, Tsakalidis A, Fontaras G, Dunlop E, et al. Impact of climatic conditions on prospects for integrated photovoltaics in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2022;158:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112109>.
- [12] EV Database Organization. Lightyear 0. Fully Charged n.d. <https://ev-database.org/car/1166/Lightyear-0> (accessed February 14, 2022).
- [13] Lightyear One article n.d. <https://www.motortrend.com/news/2023-lightyear-one-first-look-review/> (accessed June 16, 2023).
- [14] Light-year 2 n.d. <https://lightyear.one/lightyear-2> (accessed May 21, 2024).
- [15] Tesla Cybertruck n.d. <https://www.tesla.com/cybertruck> (accessed May 17, 2023).
- [16] Cybertruck description and details n.d. <https://www.motortrend.com/reviews/2024-tesla-cybertruck-beast-tri-motor-foundation-series-electric-truck-first-test-review/> (accessed May 21, 2024).
- [17] Sion - Sono Motors n.d. <https://sonomotors.com/en/press/press-releases/sono-motors-expands-cooperation-with-continental-for-development-of-solar-electric-vehicle-sion/> (accessed March 10, 2023).
- [18] RYAN KENNEDY. Hyundai Sonata - solar roof n.d. <https://pv-magazine-usa.com/2022/03/24/hyundai-sonata-hybrid-is-equipped-with-a-solar-roof/> (accessed March 28, 2022).
- [19] Kane M. Toyota Prius PHV with solar panels n.d. <https://insideevs.com/news/358458/toyota-tests-prius-phv-solar-charging/> (accessed February 12, 2022).
- [20] Scania solar-powered truck n.d. <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2023/scanias-solar-powered-truck.html> (accessed September 11, 2023).
- [21] DAF CF Hybrid Innovation Truck n.d. <https://www.daf.global/en-us/trucks/electric-and-hybrid-trucks> (accessed February 20, 2022).
- [22] DAF - XF 2019. www.ecochamps.eu/heavy-tractor-daf-xf/ (accessed February 20, 2022).
- [23] Lodi C, Gil-Sayas S, Currò D, Serra S, Drossinos Y. Full-battery effect during on-board solar charging of conventional vehicles. *Transp Res D Transp Environ* 2021;96. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102862>.
- [24] Coraggio G, Pisanti C, Rizzo G, Senatore A. A moving solar roof for a Hybrid Solar Vehicle. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 2010;43:67–74. <https://doi.org/10.3182/20100712-3-DE-2013.00048>.
- [25] Genie Insights - solar panels for commercial vehicles n.d. <https://www.genieinsights.com/solar-panels-for-commercial-vehicles/> (accessed April 14, 2023).
- [26] Solar panels : cost and efficiency n.d. www.news.energysage.com/solar-panel-efficiency-cost-over-time/ (accessed May 23, 2022).
- [27] Most efficient solar panels n.d. www.news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/ (accessed April 5, 2022).

- [28] Kuchta D. Solar panels efficiency factors n.d. <https://www.treehugger.com/solar-panel-efficiency-definition-and-importance-5189315> (accessed February 24, 2022).
- [29] Marsh J. Flexible solar panles on the market n.d. <https://www.energysage.com/solar/flexible-solar-panels/> (accessed May 7, 2023).
- [30] Flexible solar panels for vehicles 2021. www.pv-magazine.com/2021/09/02/flexible-solar-panel-for-vehicle-integrated-applications/ (accessed June 13, 2022).
- [31] Yang Y, Xu Y, Zhang H, Yang F, Ren J, Wang X, et al. Research on the energy management strategy of extended range electric vehicles based on a hybrid energy storage system. *Energy Reports* 2022;8:6602–23. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.013>.
- [32] Department SR. Price per kWh of Lithium batteries for last decade n.d. <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/> (accessed December 11, 2023).
- [33] Dorokhova M, Martinson Y, Ballif C, Wyrsh N. Deep reinforcement learning control of electric vehicle charging in the presence of photovoltaic generation. *Appl Energy* 2021;301:117504. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117504>.
