



REPUBLIKA HRVATSKA  
Ministarstvo regionalnoga razvoja  
i fondova Europske unije



EUROPSKI STRUKTURNI  
I INVESTICIJSKI FONDOVI



Operativni program  
KONKURENTNOST  
I KOHEZIJA



# Hibridni pogoni za održivo šumarstvo (pregled)

Danijel Pavković

## UVOD

- Trenutno postoje sve veći zahtjevi u smislu smanjenja operativnih troškova šumarskih strojeva, zajedno s regulatornim pritiscima za smanjenje emisije ispušnih plinova i smanjenje akustičke buke.
- Proizvođači šumarske opreme sve su više zainteresirani za elektrifikaciju (hibridizaciju) teških strojeva.
- Hibridizacija pogonskog sustava nudi povoljno rješenje za pogon šumarske mehanizacije u smislu:
  - Mogućnosti korištenja dizelskog motora manje snage,
  - Dodatnog sustava za pohranu energije (npr. baterije) i dodatnog izvora energije hibridnog pogona (npr. elektromotora) za poboljšanu učinkovitost,
  - Mogućnosti rada hibridnog pogona s boljim mehaničkim performansama u usporedbi s konvencionalnim pogonskim sustavom (na bazi dizelskih motora).
- Budući razvoj elektrificiranih šumarskih vozila također je vrlo važna tema istraživanja u području održivog šumarstva.
- Imajući to u vidu, ova prezentacija daje pregled mogućih rješenja za pogon hibridnih šumskih vozila.

## Mehanizacija u šumarstvu



Žetelac stabala na kotačima\*



Hodajući žetelac stabala\*



Skider na kotačima\*



Skider s gusjeničnim pogonom\*

- Ova se studija usredotočuje na zglobne šumske traktore (skidere) na kotačima i njihovu hibridizaciju.

\* Šušnjar, M., et. al., *Development of forest machines – new trends, Conference CROJFE 2015: "Current Situation and Future Challenges", 18th – 20th March 2015, Zagreb – Zalesina, Croatia*

- *Dostupni su različiti mehanizirani sustavi za poboljšanje produktivnosti u šumarskim djelatnostima:*

- Žeteoci, koji se koriste za rušenje stabala i čišćenje trupaca (uklanjanje grana),
- Usitnjivači za proizvodnju usitnjene biomase,
- Skideri za transport obrađenih trupaca do sabirnog dvorišta.
- Transporteri trupaca za daljni transport obrađenih trupaca.



Transporter trupaca\*



## Sektor šumarstva i stakleničke emisije

Machinery	Used in system <sup>a</sup>	Hourly cost (Can.\$/hour)	Fuel consumption (l/hour)	CO <sub>2</sub> emissions (kg/hour) <sup>b</sup>
Grapple loader	S, H, B	104	26	69.4
Trucks	S, H, B	135	40	106.8
Stationary grinder	S, B	300	0	0
Relocation of mobile grinder	H	470	40	106.8
Mobile grinder	H	500	170	453.9
Wheel loader	H	110	20	53.4
Relocation of bundler	B	150	24	64.1
Bundler	B	200	30	80.1

S, slash system; H, hogfuel system; B, bundling system.

Primjer troškova mehanizacije, stopa potrošnje goriva i emisija CO<sub>2</sub>\*

- Korištenje šumarskih strojeva zahtijeva goriva na bazi nafte (benzin/dizel).
- Ovo pak rezultira značajnom količinom onečišćujućih tvari poput dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>), ugljičnog monoksida (CO) i ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>).
- Dakle, također se povećava emisija stakleničkih plinova u atmosferi.
- Stoga bi mehanizirane šumarske operacije trebale biti optimizirane za postizanje minimalnih emisija ispušnih plinova.

