



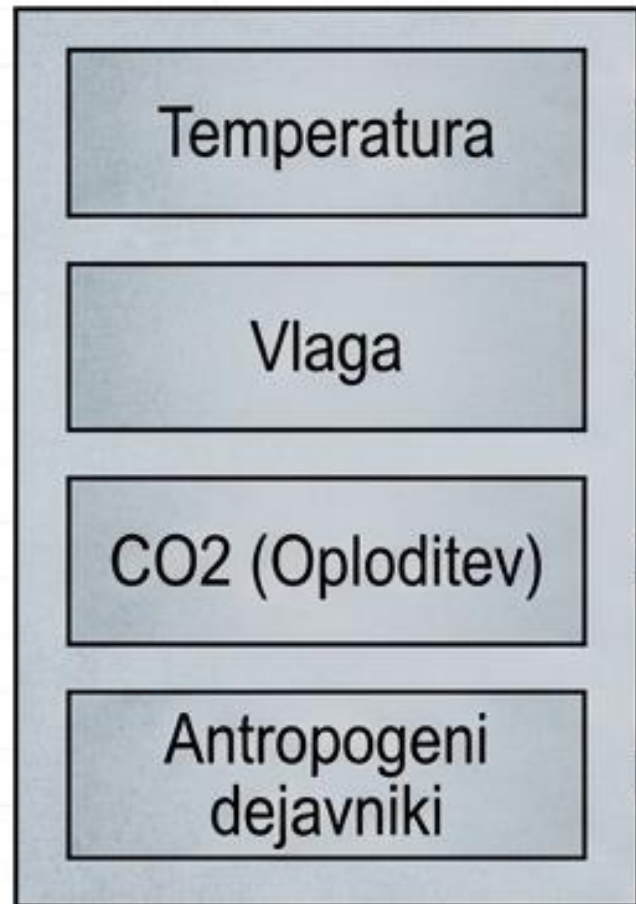
Zemlja kot digitalni dvojček

Sistemi inženiring
napovedovanja podnebnih
požarov in prehod na
hibridne modele
(AI + Fizika). »»

Verzija simulacije: CMIP6
Arhitektura: LSM / ESM / ML



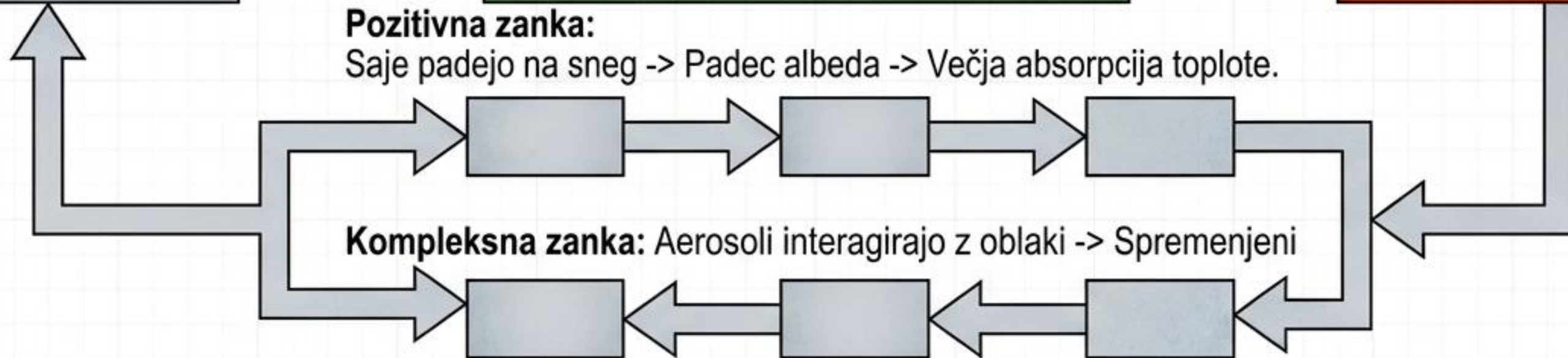
Vhodni parametri (Inputs)



Pozitivna zanka:

Saje padejo na sneg -> Padec albeda -> Večja absorpcija toplote.