- [34] Previti U, Brusca S, Galvagno A, Famoso F. Influence of Energy Management System Control Strategies on the Battery State of Health in Hybrid Electric Vehicles. *Sustainability (Switzerland)* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/su141912411>.
- [35] Wetzel G, Salomon L, Krügener J, Bredemeier D, Peibst R. High time resolution measurement of solar irradiance onto driving car body for vehicle integrated photovoltaics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2022;30:543–51. <https://doi.org/10.1002/pip.3526>.
- [36] Tiano FA, Rizzo G, Marino M, Monetti A. Evaluation of the potential of solar photovoltaic panels installed on vehicle body including temperature effect on efficiency. *ETransportation* 2020;5:100067. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100067>.
- [37] Ise F. Lade-PV Project Begins: Vehicle-integrated PV for Electrical Commercial Vehicles 2020:6–8.
- [38] Peibst R, Fischer H, Brunner M, Schiebl A, Wöhe S, Wecker R, et al. Demonstration of Feeding Vehicle-Integrated Photovoltaic-Converted Energy into the High-Voltage On-Board Network of Practical Light Commercial Vehicles for Range Extension. *Solar RRL* 2022;6. <https://doi.org/10.1002/solr.202100516>.
- [39] Cummings T, Bradley TH, Asher ZD. The effect of trip preview prediction signal quality on hybrid vehicle fuel economy. *IFAC-PapersOnLine* 2015;28:271–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.039>.
- [40] ur Rehman N, Hijazi M, Uzair M. Solar potential assessment of public bus routes for solar buses. *Renew Energy* 2020;156:193–200. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.081>.
- [41] Jiang L, Hua Y, Ma C, Liu X. SunChase: Energy-Efficient Route Planning for Solar-Powered EVs. *Proc Int Conf Distrib Comput Syst* 2017:383–93. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2017.214>.
- [42] Paykani A, Shervani-Tabar MT. A comparative study of hybrid electric vehicle fuel consumption over diverse driving cycles. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 2011;1:52005. <https://doi.org/10.1063/2.1105205>.
- [43] Oh M, Kim SM, Park HD. Estimation of photovoltaic potential of solar bus in an urban area: Case study in Gwanak, Seoul, Korea. *Renew Energy* 2020;160:1335–48. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.048>.
- [44] Grandone M, Naddeo M, Marra D, Rizzo G. Development of a regenerative braking control strategy for hybridized solar vehicle. *IFAC-PapersOnLine* 2016;49:497–504. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.073>.
- [45] Harshavarthini S, Divya M, Bongarla R, Priya CH, Balaji R. A critical investigation on regenerative braking energy recovering system on HEV based on electric and natural extracted fuel. *Mater Today Proc* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.075>.
- [46] Rakov V. Determination of optimal characteristics of braking energy recovery system in vehicles operating in urban conditions. *Transportation Research Procedia* 2020;50:566–73. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.068>.
- [47] D. Popa, S. Parlac, C.M. Popa DMP. Regenerative braking in the case of hybrid propulsion systems. *EAEC MVT-2022 UPT Conference Center 2022:The 17th E*.
- [48] Mariani V, Rizzo G, Tiano FA, Glielmo L. A model predictive control scheme for regenerative braking in vehicles with hybridized architectures via aftermarket kits. *Control Eng Pract* 2022;123:105142. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105142>.
- [49] 7_DA_Procesul_rularii_rotii_de_autovehicul_n.d.
- [50] 11_DA_Definirea_conditiilor_de_autopropulsare_n.d.
- [51] Ion Tabacu, Ștefan Tabacu, Tiberiu Macarie EN. *Îndrumar de proiectare* Editura Universității din Pitești, 2004 2004.
- [52] Agarwal AK, Mustafi NN. Real-world automotive emissions: Monitoring methodologies, and control measures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021;137. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110624>.
- [53] Tutuianu M, Bonnel P, Ciuffo B, Haniu T, Ichikawa N, Marotta A, et al. Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transp Res D Transp Environ* 2015;40:61–75. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.011>.
- [54] Pavlovic J, Marotta A, Ciuffo B. CO2 emissions and energy demands of vehicles tested under the NEDC and the new WLTP type approval test procedures. *Appl Energy* 2016;177:661–70. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.110>.