Fuel	Emission factors (g kg <sup>-1</sup> fuel)		
	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>
diesel	3188	26.6	38.4
diesel forest machines	3126	19.2	64.7
petrol equipment and vehicles	2450	340	22.8
diesel road vehicles	2836	12.8	37.5
railway diesel	2826	10.4	39.3

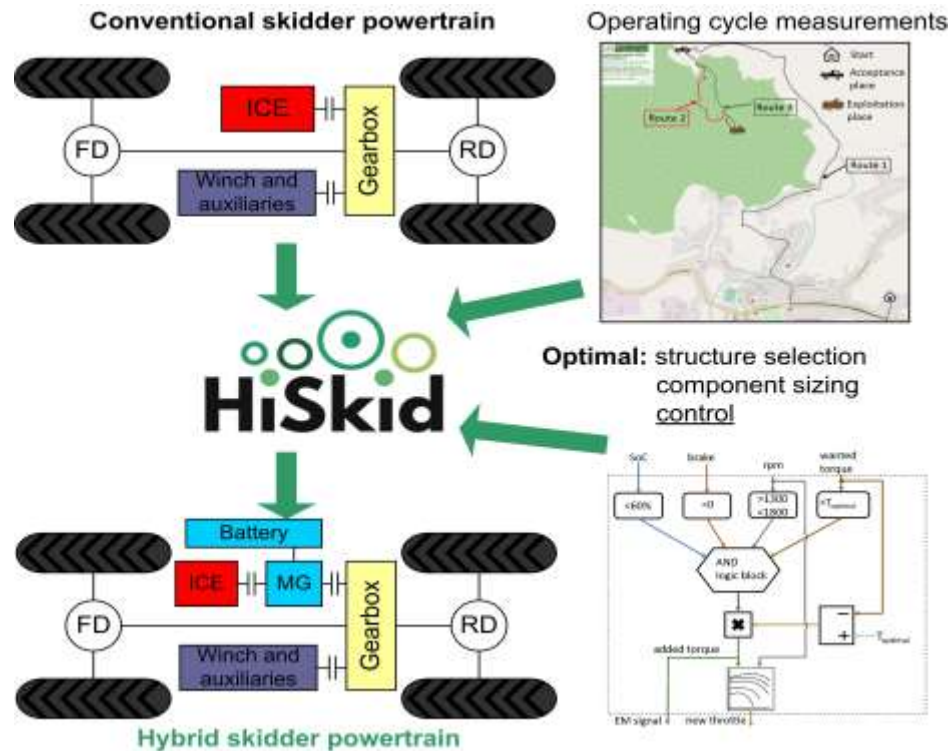
Usporedne emisije ispušnih plinova za različita goriva\*\*

\* Lindroos, O., et. al., Costs, CO<sub>2</sub> Emissions, and Energy Balances of Applying Nordic Slash Recovery Methods in British Columbia, *Western Journal of Applied Forestry*, Vol. 26, No. 1, pp. 30-36, 2011.

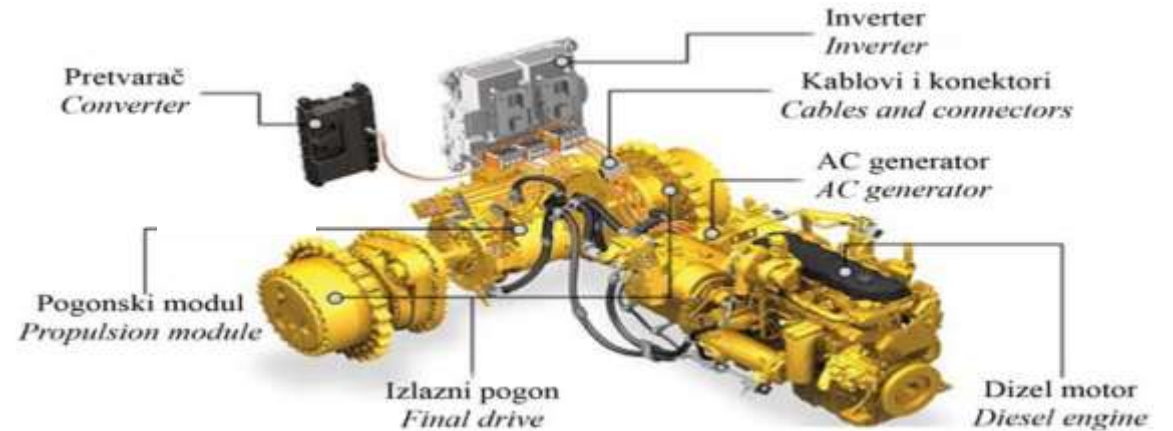
\*\* Berg, S. and Karjalainen, T., Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden, *Forestry*, Vol. 76, No. 3, pp. 271 – 284, 2003.

