

www.hrzz.hr



www.fsb.hr/acg



Integracija električnih vozila u elektroenergetske sustave s visokim udjelom obnovljivih izvora energije

Branimir Škugor, Joško Deur

Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Okrugli stol „Ovovremeni izazovi u energetici”

Zagreb; 24. travnja, 2017

Acknowledgment / Zahvala

*The project is supported by the **Croatian Science Foundation***

*The data and technical support by **Konzum, d.d.** is gratefully acknowledged, as well*

Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke iznesene u ovoj prezentaciji označavaju mišljenje predavača i ne reflektiraju nužno stajališta HRZZ-a

i-RESEV

ICT-aided integration of Electric Vehicles into the Energy Systems with a high share of Renewable Energy Sources



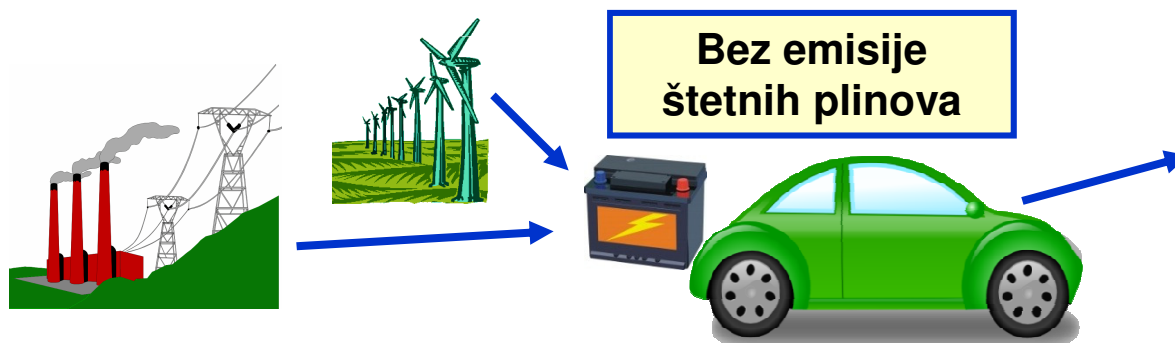
MOTIVACIJA - Uvođenje električnih vozila

PREDNOSTI

- Smanjenje potrošnje fosilnih goriva.
- Smanjenje emisije stakleničkih plinova
- Manji utjecaj na okoliš
- Niži operativni troškovi
- Tiši transport
- Proliferacija obnovljivih izvora energije
- Poravnanje opterećenja mreže

NEDOSTACI

- Dugo trajanje punjenja
- Ograničen domet
- Veliki investicijski troškovi
- Nedostatak infrastrukture za punjenje
- U slučaju nekoordiniranog punjenja mogu dovesti do preopterećenja mreže



Elektro-energetski sustav

- *P* po jedinici: 64.000 kW
- Ukupno: 602 GW
- U upotrebi: 57%
- Vrijeme odziva: min-h
- Životni vijek : ~100.000 h

Prikladan za
kvazi-stacionarni
radni režim

Veliki izvor
zagađenja

Transportni sustav

- *P* po jedinici: 111 kW
- Ukupno: 19.500 GW
- U upotrebi: 4%
- Vrijeme odziva: sec
- Životni vijek: 3.000 h

■ Modeliranje i optimiranje punjenja flote EV - podaktivnosti

**ISPITIVANJE
ISPLATIVOSTI
ELEKTRIFIKACIJE
FLOTE VOZILA**



**Modeliranje i
optimiranje
punjenja flote
električnih vozila**

**UPRAVLJANJE
PUNJENJEM
FLOTE U
REALNOM
VREMENU**

POJEDINAČNO VOZILO

**Modeliranje
pojedinačnog PHEV/EV**

**Dizajn PHEV/EV
realistične upravljačke
strategije**

**Optimiranje parametara
realistične upravljačke
strategije**

**Optimiranje PHEV/EV
upravljačkih varijabli**

VOZNI CIKLUSI

**Prikupljanje i analiza
voznih ciklusa**

Sinteza voznih ciklusa

**Verifikacija sintetičkih
voznih ciklusa**

FLOTA VOZILA

Modeliranje flote EV

**Parametriranje modela
flote EV**

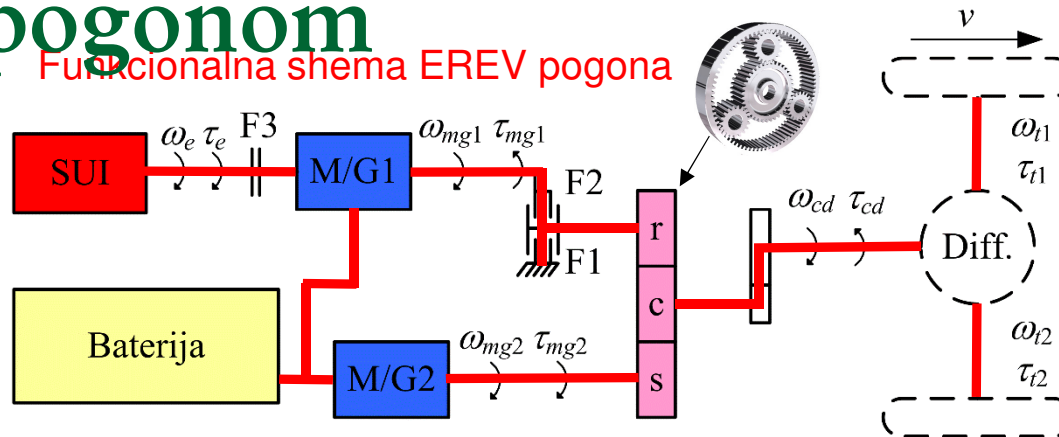
**Optimiranje punjenja
flote EV**

Validacija modela flote

Modeliranje i upravljanje EREV

pogonom

Funkcionalna shema EREV pogona



EREV GM Chevrolet Volt

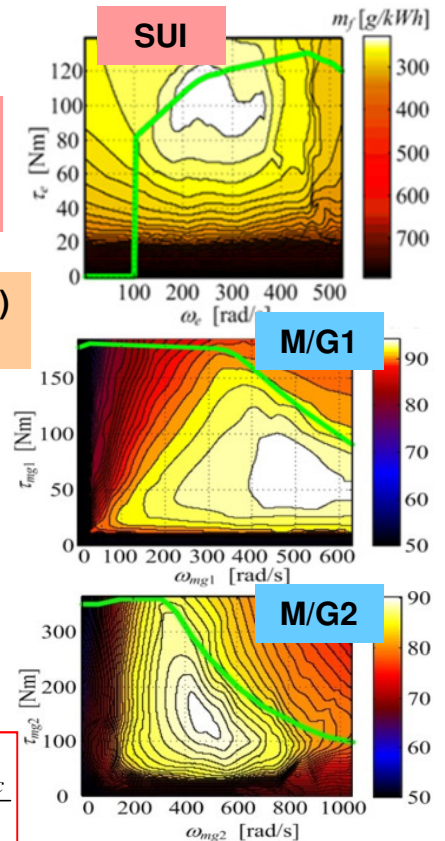
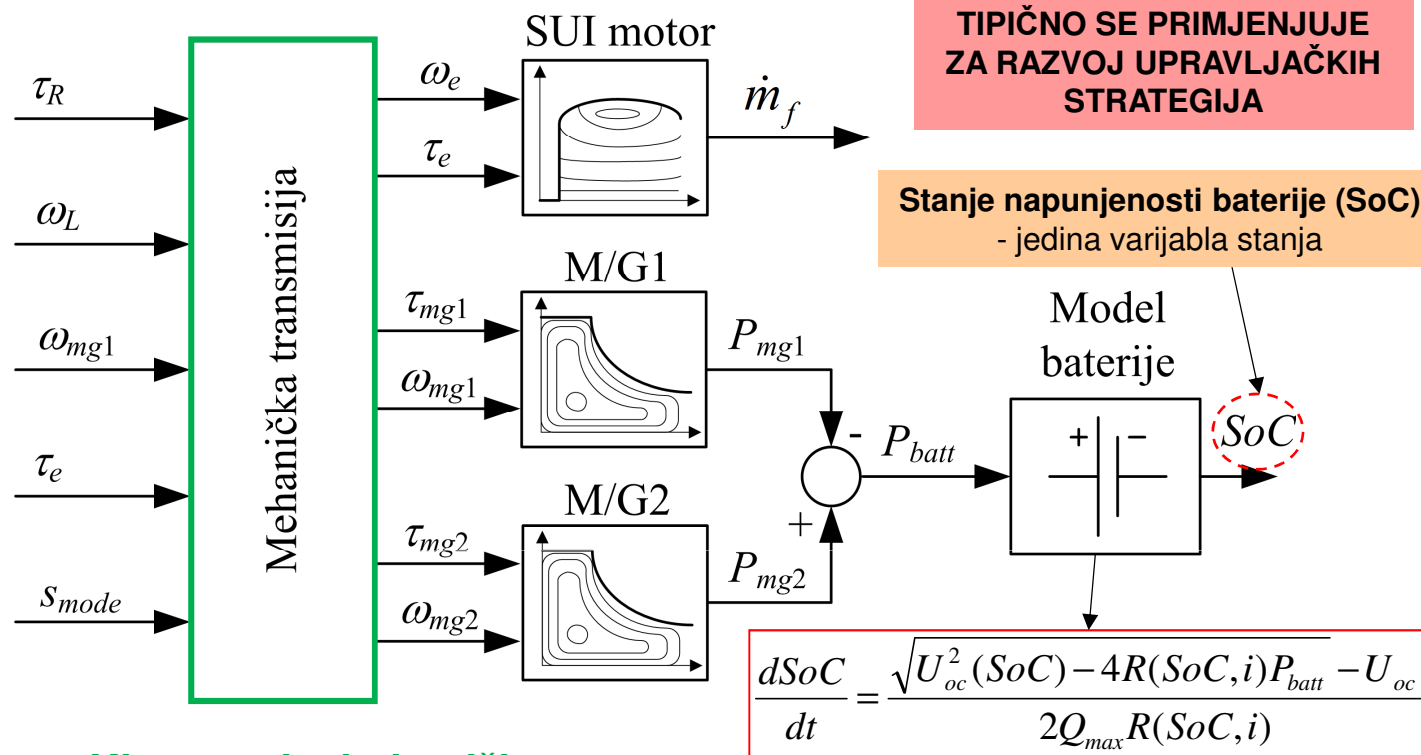
Ovisno o stanjima spojki postoje 4 osnovna načina rada