Kompleksna zanka: Aerosoli interagirajo z oblaki -> Spremenjeni



Sistemiški premik:

Globalno segrevanje hitro premika celotne biome znotraj tega prostora parametrov.

Razpoložljivost goriva/
Fuel Availability
(od nizke do visoke)

Savane in polsušna območja:

Stalno suho, a požari so odvisni od hitre rasti trave po močnem dežju.

Omejeno z gorivom
(Fuel-Limited)

Omejeno z vlago
(Moisture-Limited)

Borealni gozdovi in tundra:

Visoka zaloga goriva, požari izbruhnejo šele ob močni suši in taljenju permafrosta.

Stopnja sušnosti / Aridity
(od nizke do visoke)

Računske arhitekture za modeliranje požarov

LSM:
Modeli kopnega



Fokus na vegetaciji,
biokemiji in dinamiki tal.

ESM:
Modeli zemeljskega sistema



Sklopljeni sistemi, vključujejo
celovito dinamiko atmosfere
in oceanov.

ML:
Strojno učenje



Podatkovno vodeni modeli,
statistične abstrakcije in
neuralne mreže.

Dekonstrukcija arhitekture LSM

3. Modul za požare:

Izračun vžiga in širjenja
(npr. SPITFIRE, INFERNO).

2. Jedro (Engine):

Fiziologija rastlin, vlažnost
tal, dinamika goriva.

1. Podatkovni vhod (Offline):

Predpisana meteorologija
(model je slep za lasten vpliv
na vreme).



Inženirski Trade-off

- [+]** Visoka ločljivost, idealno za izolacijo parametrov in analizo posameznih spremenljivk.
- [-]** Ni atmosferske povratne zanke. Dim 'izgine' iz simulacije brez vpliva na lokalno vreme.

Dekonstrukcija arhitekture ESM: Izziv sklapljanja

Preklop: Dvosmerno sklapljanje



Enosmerno (1-Way Coupled)



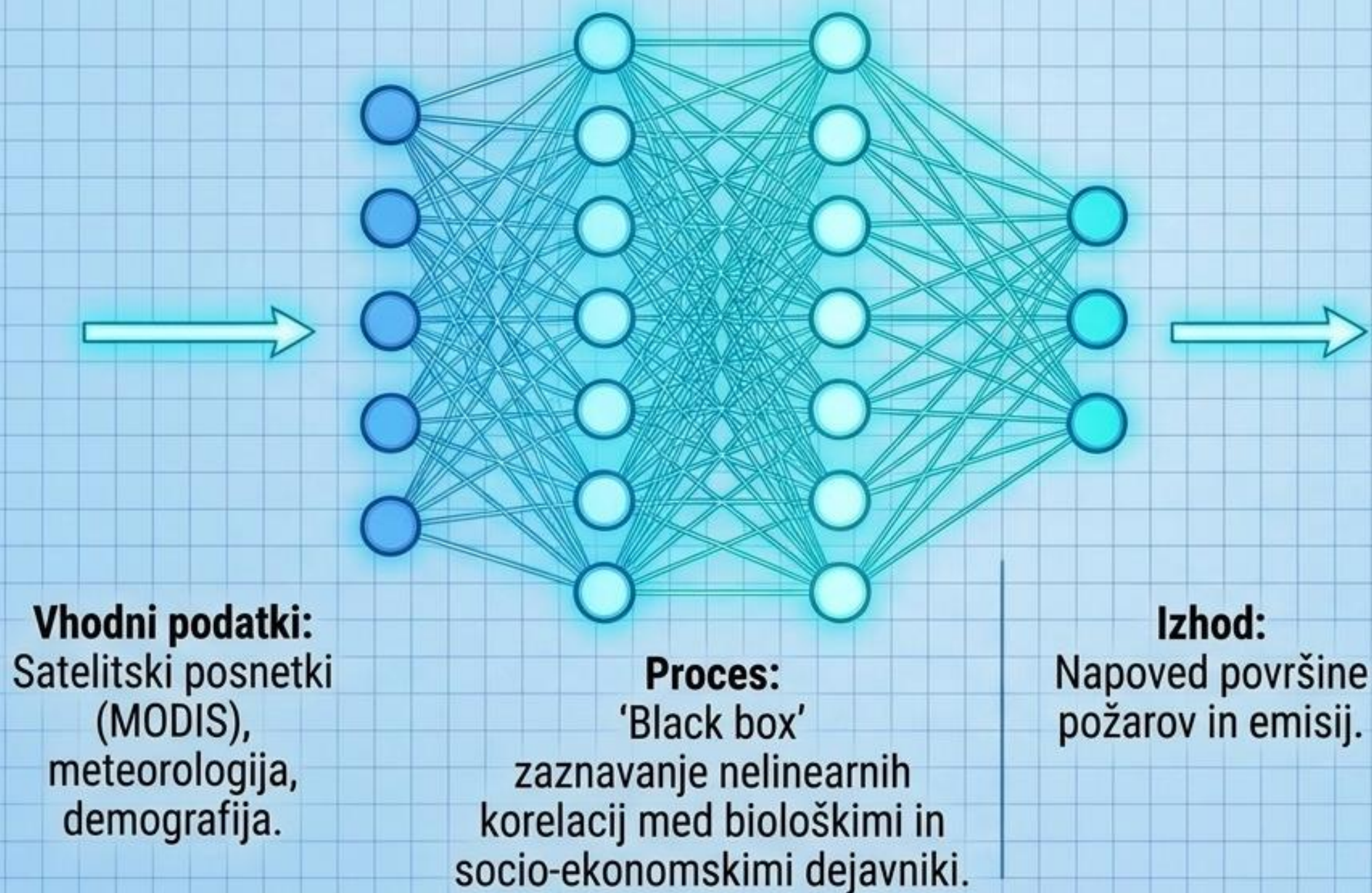
Dvosmerno (2-Way Coupled - The Frontier)