# Hibridizacija pogona

- Hibridizacija pogona šumskih i poljoprivrednih strojeva može ponuditi dodatne prednosti u smislu smanjenja potrošnje goriva i emisija stakleničkih plinova.



Projekt HiSkid - hibridizacija pogona skidera



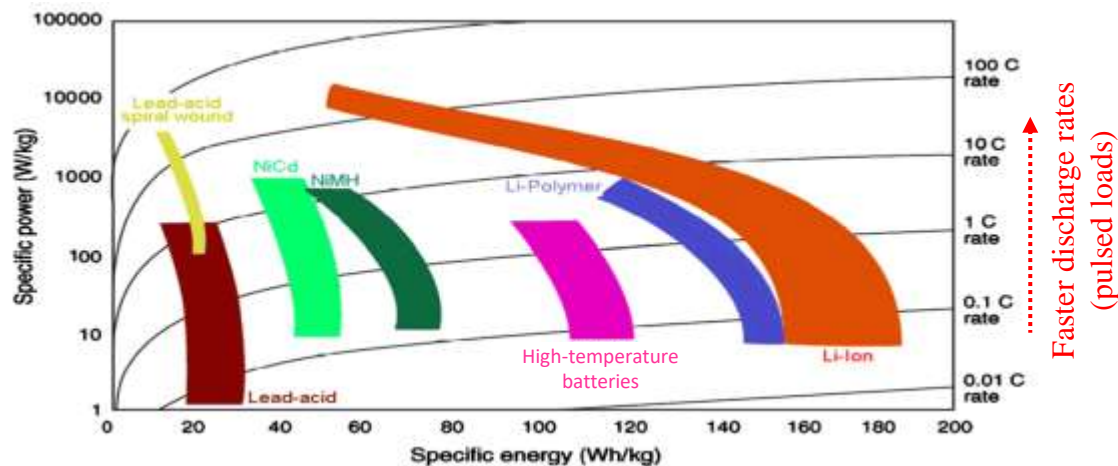
Shematski prikaz hibridiziranog pogona.

- Hibridizacija se provodi dodavanjem prikladnog sustava za skladištenje energije i pretvarača snage (pretvorbu mehaničkog rada u rad električne struje ili rad hidrauličkog fluida)
- Prijenos i skladištenje električne energije nude niz prednosti u odnosu na hidrauliku:
  - Kompaktnost (baterija)
  - Visoka učinkovitost (energetska elektronika)
  - Relativno visoka gustoća snage (litijeve baterije i električni strojevi)

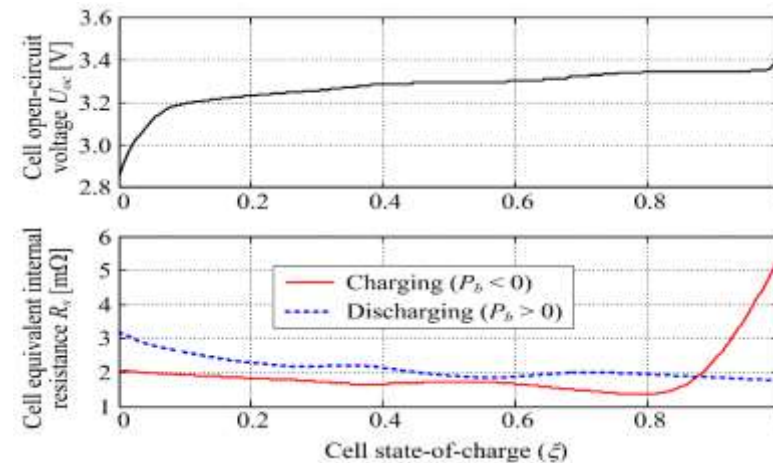
\* Oljača, M.V., et. al., Heavy caterpillar tractors and working machines with alternative power, Agricultural Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 21 – 28, 2011.