NAČIN RADA	F1	F2	F3	Režim	Dijeljenje snage	s_{mode}
EV	1	0	0	CD	NE	0
SHEV	1	0	1	CS	NE	3
TMEV	0	1	0	CD	DA	1
SPHEV	0	1	1	CS	DA	2

Osnovni parametri:

- 80km: EV;
- 560km: HEV
- 16 kWh Li-Ion

Kvazistatički model EREV pogona



Kinematske jednadžbe pogona

NAČIN RADA	s_{mode}	ω_e	τ_{mg1}	ω_{mg2}	τ_{mg2}
EV	0	0	0	$i_o(h+1)\omega_L$	$\frac{1}{i_o(h+1)}(\underbrace{\frac{P_0(\omega_L)}{\omega_L} + \frac{\tau_R}{\eta_{mi}(\tau_R)}}_{\tau_{cd}})$
SHEV	3	ω_{mg1}	$-\tau_e$		
SPHEV	2	ω_{mg1}	$h\tau_{mg2}-\tau_e$	$i_o(h+1)\omega_L-h\omega_{mg1}$	
TMEV	1	0	$h\cdot i_o^{-1}(h+1)^{-1}\cdot\tau_{cd}$		

L. Guzzella, A. Sciarretta, "Vehicle Propulsion Systems - Introduction to Modeling and Optimization 2nd ed.", 2007.

Deur et al, "Modeling and Low-level Control of Range Extended Electric Vehicle Dynamics", 2012.

■ Optimiranje upravljačkih varijabli EREV pogona

Opći problem optimiranja

Cilj: minimizacija potrošnje goriva uz uvjet održanja SoC-a ($SoC_{init} = SoC_{end}$)

$$J = \sum_{k=0}^{N_t-1} F(\mathbf{x}_{k+1}, \mathbf{u}_k, k)$$

Kumulativna kriterijska funkcija

Upravljačke varijable $\mathbf{u} = [\omega_{mg1} \ \tau_e \ s_{mode}]^T$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, k)$$

Jednadžba stanja

Varijabla stanja $\mathbf{x} = \text{SoC}$

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}_{\max}, \quad \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x}_k \leq \mathbf{x}_{\max}$$

Ograničenja na upravljačke varijable i varijable stanja

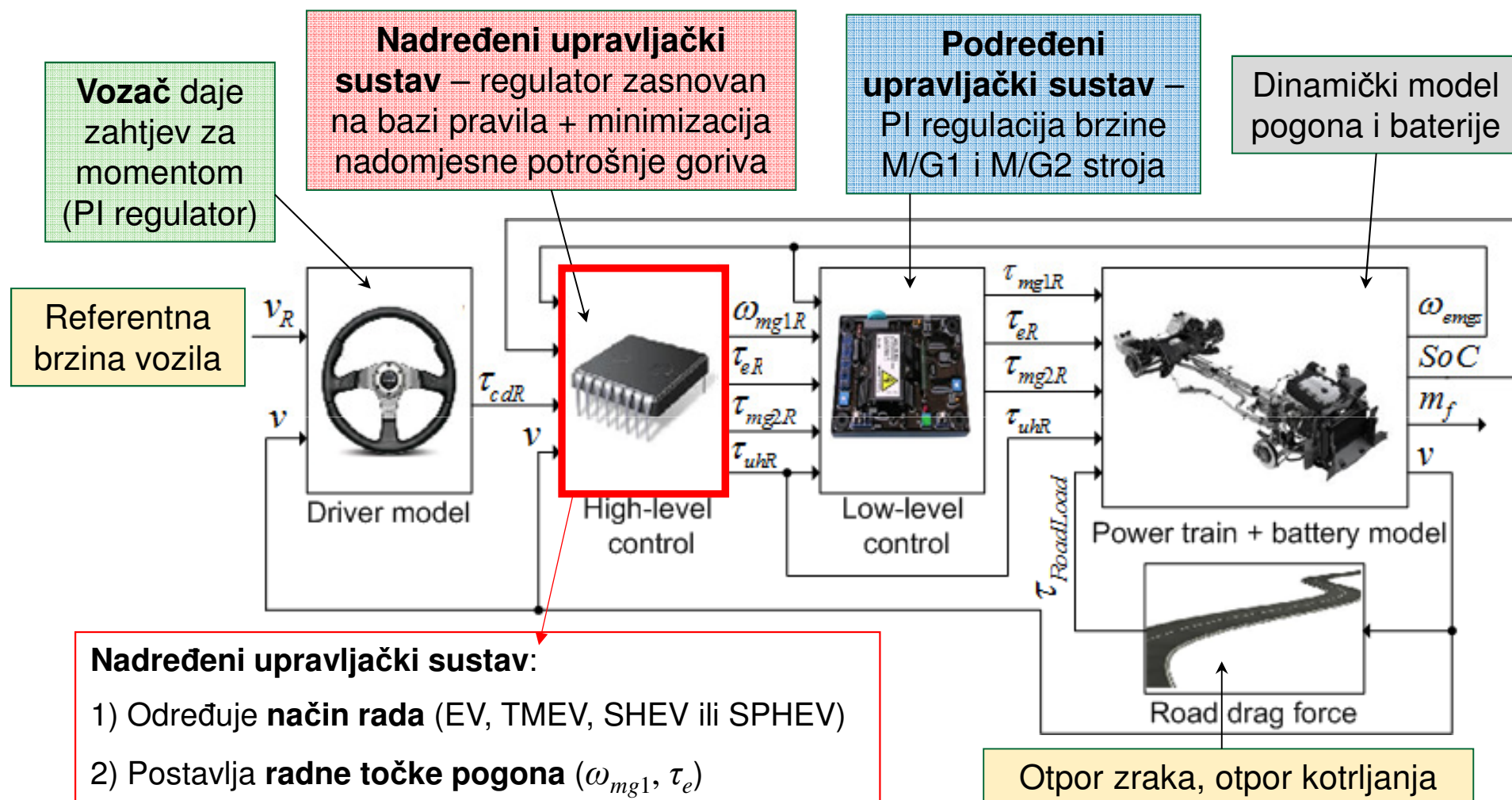
Ograničenja na upravljačke varijable definirana su krivuljama maksimalnog momenta