Inženirski Trade-off

- [+]** Najvišja fizikalna konsistentnost na dolgi rok (pravi digitalni dvojček).
- [-]** Ekstremna računska zahtevnost. Simulacija kemije dima in višine vbrizga drastično upočasni procesorje.

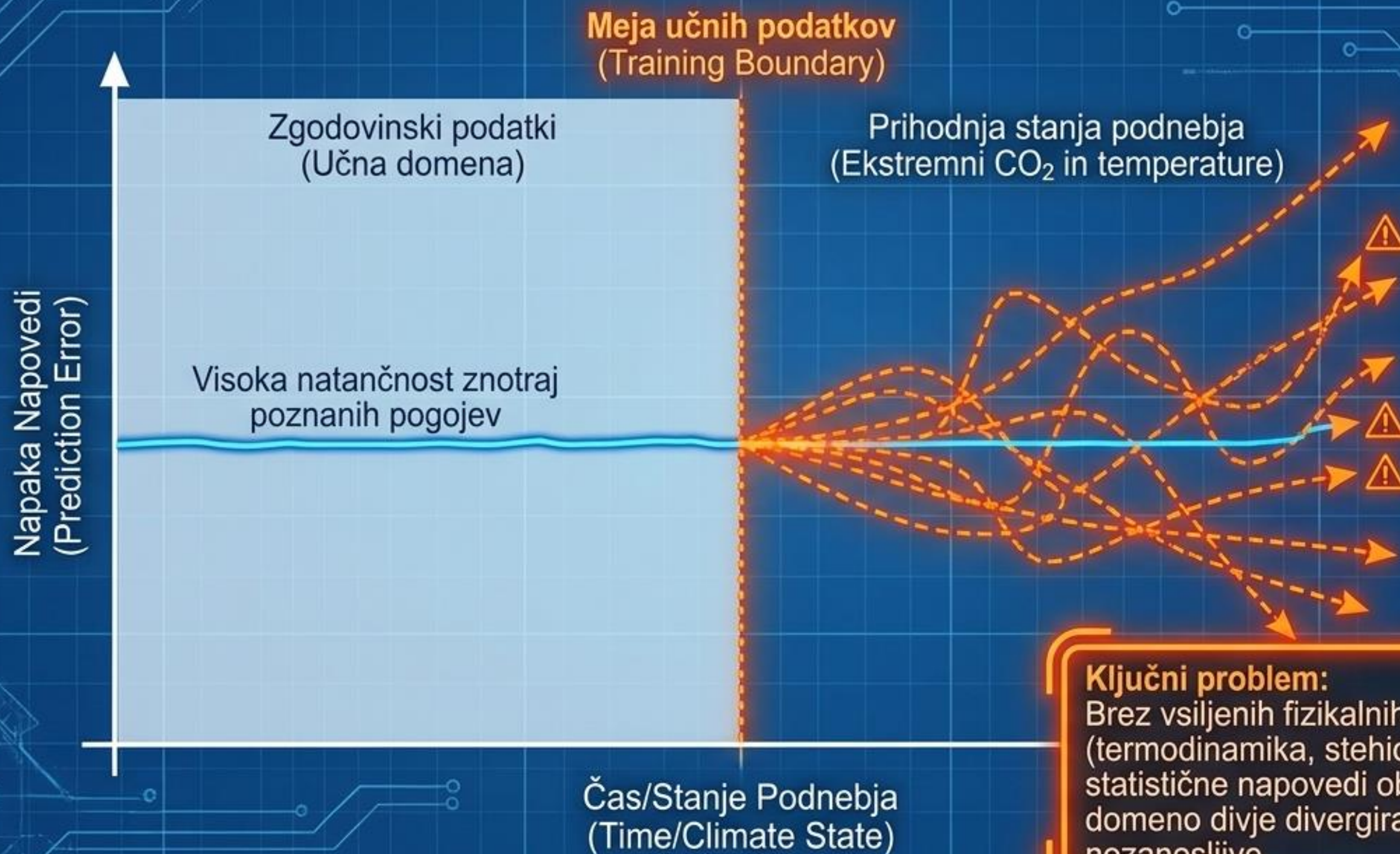
Dekonstrukcija arhitekture ML: Nevralne mreže