- [55] Sileghem L, Bosteels D, May J, Favre C, Verhelst S. Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC. *Transp Res D Transp Environ* 2014;32:70–85. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.008>.
- [56] Maricq MM, Szente JJ, Harwell AL, Loos MJ. Impact of aggressive drive cycles on motor vehicle exhaust PM emissions. *J Aerosol Sci* 2017;113:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.07.005>.
- [57] Karagöz Y. Analysis of the impact of gasoline, biogas and biogas + hydrogen fuels on emissions and vehicle performance in the WLTC and NEDC. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:31621–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.019>.
- [58] Pavlovic J, Ciuffo B, Fontaras G, Valverde V, Marotta A. How much difference in type-approval CO₂ emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transp Res Part A Policy Pract* 2018;111:136–47. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.02.002>.
- [59] Dong H, Fu J, Zhao Z, Liu Q, Li Y, Liu J. A comparative study on the energy flow of a conventional gasoline-powered vehicle and a new dual clutch parallel-series plug-in hybrid electric vehicle under NEDC. *Energy Convers Manag* 2020;218. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113019>.
- [60] Laurén M, Goswami G, Tupitsina A, Jaiswal S, Lindh T, Sapanen J. General-Purpose and Scalable Internal-Combustion Engine Model for Energy-Efficiency Studies. *Machines* 2022;10. <https://doi.org/10.3390/machines10010026>.
- [61] Gözen E, Çevirgen MS, Özgül E. Transmission speed and ratio optimization for heavy-duty electric truck. *Heliyon* 2022;8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10028>.
- [62] Yakhshilikova G, Ruzimov S, Ezemobi E, Tonoli A, Amati N. Development of Optimization Based Control Strategy for P2 Hybrid Electric Vehicle including Transient Characteristics of Engine. *Applied Sciences (Switzerland)* 2022;12. <https://doi.org/10.3390/app12062852>.
- [63] Salamone S, Lenzo B, Lutzemberger G, Bucchi F, Sani L. On the investigation of energy efficient torque distribution strategies through a comprehensive powertrain model. *Sustainability (Switzerland)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/su13084549>.
- [64] Nassar MY, Shaltout ML, Hegazi HA. Multi-objective optimum energy management strategies for parallel hybrid electric vehicles: A comparative study. *Energy Convers Manag* 2023;277. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116683>.
- [65] Same A, Stipe A, Grossman D, Park JW. A study on optimization of hybrid drive train using Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR). *J Power Sources* 2010;195:6954–63. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.03.057>.
- [66] Estrada PM, de Lima D, Bauer PH, Mammetti M, Bruno JC. Deep learning in the development of energy Management strategies of hybrid electric Vehicles: A hybrid modeling approach. *Appl Energy* 2023;329:120231. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120231>.
- [67] Rakha HA, Ahn K, Moran K, Saerens B, den Bulck E Van. Virginia Tech Comprehensive Power-Based Fuel Consumption Model: Model development and testing. *Transp Res D Transp Environ* 2011;16:492–503. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.008>.
- [68] Robbio R De, Cameretti MC, Mancaruso E. Investigation by modelling of a plug-in hybrid electric commercial vehicle with diesel engine on WLTC. *Fuel* 2022;317. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123519>.
- [69] Zhang C, Kotz A, Kelly K, Rippelmeyer L. Development of heavy-duty vehicle representative driving cycles via decision tree regression. *Transp Res D Transp Environ* 2021;95. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102843>.
- [70] Lekshmi S, Lal LP. Mathematical modeling of Electric vehicles - A survey. *Control Eng Pract* 2019;92. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104138>.
- [71] Liu Z, Liu S, Zheng T. The influence of NEDC and CATC type approval test procedure on the E-range of battery electric vehicles. *Energy Reports* 2022;8:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.004>.
- [72] Sayed K, Kassem A, Saleeb H, Alghamdi AS, Abo-Khalil AG. Energy-saving of battery electric vehicle powertrain and efficiency improvement during different standard driving cycles. *Sustainability (Switzerland)* 2020;12:1–26. <https://doi.org/10.3390/su122410466>.