Problem optimiranja rješava se **dinamičkim programiranjem** (DP) koji rezultira **globalno optimalnim rezultatima**

Verifikacija realističnih upravljačkih strategija

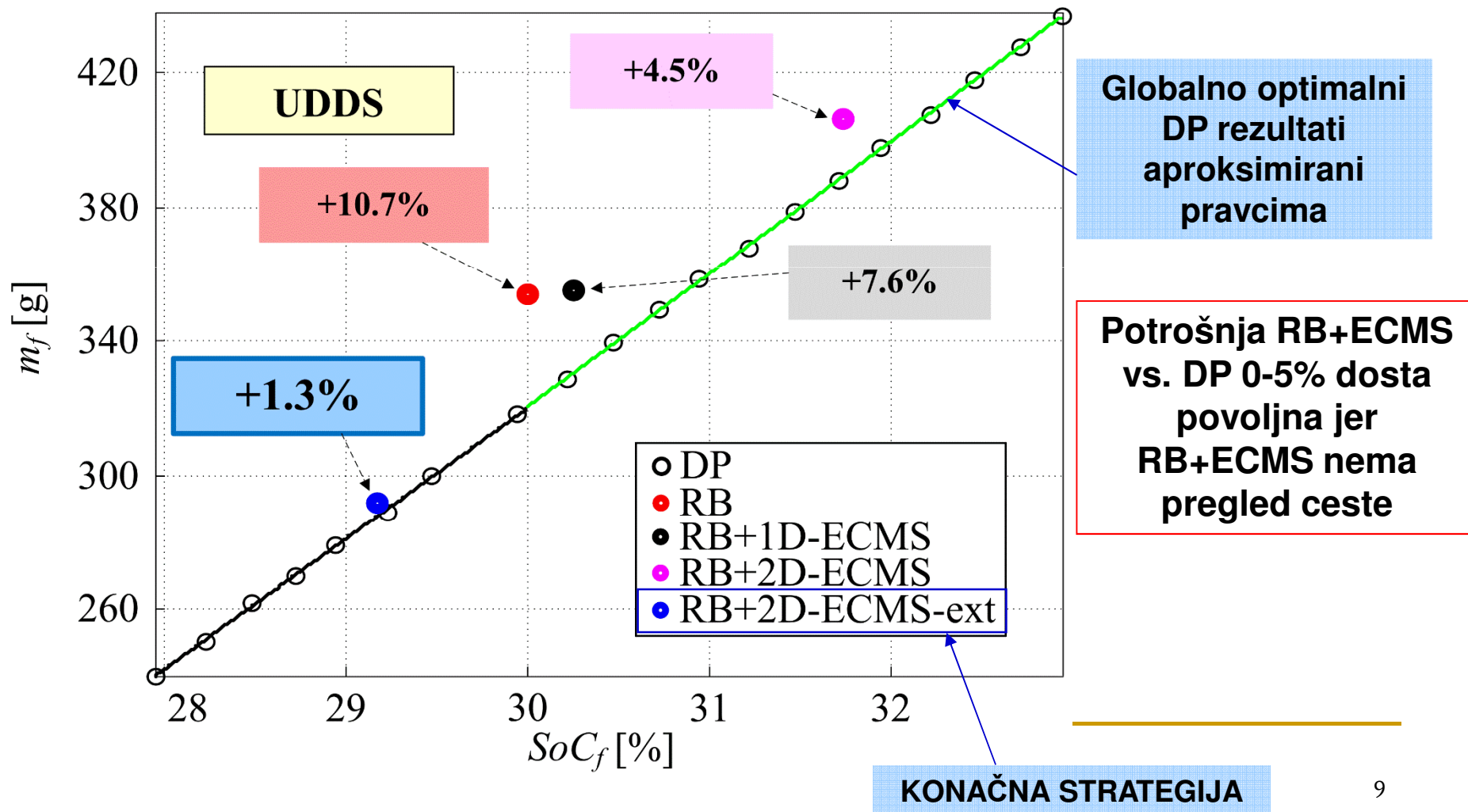
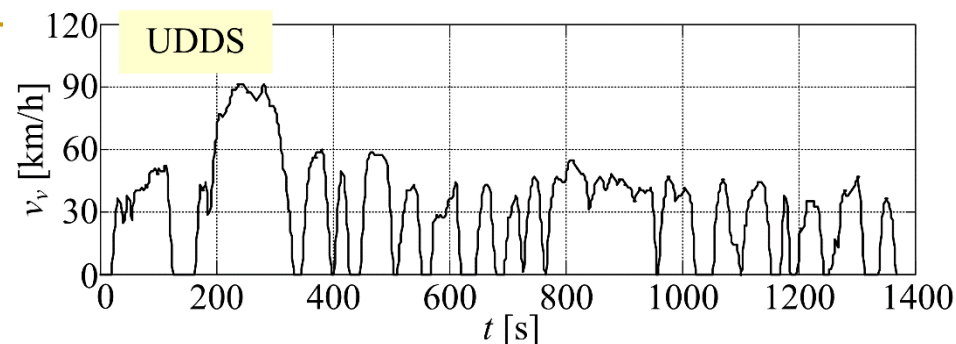
Uvid u optimalne značajki rada pogona

■ Realistična upravljačka strategija pogona



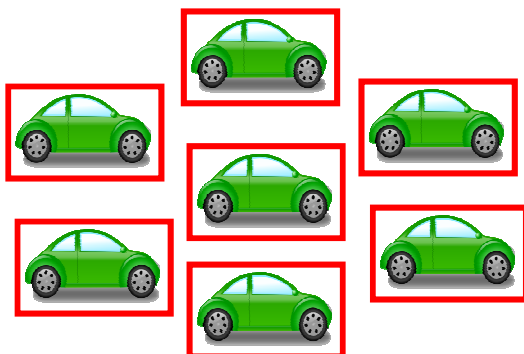
■ Simulacijski rezultati CS režim rada

VERIFIKACIJA UPRAVLJAČKIH STRATEGIJA



Modeliranje i optimiranje punjenja EV

**Modeliranje flote
zasnovano na agentima**

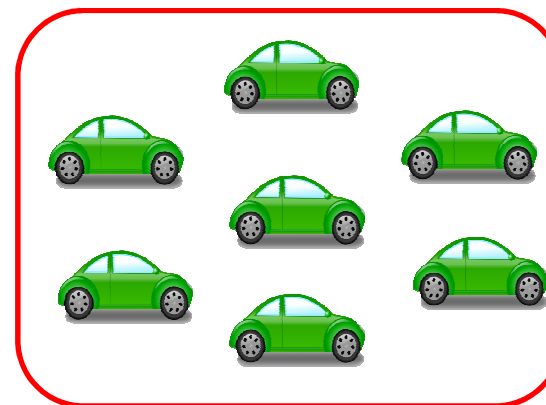


**Svako električno vozilo unutar
flote modelira se zasebno**



**Računalno neučinkovit, precizniji,
pogodan za verifikaciju
agregatnih modela baterije**

**Agregatni pristup
modeliranju flote vozila**



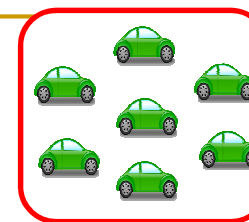
**Sva električna vozila modeliraju se
kao jedna agregatna baterija**