## Hibridizacija pogona

- **Litij-ionske i srodne tehnologije baterija su svestrane:** mogu pokriti i velike zahtjeve za gustoćom pohrane energije i velike gustoće snage.
- **Litij-željezo-fosfat (LiFePO<sub>4</sub>) baterije** imaju još neke dodatne prednosti:
  - **Mali toplinski gubici** zbog malog unutarnjeg otpora
  - **Praktički kruta karakteristika pražnjenja** (male varijacije napona baterije)



Ragone mape za različite baterijske tehnologije\*



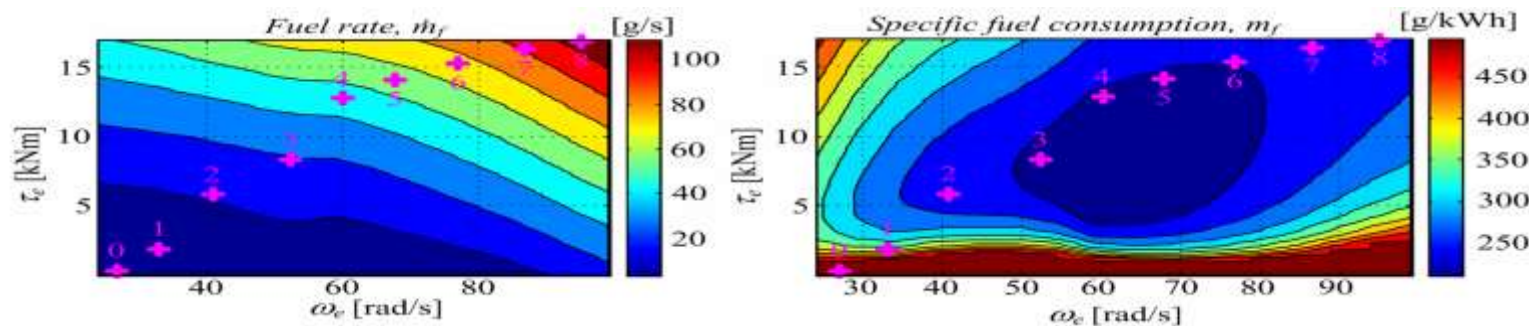
Karakteristike suvremene LiFePO<sub>4</sub> ćelije \*\*

\* Van den Bossche, P., et al., "SUBAT: An Assessment of Sustainable Battery Technology", *Journal of Power Sources*, Vol. 162, pp. 913-919, 2006.

