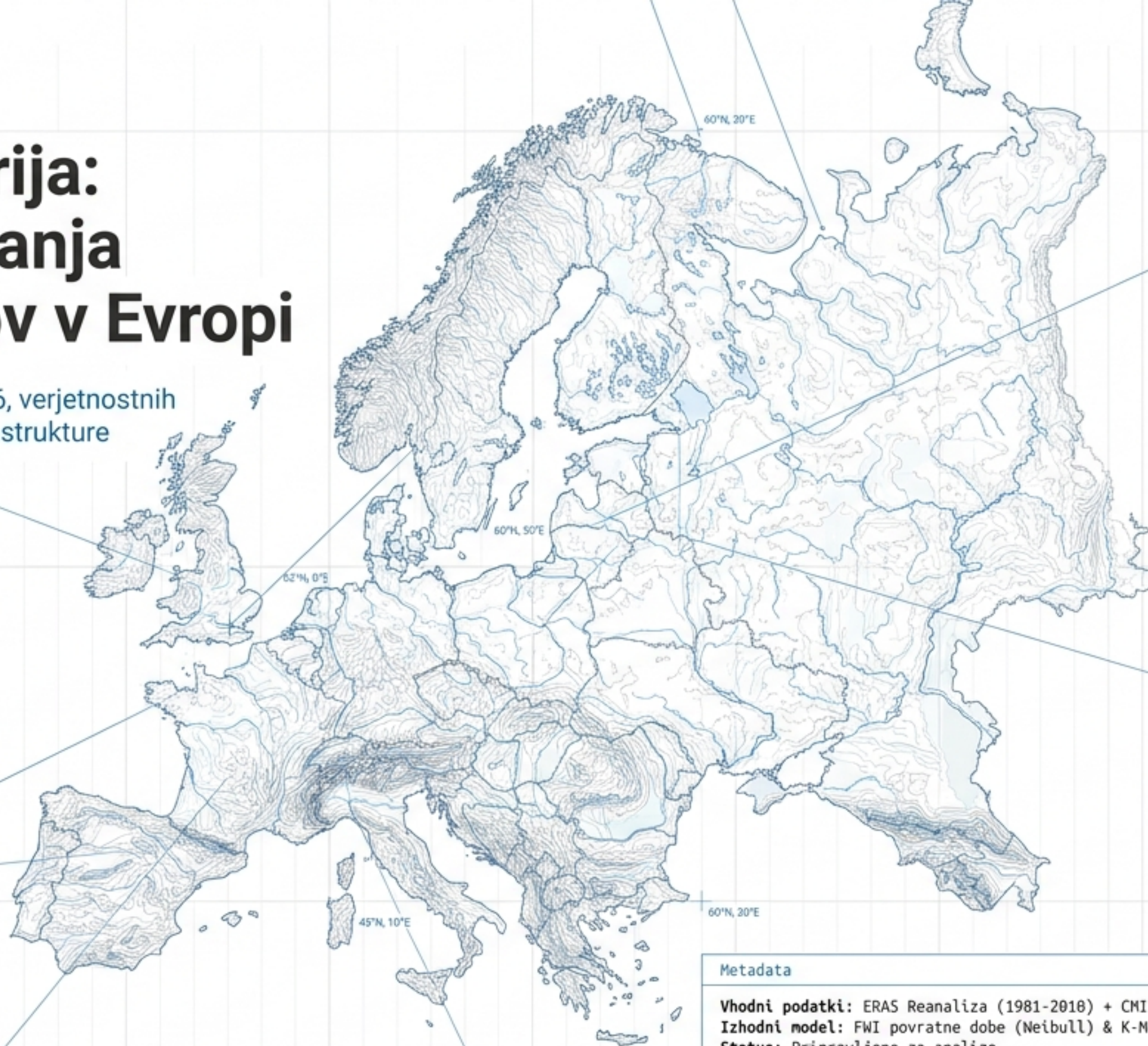


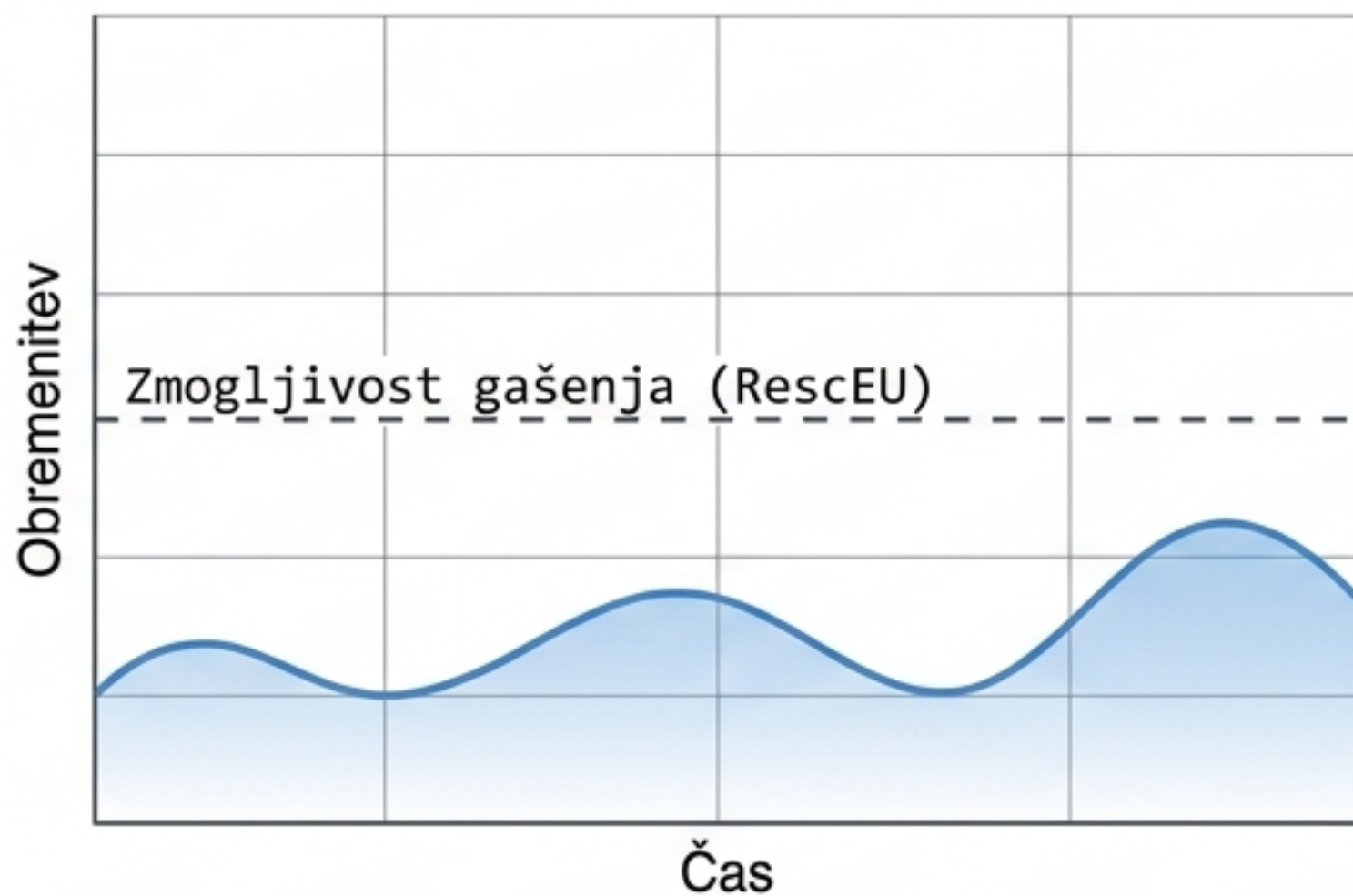
Klimatska telemetrija: Kvantifikacija tveganja ekstremnih požarov v Evropi