**Računalno učinkovit, pogodan za
za korištenje u studijama
energetskog planiranja**

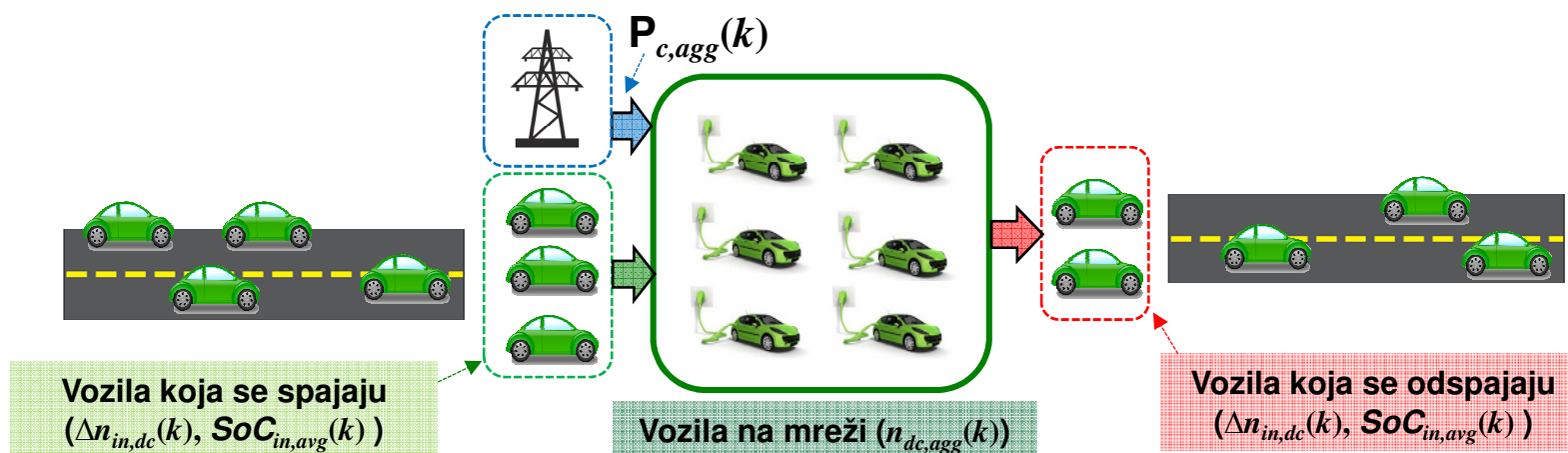
■ Agregatni model flote EV

- Jedna varijabla stanja (SoC_{agg}), jedna upravljačka varijabla ($P_{c,agg}$)



Jednadžba stanja

$$SoC_{agg}(k+1) = SoC_{agg}(k) + \underbrace{SoC_{in,avg}(k) \frac{\Delta n_{in,dc}(k)}{N_v}}_{\text{POVEĆANJE SoC-a}} + \underbrace{\eta_{ch} \frac{P_{c,agg}(k) \Delta T}{E_{max,agg}}}_{\text{PUNJENJE}} - \underbrace{SoC_{out,avg} \frac{\Delta n_{out,dc}(k)}{N_v}}_{\text{SMANJENJE SoC-a}}$$



Ograničenje na SoC

$$0 \leq SoC_{agg,min} \leq SoC_{agg}(k) \leq SoC_{agg,max}(k) = \frac{n_{dc,agg}(k)}{N_v} \leq 1$$

Parametriranje modela - prikupljanje podataka

Flota dostavnih vozila



UZORAK: Deset reprezentativnih vozila

MAN TGM 15.240



SNIMLJENI PODACI

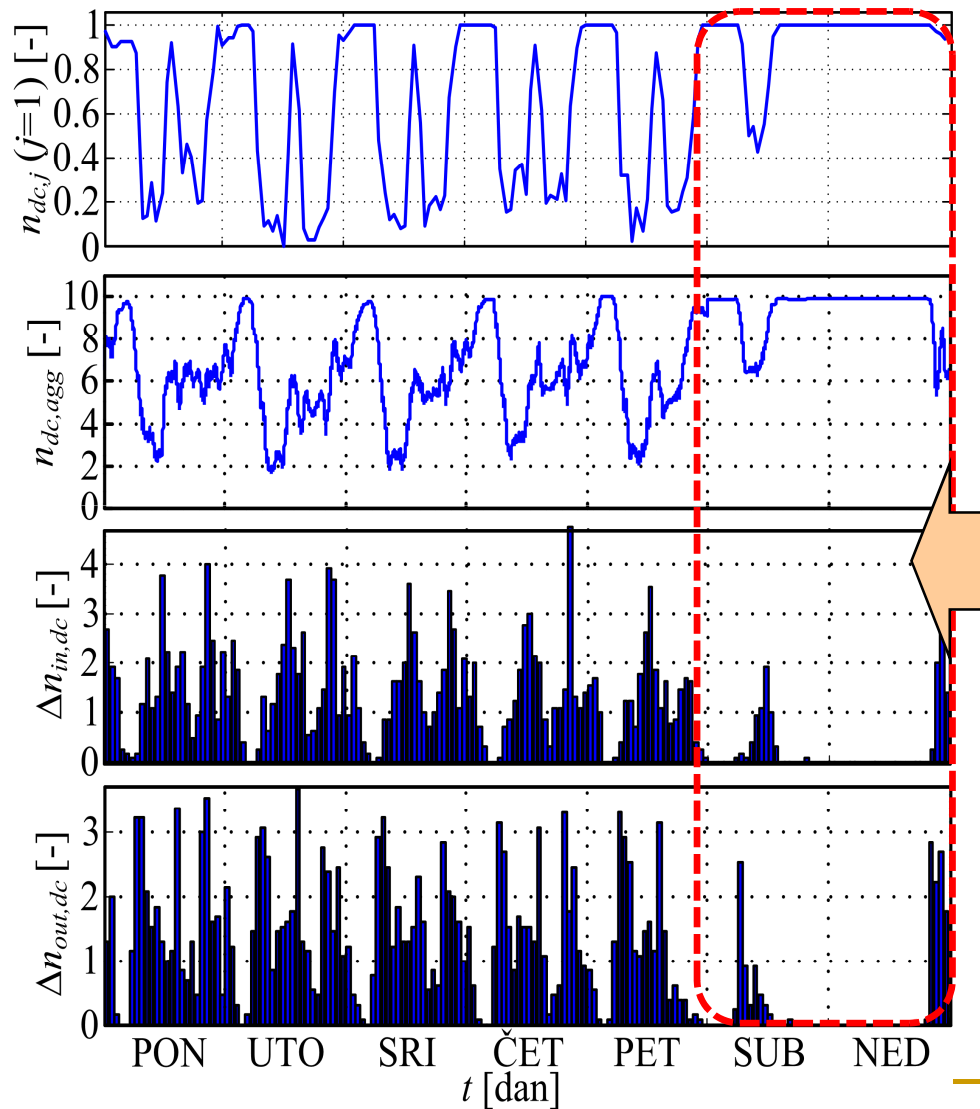
- 1) ID broj vozila,
- 2) Vrijeme: datum:sat:minuta:sekunda
- 3) Geografska (GPS X koordinata) duljina u stupnjevima
- 4) Geografska (GPS Y koordinata) širina u stupnjevima
- 5) Nadmorska visina [m],
- 6) Brzina vozila [km/h],
- 7) Brzina SUI motora [rpm],
- 8) Kumulativna potrošnja goriva [L].

GPS podaci

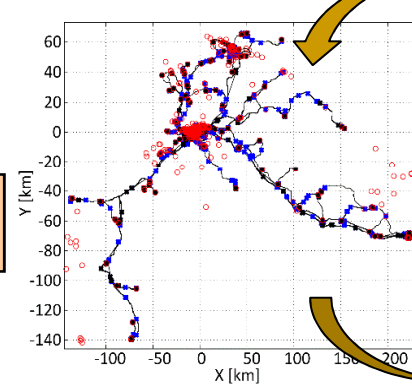
CAN podaci

- **Vozni podaci** snimani su tijekom perioda od **3 mjeseca** (91 dan) korištenjem namjenske **GPS opreme** ugrađene u vozila i **bežičnog prijenosa** podataka temeljenog na **GPRS tehnologiji**
- **Vrijeme uzorkovanja** postavljeno je na **1 sekundu**, a **rezolucija mjerenja brzine vozila** iznosi **0.1 km/h**

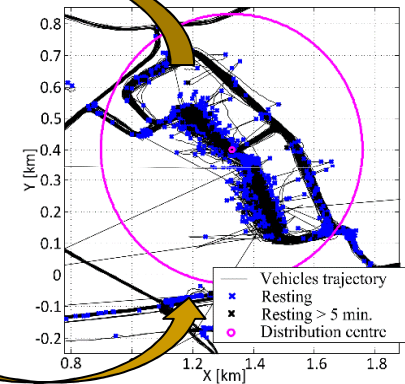
■ Parametriranje modela – parkiranost vozila