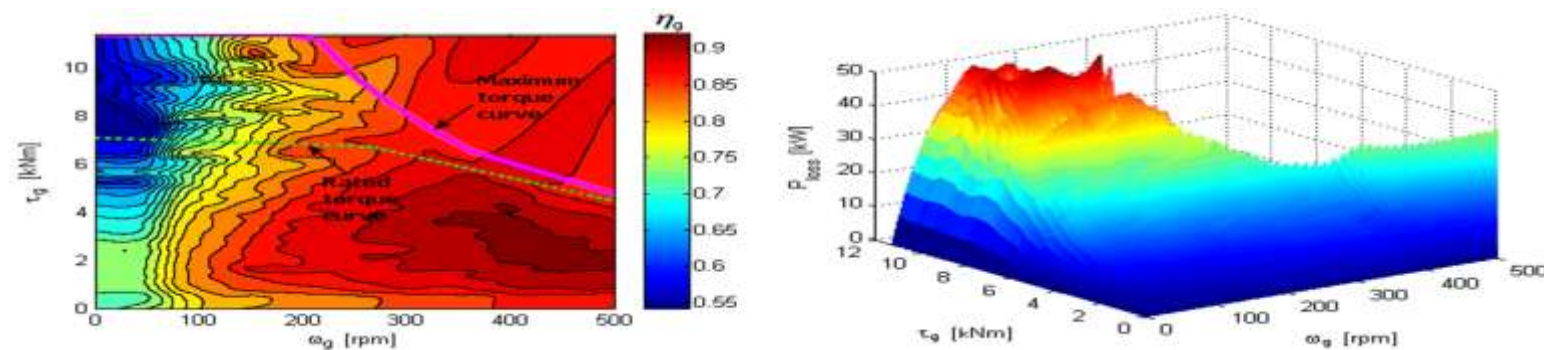
\*\* Pavković, D., et al., *Oil drilling rig diesel power-plant fuel efficiency improvement potentials through rule-based generator scheduling and utilization of battery energy storage system*, *Energy Conversion and Management*, Vol. 121, pp. 194-211, 2016.



## Modeli i računalni alati



Primjer statičkih mapa dizelskog motora uz potrošnju goriva kao parametar\*



Primjer statičkih mapa elektromotornog pogona i njegove učinkovitosti\*\*

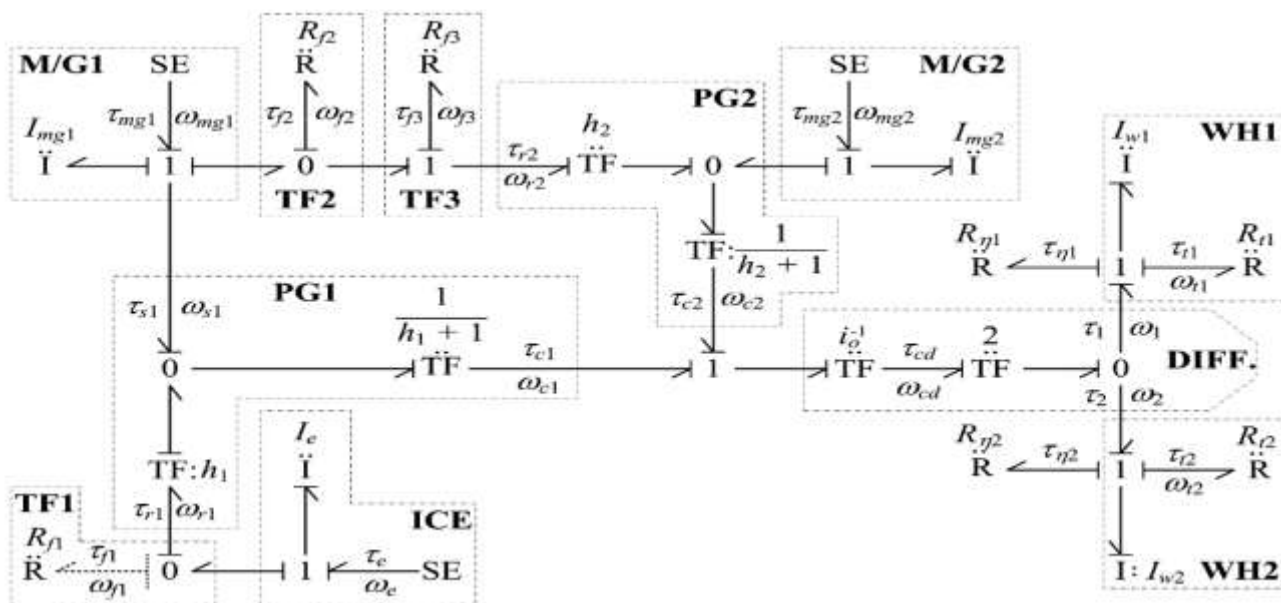
- Kako bi se odredila optimalna strategija upravljanja hibridnim pogonom, potrebni su točni modeli njegovih komponenata.
- Motor s unutarnjim izgaranjem modeliran je statičkim mapama (moment u funkciji brzine) s parametrom potrošnje goriva.
- Električni pogon modeliran je na sličan način, s ukupnom učinkovitošću (gubicima) kao parametrom.