- [73] Tian X, Cai Y, Sun X, Zhu Z, Xu Y. A Novel Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Buses Based on Model Predictive Control and Estimation of Distribution Algorithm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2022;27:4350–61. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3156150>.
- [74] Birnie DP. Analysis of energy capture by vehicle solar roofs in conjunction with workplace plug-in charging. *Solar Energy* 2016;125:219–26. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.014>.
- [75] Sagaria S, Duarte G, Neves D, Baptista P. Photovoltaic integrated electric vehicles: Assessment of synergies between solar energy, vehicle types and usage patterns. *J Clean Prod* 2022;348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131402>.
- [76] Gallagher J, Clarke S. Energy efficient route prediction for solar powered vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation* 2023;2. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100063>.
- [77] Pettersson P, Jacobson B, Bruzelius F, Johannesson P, Fast L. Intrinsic differences between backward and forward vehicle simulation models. *IFAC-PapersOnLine* 2020;53:14292–9. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1368>.
- [78] Soldo J, Cvok I, Deur J. Optimal Control of a PHEV Based on Backward-Looking Model Extended with Powertrain Transient Effects. *Energies (Basel)* 2022;15:8152. <https://doi.org/10.3390/en15218152>.

- [79] Settey T, Gnap J, Synák F, Skrúčaný T, Dočkalík M. Research into the impacts of driving cycles and load weight on the operation of a light commercial electric vehicle. *Sustainability (Switzerland)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/su132413872>.
- [80] Vehicle Energy Consumption calculation TOol - VECTO 2023.
- [81] J.Y. W. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons; 1978.
- [82] Peng J, Liu D, Parnell J, Kessissoglou N. Influence of translational vehicle dynamics on heavy vehicle noise emission. *Science of the Total Environment* 2019;689:1358–69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.426>.
- [83] Tabacu S, Popa D. Backward-Facing Analysis for the Preliminary Estimation of the Vehicle Fuel Consumption. *Sustainability (Switzerland)* 2023;15:1–13. <https://doi.org/10.3390/su15065344>.
- [84] Jeong J, Choi J, Seo H, Park Y-I, Cha SW. Analysis of Fuel Economy and Battery Life depending on the Types of HEV using Dynamic Programming n.d.
- [85] Bellis V De, Malfi E, Zaccardi JM. Development of an efficient thermal electric skipping strategy for the management of a series/parallel hybrid powertrain. *Energies (Basel)* 2021;14. <https://doi.org/10.3390/en14040889>.
- [86] Zeng Y, Huang Z, Cai Y, Liu Y, Xiao Y, Shang Y. A control strategy for driving mode switches of plug-in hybrid electric vehicles. *Sustainability (Switzerland)* 2018;10:1–19. <https://doi.org/10.3390/su10114237>.
- [87] Yang G, Xu H, Wang Z, Tian Z. Truck acceleration behavior study and acceleration lane length recommendations for metered on-ramps. *International Journal of Transportation Science and Technology* 2016;5:93–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2016.09.006>.
- [88] André M. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of the Total Environment* 2004;334–335:73–84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.070>.
- [89] Directiva 96-53-CE a Consiliului din 25 iulie 1996 2010;40:1–89.
- [90] UE D, Europeana. Directiva UE 2015-719 Dimensiuni si Greutati in SEE. vol. 2014. 2015.
- [91] Commission THEE. Commission Regulation EU 2017-2400 of 12 December 2017 2017.
- [92] Hariram A, Koch T, Mårdberg B, Kyncl J. A study in options to improve aerodynamic profile of heavy-duty vehicles in Europe. *Sustainability (Switzerland)* 2019;11. <https://doi.org/10.3390/su11195519>.
- [93] Time UP, Savings WE. DAF Paccar MX-11 engines --- EPA 2021 2021:2021–2.
- [94] Catalytic S. DAF - PACCAR MX-11 engines. n.d.
- [95] Rupp M, Schulze S, Kuperjans I. Comparative life cycle analysis of conventional and hybrid heavy-duty trucks. *World Electric Vehicle Journal* 2018;9. <https://doi.org/10.3390/wevj9020033>.