SNIMLJENE
PUTANJE VOZILA



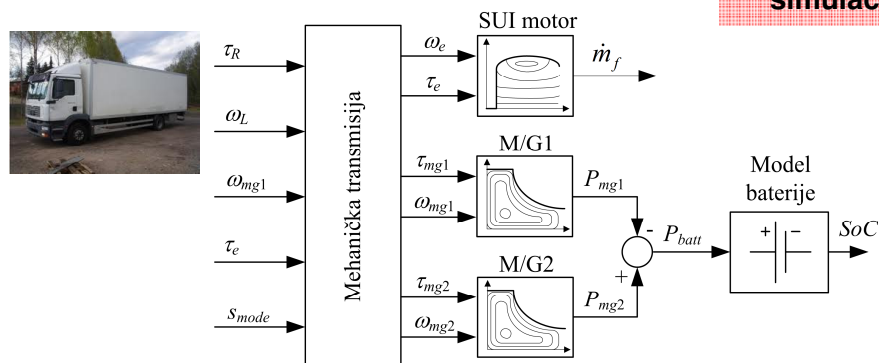
KOORDINATE
DISTRIBUTIVNOG CENTRA



**HIPOTETSKA ELEKTRIČNA VOZILA BI
SE PUNILA U DISTRIBUTIVNOM CENTRU**

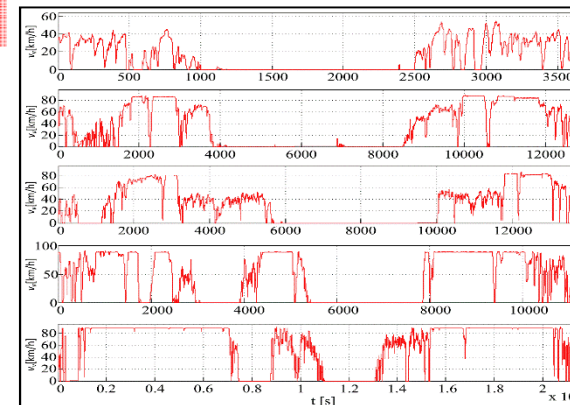
■ Parametriranje modela – zahtjev za energijom

Kvazistatički model EREV vozila +
upravljačka strategija RB+ECMS



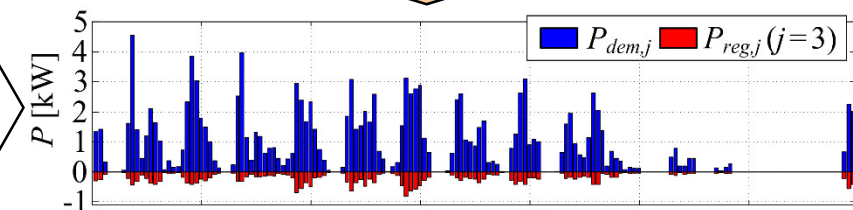
SoC na početku svake
simulacije postavljen u 1

Snimljeni vozni ciklusi (≈2400)

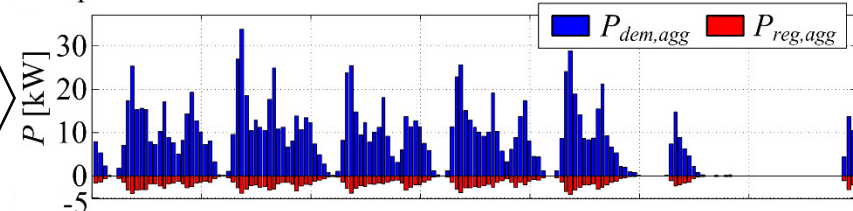


Simulacija

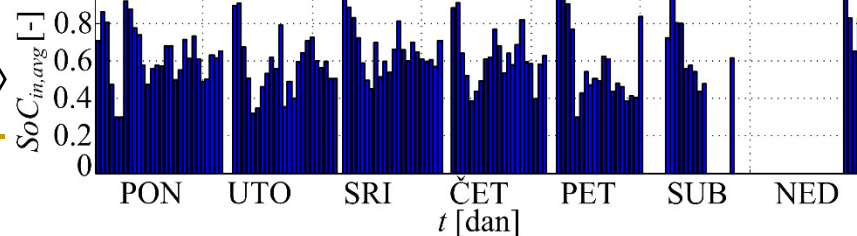
Razdioba regenerativnog
kočenja i zahtjeva za
snagom pojedinačnog EV



Razdioba agregatne snage
regenerativnog kočenja i
zahtjeva za snagom

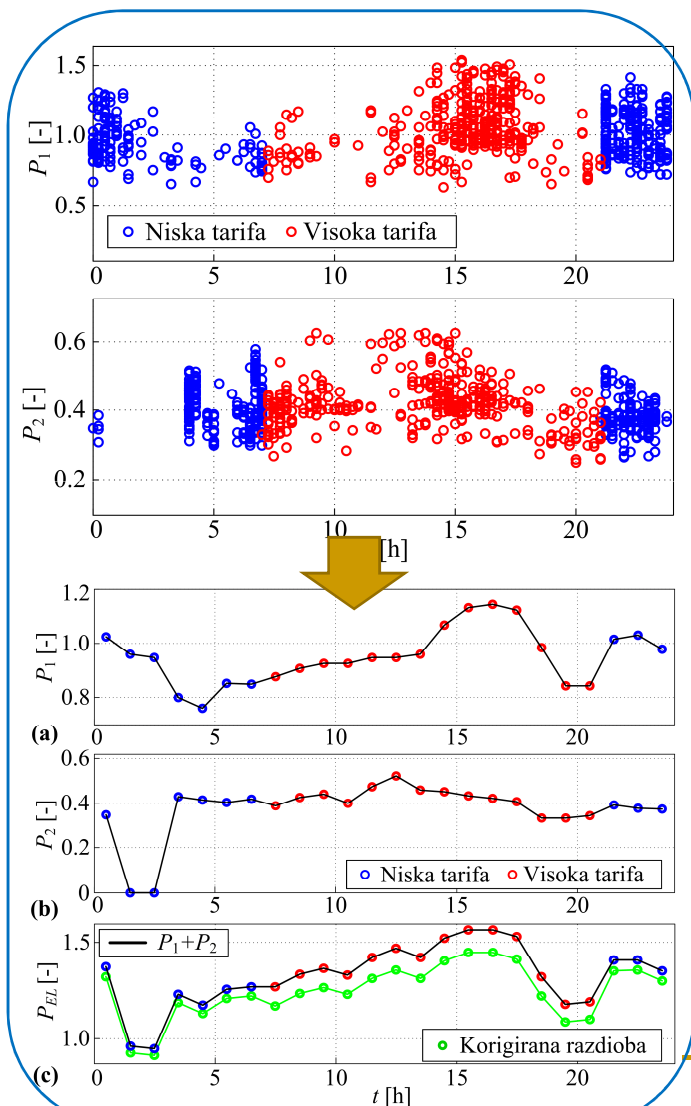


Razdioba prosječnog SoC-a
vozila koja dolaze u DC

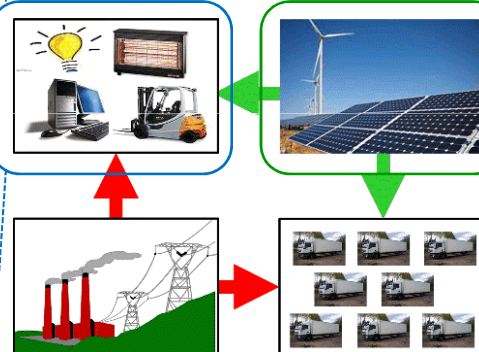


PRERAČUNATO NA
SATNU VREMENSKU
BAZU

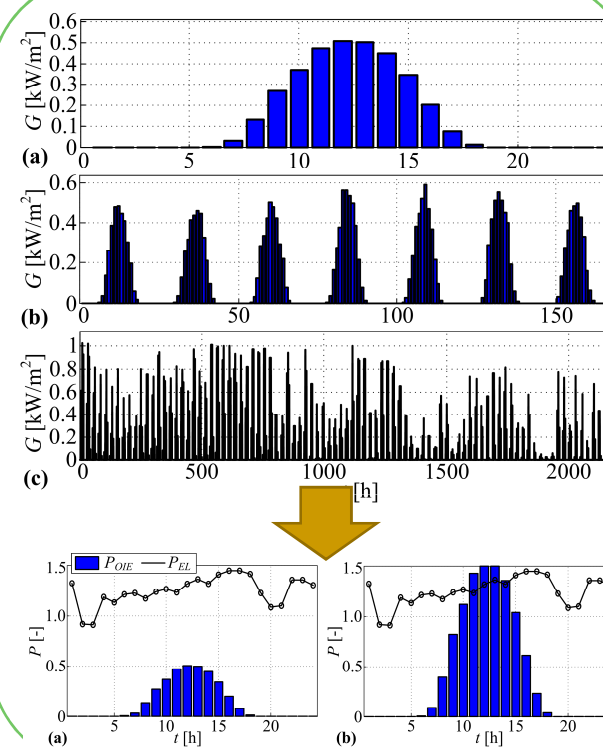
DP optimiranje punjenja EV flote



Razdioba globalne
Sunčeve iradijacije
dobivena iz **Meteonorm**
programa za lokaciju
distributivnog centra