\* Cipek, M., et. al., Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route, *Energy*, Vol. 173, pp. 1154-1171, 2019.

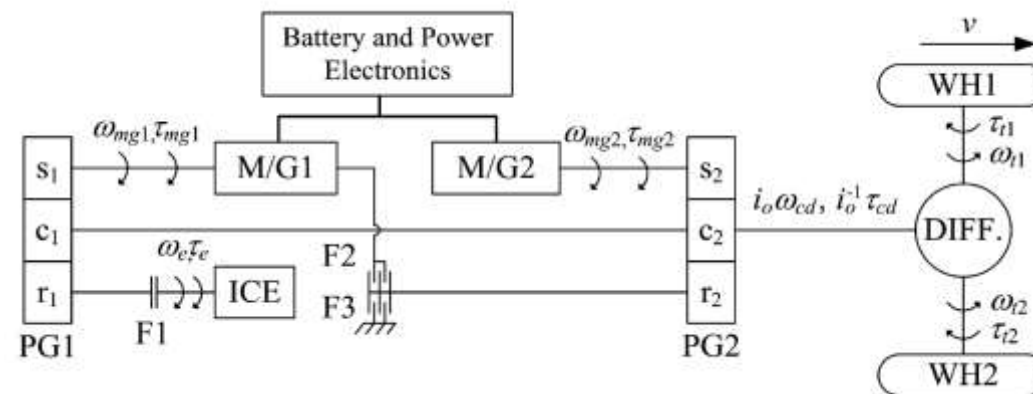
\*\* Pavković, D., et. al., Modeling, Parameterization and Damping Optimum-based Control System Design for an Airborne Wind Energy Ground Station Power Plant, *Energy Conversion and Management*, Vol. 164, pp. 262-276, 2018.

# Modeli i računalni alati

- Pod-modeli pojedinih komponenti uključeni su u razmatranu topologiju hibridnog električnog pogona.
- Prijenos snage određen je konfiguracijom sustava transmisije.



Primjer modela veznih dijagrama hibridno-električnog pogona\*



Serijsko-paralelni hibridni električni pogon\*

- Za pojedinu konfiguraciju transmisije (prijenosni omjer) uspostavljen je odgovarajući model protoka snage.
- Modeliranje temeljeno na analizi tokova snage može se provesti pomoću specijaliziranih alata kao što su vezni dijagrami.
- Relativno jednostavna metodologija za izvođenje kvazi-stacionarnog modela.