Inženirska analiza podatkovnih modelov CMIP6, verjetnostnih
premikov in sistemskih omejitev evropske infrastrukture



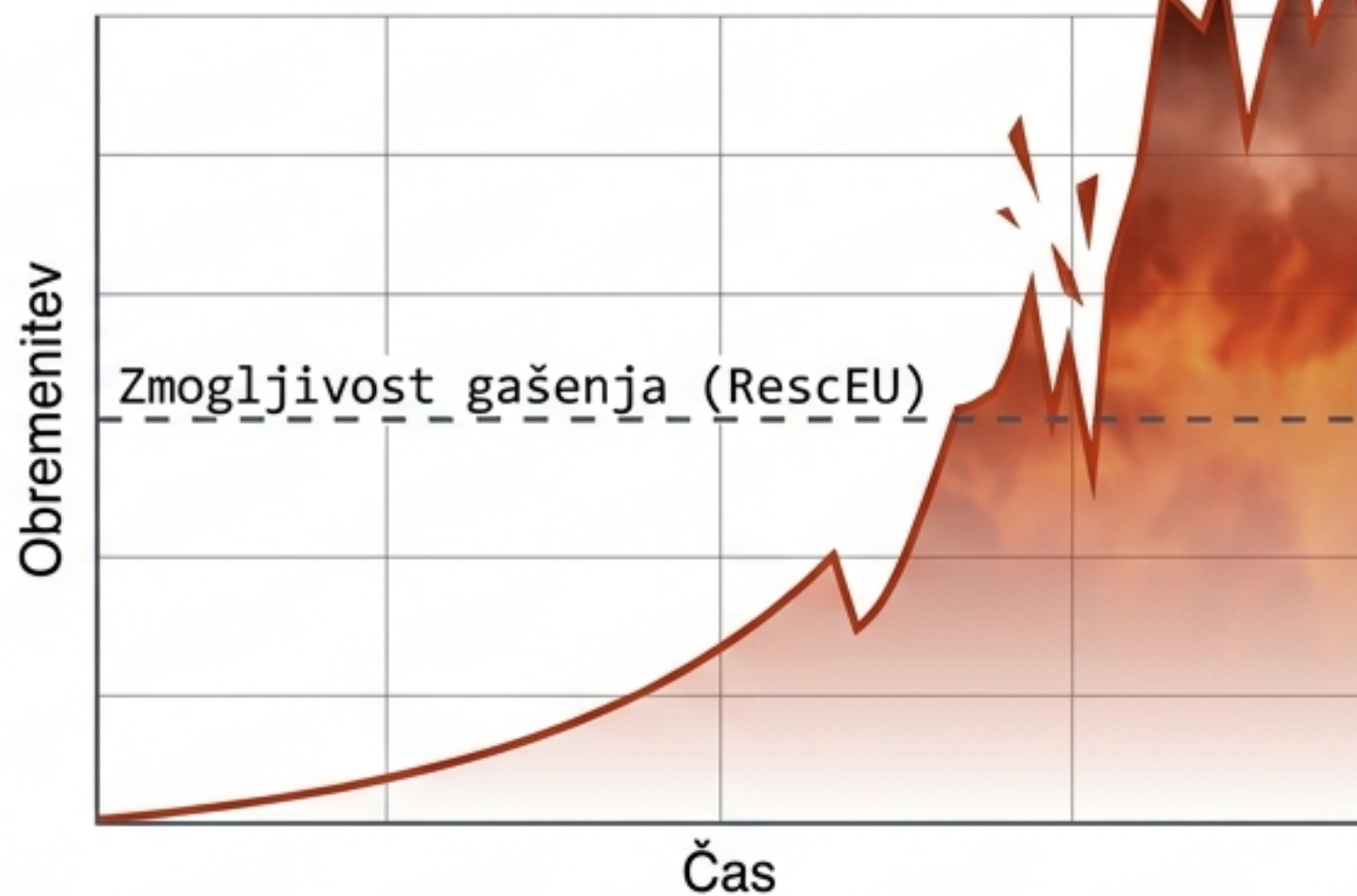
Ekstremni požari kot sistemska odpoved

Linearni odziv (FWI < 20)



Standardni požari so obvladljivi s konvencionalnimi metodami gašenja in alokacijo virov.

Nelinearna eksponentna rast
(Megapožari, FWI > 50)



Pri ekstremnih vremenskih pogojih se požari širijo eksponentno. Nobena metoda gašenja ne more zaustaviti megapožara – ugasnejo šele z naravnim izčrpanjem goriva ali spremembo vremena. Sistemska obremenitev preseže zmogljivost.

Arhitektura podatkovnega modela

1. Vhodni Modeli (Input)

- **Opazovani podatki:** ERA5 (Reanaliza ECMWF, 31 km ločljivost, 1981-2010).
- **Projekcije:** CMIP6 Večmodelske simulacije (Scenarij SSP2-4.5 in SSP4-8.5).



2. Računsko Jedro (Processing)

- **GEFF Model:** Global ECMWF Fire Forecast model preoblikuje dnevne atmosferske spremenljivke (temperatura, padavine, veter, vlaga).



3. Primarna Metrika (Output)

- **FWI (Fire Weather Index):** Kvantifikator potencialnega obnašanja požara in težavnosti supresije.