- [96] D. Popa, I.V. Tudor, C.M. Popa DMP. Numerical and experimental results obtained from the study of the mechanical coupling systems of the power sources. EAEC MVT-2022 UPT Conference Center 2022;The 17th E.
- [97] Zhou M, Jin H, Ding F. Minimizing vehicle fuel consumption on hilly roads based on dynamic programming. *Advances in Mechanical Engineering* 2017;9. <https://doi.org/10.1177/1687814017694116>.
- [98] Shen D, Bensch V, Müller S. Model predictive energy management for a range extender hybrid vehicle using map information. *IFAC-PapersOnLine* 2015;28:263–70. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.038>.
- [99] Meneghetti A, Dal Magro F, Romagnoli A. Renewable energy penetration in food delivery: Coupling photovoltaics with transport refrigerated units. *Energy* 2021;232:120994. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120994>.
- [100] Teichert O, Link S, Schneider J, Wolff S, Lienkamp M. Techno-economic cell selection for battery-electric long-haul trucks. *ETransportation* 2023;16:100225. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100225>.
- [101] Gao Z, Smith DE, Stuart Daw C, Dean Edwards K, Kaul BC DN. The evaluation of developing vehicle technologies on the fuel economy of long-haul trucks. *Energy Convers Manag* 2015;106:766–81.
- [102] Anselma PG BG. Fuel cell electrified propulsion systems for long-haul heavy-duty trucks: present and future cost-oriented sizing. *Appl Energy* 2022:321.
- [103] Aletras N, Broekaert S, Bitsanis E, Fontaras G, Samaras Z NL. Energy management algorithm based on average power demand prediction for plug-in hybrid electric trucks. *Energy Convers Manag* 2024:299.
- [104] ABB partners with First Mode to power fleet of zero-emission mining haulage trucks n.d. <https://new.abb.com/news/detail/102975/abb-partners-with-first-mode-to-power-fleet-of-zero-emission-mining-haulage-trucks> (accessed June 3, 2024).
- [105] World's largest EV never has to be recharged n.d. https://www.greencarreports.com/news/1124478_world-s-largest-ev-never-has-to-be-recharged (accessed June 3, 2024).
- [106] Sagaria S, Duarte G, Neves D BP. Photovoltaic integrated electric vehicles: Assessment of synergies between solar energy, vehicle types and usage patterns. *J Clean Prod* 2022:348.
- [107] Gözen E, Çevirgen MS ÖE. Transmission speed and ratio optimization for heavy-duty electric truck 2022:8.
- [108] Aroua A, Lhomme W, Redondo-Iglesias E VF. Fuel saving potential of a long haul heavy duty vehicle equipped with an electrical variable transmission. *Appl Energy* 2022:307.

- [109] Teichert O, Link S, Schneider J, Wolff S, Lienkamp M. Techno-economic cell selection for battery-electric long-haul trucks. *ETransportation* 2023;16. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100225>.
- [110] The European Parliament and The Council. Regulation (EU) 2019/1242: Setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC. n.d. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1242/oj> (accessed June 3, 2024).
- [111] Moghadasi S, Long Y, Jiang L, Munshi S, McTaggart-Cowan G SM. Design and performance analysis of hybrid electric class 8 heavy-duty regional-haul trucks with a micro-pilot natural gas engine in real-world highway driving conditions. *Energy Convers Manag* 2024:309.
- [112] Rupp M, Schulze S KI. Comparative life cycle analysis of conventional and hybrid heavy-duty trucks. *World Electric Vehicle Journal* 2018:9.
- [113] Röck M, Rexeis M, HS. JEC Tank-To-Wheels report v5: Heavy duty vehicles. n.d.
- [114] Röck M, Rexeis M, Hausberger S. JEC Tank-To-Wheels report v5: Heavy duty vehicles n.d.
- [115] DP. B. Analysis of energy capture by vehicle solar roofs in conjunction with workplace plug-in charging. *Solar Energy* 2016:125:219–26.
