

Zbornik 28. mednarodne multikonference
INFORMACIJSKA DRUŽBA – IS 2025
Zvezek D

Proceedings of the 28th International Multiconference
INFORMATION SOCIETY – IS 2025
Volume D

Miti in resnice o varovanju okolja
Myths and Truths About Environmental Protection

Uredniki / Editors

Matjaž Gams, Rafael Mihalič, Tomaž Crnin, Erik Margan

<http://is.ijs.si>

October 2025 / 7 October 2025
Ljubljana, Slovenia

Uredniki:

Matjaž Gams

Odsek za inteligentne sisteme, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

Rafael Mihalič

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

Tomaž Ogrin

Oddelek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

Erik Margan

Oddelek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

Založnik: Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

Priprava zbornika: Mitja Lasič, Vesna Lasič, Vesna Zemljak

Oblikovanje naslovnice: Vesna Lasič

Dostop do e-publikacije:

<http://library.ijs.si/Stacks/Proceedings/InformationSociety>

Ljubljana, oktober 2025

Informacijska družba

ISSN 2630-371X



PREDGOVOR MULTIKONFERENCI INFORMACIJSKA DRUŽBA 2025

28. mednarodna multikonferenca *Informacijska družba* se odvija v času izjemne rasti umetne inteligence, njenih aplikacij in vplivov na človeštvo. Vsako leto vstopamo v novo dobo, v kateri generativna umetna inteligenca ter drugi inovativni pristopi oblikujejo poti k superinteligenci in singularnosti, ki bosta krojili prihodnost človeške civilizacije. Naša konferenca je tako hkrati tradicionalna znanstvena in akademsko odprta, pa tudi inkubator novih, pogumnih idej in pogledov.

Letošnja konferenca poleg umetne inteligence vključuje tudi razprave o perečih temah današnjega časa: ohranjanje okolja, demografski izzivi, zdravstvo in preobrazba družbenih struktur. Razvoj UI ponuja rešitve za številne sodobne izzive, kar poudarja pomen sodelovanja med raziskovalci, strokovnjaki in odločevalci pri oblikovanju trajnostnih strategij. Zavedamo se, da živimo v obdobju velikih sprememb, kjer je ključno, da z inovativnimi pristopi in poglobljenim znanjem ustvarimo informacijsko družbo, ki bo varna, vključujoča in trajnostna.

V okviru multikonference smo letos združili dvanajst vsebinsko raznolikih srečanj, ki odražajo širino in globino informacijskih ved: od umetne inteligence v zdravstvu, demografskih in družinskih analiz, digitalne preobrazbe zdravstvene nege ter digitalne vključenosti v informacijski družbi, do raziskav na področju kognitivne znanosti, zdrave dolgoživosti ter vzgoje in izobraževanja v informacijski družbi. Pridružujejo se konference o legendah računalništva in informatike, prenosu tehnologij, mitih in resnicah o varovanju okolja, odkrivanju znanja in podatkovnih skladiščih ter seveda Slovenska konferenca o umetni inteligenci.

Poleg referatov bodo okrogle mize in delavnice omogočile poglobljeno izmenjavo mnenj, ki bo pomembno prispevala k oblikovanju prihodnje informacijske družbe. »Legende računalništva in informatike« predstavljajo domači »Hall of Fame« za izjemne posameznike s tega področja. Še naprej bomo spodbujali raziskovanje in razvoj, odličnost in sodelovanje; razširjeni referati bodo objavljeni v reviji *Informatica*, s podporo dolgoletne tradicije in v sodelovanju z akademskimi institucijami ter strokovnimi združenji, kot so ACM Slovenija, SLAIS, Slovensko društvo Informatika in Inženirska akademija Slovenije.

Vsako leto izberemo najbolj izstopajoče dosežke. Letos je nagrado *Michie-Turing* za izjemen življenjski prispevek k razvoju in promociji informacijske družbe prejel **Niko Schlamberger**, priznanje za raziskovalni dosežek leta pa **Tome Eftimov**. »Informacijsko limono« za najmanj primerno informacijsko tematiko je prejela odsotnost obveznega pouka računalništva v osnovnih šolah. »Informacijsko jagodo« za najboljši sistem ali storitev v letih 2024/2025 pa so prejeli Marko Robnik Šikonja, Damir Vreš in Simon Krek s skupino za slovenski veliki jezikovni model GAMS. Iskrene čestitke vsem nagrajencem!

Naša vizija ostaja jasna: prepoznati, izkoristiti in oblikovati priložnosti, ki jih prinaša digitalna preobrazba, ter ustvariti informacijsko družbo, ki koristi vsem njenim članom. Vsem sodelujočim se zahvaljujemo za njihov prispevek — veseli nas, da bomo skupaj oblikovali prihodnje dosežke, ki jih bo soustvarjala ta konferenca.

Mojca Ciglarič, predsednica programskega odbora
Matjaž Gams, predsednik organizacijskega odbora

FOREWORD TO THE MULTICONFERENCE INFORMATION SOCIETY 2025

The 28th International Multiconference on the Information Society takes place at a time of remarkable growth in artificial intelligence, its applications, and its impact on humanity. Each year we enter a new era in which generative AI and other innovative approaches shape the path toward superintelligence and singularity — phenomena that will shape the future of human civilization. The conference is both a traditional scientific forum and an academically open incubator for new, bold ideas and perspectives.

In addition to artificial intelligence, this year's conference addresses other pressing issues of our time: environmental preservation, demographic challenges, healthcare, and the transformation of social structures. The rapid development of AI offers potential solutions to many of today's challenges and highlights the importance of collaboration among researchers, experts, and policymakers in designing sustainable strategies. We are acutely aware that we live in an era of profound change, where innovative approaches and deep knowledge are essential to creating an information society that is safe, inclusive, and sustainable.

This year's multiconference brings together twelve thematically diverse meetings reflecting the breadth and depth of the information sciences: from artificial intelligence in healthcare, demographic and family studies, and the digital transformation of nursing and digital inclusion, to research in cognitive science, healthy longevity, and education in the information society. Additional conferences include Legends of Computing and Informatics, Technology Transfer, Myths and Truths of Environmental Protection, Knowledge Discovery and Data Warehouses, and, of course, the Slovenian Conference on Artificial Intelligence.

Alongside scientific papers, round tables and workshops will provide opportunities for in-depth exchanges of views, making an important contribution to shaping the future information society. *Legends of Computing and Informatics* serves as a national »Hall of Fame« honoring outstanding individuals in the field. We will continue to promote research and development, excellence, and collaboration. Extended papers will be published in the journal *Informatica*, supported by a long-standing tradition and in cooperation with academic institutions and professional associations such as ACM Slovenia, SLAIS, the Slovenian Society Informatika, and the Slovenian Academy of Engineering.

Each year we recognize the most distinguished achievements. In 2025, the Michie-Turing Award for lifetime contribution to the development and promotion of the information society was awarded to **Niko Schlamberger**, while the Award for Research Achievement of the Year went to **Tome Eftimov**. The »Information Lemon« for the least appropriate information-related topic was awarded to the absence of compulsory computer science education in primary schools. The »Information Strawberry« for the best system or service in 2024/2025 was awarded to Marko Robnik Šikonja, Damir Vreš and Simon Krek together with their team, for developing the Slovenian large language model GAMS. We extend our warmest congratulations to all awardees.

Our vision remains clear: to identify, seize, and shape the opportunities offered by digital transformation, and to create an information society that benefits all its members. We sincerely thank all participants for their contributions and look forward to jointly shaping the future achievements that this conference will help bring about.

Mojca Ciglarič, Chair of the Program Committee
Matjaž Gams, Chair of the Organizing Committee

KONFERENČNI ODBORI

CONFERENCE COMMITTEES

International Programme Committee

Vladimir Bajic, South Africa
Heiner Benking, Germany
Se Woo Cheon, South Korea
Howie Firth, UK
Olga Fomichova, Russia
Vladimir Fomichov, Russia
Vesna Hljuz Dobric, Croatia
Alfred Inselberg, Israel
Jay Liebowitz, USA
Huan Liu, Singapore
Henz Martin, Germany
Marcin Paprzycki, USA
Claude Sammut, Australia
Jiri Wiedermann, Czech Republic
Xindong Wu, USA
Yiming Ye, USA
Ning Zhong, USA
Wray Buntine, Australia
Bezalel Gavish, USA
Gal A. Kaminka, Israel
Mike Bain, Australia
Michela Milano, Italy
Derong Liu, Chicago, USA
Toby Walsh, Australia
Sergio Campos-Cordobes, Spain
Shabnam Farahmand, Finland
Sergio Crovella, Italy

Organizing Committee

Matjaž Gams, chair
Mitja Luštrek
Lana Zemljak
Vesna Koricki
Mitja Lasič
Blaž Mahnič

Programme Committee

Mojca Ciglarich, chair
Bojan Orel
Franc Solina
Viljan Mahnič
Cene Bavec
Tomaž Kalin
Jozsef Györköcs
Tadej Bajd
Jaroslav Berce
Mojca Bernik
Marko Bohanec
Ivan Bratko
Andrej Brodnik
Dušan Caf
Saša Divjak
Tomaž Erjavec
Bogdan Filipič
Andrej Gams
Matjaž Gams
Mitja Luštrek
Marko Grobelnik
Nikola Guid

Marjan Heričko
Borka Jerman Blažič Džonova
Gorazd Kandus
Urban Kordeš
Marjan Krisper
Andrej Kuščer
Jadran Lenarčič
Borut Likar
Janez Malačič
Olga Markič
Dunja Mladenich
Franc Novak
Vladislav Rajkovič
Grega Repovš
Ivan Rozman
Niko Schlamberger
Gašper Slapničar
Stanko Strmčnik
Jurij Šilc
Jurij Tasič
Denis Trček
Andrej Ule