4. Statistična Analiza (Analytics)

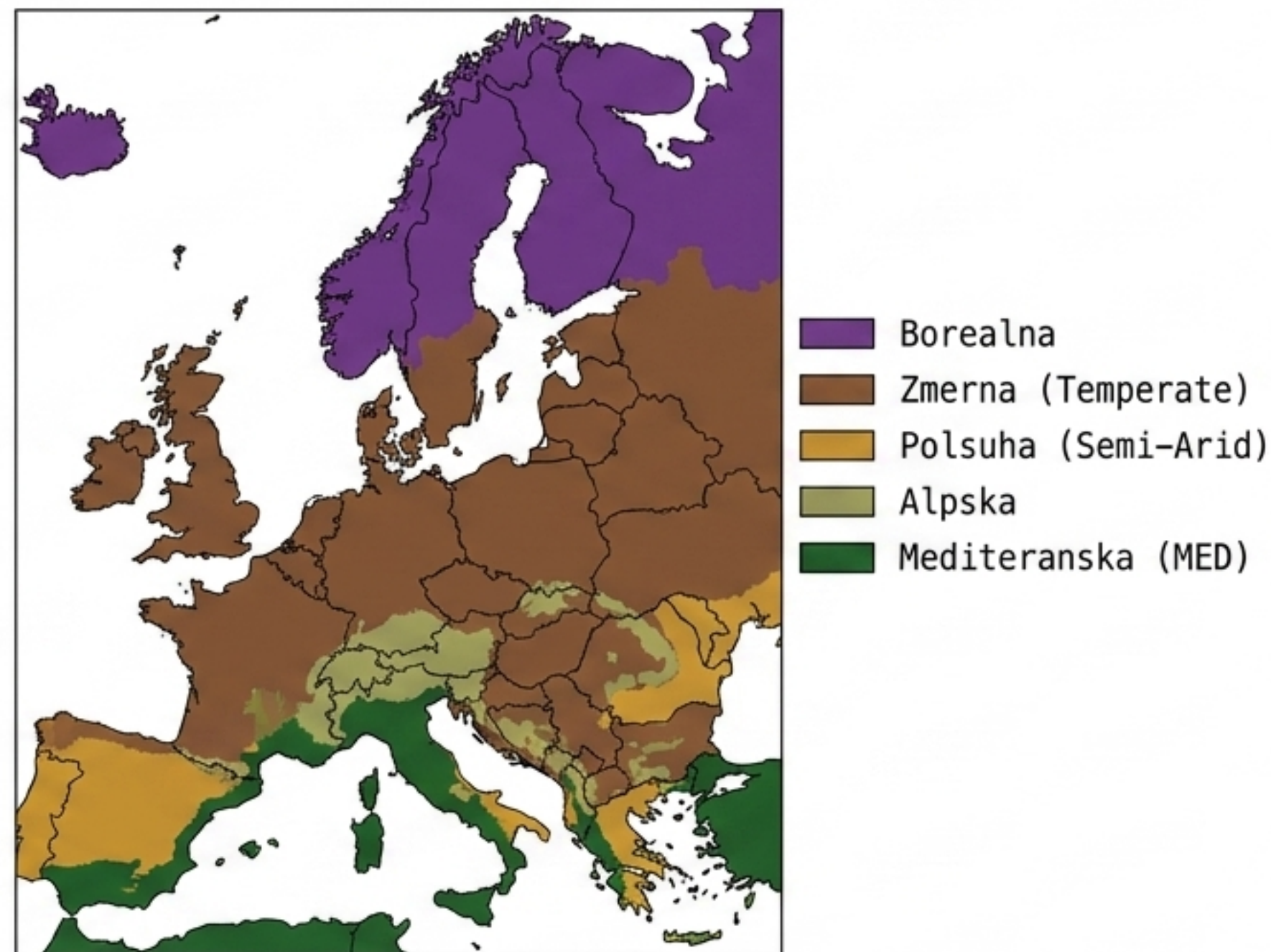
- Dvodimenzionalne površine odziva (IRS) in modeliranje povratnih dob.

Algoritemsko gručenje požarnih režimov (K-Means)

Analiza FWI časovnih vrst (april–oktober) zahteva identifikacijo regij s homogenimi požarnimi karakteristikami.

$$\arg \min \sum_{k=1}^K \sum_{i \in \mathcal{L}_k} \|y_i - \mu_k\|^2$$

Algoritem strojnega učenja brez nadzora (K-means) je optimiziral varianco znotraj gruč in identificiral K=5 stabilnih evropskih regij, pri čemer je upošteval dolžino sezone in intenzivnost (maksimalni FWI).



Referenčna matrika evropskih biosistemov (1981–2010)

Regija	20-letni prag FWI (Ekstrem)	Trenutna dolžina sezone (dni)
Mediterska (MED)	63 (Kritično)	115 dni (4 meseci)
Polsuha (Semi-Arid)	45 (Visoko)	55 dni
Zmerna (Temperate)	28 (Zmerno)	38 dni
Borealna (Boreal)	19 (Nizko)	35 dni
Alpska (Alpine)	15 (Nizko)	25 dni