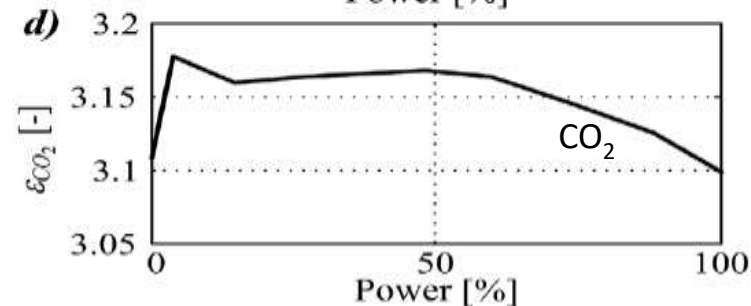
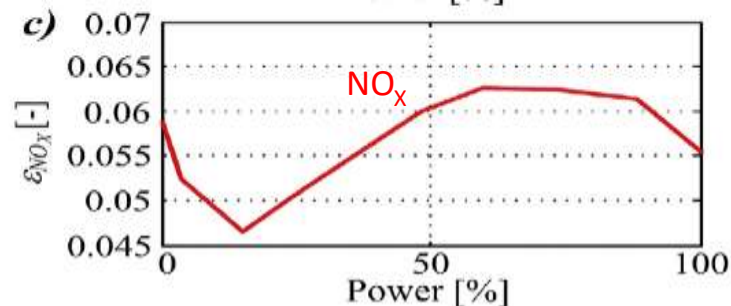
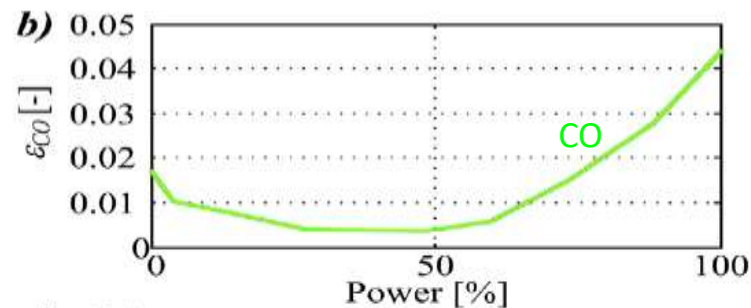
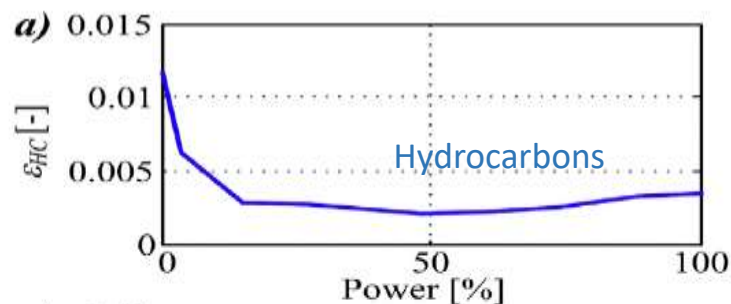
\* Cipek, M., et. al., A Control-Oriented Simulation Model of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle, Applied Energy, Vol. 101, pp. 121-133, 2013.



## Modeli i računalni alati

- Emisije ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem (dizelski ili benzinski motor) izražene su u ovisnosti o postotku nazivne snage i normalizirane prema potrošnji goriva:

$$\varepsilon_{HC,CO,NO_x,CO_2} (\%dP) = \frac{\dot{m}_{HC,CO,NO_x,CO_2} (\%dP)}{\dot{m}_f (\%dP)}$$



- Za određenu potrošnju energije, potrebna količina goriva određuje se pomoću statičkih mapa motora i elektromotornog pogona.
- Na temelju ovih podataka mogu se procijeniti emisije ispušnih plinova i koristiti kao dodatni kriterij u procjeni efikasnosti hibridnog pogona.