Boštjan Vilfan
Baldomir Zajc
Blaž Zupan
Boris Žemva
Leon Žlajpah
Niko Zimic
Rok Piltaver
Toma Strle
Tine Kolenik
Franci Pivec
Uroš Rajkovič
Borut Batagelj
Tomaž Ogrin
Aleš Ude
Bojan Blažica
Matjaž Kljun
Robert Blatnik
Erik Dovgan
Špela Stres
Anton Gradišek

KAZALO / TABLE OF CONTENTS

<i>Miti in resnice o varovanju okolja / Myths and Truths About Environmental Protection.....</i>	<i>1</i>
PREDGOVOR / FOREWORD	3
PROGRAMSKI ODBORI / PROGRAMME COMMITTEES	5
Kako zanesljivi so klimatografski, demografski in AI modeli? / Gams Matjaž.....	7
Energetska Učinkovitost in Prehod na Alternativne Pogone v Prometnem Sektorju: Analiza Stališč Podjetij v Sloveniji / Blekač Erika, Lovrenčič Držanič Irena, Horvat Laura, Gialelis Giannis, Kožuh Ines	13
Asset-Risk-Weighted Spectral Partitioning to Improve the Resilience of Water Distribution Networks / Kozelj Daniel	17
Prioritizing Leaks that Matter: Evidence-Based Assessment of Water Loss KPIs / Kozelj Daniel	22
Intensification of dairy farming reduces the nitrogen footprint of milk production / Vrbič Jože, Jeretina Janez	30
Conformity of LCA Data to Benford's Law: A Country-Level Perspective / Šinik Bogdan, Tošić Aleksander.....	34
Nuclear fuel cycle / Valenčič Matjaž	38
Kako "obnovljivi viri energije niso bili vzrok letošnjega razpada španskega elektroenergetskega sistema" / Mihalič Rafael, Rudež Urban.....	42
On the Climate Sensitivity to Atmospheric CO2 Concentration / Margan Erik	49
Kmetijstvo in podnebne spremembe / Ogrin Tomaž.....	54
Pumping Scheduling Optimization for Water Distribution Systems with Day-Ahead Electricity Pricing / Kozelj Daniel	64
<i>Indeks avtorjev / Author index</i>	<i>71</i>

Zbornik 28. mednarodne multikonference
INFORMACIJSKA DRUŽBA – IS 2025
Zvezek D

Proceedings of the 28th International Multiconference
INFORMATION SOCIETY – IS 2025
Volume D

Miti in resnice o varovanju okolja
Myths and Truths About Environmental Protection

Uredniki / Editors

Matjaž Gams, Rafael Mihalič, Tomaž Crnin, Erik Margan

<http://is.ijs.si>

October 2025 / 7 October 2025
Ljubljana, Slovenia

PREDGOVOR

Letošnjo konferenco o okoljski problematiki odpiramo z eno novostjo, okroglo mizo o jedrski energiji.

Energetika je eden najpomembnejših dejavnikov človeškega vpliva na okolje. Nesluteno hiter razvoj, ki ga je omogočil razvoj oskrbe z energijo pa ima na žalost tudi nekatere negativne posledice, ki jih danes nekateri močno izpostavljajo, a hkrati zamolčijo vse dobrobiti tega razvoja. Zgolj zmanjšanje rabe energije, kar nekateri predlagajo, pa tudi ni odgovor na probleme, saj je elektrifikacija industrije pomembno vplivala na zmanjšanje onesnaževanja okolja. Pri tem je ena pomembnejših značilnosti energijska gostota virov in pri tej lastnosti ima jedrska energija občutno prednost pred ostalimi viri. Seveda pa ima jedrska energija tudi svoje problematične značilnosti, za kar je potrebno posebej poskrbeti, če naj bo delovanje jedrskih elektram zanesljivo in tveganje minimalno.

Ker pa noben energetski vir ni povsem brez tveganja in brez vpliva na okolje, je za sprejemljivo strategijo razvoja nujno temeljito pretehtati vse primerjalne lastnosti, vplive in stroške posameznih virov. Življenjske izkušnje nas učijo, da se ni dobro zanašati na eno samo rešitev in en sam vir energije, zato je potrebno v odkriti in kar se da široki javni razpravi najti ustrezno kombinacijo virov, ki bo sprejemljiva za večino prebivalcev in gospodarskih dejavnosti. Uredniški odbor si želi, da bi razprava v okviru te konference konstruktivno prispevala svoj strokovni delež k splošni družbeni razpravi in sprejetju ustrezne strategije razvoja.

Veseli smo, da smo tudi za letošnjo konferenco prejeli lepo število kvalitetnih prispevkov, poleg energetike tudi za druge vidike okoljske problematike, poleg že tradicionalne kmetijske problematike še problematiko oskrbe z vodo, prometno problematiko, ter nekatere teoretične vidike splošne podnebne problematike.

Kot vedno pa želimo poudariti, da je temeljni cilj konference odpiranje dialoga o vseh spornih temah in različnih vidikih prihodnjega razvoja družbe, saj edino skozi odprti dialog lahko pridemo do kvalitetnih in sprejemljivih rešitev. Ne moremo pristati na tezo, ki jo radi razširjajo podnebni aktivisti, da je znanost že vse dorekla, da je čas za debato potekel in da je čas za akcijo. Osnovna značilnost znanosti, pa tudi tehnologije je nenehno in vsakodnevno preverjanje dosedanjih spoznanj in iskanje novih. Zato je nujno že sprejete družbene razvojne in politične usmeritve sproti preverjati in vrednotiti v luči novih spoznanj in sprejemati ustrezne popravke. Prizadevamo si, da bodo spoznanja predstavljena na tej konferenci pripomogla k lažjemu sprejemanju prihodnjih odločitev.

Uredniški odbor
prof. dr. Matjaž Gams
prof. dr. Rafael Mihalič
mag. Tomaž Ogrin
Erik Margan
Ljubljana, 7.10.2025

FOREWORD

This year's conference on environmental issues opens with a new feature, a roundtable on nuclear energy.

Energy is one of the most important factors of human impact on the environment. The unexpected high rate of development of energy supply has sadly shown also some negative effects, which some excessively expose, while not mentioning all the positive aspects of that development. A sheer reduction of energy use, which is often being advocated, is neither the answer to the problems, as the electrification of industry has significantly contributed to a reduction of environmental pollution. One of the key characteristics in this regard is the energy density of sources, and in this respect nuclear energy has a clear advantage over other sources. Of course, nuclear energy also has its problematic characteristics, which must be carefully addressed in order to ensure the reliable operation of nuclear power plants and to minimize risk.

Since no energy source is entirely risk-free or without environmental impact, a thorough consideration of all comparative characteristics, impacts, and costs of individual sources is essential for an acceptable development strategy. Life experience teaches us that it is unwise to rely on a single solution and a single energy source, and therefore it is necessary, in an open and as broad as possible public debate, to find an appropriate combination of sources acceptable to most citizens and economic activities. The editorial board hopes that the discussions within this conference will constructively contribute their professional share to the general social debate and the adoption of an appropriate development strategy.

We are pleased that this year's conference has again received a good number of high-quality contributions, covering not only energy but also other aspects of environmental issues. In addition to the traditional focus on agriculture, this includes issues of water supply, transportation, and some theoretical aspects of the general climate problem.

As always, we wish to emphasize that the fundamental goal of the conference is to open dialogue on all contentious topics and the various aspects of future societal development, since only through open dialogue can we arrive at quality and acceptable solutions. We cannot accept the thesis often promoted by climate activists that science is settled, that the time for debate is over, and that now is the time for action. The essential characteristic of science, and of technology as well, is the constant and daily re-examining and verification of existing knowledge and the search for new insights. It is therefore necessary to continuously review and evaluate already adopted societal development and political directions in light of new findings, and to make appropriate adjustments. We strive for the insights presented at this conference to contribute to easier decision-making in the future.

The Editorial Board:
prof. dr. Matjaž Gams
prof. dr. Rafael Mihalič
mag. Tomaž Ogrin
Erik Margan
Ljubljana, 7 October 2025

PROGRAMSKI ODBOR / PROGRAMME COMMITTEE

Matjaž Gams

Rafael Mihalič

Tomaž Ogrin

Erik Margan

Kako zanesljivi so klimatografski, demografski in AI modeli?

How reliable are climate, demographic, and AI models?

Matjaž Gams[†]

Odsek za inteligentne sisteme
Jozef Stefan Institute
Ljubljana, Slovenija
matjaz.gams@ijs.si

Abstract / Povzetek

Prispevek analizira zanesljivost klimatografskih, demografskih in AI modelov, ki napovedujejo prihodnost podnebja, prebivalstva in tehnološkega razvoja. Zgodovinske napake, kot so napovedi o potopitvi Londona v konjske iztrebke ali izčrpanju virov v "Mejah rasti" (1972), opozarjajo na previdnost pri modelih. Moderni klimatografski modeli (npr. GCM) so zanesljivi za trende segrevanja (napaka <4 %), a manj za regionalne ekstreme (10–20 % napake). Skeptiki, kot je Steve Koonin, kritizirajo njihovo pretiravanje in politično pristranskost. Demografski modeli so zelo zanesljivi in kvalitetni (90–96 % za svetovne ocene), potrjujejo upad rodnosti v Evropi (<1,5) tveganje demografskega preobrata zaradi migracij in dolgoročno izumrtja malih narodov. AI modeli hitro napredujejo (IQ LLM-jev raste za 20–30 točk na generacijo), a napovedi o superinteligenci (2029–2040) so negotove. EU regulacije (AI Act) zavirajo inovacije in razvoj EU, saj je AI med najbolj hitro razvijajočimi se in koristnimi področji. Znanost je potrebno očistiti ideologije, rasizma in vseh drugih diskriminacij.