Razdioba potrošnje električne
energije u distributivnom centru
dobivena na temelju podataka o
vršnim snagama i potrošenoj
energiji snimljenih tijekom
perioda od 1 godine



Razdioba hipotetske proizvodnje
električne energije iz solarnih
panela dobivena iz Sunčeve
iradijacije i pretpostavljene
instalirane površine te korisnosti
solarnih panela

■ Formulacija problema optimiranja

Optimiranje punjenja flote

$$x = SoC_{agg} \quad [SoC_{agg,min}, SoC_{agg,max}] \quad N_x = N_{soc}$$

$$u = P_{c,agg} \quad [P_{c,agg,min}, P_{c,agg,max}] \quad N_u = N_{control}$$

Broj diskretnih vrijednosti **varijable stanja** i **upravljačke varijable**

Opći optimizacijski problem

$$J = \sum_{k=0}^{N_t-1} F(\mathbf{x}_{k+1}, \mathbf{u}_k, k)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, k)$$

$$\mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}_{max},$$

$$\mathbf{x}_{min} \leq \mathbf{x}_k \leq \mathbf{x}_{max}$$

$$F(SoC_{agg}(k+1), P_{grid}(P_{c,agg}(k), k), k) = C_{el}(k) \frac{P_{grid}(P_{c,agg}(k), k) \Delta T}{1000}$$

Minimizacija cijene električne energije iz mreže

Penalizacija ograničenja

$$\begin{aligned} & +K_{g1} \{H^-(SoC_{agg}(k+1) - SoC_{agg,min}) + H^-(SoC_{agg,max} - SoC_{agg}(k+1))\} \\ & +K_{g1} \{H^-(n_{dc,agg}(k) \cdot P_{cmax,ind} - P_{c,agg}(k))\} \\ & +K_{g2} \{H^-(P_{cmax,grid} - P_{c,agg}(k))\} \\ & +K_{g3} \{|P_{cmax,grid} - P_{c,agg}(k)| H^-(P_{cmax,grid} - P_{c,agg}(k))\} \end{aligned}$$

Za optimiranje se koristi DP algoritam

Punjenje flote EV

Proizvodnja iz OIE

Potrošnja ostalih potrošača

Uvjet na održivost SoC-a

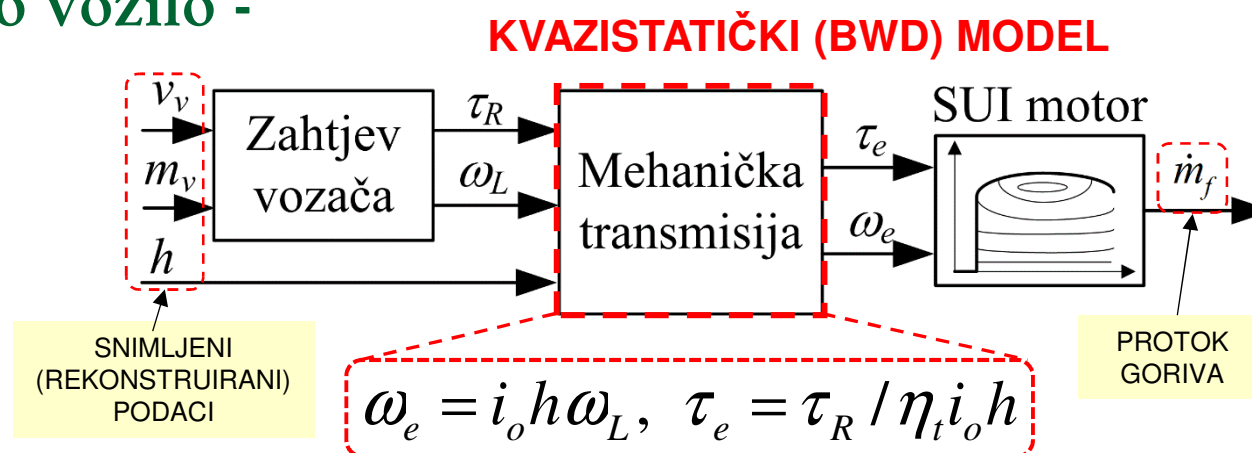
$$P_{grid}(k) = \begin{cases} P_{c,agg}(k) - P_{OIE}(k) + P_{EL}(k) & \text{za } P_{c,agg}(k) - P_{OIE}(k) + P_{EL}(k) \geq 0 \\ 0 & \text{, za } P_{c,agg}(k) - P_{OIE}(k) + P_{EL}(k) < 0 \end{cases}$$

$$SoC_{agg,end} = SoC_{agg,init}$$

Elektrifikacija flote dostavnih vozila – pilot studija

Konvencionalno vozilo - model

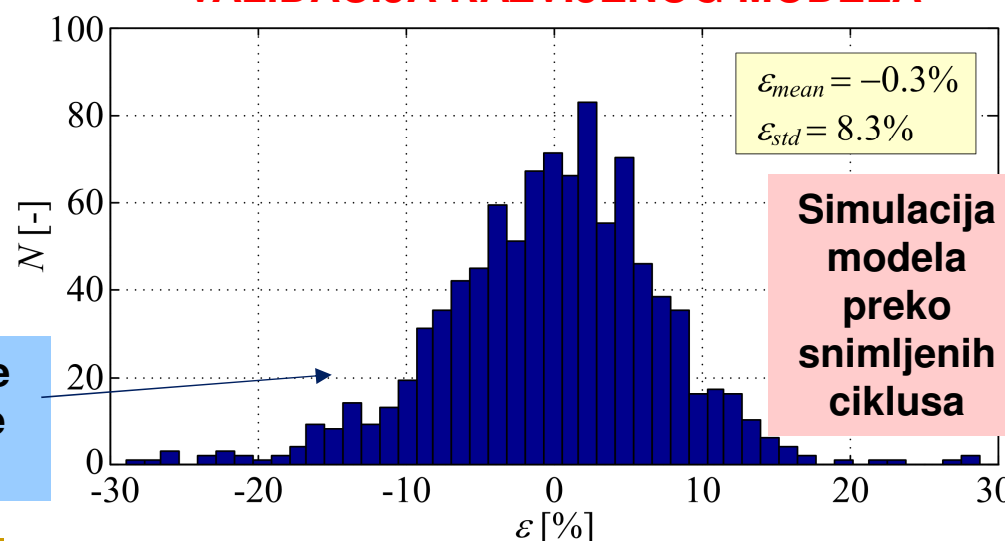
MAN TGM 15.240



- Pogonski Diesel motor 176 kW (240 KS)
- Masa praznog vozila 7860 kg
- Nosivost 7460 kg
- Maksimalna brzina 90 km/h
- AMT transmisija - 12 stupnjeva prijenosa
- Poseban agregat i rezervoar goriva za hlađenje

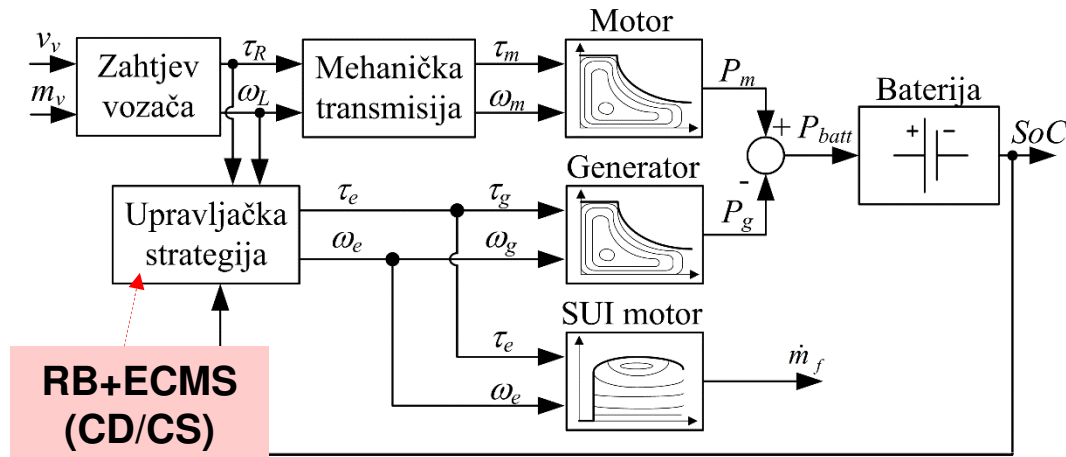
Odstupanje predviđene potrošnje od snimljene (većinom unutar 10%)