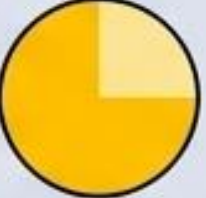
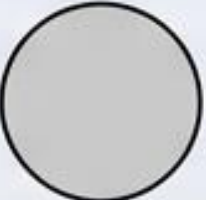
Inženirski Trade-off

- [+]** Izjemno hitro izvajanje po končanem učenju (fast inference). Omogoča ustvarjanje ogromnih ansamblov podatkov.
- [-]** 'Slepo' za fizikalne zakone. Ne upošteva zakona o ohranitvi mase.

Problem čistega strojnega učenja: Fenomen "Domain Shift"



Sintezna diagnostična matrika arhitektur

	LSM (Modeli kopnega)	ESM (Zemeljski sistemi)	ML (Strojno učenje)
Fizikalna konsistentnost	 Srednje	 Visoko	 Nizko
Ekstrapolacija v nova podnebja	 Srednje	 Visoko	 Zelo nizko
Računska optimizacija in hitrost	 Srednje	 Zelo nizko (Počasno)	 Visoko (Hitro)
Dvosmerno sklapljanje emisij	 Ni na voljo	 Da	 Ni na voljo

Zaključek: Noben model sam po sebi ne izpolnjuje vseh inženirskih pogojev za hitre in točne napovedi do konca stoletja.