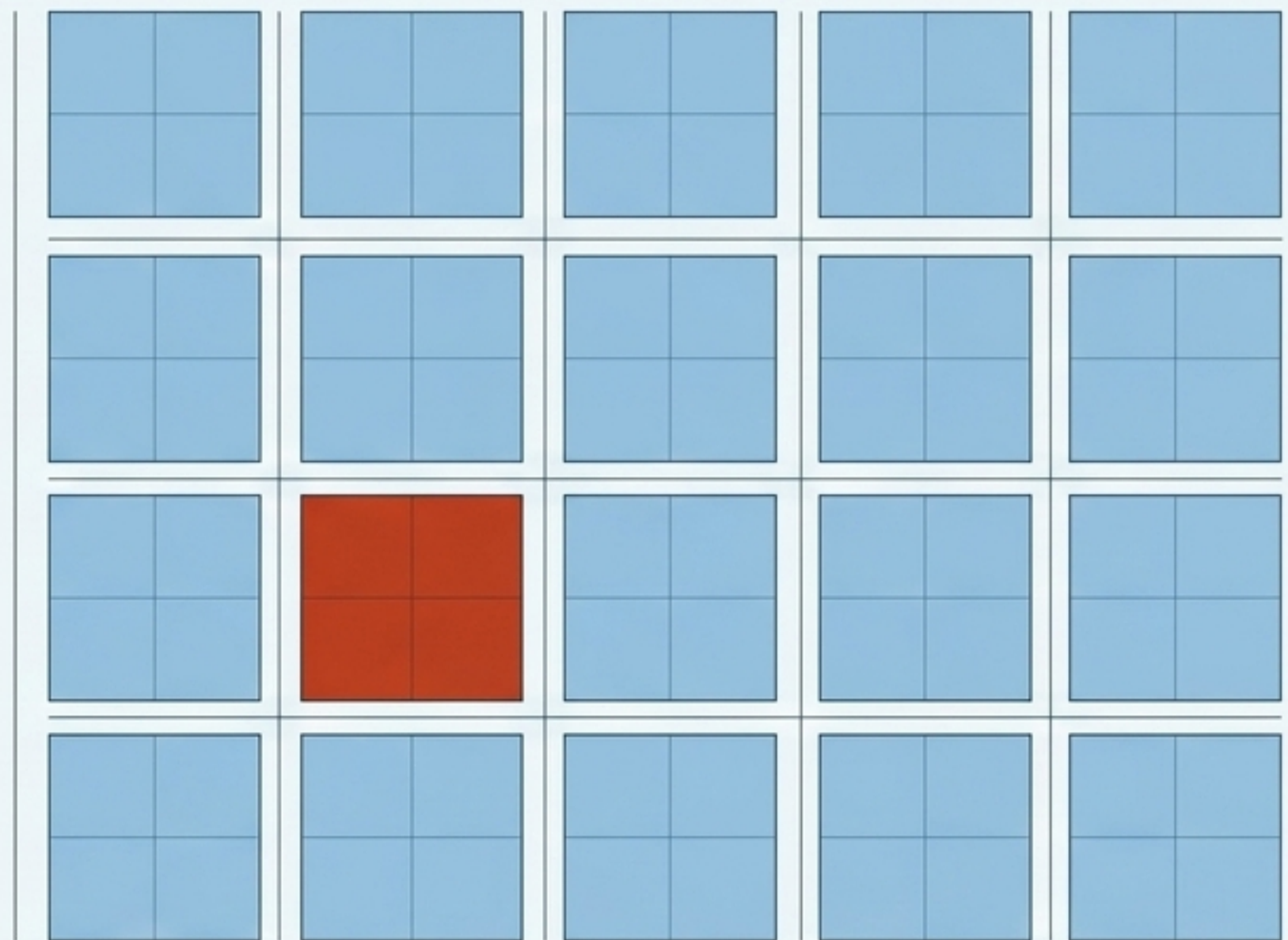
Mediterran že sedaj prenese 3x višjo požarno obremenitev in ima 4x daljšo sezono kot borealni/alpski sistemi pred nastopom 'ekstremnega' stanja.

Definicija ekstrema: 20-letna povratna doba

$$R = \frac{(n+1)}{m}$$

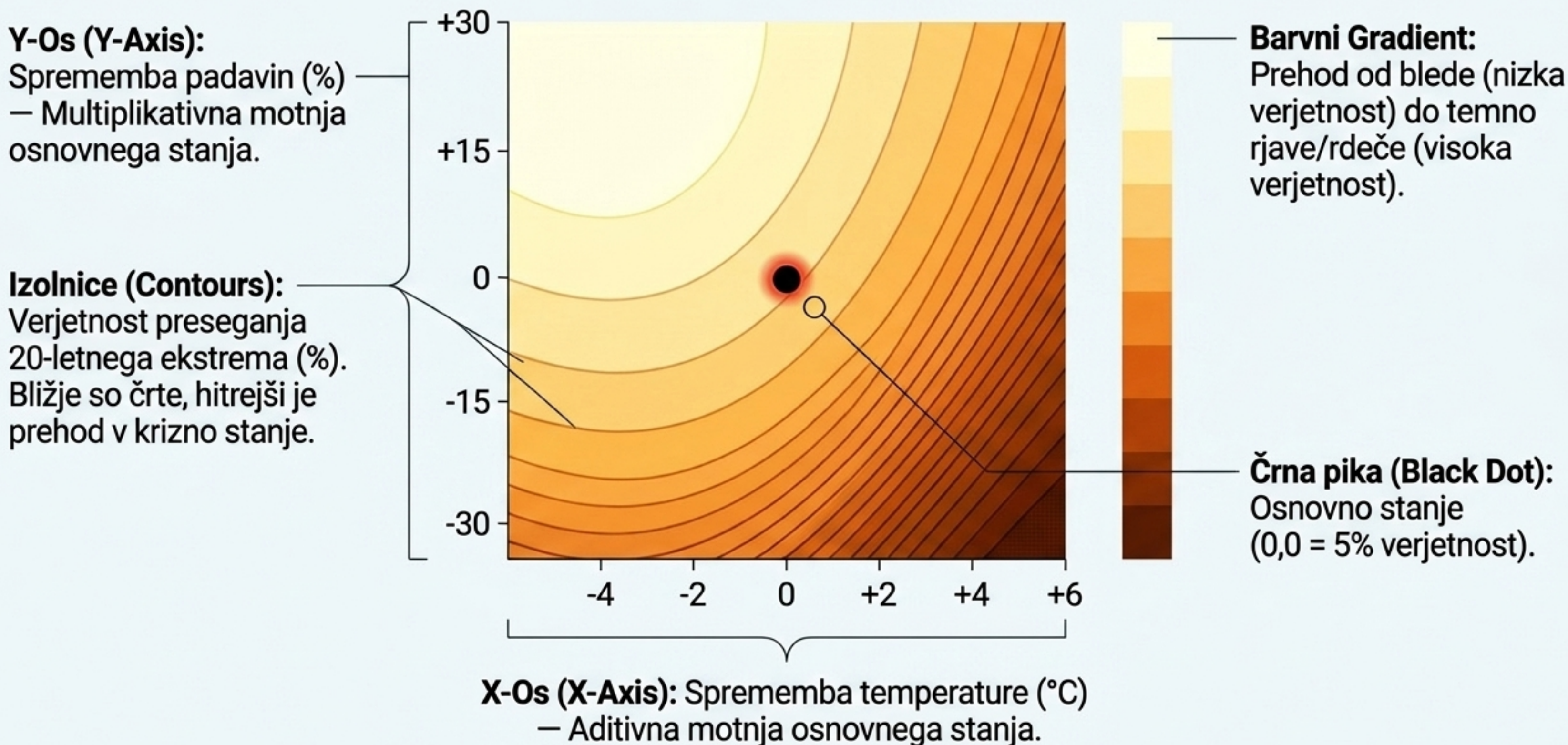
Povratna doba (R) definira intenzivnost dogodka. Z uporabo Weibullove formule, kjer je n število let in m rang maksimalne letne vrednosti FWI, raziskava postavi mejo ekstrema pri 20 letih.

To matematično pomeni 5% osnovno verjetnost, da bo ta vrednost FWI dosežena ali presežena v kateremkoli danem letu.