Ključne besede

Klimatografski modeli, demografski modeli, AI modeli, znanost brez ideologije

Abstract

The paper analyzes the reliability of climate, demographic, and AI models that predict the future of climate, population, and technological development. Historical errors, such as predictions of London being submerged in horse manure or resource depletion in "Limits to Growth" (1972), caution against overreliance on models. Climate models (e.g., GCM) are reliable for warming trends (error <4%) but less so for regional extremes (10–20% error), with sceptics like Steve Koonin criticizing their exaggeration and political bias. Demographic models are accurate (90–96% for global estimates), confirming Europe's declining fertility (<1.5) and the risk of demographic reversal due to migration. AI models are rapidly advancing (LLM IQ increasing by 20–30 points per generation), but predictions of superintelligence (2029–2040) remain uncertain. EU regulations (AI Act) hinder innovation and EU development, as AI is among the most rapidly evolving and beneficial fields. Science must be

.Kako zanesljivi so klimatografski, demografski in AI modeli?

[†]Matjaž Gams

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

© 2025 Copyright held by the owner/author(s).

<https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.1>

cleansed of ideology, racism, and all other forms of discrimination.

Keywords

Climate models, demographic models, AI models, science without ideology

1 Uvod

V medijih in celo v strokovnih krogih se pogosto pojavljajo dramatične napovedi o prihodnosti človeške civilizacije in velo planeta, ki se zdijo pretirane ali vsaj vprašljive. Te napovedi segajo od podnebnih katastrof do demografskih ekstremov; pogosto temeljijo na modelih, ki naj bi opisovali in napovedovali kompleksne sisteme, kot so podnebje, populacija ali viri. Vendar zgodovina kaže, da so številne napovedi zgrešene, kar postavlja pod vprašaj zanesljivost uporabljenih modelov. Izgovor, da so bili vsi stari modeli nezanesljivi, sedanji pa so zanesljivi, ne vzbuja posebnega zaupanja. Zato bomo skušali oceniti zanesljivost posameznih napovedi in razloge za težave. Hkrati bomo skušali oceniti, kateremu modelu koliko verjeti.

Začnimo z nekaj preprostimi primeri iz preteklosti. Konec 19. stoletja so strokovnjaki v Londonu napovedovali, da bo mesto dobesedno potopljeno v konjskih iztrebkih [1]. Zaradi hitre urbanizacije in rasti števila konjskih vpreg so ocenili, da bo do leta 1950 plast iztrebkov dosegla tri metre višine, kar bo onemogočilo normalno življenje. Ta napoved se ni uresničila, saj je prišlo do tehnološke inovacije – avtomobila. Pa tudi brez avtomobila je bila napoved po zdravi pameti neverjetna. Na prvo misel bi dejali, da je bila napoved naivna, da ni upošteva realnih mehanizmov, ki bi stopili v veljavo, ko bi se situacija poslabšala. Recimo: ob zadosti veliki količini konjskih iztrebkov bi promet postal nemogoč, zato tudi ne bi bilo več novih iztrebkov. Ali pa: uvedli bi posebno službo, ki bi skrbno in sproti odvažala odvečne iztrebke in jih prodajala kmetom za pognojitev.

Podobno so v 70. letih prejšnjega stoletja nekateri klimatologi napovedovali novo ledeno dobo zaradi hlajenja ozračja, kar se je izkazalo za napačno interpretacijo kratkoročnih trendov [2]. Danes, ko so vsi mediji polni poročil o pregrevanju, se kaj takega zdi težko verjetno, a to so napovedovali najboljši modeli tedanjega časa – zgolj 50 let nazaj!

Eden najbolj znanih primerov strokovno urejenih in na prvi pogled smiselnih neuresničenih napovedi je poročilo Rimskega kluba "Meje rasti" (Limits to Growth) iz leta 1972, ki je na podlagi računalniških modelov napovedalo propad civilizacije do sredine 21. stoletja zaradi izčrpanja surovin, prenaseljenosti in onesnaženja [3]. Modeli so predvidevali kolaps gospodarstva in populacije, vendar se te napovedi niso uresničile. Recimo,

zlata naj bi začelo zmanjkovati okoli 1981, nafta 1992 in svinec 1993.

Osnovni razlog je bila človeška iznajdljivost: ko se je pojavil en problem, se ga je razrešilo z alternativnim pristopom [4]. Recimo: ko je tekoče nafta v ZDA začelo zmanjkovati, so jo začeli pridobivati iz oljnih skrilavcev. Hkrati so se dogajale znanstvene in tehnološke revolucije od zelene revolucije v kmetijstvu in boljše izraba virov do informacijske in sedaj revolucije umetne inteligence [5].

Kljub temu se podobni alarmistični toni ponavljajo že stoletja: danes slišimo, da bo morje kmalu poplavelo vsa obrežja in otočja, kot so Maldivi, da se bo planet pregrel do te mere, da življenje ne bo več mogoče, ali da bo Zemlja postala podobna Veneri z neobvladljivim učinkom tople grede. Demografski modeli pa nihajo med scenariji prenaseljenosti, kjer bo človeštvo izčrpalo vire, in izumrtja zaradi padajoče rodnosti, kar bi vodilo v propad družb. Umetna inteligenca pa bo uničila človeštvo ali bo rešitev človeške civilizacije [5].

Te napovedi niso le poceni medijske senzacije, ampak nekatere izhajajo iz kompleksnih, zapletenih, naprednih modelov, kot so klimatografski (npr. GCM – General Circulation Models) ali demografskih (npr. modeli ZN ali EU za populacijsko dinamiko). Ker ti modeli nesporno napredujejo, se postavlja vprašanje, ali jim gre sedaj verjeti, posebej če odmislimo medijsko pretiravanje v iskanju bralcev in zaslužka, ki je dostikrat pomembnejše kot stroka.

To kontradiktornost smo imeli možnost opaziti, ko smo v Državnem svetu izvedli posvet in izdali zbornik z naslovom »Kmetijstvo je varuh okolja in narave« [6] (slika 1). Omenjali smo naše argumente in izračune, recimo avtor o tem, da kmetijska površina v resnici proizvede več neto kisika kot pragozd (ki je sicer izredno pomemben za kvalitetno okolje in podnebje), kar pomeni, da je treba s kmetijskimi površinami zelo previdno ravnati in jih moramo prenehati lahko zmanjševati. V Sloveniji izgubimo za eno nogometno igrišče na dan. Zmanjševanje kmetijskih površin bi po postavljeni raziskovalni tezi lahko pomenilo enega ključnih razlogov za segrevanje ozračja.

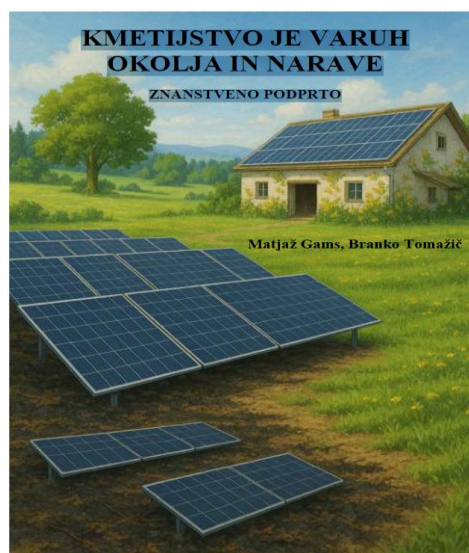
Sodelujoči na posvetu v DS so predstavili argumente, da so klimatografski modeli, ki vso krivdo valili na človeško povzročeno povečanje CO₂ v ozračju, nepravilni. Med ključni kritiki sta se pojavila tedanji direktor največjega inštituta v Sloveniji in rektor največje univerze. Trdila sta, da so tovrstne teze v popolnem nasprotju z dokazanimi in sprejetimi znanstvenimi dejstvi.

Podoben konflikt se je pojavil ob predstavitvi demografskih ugotovitev in napovedi, da bomo mali evropski narodi, kot je slovenski, izumrli v nekaj 100 letih. Ideološki napadi so šli do meje fizičnih napadov na avtorjeve materialne dobrine (avto, steklo na hiši), zahteve in dejansko izpeljan odstop na določeni funkciji, osebni napadi s strani znanstvenikov pa celo z izrazi, ki ne pritičejo nobenemu znanstveniku. Analize pa kažejo, da so bile napovedi o potencialnem izumrtju slovenskega naroda čez nekaj 100 let povsem na mestu, saj so se praktično vse napovedi izpred 20 let uresničile. Kaj torej drži oz. komu gre verjeti?

Vprašanje o zanesljivosti modelov za napovedovanje podnebnih sprememb (klimatografski modeli), demografskih trendov (demografski modeli) in umetne inteligence (AI modeli) je kompleksno, saj ti modeli temeljijo na zapletenih predpostavkah, podatkih in algoritmih. Zgodovina kaže na

mešane rezultate: nekateri modeli so se izkazali za kvalitetne, drugi pa so podcenjevali ali precenjevali dejavnike, kot so tehnološki napredek, naravni cikli ali človeško vedenje.