VALIDACIJA RAZVIJENOG MODELA



■ Dostavno električno vozilo proširenog dometa - modeliranje

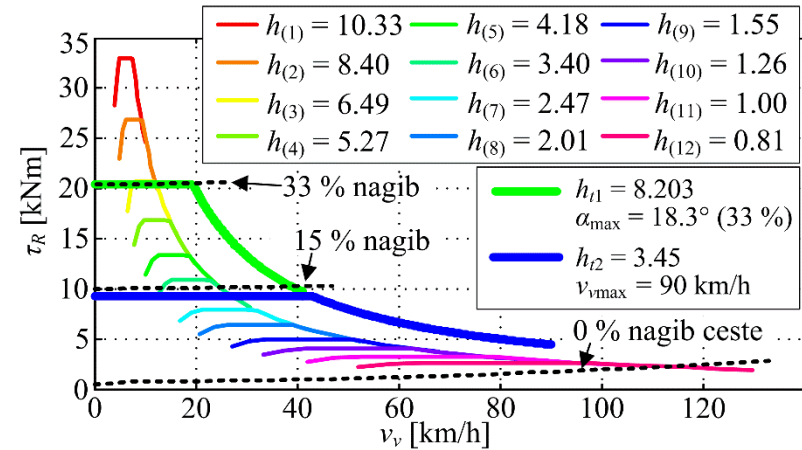
KVAZISTATIČKI (BWD) MODEL



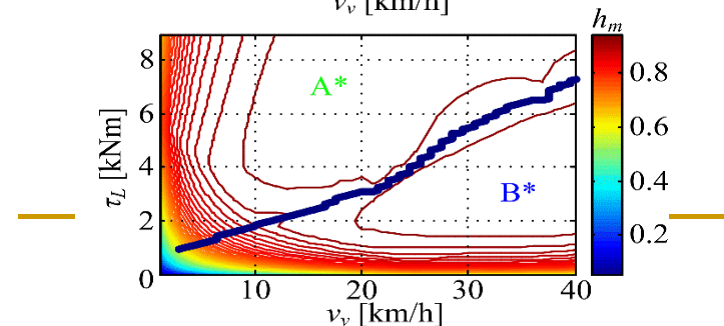
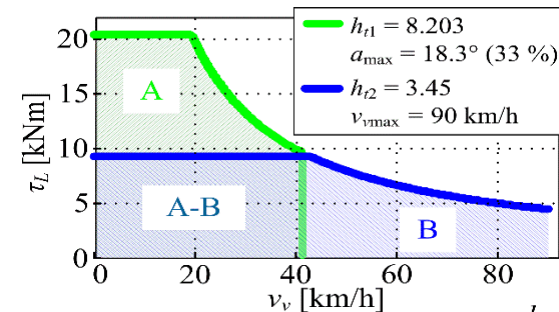
**RB+ECMS
(CD/CS)**

- Serijska konfiguracija
- Pogonski elektromotor 128 kW, vršna snaga 280 kW
- Agregat (SUI motor + generator) 124 kW
- Masa baterije 800 kg $\rightarrow$ 73 kWh
- Potrošnja pomoćnih uređaja nije modelirana

Odabir stupnjeva prijenosa

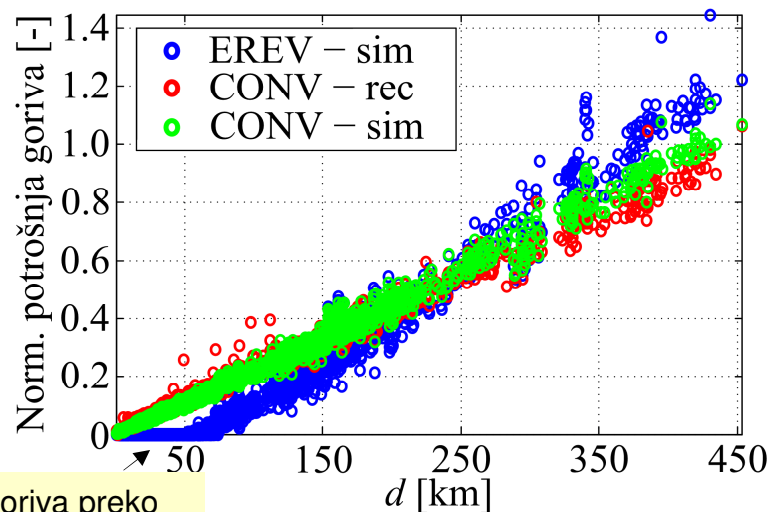


Odabir optimalnog stupnja prijenosa

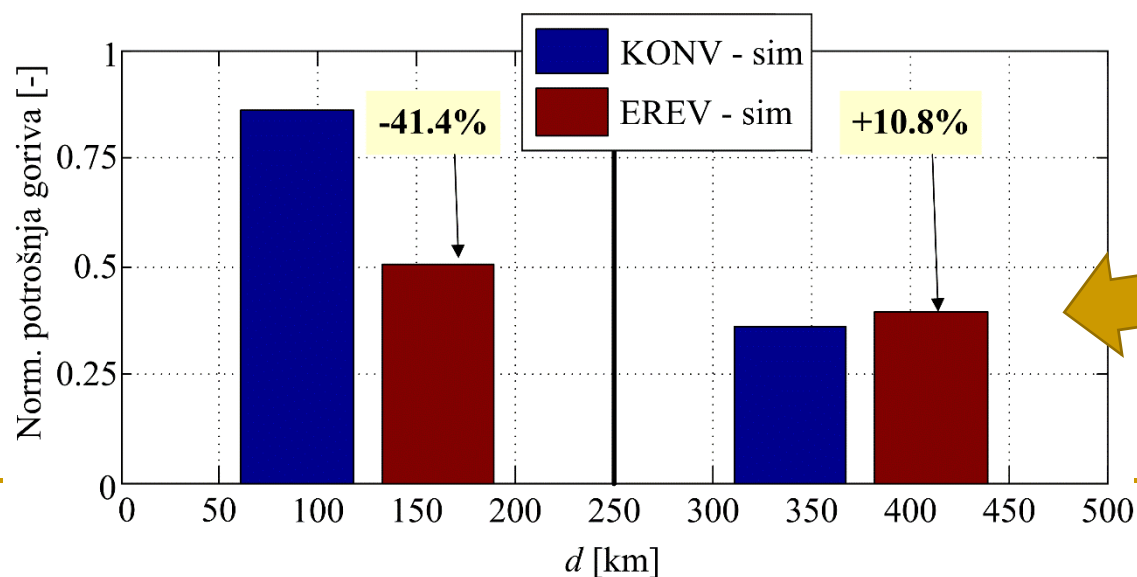
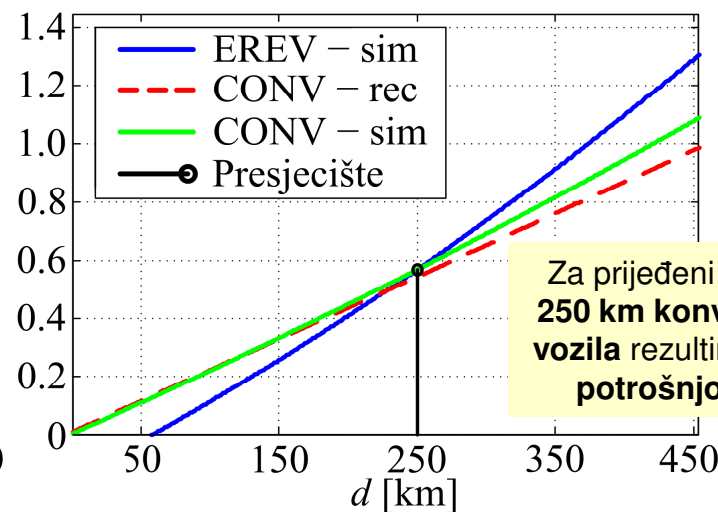