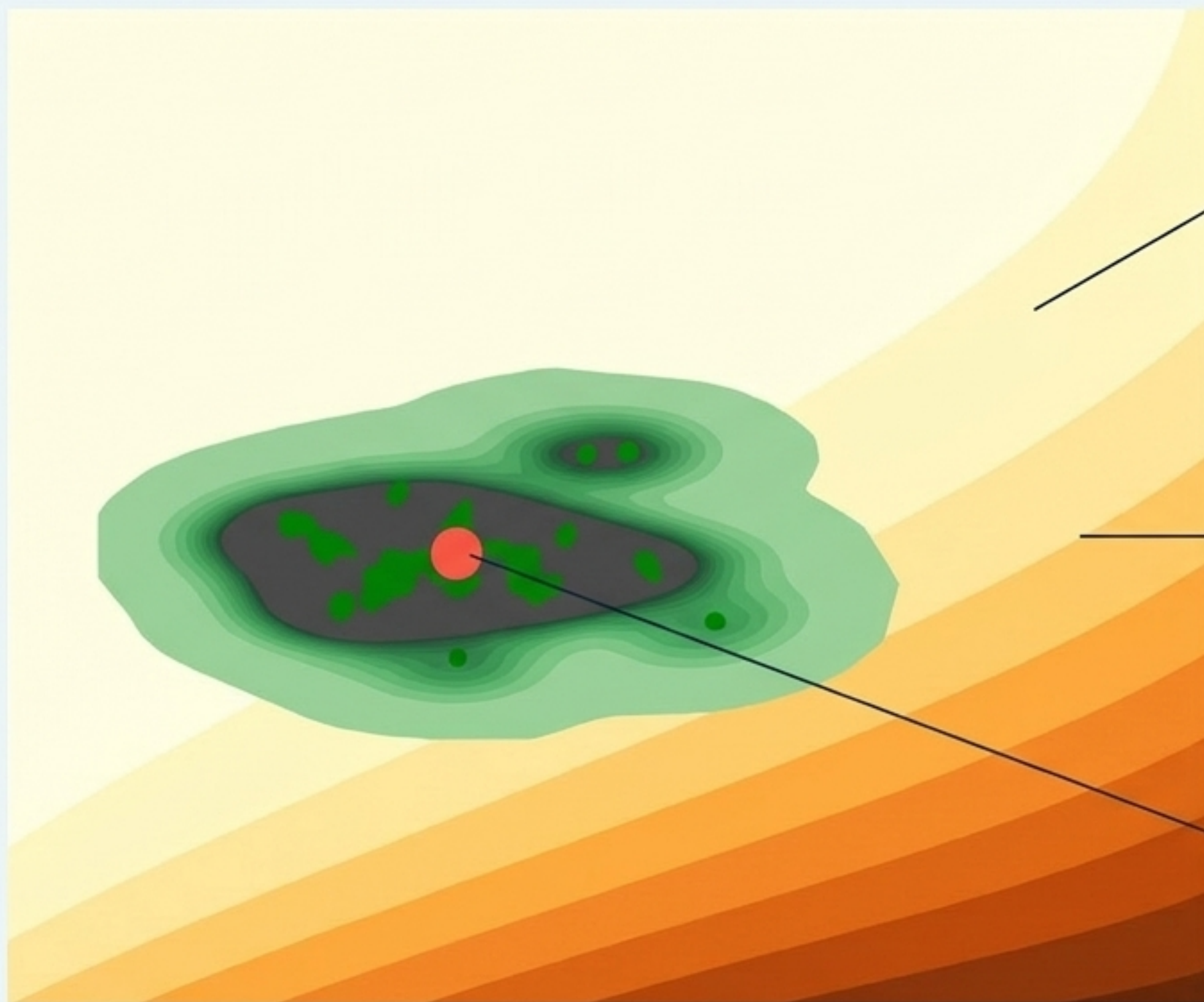


Osnovno stanje (Baseline): 1/20 let (5%) =
Prag sistemske tolerance.

Metodologija: Dvodimenzionalne površine odziva (IRS)



Analiza občutljivosti: Mediteranski sistem



Temperaturna dominanca

Regija je visoko občutljiva na zvišanje temperature. Dvig za 1 °C skoraj podvoji verjetnost ekstremnega požarnega dogodka.

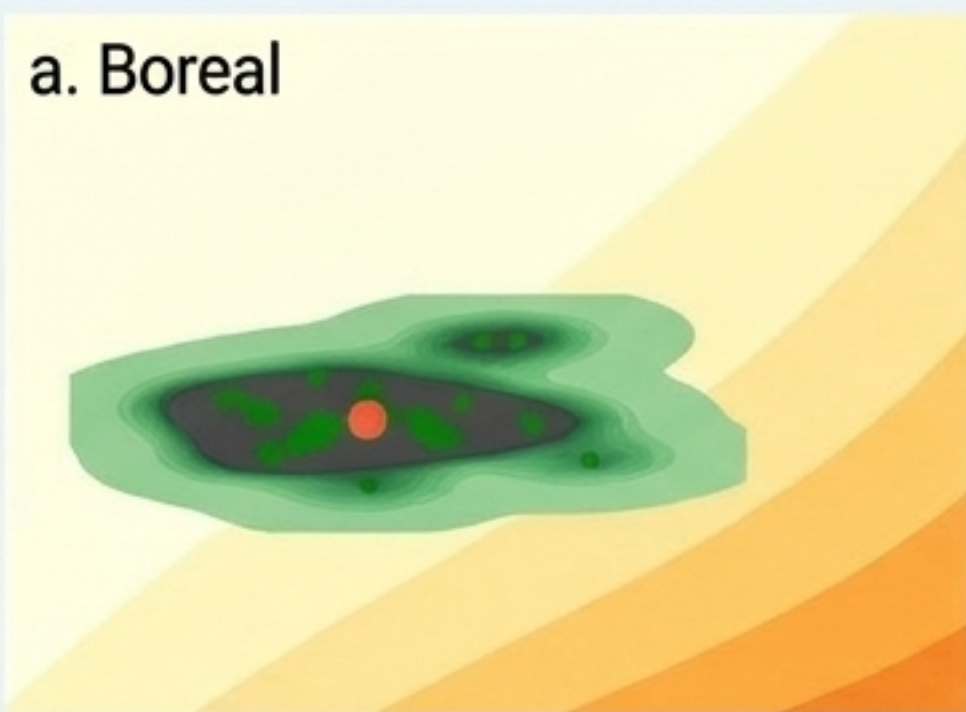
Asimetrija padavin

Zmanjšanje padavin ima manjši dodatni vpliv, saj so poletja že suha. Potrebno bi bilo kar 20% povečanje padavin samo za nevtralizacijo učinka 1 °C segrevanja.