Na koncu bomo razpravljali o tem, kako izboljšati modele za bolj realistične napovedi, ki podpirajo trajnostni razvoj brez nepotrebnega alarmizma [7]. Prispevek temelji na analizi literature in empiričnih podatkov, z namenom prispevati k uravnoteženi debati na področju okoljske, demografske in AI znanosti.



Slika 1: Posvet v Državnem svetu je pokazal, da so napadi na kmetijstvo kot na onesnaževalca okolja brez strokovne podlage, hkrati pa sprožil tudi kritiko, ki je temeljila na enostranski razlagi okoljskih problemov. Ne glede na to, kdo ima prav, se je smotno o odprtih znanstvenih dilemah pogovarjati strpno in argumentirano.

2 Klimatografski modeli

2.1 Analiza predavanja Stevea Koonina

Steve Koonin, nekdanji podsekretar za znanost v ameriškem ministrstvu za energijo pod Obamo, vendar sedaj eden izmed avtorjev nove klimatske študije v Trumpovem ministrstvu, v predavanju ("Reframing the Climate Debate")

<https://www.youtube.com/watch?v=xaKrTnRx5fA> analizira podnebno znanost, modele in energijski prehod [8]. Steven E. Koonin je univerzitetni profesor na Univerzi v New Yorku (NYU) z imenovanji na Stern School of Business, Tandon School of Engineering in Oddelku za fiziko, kjer raziskuje podnebno znanost, energetske tehnologije, teoretično fiziko in upravljanje urbanih podatkov. Od 2024 je tudi Edward Teller Fellow na Hoover Institution (Stanford). Prej je bil profesor teoretične fizike na Caltechu (1975–2004), kjer je bil tudi podpredsednik in prorektor. Njegovi argumenti so skeptični do večinskih okoljskih interpretacij, poudarjajo naravno variabilnost in omejitve modelov ter kritizirajo »alarmizem« [9].

Sklicuje se na vrsto nespornih podatkov / grafov, vendar jih interpretira drugače kot večina:

1. Podnebne spremembe in človeški vpliv

- Podnebje se spreminja, vendar ne samo zaradi CO₂: Temperatura raste, vendar so bile podobne spremembe (npr. segrevanje v zgodnjem 19. stoletju, ohlajanje v sredini stoletja) naravne, preden so človeški vplivi postali opazni.
- Človeški vplivi so majhni (1% učinek): CO₂ povzroča segrevanje, vendar so vplivi (2,5 W/m²) le 1% celotnega energijskega toka planeta (240 W/m²); pred 1940 so bile spremembe naravne in sorodno velike ali večje.
- Ni trendov v ekstremih: UN poročila (AR6) kažejo brez trendov v orkanov, sušah, poplavih, požarih itd. v zadnjih 100 letih [10]. To dokazuje z nespornimi grafi. Komentar: morda so posledice recimo zaradi poplav večje zato, ker so ljudje gradili na poplavnih področjih in niso omogočili izlivanja poplavnih voda na varnih mestih.
- Nedavni vročinski valovi niso dovolj analizirani: Nedavna segrevanja so lahko le delno pojasnjena z toplogrednimi plini, predvsem izstopa nepojasnjena večja absorpcija sončne svetlobe. Komentar: morda zaradi spreminjanja okolja, kjer zelenje zamenjujeta asfalt in beton?

2. Zanesljivost podnebnih modelov

- Modeli so nezanesljivi: Klimatski modeli (GCM) se med seboj ne ujemajo in ne odražajo opazovanj; težave z ločljivostjo, povratnimi zankami (npr. oblaki) in naravnimi cikli. Komentar: in dodatnimi odvisnostmi.
- Modeli precenjujejo občutljivost: 40 modelov kaže različno občutljivost na CO₂; 40% jih je UN zavrgel kot preobčutljive.
- Ne ujamejo zgodovinskih podatkov: Modeli napačno reproducirajo temperature zadnjih 140 let, razlike v odbojnosti med poloblama in regionalne napovedi.
 - Napovedi emisij so pretirane: Projekcije emisij so bile vedno previsoke v primerjavi z realnostjo; napovedi dviga morske gladine (npr. New York) so pogosto zgrešene, vendar zgodovinski podatki kažejo stabilen trend. Komentar: morska gladina verjetno narašča, vendar počasi.

3. Koristi segrevanja in majhni ekonomski vplivi

- Segrevanje prinaša koristi: Od 1900 (1,3°C segrevanja) se je populacija povečala 5-krat, življenjska doba s 32 na 72 let, pismenost z 20% na 86%, BDP na osebo 7-krat višji, ekstremna revščina padla 7-krat, smrtnost zaradi vremena padla 50-krat [11].
- Kmetijstvo ima koristi od CO₂: Več CO₂ pomeni bolj zeleni planet in izboljšuje rast.
- Vremenske katastrofe niso hujše: Kot delež BDP padajo (0,2% globalno).
- Ekonomski vpliv majhen: Bidenova administracija (2023) napoveduje le nekaj odstotni padec BDP za nekaj stopinj segrevanja v daljšem obdobju, kar je zanemarljivo [12].

4. Energijski prehod in emisije

- Energijski prehod propada: Emisije so rekordne kljub 10 letom prizadevanj; varnost (Evropa, Japonska) prednjači pred emisijami. Komentar: EU se militarizira, namesto zelenega prehoda oboroževanje (vsaj za časa pisanja prispevka).

- Vzroki težav energetskega prehoda: Rast povpraševanja (4 milijarde ljudi brez dovolj energije), fosilna goriva so zanesljiva, geopolitična nestabilnost, dolgotrajne spremembe sistemov, visoki stroški in motnje.
- Kritika prehoda: Ne spreminjaj sistema, dokler ni boljšega (kot Xi Jinping za Kitajsko); percepcija tveganja podnebja upada, katastrofični izrazi (kriza, eksistencialna grožnja) neprimerni. Komentar: zaradi pretiravanja z alarmantnimi novicami, ki se niso uresničile, se namesto uravnoveženega prehoda pojavljajo pretirane zahteve v eni in drugi smeri.

5. Politike in priporočila

- Prekliči "krizo": Priznaj človeške vplive, vendar brez alarmizma; izboljšaj predstavitev znanosti in energijske pismenosti.
- Razvoj tehnologij: R&D za nizkoemisijske tehnologije (jedrska fisija, fuzija); počasen prehod z upoštevanjem ekonomije in vedenja – krize ukrepi bi bili bolj škodljivi kot spremembe same.

Na osnovi tega poljudno-strokovnega predavanja, podprtega z znanimi grafi, ter pregleda literature, je možno sklepati takole:

2.2 Klimatografski računalniški modeli

Klimatografski računalniški modeli (npr. GCM – General Circulation Models) simulirajo podnebne procese na podlagi fizikalnih zakonov, emisij toplogrednih plinov in naravnih dejavnikov. Glavni vir je IPCC (Medvladni panel za podnebne spremembe), ki jih uporablja za projekcije. Ocena skozi večinski in alternativni pogled:

Večinski pogled: Moderni modeli so se izkazali za zanesljive pri napovedovanju dolgoročnih trendov, kot je globalno segrevanje. Na primer, IPCC projekcije iz leta 1990 so napovedale dvig temperatur do 2025 z napako <0,2 °C. Po »Skeptical Science« so modeli natančni pri simulaciji opazovanih podatkov z napako okoli 4 % za globalne temperature [13]. Nedavne AI izboljšave (npr. GenCast) so povečale napovedi za kratkoročne ekstreme, kot so vročinski valovi [14]. Revija Nature poroča, da so modeli zanesljivi za napovedovanje trendov, a manj za regionalne ekstreme [15]. Konsenz med znanstveniki, posebej klimatologi, je: človek vpliva na podnebje, ki se segreva hitreje kot »normalno«.

Skeptični pogled: Kritiki, kot so tisti iz Trumpove administracije, npr. Judith Curry, trdijo, da modeli precenjujejo človeški vpliv in podcenjujejo naravne cikle, kot so sončna aktivnost ali oceanski cikli [16]. Hoover Institution (iz Stanfordske univerze) opozarja, da so modeli nelinearni in kaotični, s parametri in odvisnostmi, ki ne zajamejo neznanih vplivov [17]. Quora in ResearchGate vidita IPCC kot političen, ne znanstven, z modeli, ki ne sledijo opazovanjem. ScienceDirect (2025) ugotavlja, da modeli še vedno zatajijo pri naravni variabilnosti na vseh lestvicah

Zaključek: Moderni modeli so kljub problemom s parametri in pomanjkljivimi relacijami dokaj zanesljivi za splošne trende (npr. segrevanje), manj za kratkoročne ali regionalne napovedi zaradi negotovosti (napaka 10–20 % za ekstreme). Napredek z AI dodatki izboljšuje kvaliteto, vendar skeptiki opozarjajo na politično pristranskost, nepopolne podatke, nepojasnjeno odvisnosti in pretiravanja s posledicami. Zgodovinske napačne

napovedi, npr. napovedi ledene dobe v 1970-ih, ne vlivajo zaupanja kljub znanstvenemu konsenzu, še posebej glede katastrofičnih napovedi. Medijske napovedi in dejanski ukrepi pa žal niso na tem nivoju, ampak pogosto vzbujajo vtis ideološko-političnega pristopa k naravoslovno-znanstvenim-realističnim problemom. Za dejansko varovanje okolja bi bilo možno narediti ogromno ob sprejetju konkretnih znanstvenih in inženirskih napotkov [7].