Sistemi izhodi: Napovedi za konec 21. stoletja

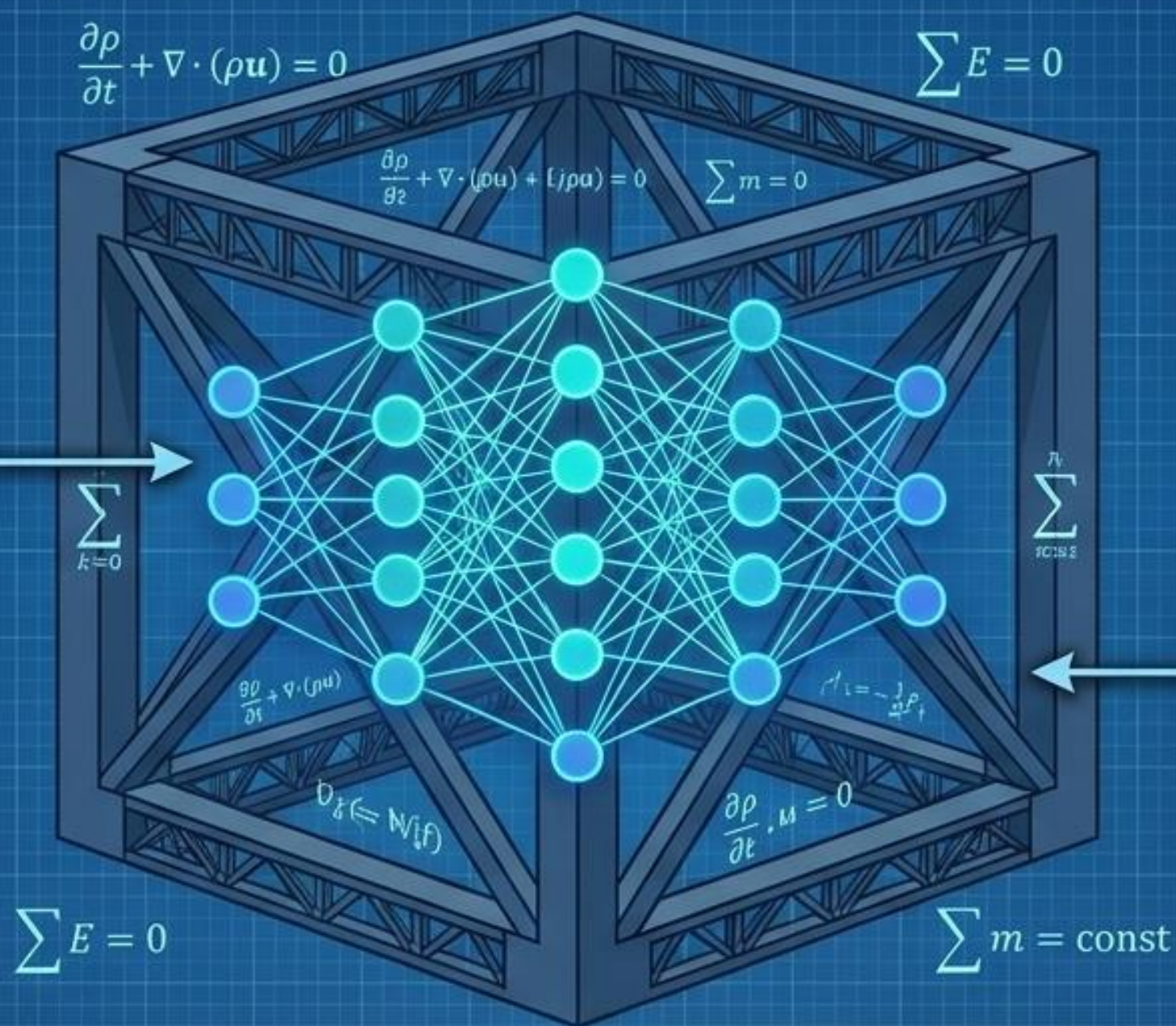
+50-100% povečanje emisij požarov.
Podaljšanje sezone za 20-30 dni
zaradi taljenja permafrosta.
Modeli močno konvergirajo.

Mešani signali. Napovedi
divergirajo zaradi kompleksnih
sprememb v padavinah in
krčenja gozdov.

Sistemske dejstvo: Največja gotovost
obstaja tam, kjer se rezultati povsem neodvi-
snih arhitektur (LSM, ESM in ML) stikajo.

Nova meja: Fizikalno informirano strojno učenje (Physics-Informed ML)

AI (Surrogate Model):
Ultra-hiter nadomestni emulator
za izjemno počasne enačbe
atmosferske kemije.



**Fizikalna zaščitna kletka
(Physical Constraints):**
Učenje je strogo omejeno
z zakoni o ohranitvi mase
in termodinamiko.