Projekcija

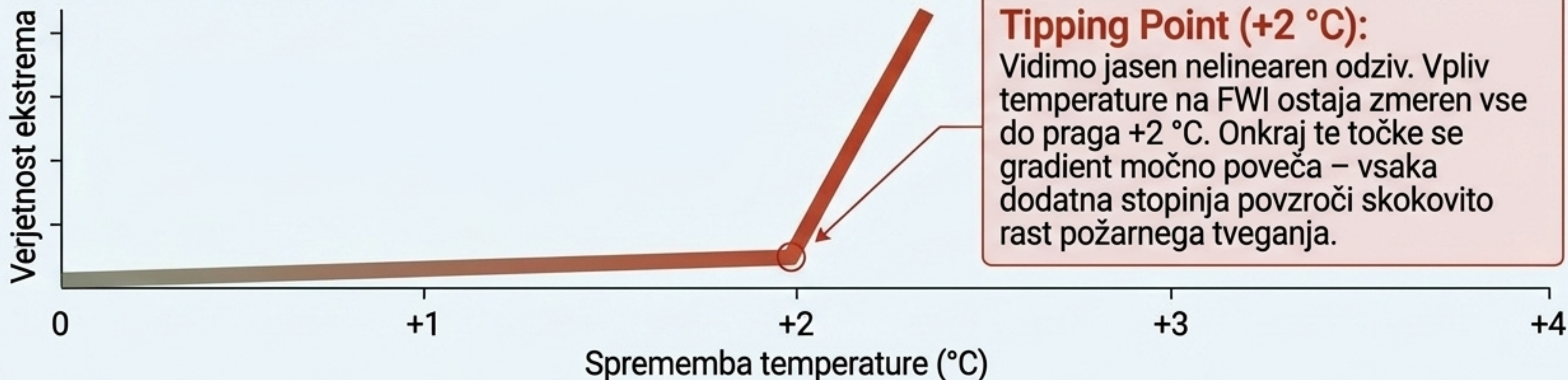
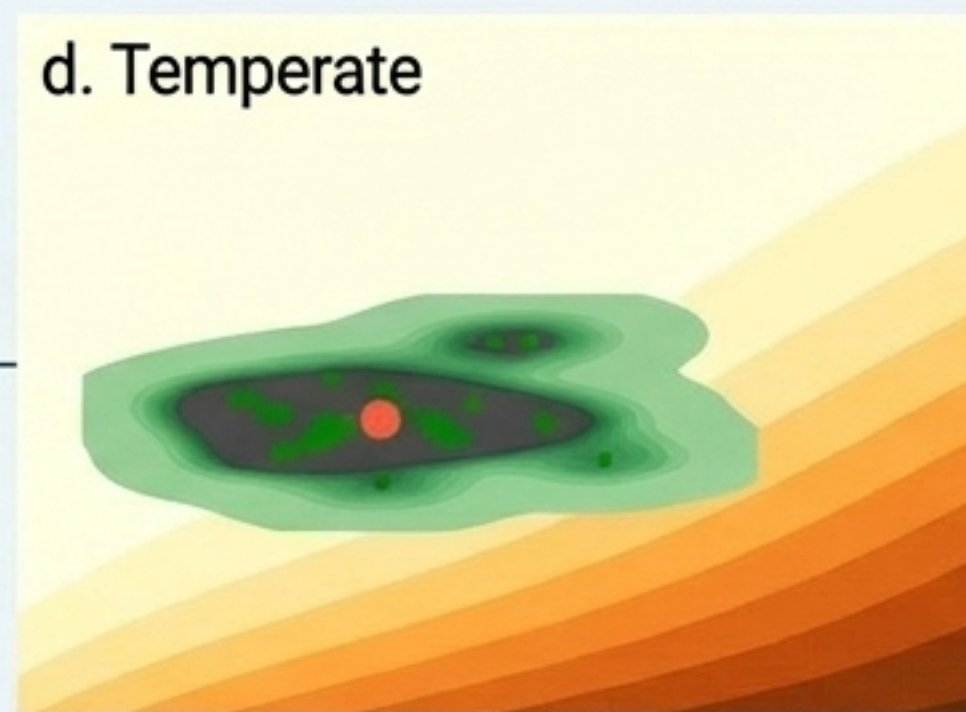
V kratkoročnem scenariju (SSP2-4.5) se sistem pomika globoko v kritično območje izolnic.

Nelinearni prag aktivacije: Borealni in zmerni pas



Padavinska občutljivost:

V nasprotju z Mediteranom sta ti regiji močno odvisni od padavin. 20% zmanjšanje padavin podvoji tveganje ekstrema (iz 5% na 10%).



Časovna razširitev sistemske obremenitve

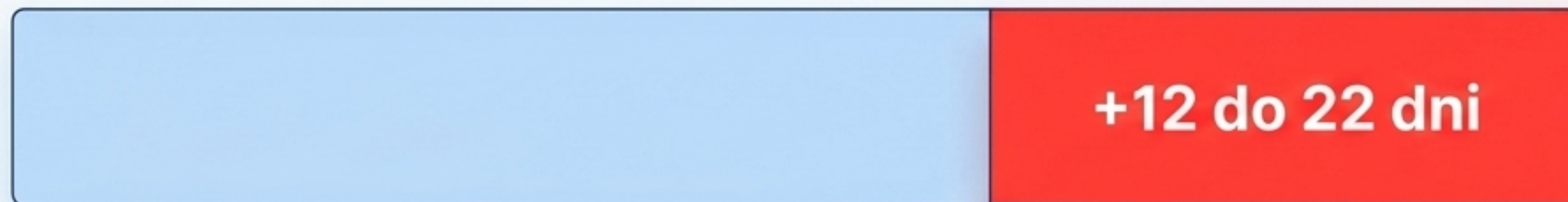
Definicija: Število dni, ko FWI preseže polovico praga 20-letne povratne dobe.

Sever (Boreal/Temperate)



Povečanje za ~1 teden.
Procentualno najvišji relativen
skok (+30% povečanje
potrebe po protipožarni
asistenci).