Slika 2: V Beli knjigi o strokovnem varovanju okolja [7] je bilo s strani okoli 100 sodelavcev zbrano nekaj 10 napotkov, kako skrbeti za okolje z maksimalnimi učinki ob minimalnih stroških. Slovenski odločevalci jih večinoma še niso uresničili, recimo večje davke na temnejše strehe.

3 Demografski modeli

Demografski modeli (npr. ZN-ovi World Population Prospects) napovedujejo populacijske trende na podlagi rodnosti, umrljivosti, migracij in starostne strukture. Glavni vir so ZN (UN DESA) [18].

- **Večinski pogled:** ZN projekcije so se izkazale za točne in natančne. Na primer, napoved iz 1958 za svetovno populacijo leta 2000 je bila natančna v 4 % [19]. OurWorldInData poroča, da so večina ZN napovedi za globalno populacijo blizu dejanskim ocenam, tudi desetletja vnaprej. Za Jugovzhodno Azijo so bile napovedi od 1950-ih natančne. Gapminder hvali ZN za natančnost, tudi pred računalniškimi modeli [20]. Napake so manjše v razvitih regijah (do 2 %). Probabilistični pristopi (od 2010) izboljšujejo zanesljivost za dolgi rok [21].
- **Skeptični pogled (nizka zanesljivost v hitro rastočih regijah):** Napake so večje v regijah z visoko rastjo (npr. Afrika), kjer so lahko do 20 %. IIASA analiza kaže na zgodovinske netočnosti, odvisne od regije in baznega

leta [22]. Skeptics StackExchange: Mešano, nobena varianta (nizka/srednja/visoka) ni vedno boljša. Population Matters kritizira ZN za podcenjevanje upada v nekaterih scenarijih. Ključne negotovosti: migracije in nepričakovane spremembe (npr. pandemije).

- **Zaključek:** Demografski modeli so med najbolj zanesljivimi, s točnostjo 90–96 % za svetovne ocene. Boljši so za razvite države in kratki rok, slabši za Afriko ali dolgi rok zaradi nepredvidljivih faktorjev. Projekcije izumrtja evropskih narodov (npr. Slovenije) se ujemajo z ZN trendi padajoče rodnosti, a so odvisne od predpostavk o migracijah.

4 Zanesljivost napovedovanja AI

Medtem ko nekateri strokovnjaki, kot so Geoffrey Hinton ali Elon Musk, napovedujejo, da bo AI lahko privedel do uničenja človeštva – na primer preko nenadzorovane superinteligence, ki bi prevzela nadzor ali povzročila masovno brezposelnost, drugi, kot je avtor tega prispevka, vidijo AI kot rešitelja človeštva. AI lahko rešuje kompleksne probleme, kot so podnebne spremembe, demografski izzivi ali medicinske inovacije, in omogoča trajnostni razvoj z optimizacijo virov in napovedovanjem trendov.

Tempo rasti AI je impresiven in traja že več kot 50 let, od pionirskih del v 1950-ih (npr. Dartmouth konferenca 1956) do današnjih revolucionarnih sistemov. V zadnjih letih pa je rast še pospešena, posebej pri velikih jezikovnih modelih (LLM-jih), kot so GPT serije ali GROK. Po testih IQ, prilagojenih za AI (npr. Mensa ali standardni IQ testi), so LLM-ji pokazali izjemno rast: GPT-3 (2020) je dosegel približno 100–120 IQ točk, GPT-4 (2023) pa že 130–150, kar daleč presega povprečnega človeka in je le kakšen odstotek populacije pametnejši [24]. Po podatkih OpenAI in Anthropic se IQ LLM-jev povečuje za približno 20–30 točk na generacijo, z rastjo zmogljivosti (parametri, podatki) po Mooreovem zakonu, ki se za AI podvoji vsakih 18 mesecev do dveh let [25].

Vprašanje, kdaj bo dosežena superinteligence, tj. AI, ki presega človeško inteligenco v vseh domenah, ostaja odprto. Optimistične napovedi, kot je Ray Kurzweilova [23], napovedujejo umetno splošno inteligenco (AGI) okoli 2029, superinteligenco pa kmalu zatem (2030–2040). Pesimisti, kot je Yann LeCun, menijo, da bo trajalo desetletja dlje zaradi omejitev v razumevanju sveta – npr. AI še vedno halucinira ali ne razume konteksta. Mediji pogosto pretiravajo z nevarnostmi, kot so "Skynet" scenariji iz filmov kot Matrica, kar ustvarja paniko, vendar so resna tveganja (npr. pristranskost, zloraba) bolj realna kot apokaliptične napovedi.

Kljub temu večina ljudi AI s pridom uporablja: ChatGPT ima več kot 200 milijonov aktivnih uporabnikov tedensko (2025), AI pomaga v medicini (npr. diagnostika raka), kmetijstvu (optimizacija pridelave) in demografiji (napovedi migracij). Vendar je EU z AI Actom (2024) uvedla stroge regulacije, ki zahtevajo preglednost, varnost in omejitve visoko tveganih sistemov [26]. Kritiki, vključno z Evropsko komisijo za inovacije, opozarjajo, da ta birokratizacija (npr. dolgotrajni pregledi, globe do 7 % prihodka) škodi AI razvoju v EU, saj podjetja (npr.

Mistral AI) selijo operacije v ZDA ali Azijo, kar zmanjšuje konkurenčnost EU in zavira gospodarsko rast.

Zaključek: Napovedi AI so nezanesljive zaradi hitre rasti in nepredvidljivosti, vendar AI že danes prinaša koristi; regulacije, kot so v EU, zavirajo napredek AI, znanosti in EU, medtem ko pa je treba paziti na etiko in inovacije za reševanje globalnih izzivov.

5 Kaj je prava znanost in kaj ne

Znanost deluje na dveh področjih: eno so ugotovljene nesporne ugotovitve / resnice (recimo, da je zemlja okrogla ali dva biološka spola), o katerih nima smisla dvomiti, dokler se ne pojavijo res utemeljeni dvomi ali popravki. Drugo, dejansko najbolj aktivno področje delovanja znanosti pa je iskanje novih spoznanj na fronti znanega. Primer: ali maske pomagajo ali ne pri boleznih tipa kovid; ali postavljanje sončnih panelov na kmetijskih površinah pomaga pri ohranjanju okolja, ali pa je okoljski kriminal, kot piše avtor [6, 7]. Ali pa iskanje novih zdravil. Avtor je objavil tudi prisego znanstvenikov, v kateri opozarja, da se moramo obraniti vdorom ideologije v znanost [27]. Po lažnih novicah, lažnih informacijah v enciklopedijah se sedaj pojavljajo tudi lažni članki v znanstvenih revijah in javnosti s trditvijo, da držijo. Posebej zanimiva je nova knjiga »The new war on science« [28].

Tako smo imeli kar precej debat o tem, ali zdravila, zdravniki, cepljenje na splošno pomaga ali škodi. Recimo v znanstveni reviji je bil objavljen članek, ki je pokazal skladnost med količino cepljenja in številom obiskov pri zdravilih po državah. Anticipilci so s tem skušali dokazati, da cepiva škodijo. A pri tem niso upoštevali, da je lahko korelacija povsem slučajna in je resnica lahko povsem drugačna. Če bi pogledali življenjsko dobo, bi ugotovili, da je ravno nasprotno odvisnosti. Relacije je torej potrebno obravnavati bolj vsebinsko in v modele dodati skrite mehanizme, ki pridejo do veljave, ko se razmere spremenijo.

Ključno je, da znanstveniki sami ne dopustimo vdora ideologije, rasizma in seksizma ter starizma v znanost, ter da ne volimo na nobena ključna mesta znanstvenikov, ki zagovarjajo taka stališča (npr. da je zemlja ploščata ali da sta dva biološka spola).

6 Diskusija

V prispevku smo pregledali zanesljivost klimatografskih, demografskih in AI modelov skozi zgodovinske primere, večinske in skeptične poglede ter konkretne analize. Klimatografski modeli, kot kaže analiza Stevea Koonina, so zanesljivi za splošne trende segrevanja, vendar precenjujejo človeški vpliv in podcenjujejo naravno variabilnost, kar vodi do nepotrebnega alarmizma v medijih. Zgodovinske napake, kot so napovedi ledene dobe v 1970-ih ali izčrpanja virov v "Mejah rasti", opozarjajo na previdnost pri katastrofičnih scenarijih, čeprav IPCC konsenz poudarja človeški prispevek.

Demografski modeli ZN, pa tudi v demografski konferenci na Informacijski družbi [29, 30, 31, 32], so se izkazali za izjemno natančne, saj se napovedi o padcu rodnosti v Evropi, vključno s Slovenijo, uresničujejo: rodnost je pod 1,5, kar vodi do staranja populacije in tveganja demografskega preobrata prek migracij ter

dolgoročnega izumrtja. To potrjujejo študije, kot so Murrayjeva "The Strange Death of Europe" [33] in avtorjeve [34], ki opozarjajo na kulturno, genetsko in narodno izumrtje malih evropskih narodov v nekaj stoletjih, če ne bo ukrepov za dvig rodnosti.

AI modeli predstavljajo kontrast: njihova rast je eksponentna, z IQ LLM-jev, ki se povečuje za 20–30 točk na generacijo, vendar napovedi o superinteligenci variirajo od 2030 (Kurzweil [33]) do desetletij kasneje. Medtem ko nekateri vidijo AI kot grožnjo (uničenje človeštva), ga drugi, vključno z avtorjem [35], vidijo kot rešitelja za izzive, kot so podnebne spremembe in demografija. Kljub temu EU regulacije (AI Act [26]) zavirajo inovacije, kar škodi konkurenčnosti EU v primerjavi z ZDA in Kitajsko.