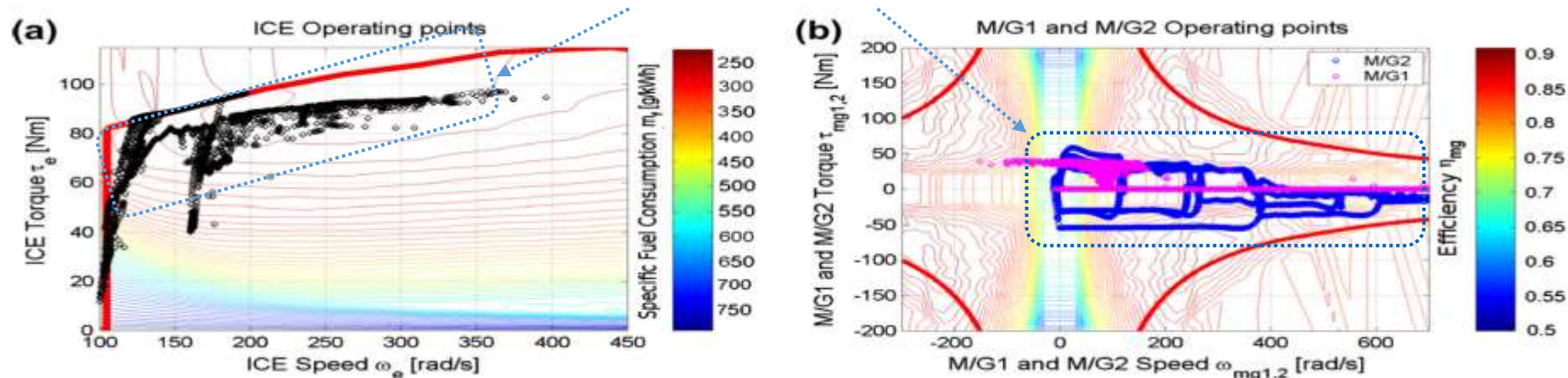
Primjer mapa emisija onečišćujućih tvari za dizelski motor: ugljikovodici (a), ugljikov monoksid (b), dušikovi oksidi (c) i ugljikov dioksid (d)\*

\* Cipek, M., et. al., *Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route*, Energy, Vol. 173, pp. 1154-1171, 2019.

# Optimiranje potrošnje energije

- Optimizacijski alati koji se mogu koristiti za pronalaženje optimalnog režima rada hibridnog postrojenja (pogona):
  - **Dinamičko programiranje** (spora konvergencija, diskretizacija po vremenu i amplitudi)\*
  - **Gradijentne metode** (brza konvergencija, ne mogu jamčiti globalni optimum)\*
  - **Kaskadna optimizacija** koja **kombinira dinamičko programiranje i gradijentni postupak\*\***

Optimizacija pronalazi slijed kontrolnih varijabli za rad hibridnog pogona u području visoke učinkovitosti



Primjer rezultata optimizacije hibridno-električnog pogona: radne točke motora (a) i radne točke električnih strojeva (b)\*

\* Cipek, M., et. al., *A Control-Oriented Simulation Model of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle*, *Applied Energy*, Vol.101, pp. 121-133, 2013.

\*\* Cipek, M., et. al., *A novel cascade approach to control variables optimisation for advanced series-parallel hybrid electric vehicle power-train*, *Applied Energy*, Vol. 276, paper No. 115488, 12 pages, 2020.

## Zaključak

- **Uslijed povećane razine mehanizacije** u sektoru šumarstva **dolazi do povećanja operativnih troškova** (u smislu potrošnje goriva i održavanja strojeva), **kao i do povećanja emisija štetnih (stakleničkih) plinova**.
- Stoga je **vrijedno uvesti mjere za povećanje energetske učinkovitosti** (i smanjenje potrošnje goriva) kroz hibridizaciju pogona šumskih strojeva.
- **Hibridizacija teške šumske mehanizacije** predstavlja **izazov** u smislu **odabira odgovarajuće konfiguracije pogona**, pri čemu elektrificirani pogonski sklopovi imaju jasne prednosti u odnosu na hidraulične.
- **Alati potrebni za uspješnu hibridizaciju šumarskih vozila uključuju:**
  - Prikladne **modele baterijskih sustava** za pohranu energije,
  - **Modele tokova snage** motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotornog pogona **u funkciji potrošnje goriva i ukupne učinkovitosti**,
  - **Modele emisija štetnih plinova** u funkciji potrošnje energije i goriva,
  - **Optimizacijske alate**, po mogućnosti one koji mogu jamčiti brzu stopu konvergencije i globalno optimalno rješenje unutar prihvatljivih granica tolerancije (rezolucije optimizacijskog modela).



# Hvala na pažnji!



[danijel.pavkovic@fsb.hr](mailto:danijel.pavkovic@fsb.hr)

[https://www.researchgate.net/profile/Danijel\\_Pavkovic](https://www.researchgate.net/profile/Danijel_Pavkovic)