■ Usporedna analiza – EREV vs. konvencionalno vozilo

Pretpostavka: svako EREV vozilo svaku misiju počine s punom baterijom (SoC = 1)



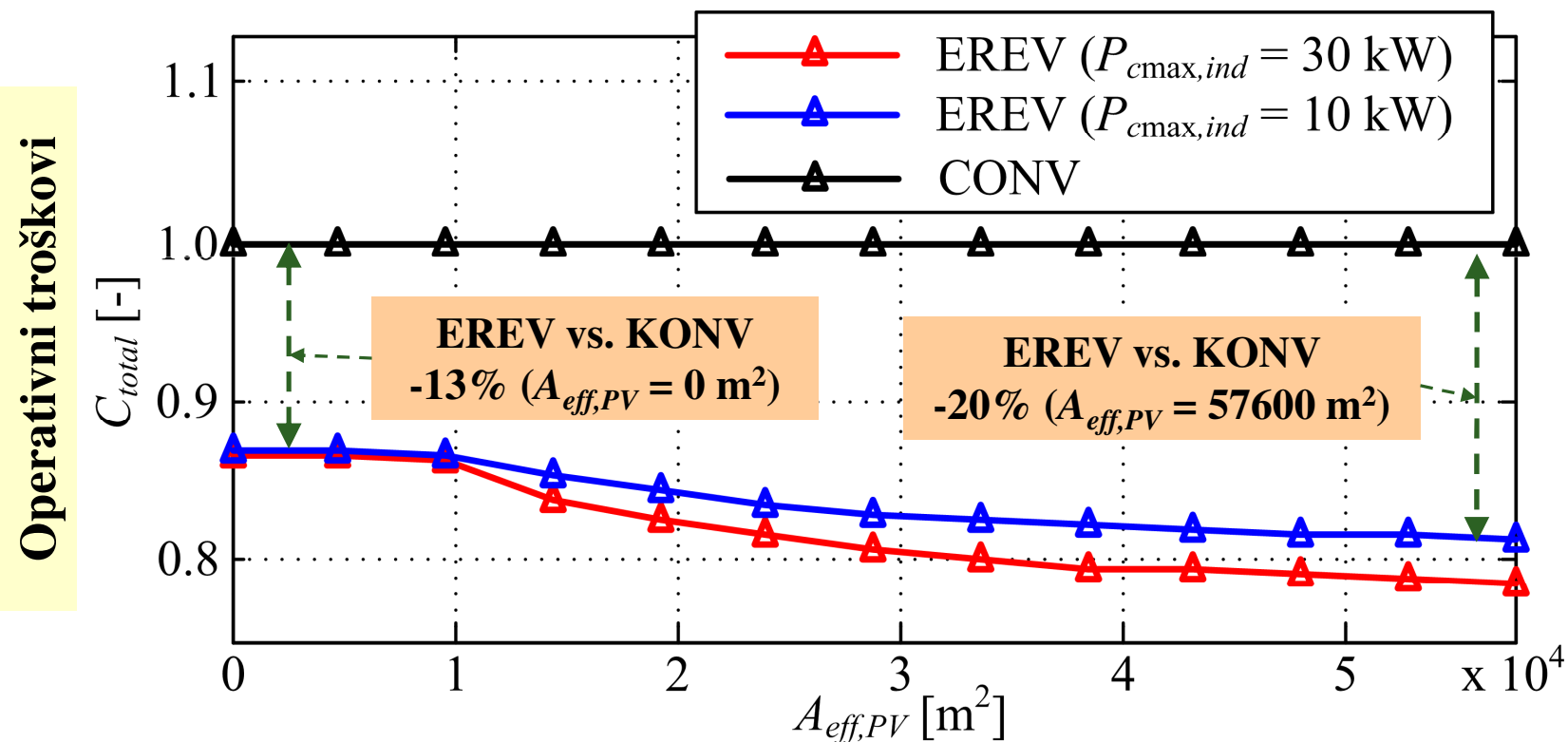
Potrošnja goriva preko snimljenih voznih ciklusa



Indikator za optimalnu elektrifikaciju flote

■ Rezultati optimiranja punjenja flote EV – operativni troškovi

- Za analize korišten **agregatni model flote**, **DP optimiranje punjenja**, te **dvotarifna cijena električne energije** ($E_{LT} = 0.06$ EUR/kWh, $E_{HT} = 0.11$ EUR/kWh)

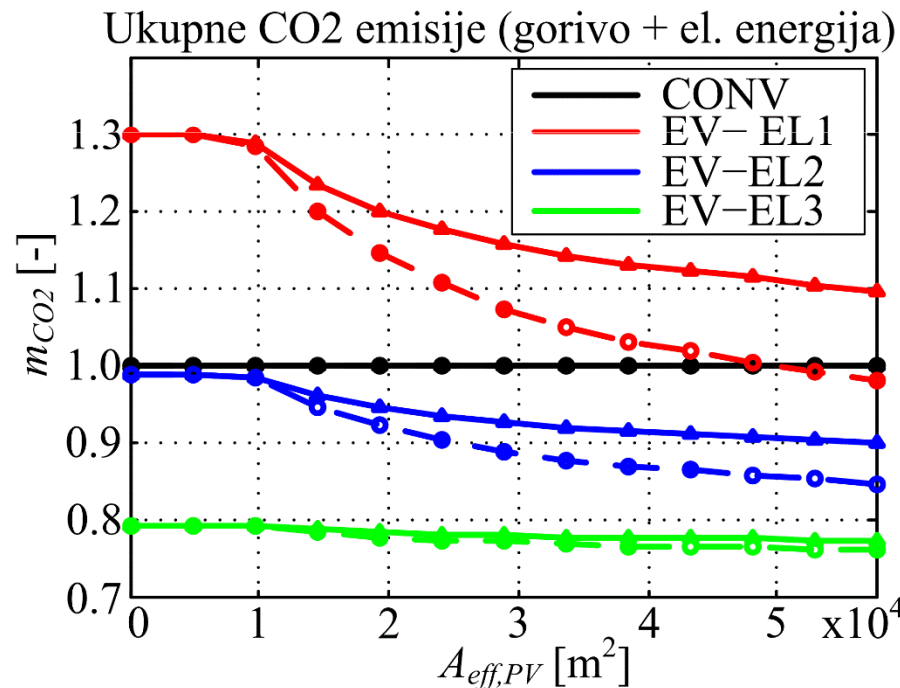


Instalirana površina solarnih panela

■ Rezultati optimiranja punjenja flote EV – emisije CO₂

W2W (od bušotine do kotača) analiza emisija CO₂

- Izgaranje 1 litre **Diesel goriva** emitira 3.16 kg CO₂
- EL1 – el. energija dobivena iz **ugljena** 1 kg CO₂/kWh
- EL2 – el. energija dobivena iz **prirodnog plina** 0.45 kg CO₂/kWh
- EL3 – el. energija dobivena iz **nuklearne elektrane/OIE** 0.1 kg CO₂/kWh



EL1 - EREV flota emitira i do 30% više CO₂

EL2 - emisije EREV flote sumjerljive s KONV emisijama ako nema proizvodnje iz OIE

EL3 – jedini slučaj u kojem EREV flota emitira značajno manje CO₂ (više od 20%)

Perspektiva istraživanja

- Optimiranje ruta električnih vozila kombinirano s dodjeljivanjem zadataka vozilima (npr. kod dostavnih vozila) – bitno se razlikuje od klasičnog problema optimiranja ruta
- Optimalno upravljanje punjenjem flote električnih vozila u realnom vremenu s ciljem minimizacije cijene punjenja, starenja baterije, poravnania opterećenja
- Predikcije/estimacije: vrijeme spajanja vozila na mrežu, SoC vozila na destinaciji, cijena električne energije, proizvodnja el. energije iz obnovljivih izvora energije
- Realistični vozni ciklusi koji uključuju nagib ceste (umjesto certifikacijskih; npr. sintetički) za projektiranje HEV i EV vozila
- Razvijanje modela flote vozila prikladnih za iscrpne tehnno-ekonomske analize

INTEREG SOLEZ PROJEKT – elektrifikacija gradskog bus prijevoza

Hvala na pažnji!
Pitanja?