Splošni zaključek: Modeli so zanesljivi za trende, vendar negotovosti (predpostavke, podatki, ideologija) zahtevajo uravnotežen pristop brez alarmizma. Od analiziranih je resna nevarnost samo ena za Slovenijo in Evropo – padec rodnosti in migracije ogrožajo identiteto [36, 37], medtem ko bi AI lahko močno pomagala z optimizacijo politik.

References / Literatura

- [1] Szczesny, D. (2024). The Great Horse Manure Crisis of 1894. danschczesny.substack.com/p/the-great-horse-manure-crisis-of-1894.
- [2] Peterson, T. C., Connolley, W. M., & Fleck, J. (2008). The Myth of the 1970s global cooling scientific consensus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(9), 1325-1337. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2370.1>.
- [3] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books. ISBN 0-87663-165-0.
- [4] Herrington, G. (2021). Update to limits to growth: Comparing the World3 model with empirical data. *Journal of Industrial Ecology*, 25(3), 614-626. <https://doi.org/10.1111/jiec.13084>.
- [5] Gams, M., Kolenik, T. (2021). Relations between Electronics, Artificial Intelligence and Information Society. *Electronics*, 10(4), 514. <https://doi.org/10.3390/electronics10040514>.
- [6] Gams, M., Tomažič, B. (ur.) (2025). *Kmetijstvo je varuh okolja in narave. Zbornik posveta v Državnem svetu*. Ljubljana, Slovenija. ISBN 978-961-264-XXX-X. [COBISS.SI-ID 241615619].
- [7] Gams, M. (2020). Bela knjiga o strokovnem varovanju okolja. <http://library.ijs.si/Stacks/Literature/Bela%20knjiga%20znanost%20o%20okolju%202020.pdf>
- [8] Koonin, S. E. (2021). *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*. BenBella Books. ISBN 978-1953295248.
- [9] Koonin, S. E. (2021). Reframing the Climate Debate. YouTube predavanje. <https://www.youtube.com/watch?v=xaKrTnRx5fA>.
- [10] IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- [11] Epstein, R.A. (2024). A Balance Sheet For Global Warming. Hoover Institution. <https://www.hoover.org/research/balance-sheet-global-warming>.
- [12] U.S. Global Change Research Program. (2023). *Fifth National Climate Assessment*. U.S. Government Printing Office. <https://nca2023.globalchange.gov/>. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023>.
- [13] Mason, J., & Winkler, B. (BaerbelW) [ORCID: 0000-0002-5085-8633] (2023, 30. maj). At a glance – How reliable are climate models? Skeptical Science. <https://skepticalscience.com/at-a-glance-model.html>
- [14] Price, I., Lam, R., Willson, E. et al. (2024). Probabilistic weather forecasting with machine learning. *Nature*, 627, 796-800. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08252-9>.
- [15] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... Zhou, B. (ur.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [16] Curry, J. (2020). Part of the heat is coming from beneath our feet. *Climate Etc.* <https://judithcurry.com/2020/09/08/part-of-the-heat-is-coming-from-beneath-our-feet/>.
- [17] Hoover Institution. (2024). *Climate Change Is Not An Apocalyptic Threat— Let's Address It Smartly*. Hoover Institution. <https://www.hoover.org/research/climate-change-not-apocalyptic-threat-lets-address-it-smartly>.

- [18] United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2024). World Population Prospects 2024: Summary of Results. UN DESA. <https://population.un.org/wpp/>.
- [19] Ritchie, H., & Roser, M. (2023). Our World in Data. (2023). Population Growth. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/population-growth>.
- [20] Gapminder. (2021). How reliable is the world population forecast? Gapminder. <https://www.gapminder.org/videos/how-reliable-is-the-world-population-forecast/>.
- [21] Keilman, N. (2023). The UN has made population projections for more than 50 years – how accurate have they been? Our World in Data. <https://ourworldindata.org/population-projections>.
- [22] Lutz, W., Goujon, A., Samir, K. C., Stonawski, M., & Stilianakis, N. (eds.). (2018). Demographic and human capital scenarios for the 21st century: 2018 assessment for 201 countries. IIASA. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15291/>.
- [23] Kurzweil, R. (2024). The Singularity Is Nearer: When We Merge with AI. Viking. ISBN 978-0593152348.
- [24] OpenAI. (2023). GPT-4 Technical Report. arXiv:2303.08774. <https://arxiv.org/abs/2303.08774>.
- [25] Bubeck, S. et al. (2023). Sparks of Artificial General Intelligence: Early experiments with GPT-4. arXiv:2303.12712. <https://arxiv.org/abs/2303.12712>.
- [26] European Parliament. (2024). EU AI Act: first regulation on artificial intelligence. European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20230601STO93804/eu-ai-act-first-regulation-on-artificial-intelligence>.
- [27] Gams, M. (2025). The Oath of Researchers and Developers. Informatica, 49(1), 1-6. <https://doi.org/10.31449/inf.v49i1.8149>.
- [28] Krauss, L. M. (ed.). (2024). The War on Science: Thirty-Nine Renowned Scientists and Scholars Speak Out. Simon & Schuster. ISBN 9798888457566.
- [29] Gams M. & Malačič J. (ur.) (2019). Bela knjiga slovenske demografije. URN:NBN:SI.
- [30] United Nations DESA (2024). World Population Prospects 2024: Highlights.
- [31] Lutz W., Sanderson W.C., Scherbov S. (eds.) (2004). The End of World Population Growth in the 21st Century. Routledge.
- [32] Eurostat (2023). Demographic Statistics Report 2023.
- [33] Murray D. (2017). The Strange Death of Europe: Immigration, Identity, Islam. Bloomsbury.
- [34] Gams M. (2024). "Depopulation politics = Depopulacijska politika. V: MALAČIČ, Janez (ur.), OSREDKAR, Mari Jože (ur.), GAMS, Matjaž (ur.). Demografske in družinske analize = 9 October 2023, Ljubljana, Slovenia. ISBN 978-961-264-278-5. ISSN 2630-371X. https://is.ijs.si/wp-content/uploads/2023/11/IS2023_Volume-F.pdf. [COBISS.SI-ID 171830787]
- [35] Gams, M. (2025). Artificial intelligence might save us. In: Sander, G. G., Pošćić, A., Martinović, A. (eds.). Exploring digital legal landscapes. Berlin: Logos Verlag, pp. 9–28. ISBN 978-3-8325-5962-5. <https://zenodo.org/records/16319872>. [COBISS.SI-ID 244005123]
- [36] Li Q., Zhang Y. & Wang H. (2025). "Can decent work promote fertility intention?" Humanities & Social Sciences Communications, 12(1), 46.
- [37] Skakkebaek, N. E., Priskorn, L., Lindahl-Jacobsen, R., Andersson, A.-M., Kristensen, D. M., Beck, A. L., idr. (2025, 14. junij). Human reproduction in crisis: causes unknown. *The Lancet*, 405(10495), 2121–2122. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(25\)00736-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(25)00736-6)

Energetska Učinkovitost in Prehod na Alternativne Pogone v Prometnem Sektorju: Analiza Stališč Podjetij v Sloveniji

Energy Efficiency and Transition to Alternative Fuels in the Transport Sector: Analysis of the Views of the Slovenian Companies

Erika Blekač[†]

Faculty of Electrical Engineering
and Computer Science
University of Maribor
Maribor, Slovenia
erika.blekac@student.um.si

Irena Lovrenčič Držanič

Faculty of Electrical Engineering
and Computer Science
University of Maribor
Maribor, Slovenia
irena.lovrencic@um.si

Laura Horvat

Faculty of Electrical Engineering
and Computer Science
University of Maribor
Maribor, Slovenia
laura.horvat3@um.si

Giannis Gialelis

Electrical and Computer
Engineering Department
University of Patras
Patras, Greece
gialelis@ece.upatras.gr

Ines Kožuh

Faculty of Electrical Engineering
and Computer Science
University of Maribor
Maribor, Slovenia
ines.kozuh@um.si

Faculty of Social Sciences

University of Ljubljana
Ljubljana, Slovenia
ines.kozuh@fdv.uni-lj.si

Povzetek

Članek izpostavlja negativen vpliv mestnega prometa na okolje in zdravje ter nujnost trajnostne urbane mobilnosti (hoja, kolesarjenje, zeleni javni prevoz, manj osebnih vozil). Predstavlja concept mednarodnega projekta ADCCAM2ZERO, ki uvaja multimodalne, deljene in digitalne rešitve (digitalni dvojčki, ekonomija delitve) ter sistem trgovanja z emisijami. V empiričnem delu predstavimo rezultate analize raziskovalne študije, ki smo jo izvedli v okviru projekta in v kateri smo preverjali stališča predstavnikov podjetij v prometnem sektorju v Sloveniji ter njihovo pripravljenost na prehod k alternativnim pogonom.

Ključne besede

trajnostna urbana mobilnost, energetska učinkovitost, alternativni pogoni, pametna mobilnost, deljena mobilnost

Abstract

The article highlights the negative impact of urban transport on the environment and health and the necessity of sustainable urban mobility (walking, cycling, green public transport, fewer passenger vehicles). It is the concept of the international project Adccam2zero, which introduces multimodal, shared and digital solutions (digital twins, division economy) and the emission trading system. In the empirical part, we present the results of analyzing a research study, which we conducted within the project, in which we checked the views of representatives of companies in the transport sector in Slovenia and their readiness to transition to alternative drive.