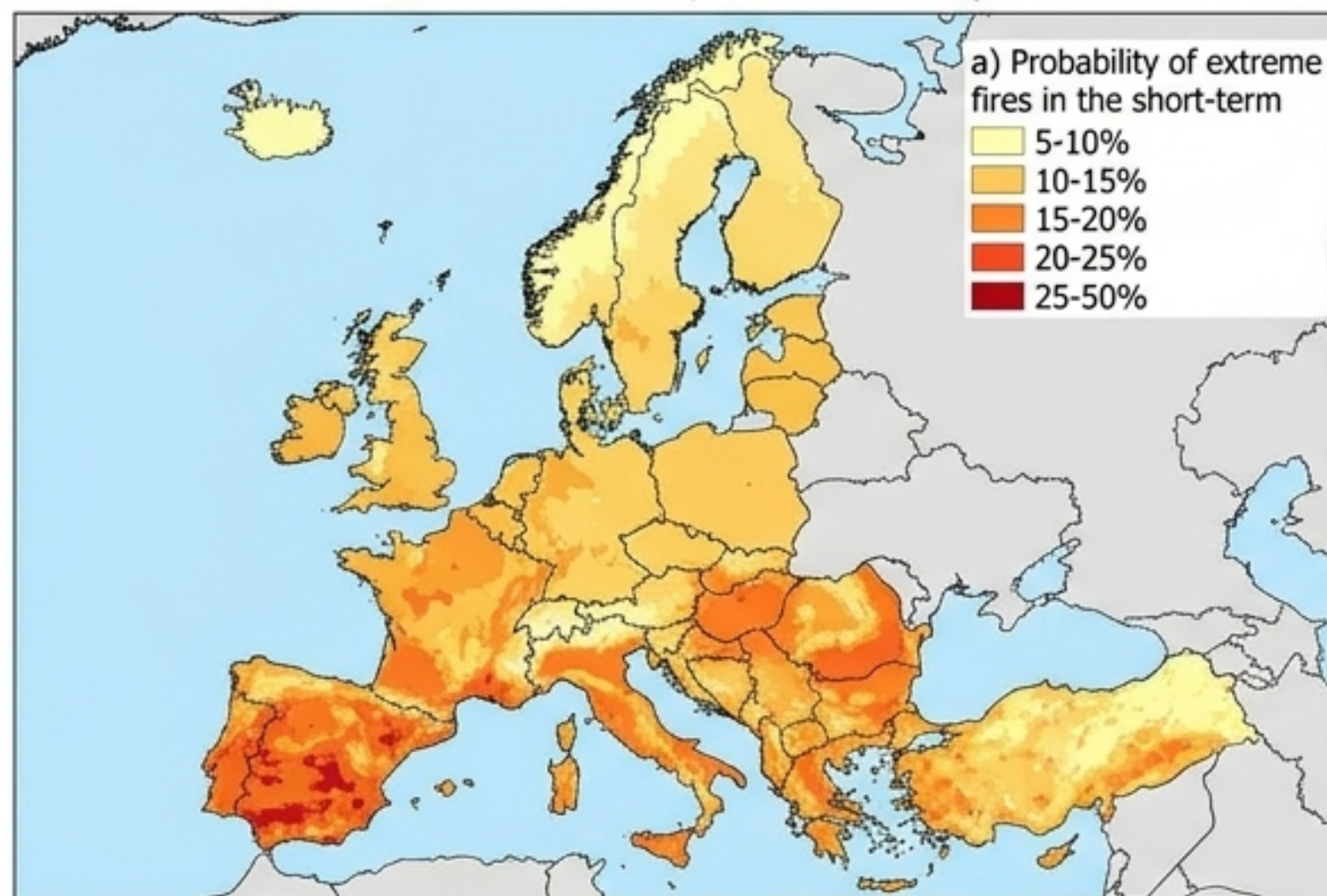
Jug (Mediterran)



Dolgoročni scenarij predvideva
**podaljšanje sezone za 12 do
22 dni**. Za regijo, ki ima že zdaj
115-dnevno sezono, to
predstavlja **neprekinjeno
neprekinjeno večmesečno
obremenitev** celotne
infrastrukture.

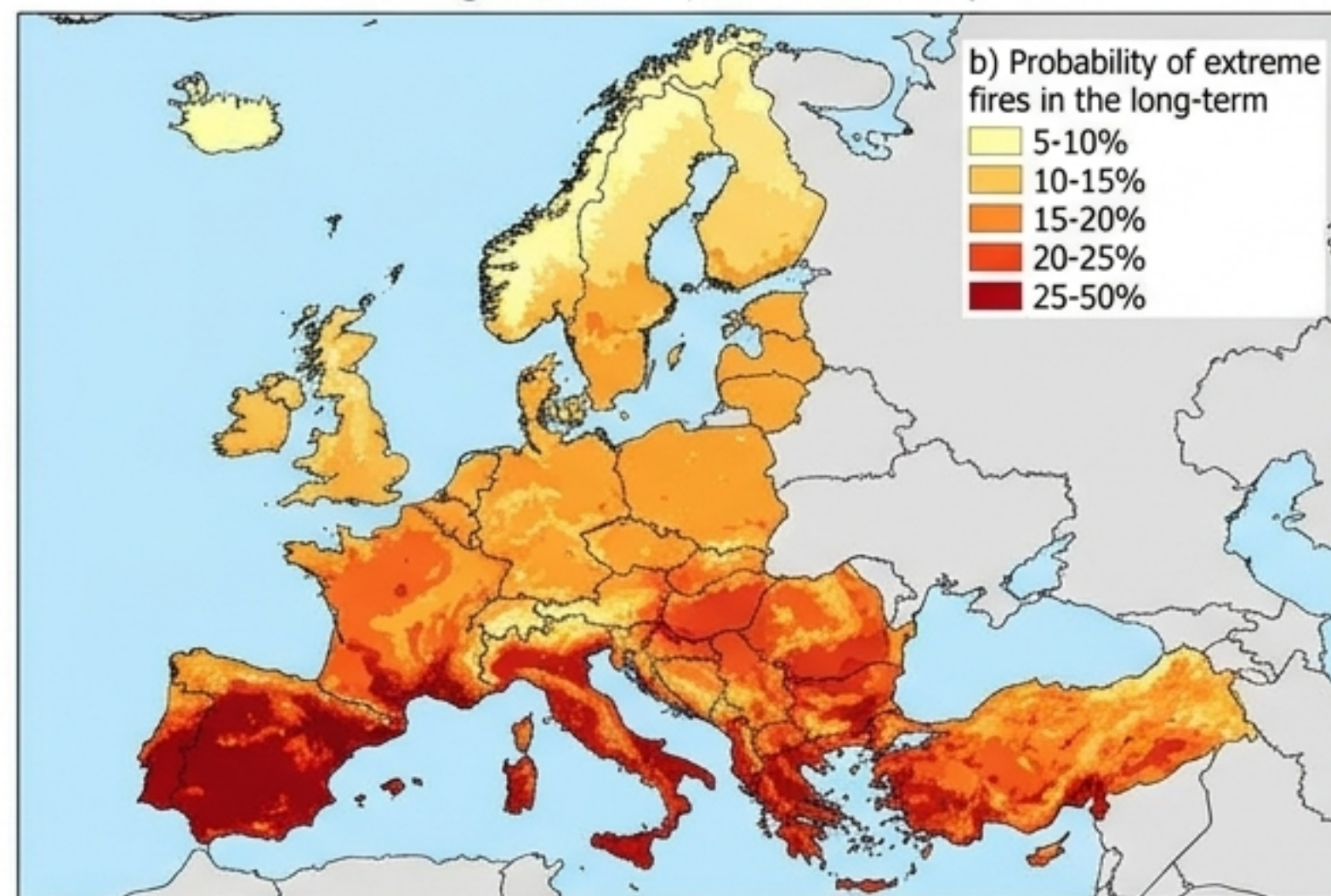
Prostorska ekspanzija tveganja (CMIP6 Projekcije)

Kratkoročno (2036-2065)



Več kot 50% celotnega evropskega ozemlja bo doživelo najmanj podvojitev verjetnosti ekstremnih požarov (skok iz 5% na 10%).