- [116] Energy R. Range Trailer - Refrigerated n.d. <https://range.energy/product/refrigerated-trailer/> (accessed June 3, 2024).
- [117] 2019/1242 TEP and TCouncilR (EU). Setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC n.d.
- [118] Panagiotou P, Tsavidis I, Yakinthos K. Conceptual design of a hybrid solar MALE UAV. *Aerosp Sci Technol* 2016;53:207–19. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.03.023>.
- [119] D. Popa DMP. Sistem de propulsie hibridă pentru o navă de dimensiuni medii. *TUIASI 2021* 2021.
- [120] Glykas A, Papaioannou G, Perissakis S. Application and cost-benefit analysis of solar hybrid power installation on merchant marine vessels. *Ocean Engineering* 2010;37:592–602. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.01.019>.
- [121] Tang R, Wu Z, Fang Y. Configuration of marine photovoltaic system and its MPPT using model predictive control. *Solar Energy* 2017;158:995–1005. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.025>.
- [122] Xing H, Spence S, Chen H. A comprehensive review on countermeasures for CO2 emissions from ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020;134:110222. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110222>.
- [123] Yuan Y, Wang J, Yan X, Li Q, Long T. A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship. *Energy* 2018;165:965–78. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.085>.
- [124] Tang R, Li X, Lai J. A novel optimal energy-management strategy for a maritime hybrid energy system based on large-scale global optimization. *Appl Energy* 2018;228:254–64. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.092>.
- [125] Lan H, Wen S, Hong YY, Yu DC, Zhang L. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system. *Appl Energy* 2015;158:26–34. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.031>.
- [126] Kalikatzarakis M, Geertsma RD, Boonen EJ, Visser K, Negenborn RR. Ship energy management for hybrid propulsion and power supply with shore charging. *Control Eng Pract* 2018;76:133–54. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.04.009>.
- [127] Yuan Y, Wang J, Yan X, Shen B, Long T. A review of multi-energy hybrid power system for ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020;132:110081. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110081>.

ANEXA I. CALIBRARE

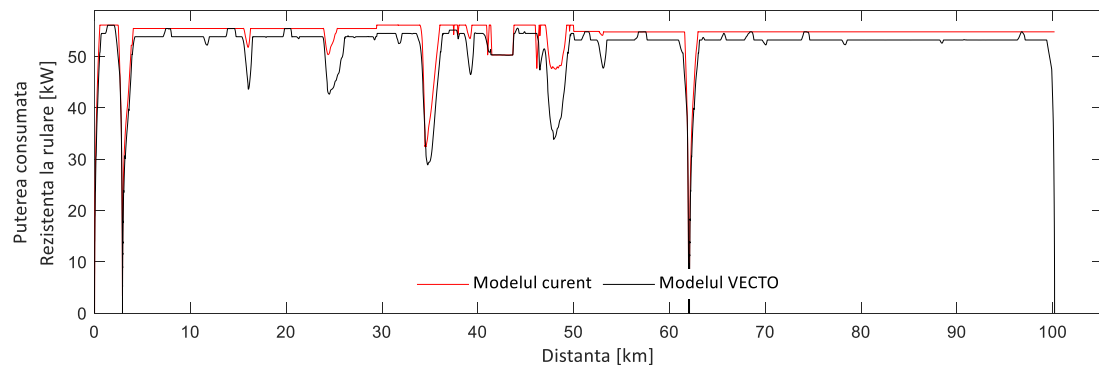


Figura I.1. Date de calibrare. Rezistența la rulare

ANEXA II. ALGORITMUL DE CALCUL

E00: **user data (input)**
E01: **vehicle data**
E02: **conventional vehicle:** $P_{max,ice}$, W , η_{tr} , f , CDA
E03: **hybrid (motor and battery pack):** $P_{eu,m}$, η_{emt} , BW_{nom} , A_{nom} , V_{nom} , $SOC_{\%}$
E04: **photovoltaic panels array:** n_{pv} , $P_{nom,pv}$, $V_{in,pv}$, CF_{pv}
E05: **road data:** s , v , p
E06: **initial state**
hev (on/off)
pev (on/off)
brake off