Keywords

sustainable urban mobility, energy efficiency, alternative powertrains, smart mobility, shared mobility

1 Uvod

Promet močno vpliva na trajnost in kakovost življenja v mestih. Mestna območja se soočajo z onesnaženjem zraka, gnečo, zasedenostjo javnega prostora s prometom ter povečano obolenostjo in smrtnostjo zaradi prometnih nesreč in onesnaženosti. Uporaba fosilnih goriv dodatno podaljšuje škodljive učinke mestnega prometa s prispevanjem h globalnim podnebnim spremembam [1].

Prometni sektor je eden največjih onesnaževalcev in povzročiteljev emisij CO₂. Prispeva skoraj četrtno svetovnih

*Article Title Footnote needs to be captured as Title Note

[†]Author Footnote to be captured as Author Note

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

© 2025 Copyright held by the owner/author(s).

<https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.2>

emisij CO₂, povezanih z energijo, pri čemer naj bi se ta delež do leta 2050 povečal na 30 % [2, 3]. Povzroča onesnaženost zraka, slabše zdravje ter neučinkovito rabo virov, kot so visoke cene nafte in prometni zastoji. Mestni odločevalci pogosto ne upoštevajo vplivov podnebnih sprememb ali pa zanemarjajo alternativne možnosti prevoza in omrežij. Medtem ko mesta še naprej rastejo in se razvijajo, lahko vključijo trajnostno urbanistično zasnovo in mobilnost. V kolikor uvedejo več hoje, kolesarjenja in zelenega javnega prevoza, se obremenitev tradicionalnega in osebnega prometa zniža, kar na dolgi rok pomeni večjo dostopnost in udobje za prebivalce [4].

K naslavljanju tovrstnih vprašanj pripomore tudi mednarodni projekt »Adopting CCAM 2ZERO through ADRION Programmed Partnerships« (ADCCAM2ZERO). Gre za projekt v okviru programa Interreg IPA Adriatic, ki spodbuja trajnostno mestno mobilnost in tako prispeva k širšim ciljem strategij Evropske unije za zeleno, pametno in učinkovito prometno prihodnost. Glavni cilj projekta je preoblikovati načine gibanja po mestih z uvedbo trajnostnih, multimodalnih in digitalno podprtih rešitev mobilnosti. Projekt se osredotoča na zmanjševanje prometnih zastojev, onesnaževanja zraka ter prekomernega zanašanja na zasebna vozila z vključevanjem ekonomije delitve, digitalnih orodij, kot so digitalni dvojčki, ter mehanizmov, kot je trženje z ogljikom [5].

V članku predstavljamo rezultate študije, ki smo jo izvedli v okviru projekta ADCCAM2ZERO, z namenom pridobiti vpogled v trenutne trende in izzive na področju energetske učinkovitosti v prometnem sektorju. Osredotočili smo se na tri raziskovalna vprašanja:

1. Kakšno je trenutno stanje energetske učinkovitosti v prometnem sektorju v Sloveniji?
2. Kako podjetja v Sloveniji ocenjujejo potencialne ukrepe za povečanje energetske učinkovitosti?
3. Kakšno je zanimanje podjetij v Sloveniji za prehod na alternativne pogone?

S tem, ko smo iskali odgovore na omenjena vprašanja, bomo lahko bolje razumeli, kako so slovenska podjetja pripravljena na prehod v trajnostne oblike mobilnosti, in s tem posredno prispevali k oblikovanju ustreznih podpornih politik na področju.

2 Trajnostna Urbana Mobilnost in Pametna Mobilnost

Trajnostni razvoj je bil prvič predstavljen s strani Mednarodne zveze za varstvo narave in naravnih virov (IUCN) v študiji, ki sta jo naročila Program Združenih narodov za okolje (UNEP) in Svetovni sklad za naravo (WWF). V dokumentu so avtorji predlagali svetovno strategijo za ohranjanje narave, ki jo je kasneje populariziralo Brundtlandovo poročilo. Glavni cilj načrta je bil izboljšati socialno, ekonomsko in okoljsko kakovost človeških naselij ter bivalno in delovno okolje vseh ljudi, zlasti mestnega in podeželskega prebivalstva v slabšem položaju. Omenjena poročila trajnost razumejo kot strategijo za spodbujanje razvoja, ki ohranja harmoničen odnos med človekom in naravo v smislu socialne vključenosti, gospodarskega razvoja in okoljskega ravnesja [6].

Trajnostna urbana mobilnost se osredotoča na enostavnost, udobje, cenovno dostopnost in dostopnost potovanja do cilja z minimalnim vplivom na okolje in druge. Mobilnost je bistvena za razvoj in rast. Z razvojem rastejo tudi zahteve in pričakovanja po večji mobilnosti, ki nato omogoča večji in bolj raznolik dostop do storitev, širše osebne stike in večjo ozaveščenost o svetu [4].

Pametna mobilnost je raziskovalno področje, ki se uporablja v prometnih omrežjih tako v urbanističnem kot prometnem načrtovanju. Predstavlja integriran, tehnološko podprt pristop k

urbani mobilnosti, ki izboljšuje učinkovitost, dostopnost in trajno mobilnost. Vključuje uporabo komunikacijskih in informacijskih tehnologij za optimizacijo prometnih sistemov, spodbuja okolju prijazne načine potovanja, zmanjšuje zastoje in emisije ter spodbuja bolj racionalen in vključujoč odnos med prebivalci in njihovim urbanim okoljem [7].

Pametna mobilnost je lahko rešitev za nekatere izzive prometnih sistemov, kot so zastoji, omejena dostopnost, povečane emisije in stroški, saj združuje napredne tehnologije za učinkovitejše, varnejše in trajnostne prometne sisteme [8]. Dodatna rešitev je deljena mobilnost, ki pomeni souporabo vozil namesto lastništva [9]. Njen cilj je čim bolj izkoristiti mobilnostne vire, ki si jih družba lahko realno privoščiti, pri čemer se uporaba loči od lastništva [10].

Prometni sektor predstavlja skoraj tretjino celotne porabe energije v Evropi in ZDA, pri čemer pomemben delež izhaja iz uporabe osebnih avtomobilov z enim potnikom. Čeprav osebni avtomobili ponujajo prednosti, kot so udobje, razpoložljivost in prilagodljivost, so večino časa parkirani, povprečna zasedenost pa je nizka, okoli 1,5 osebe na avtomobil. Souporaba prevoza, kot sta skupna vožnja ali deljenje avtomobilov, lahko poveča zasedenost vozil, zmanjša število vozil na cestah, zmanjša prometne zastoje, potrebo po parkiriščih in emisije [10].

V mestnih območjih je večina poti kratkih in jih je mogoče opraviti peš. Drugi največji delež poti je srednje dolžine in jih je najbolje opraviti z avtobusom ali kolesom. Najmanjši delež poti je dolgih, kjer je uporaba avtomobila ali metroja primerna. V večjih mestih je optimalno imeti uravnoteženo kombinacijo prometnih načinov, ki odražajo razdalje, ki jih prebivalci običajno prepotujejo. Multimodalna mobilnost pomeni kombiniranje več prometnih načinov znotraj ene poti [11].

S spodbujanjem uporabe javnega prevoza, nemotoriziranih načinov in deljenih mobilnostnih storitev lahko multimodalna mobilnost zmanjša odvisnost od osebnih avtomobilov, ublaži zastoje in izboljša kakovost zraka. Prav tako lahko izboljša dostopnost in prispeva k družbeni pravičnosti [12].

Upravljanje urbane mobilnosti v rastočih mestih zahteva spremljanje prometa za takojšnje sprejemanje odločitev, ki temeljijo na konkretnih podatkih [13]. Tehnologija digitalnih dvojčkov vključuje ustvarjanje virtualne predstavitve fizičnega sistema, ki omogoča simulacijo, spremljanje in optimizacijo realnih procesov [14, 15].

Mestni digitalni dvojčki so virtualne replike mest, ki jih v realnem času informirajo procesi, ki se dogajajo v resničnem mestu prek povezav s podatki v živo. Omogočajo analizo različnih področij, kot so obvladovanje nesreč, prometni nadzor in energetska učinkovitost [16]. Lahko koristijo javni upravi z zmanjšanjem prometnih zastojev ob konicah, identifikacijo lokacij za nove kolesarske steze, izboljšanjem javnega prevoza in ocenjevanjem vpliva novih mobilnostnih rešitev. Digitalni dvojčki mest omogočajo tudi virtualno testiranje različnih scenarijev in možnih rešitev [17].

Kot je bilo že omenjeno, je prometni sektor velik vir emisij, izboljšave učinkovitosti novih vozil pa niso bile zadostne za zmanjšanje skupnih emisij, povezanih s prometom [18]. Urbani javni prevoz lahko sodeluje v sistemu trgovanja z emisijami, s čimer lahko podjetja za javni prevoz pridobijo prihodke in hkrati zmanjšajo svoje emisije [19].

Trgovanje z emisijami, znano tudi kot sistem trgovanja z ogljikom, je politično orodje za spodbujanje zmanjševanja emisij z uporabo tržnega mehanizma. Določi se omejeno število emisijskih kuponov, ki jih delijo med onesnaževalce, ti pa lahko med seboj trgujejo s temi dovoljenji. Ob koncu obračunskega obdobja so podjetja, ki presežejo dovoljeno raven emisij, kaznovana z visokimi globami ali pa morajo kupiti dovoljenja od podjetij, ki so ustvarila manj emisij, kot je dovoljeno [20, 21].