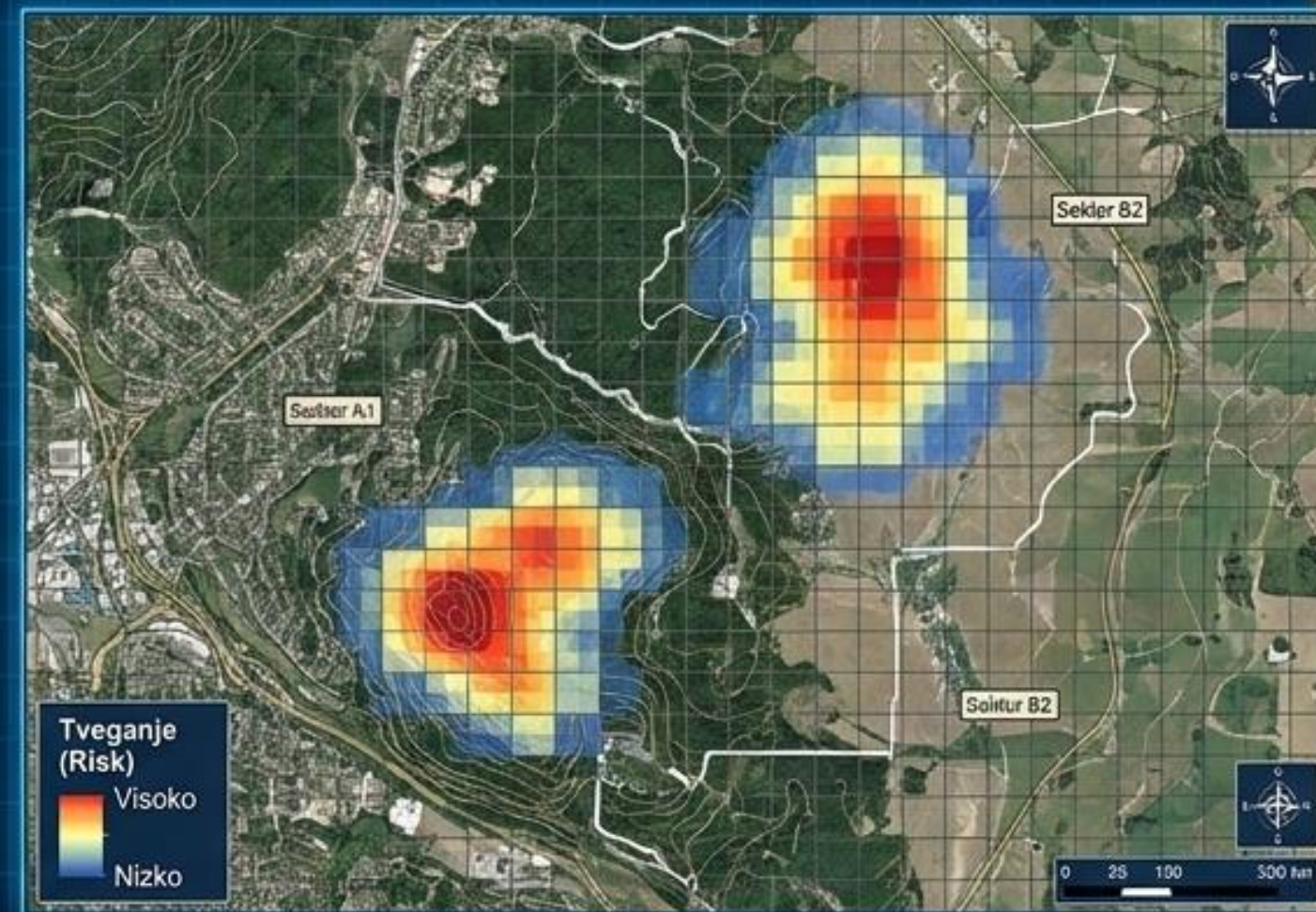
Rezultat: Doseganje ESM natančnosti z ML hitrostjo, kar preprečuje statistično divergenco v nepoznanih prihodnjih scenarijih podnebja.

Od surovih napovedi do inženirskega odločanja

Razložljivi AI (Explainable AI / SHAP)



Visokoresolucijska predikcija tveganja



Končna misel: Odgovor na kompleksnost Zemlje ni zgolj v več podatkih, temveč v hibridnih (AI+Fizika) in razložljivih arhitekturah, ki omogočajo lokalno ukrepanje. Sistemski inženiring je ključ do odpornosti.