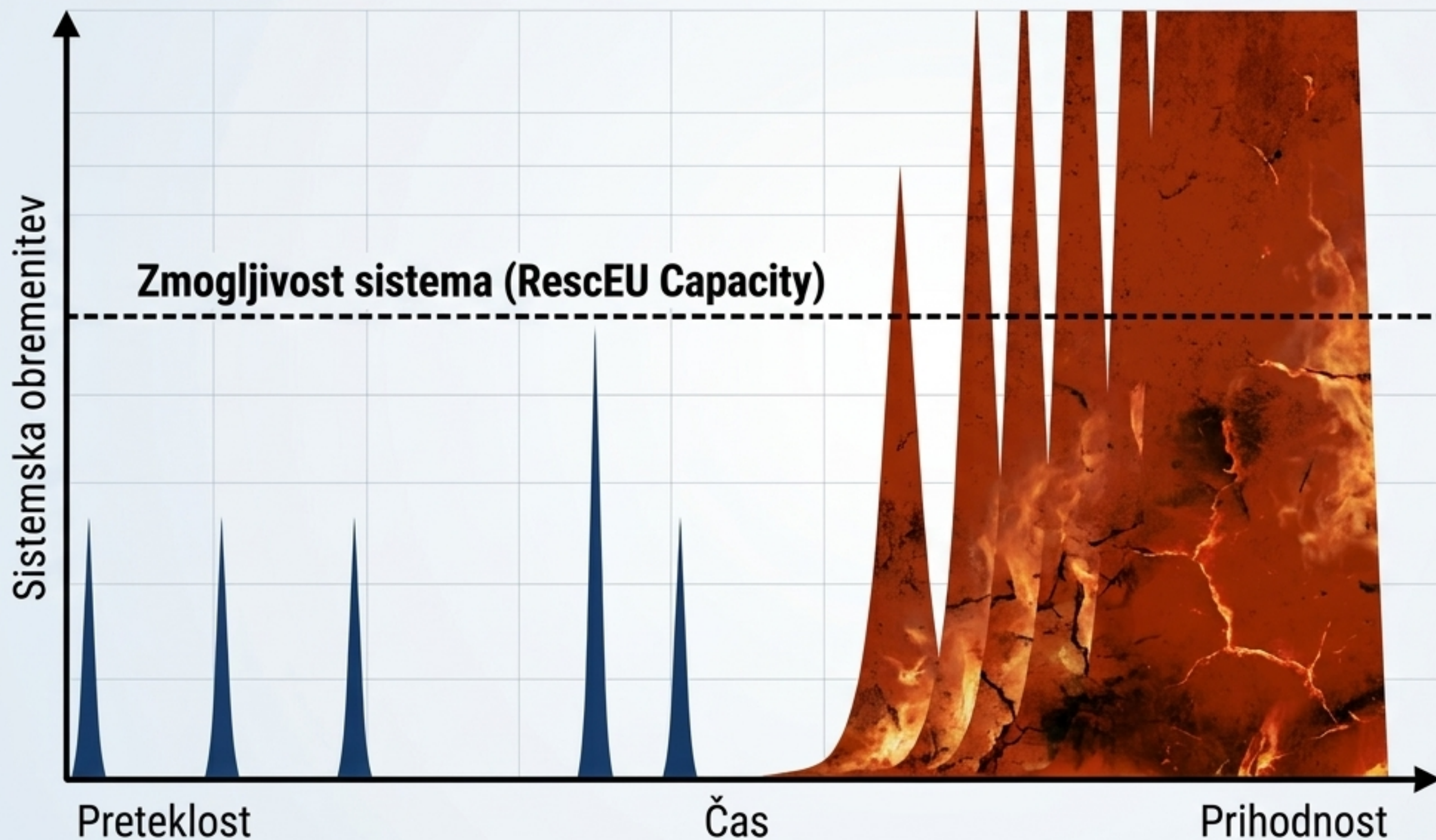
Dolgoročno (2070-2099)



Pojavijo se lokalizirana žarišča v Mediteranu (Pirenejski polotok, južna Francija, Grčija), kjer model napoveduje desetkratno povečanje tveganja.

****Prevod: Dogodek z 20-letno povratno dobo bo na teh območjih nastopil z 50% verjetnostjo vsako leto.****

Zlom load-balancing infrastrukture (RescEU)



- ❑ Trenutni evropski mehanizem civilne zaščite (RescEU) deluje na principu **deljenja virov** (letala, posadke) med državami.
- ❑ Ta load-balancing je matematično izvedljiv le, če so **ekstremni dogodki prostorsko in časovno izolirani** (verjetnost 5%).
- ❑ Premik **verjetnosti na 25–50%** in **podaljšanje sezon** pomeni **istočasno aktivacijo vseh regij**. Zmogljivost sistema **odpove** zaradi **hkratnosti obremenitev**, ne zgolj zaradi intenzivnosti posameznega požara.

Omejitve modela in mejni pogoji

Fiksno gorivo (Vegetacija)

Model FWI meri zgolj atmosferske pogoje. Predpostavlja konstantno razpoložljivost biomase, brez upoštevanja popožarne obnove ali sušnega umiranja dreves.



Statični viri vžiga

Predpostavlja, da antropogeni vžigi (96% v Evropi) ostanejo na trenutni ravni. Model ne upošteva podnebno pogojenega povečanja strel v borealnih območjih.



Brez mitigacije

Model sledi emisijski trajektoriji SSP2-4.5 brez upoštevanja morebitnih novih masovnih posegov v preoblikovanje pokrajine (land use management) in novih tehnologij gašenja.



Od gašenja k mitigaciji: Sprememba paradigme

Modeli nedvoumno dokazujejo prehod okoljskega sistema v novo ravnovesno stanje. Ko dogodek z **20-letno povratno dobo** postane dvoletni dogodek, gašenje (extinction) postane stroškovno in termodinamično nevzdržno.



1

Borealni/Zmerni pas

Nelinearni preskoki tveganja ob dosegu pragov (+2°C).

2

Mediterran

Stalno stanje preobremenjenosti sistema.

3

Inženirski imperativ

Sisteme zaščite je potrebno prestrukturirati od reaktivne asistence proti proaktivni modifikaciji gorivnih baz in zmanjševanju obremenitev.