3 Metodologija

3.1 Postopek Zbiranja Podatkov in Vzorec

V okviru projekta ADCCAM2ZERO, ki naslavlja izzive trajnostne in pametne mobilnosti v mestih, smo izvedli empirično raziskavo, ki je bila usmerjena v analizo prometnega sektorja v vseh državah partneric projekta. V Sloveniji smo se pri zbiranju podatkov osredotočili na Štajersko regijo, s poudarkom na občini Hoče-Slivnica, ki je sicer pridružen partner v projektu. Cilj raziskave je bil pridobiti vpogled v prakse, izzive in potencialne podjetij, ki delujejo na področju prevoza oseb, tovarov in komercialnega podjetja, z vidika ustvarjanja pametnih in trajnostnih mobilnostnih rešitev.

Zbiranje podatkov v Sloveniji je potekalo med 28. januarjem in 18. februarjem 2025. Na začetku je bil spletni anketni vprašalnik posredovan izbranim podjetjem iz prometnega sektorja, ki delujejo na območju občine Hoče-Slivnica. V prvi fazi smo kontaktirali 9 podjetij, ki spadajo v sektorje letalske industrije, logistike, prevoznništva in transporta. Zaradi nezadostnega odziva smo nabor potencialnih udeležencev razširili na območje Mestne občine Maribor ter širše območje Podravske regije. V tej fazi smo dodatno kontaktirali 3 podjetja, ki delujejo na področjih mestnega potniškega prometa, prometne mobilnosti, trajnostnega prometa ter prometnega načrtovanja.

V nadaljevanju smo vzorec razširili na celotno območje Slovenije. Identificirana so bila podjetja, ki delujejo na področjih železniškega prometa, avtobusnih prevozov, cestnega tovornega in potniškega prometa, taksi storitev, avtošol, dostavnih storitev ter logistike. V tej fazi je bilo kontaktiranih 141 podjetij. Skupno smo torej vzpostavili stik s 153 podjetji po vsej Sloveniji, ki delujejo v različnih segmentih prometne dejavnosti.

V zadnjem koraku smo 64 podjetjem naknadno poslali opomnik po elektronski pošti, 31 podjetij pa smo dodatno kontaktirali tudi telefonsko. Kljub navedenim prizadevanjem je spletni vprašalnik v celoti izpolnilo 12 podjetij.

3.2 Merski Instrument

Za zbiranje podatkov smo uporabili vprašalnik, ki je zajemal 80 vprašanj. Ta so bila razdeljena v več delov in s tem prilagojena različnim ciljnim javnostim. Anketirance smo tako prosili, da izpolnijo le tista poglavja, ki so se nanašala na njihovo dejavnost. Prvi del vprašalnika je vseboval osnovne podatke o podjetju, kot so naziv, lokacija, sektor in velikost podjetja. V drugem delu so se vprašanja delila glede na klasifikacijo po prometnem sektorju, kot je npr. javni prevoz, cestni promet in zračni promet, sama vprašanja pa so se navezovala na osnovne podatke o delovanju podjetja. Tretji del vprašalnika je vseboval vprašanja o energetske učinkovitosti, četrti del pa je bil namenjen predstavnikom občin ali regijskih oblasti, in je vseboval vprašanja o splošnih demografskih informacij, o trenutnem stanju brezemisijskega prometa, o trenutnem stanju povezane kooperativne avtomatizirane mobilnosti, o splošni mobilnosti, ter odprta vprašanja za priporočila in potrebe.

4 Rezultati

4.1 Družbenodemografsko Ozadje Vzorčnih Enot

V raziskavi je sodelovalo 12 podjetij, pri čemer jih je bilo največ iz Maribora ($n=4$). Dve podjetji sta prihajali iz Hoč, po eno pa iz Ljubljane, Murske Sobote, Preserij, Lenarta, Tišine in Rogoze. V raziskavo se je vključilo devet zasebnih in tri javna podjetja.

Glede na velikost je bilo največ mikropodjetij ($n=7$), sledila so velika podjetja ($n=3$), ter po eno malo in srednje veliko podjetje.

Glede na dejavnost v prometnem sektorju je osem podjetij delovalo na področju cestnega prometa, tri v logistiki in eno v javnem prevozu, na področju regionalnega prevoznništva.

4.2 RV1: Trenutno Stanje Energetske Učinkovitosti v Prometnem Sektorju v Sloveniji

Analiza zbranih podatkov je pokazala, da so podjetja v Sloveniji seznanjena z različnimi ukrepi za izboljšanje energetske učinkovitosti, kot so subvencije in nepovratna sredstva za energetske učinkovitost, regulacije, uporaba električnih in brezemisijskih vozil, ekološka vožnja, optimizacija logistike, ter spremljanje in zmanjšanje ogljičnega odtisa. Omenili so tudi ukrepe na področju stavb, kot so izolacija in energetske pasivne zgradbe, učinkovita razsvetljava ter napredni merilni sistemi za spremljanje porabe energije. Glede usposabljanja zaposlenih za energetske učinkovitost dve podjetji nista izvedli nobenega usposabljanja, dve podjetji sta usposabljali zaposlene za ekološko vožnjo, eno podjetje za uporabo inovativnih tehnologij za varčevanje z energijo, šest podjetij pa za varčevanje z energijo na delovnem mestu. Eno podjetje je izvedlo tudi usposabljanje o količinskih opredelitvah prihrankov energije.

Kot ključne izzive v sektorju so predstavniki podjetij navajali predvsem draženje energentov, potrebo po zmanjšanju ogljičnega odtisa, pomanjkanje voznikov, delo na terenu, optimalne nastavitve motorjev ter splošno varčno rabo energije. Na vprašanje, kako ti izzivi vplivajo na njihovo delovanje, je večina podjetij odgovorila negativno, in so sicer izpostavili rast stroškov, ogrožen obstoj podjetja, težko modernizacijo in potrebo po optimizaciji notranjih virov. Nekatera podjetja pa so izpostavila tudi pozitivne učinke, kot so dolgoročne koristi, povečanje obsega storitev in večja odpornost na izzive. Eno podjetje je navedlo nevtralen vpliv, in sicer da se trudijo prilagoditi razmeram in v to smer tudi spodbujajo partnerje in odjemalce. Nekatera podjetja pa na to vprašanje niso podala odgovora.

4.3 RV2: Ocena Potencialnih Ukrepov za Povečanje Energetske Učinkovitosti

Podjetja različno ocenjujejo potencialne ukrepe za povečanje energetske učinkovitosti, pri čemer kot najbolj učinkovite navajajo finančne spodbude in podporno infrastrukturo. Po mnenju podjetij imajo največji potencial za izboljšave novi in enostavnejši viri financiranja za tehnologije z nižjimi emisijami CO₂, ter povečanje števila polnilnih postaj. Približno tretjina anketiranih podjetij ocenjuje, da bi novi viri financiranja za uvedbo novih tehnologij imeli močan ali celo največji učinek. Podobno velja tudi za enostavnejši dostop do financiranja za vozila z nižjimi emisijami, ki ga več kot polovica podjetij vidi kot učinkovit ukrep.

Povečanje števila polnilnih postaj podjetja prav tako ocenjujejo kot pomembno spodbudo, čeprav se nekoliko več podjetij nagiba k oceni, da bi ta ukrep imel le srednji vpliv. Možnost, da se ne bi uvedli novi ukrepi in bi podjetja nadaljevala s poslovanjem kot običajno, pa večina podjetij ocenjuje kot neučinkovito.

4.4 RV3: Zanimanje Podjetij v Sloveniji za Prehod na Alternativne Pogone

V podjetjih, vključenih v raziskavo, uporabljajo raznolik vozni park, ki vključuje osebna, tovorna in delovna vozila, avtobuse, motorna kolesa, električna kolesa in večkolesnike. Predstavniki podjetij so najpogosteje navajali osebna in tovorna vozila. Večina vozil je bila kupljena z lastnimi sredstvi, nekatera podjetja pa so uporabila tudi leasing, najem, posojila ter sofinanciranje.

Podjetja za svoja vozila večinoma uporabljajo dizel ($n=8$) in bencin ($n=2$), navedena pa je bilo tudi eno električno vozilo in eno vozilo na utekočinjen naftni plin. Na vprašanje, če razmišljajo o prehodu na alternativne vrste goriva, je pet podjetij odgovorilo z da, štiri z ne, eno je delno naklonjeno spremembi, eno pa se še odloča. Med nadomestnimi gorivi se je pojavljala vodik, ki ga je izbralo pet podjetij. Sledita elektrika ($n=3$) in hibridni pogon ($n=2$), utekočinjen naftni plin in druge možnosti pa so prisotne v manjšem obsegu ($n=1$).

5 Diskusija in Zaključek

Naš namen je bil pridobiti vpogled v trenutne trende na področju energetske učinkovitosti v prometnem sektorju ter v praksi, izzive in potencialne podjetij, ki delujejo na področju prevoza oseb, tovarov in komercialnih storitev v Sloveniji. Posebno pozornost smo posvetili energetski učinkovitosti, prehodu na nizko- in brezemisijske vire ter oceni ukrepov, ki bi lahko pospešili trajnostno mobilnost. S pomočjo spletnega anketnega vprašalnika smo želeli identificirati ključne ovire in spodbude, ki vplivajo na sprejem trajnostnih praks v prometnem sektorju.

Podjetja so seznanjena z ukrepi za energetske učinkovitost (subvencije, električna vozila, optimizacija logistike), vendar jih implementirajo z različno hitrostjo, kar kaže na potrebo po bolj ciljanih usposabljanjih. Največji potencial za izboljšanje energetske učinkovitosti podjetja vidijo v finančnih spodbudah in podporni infrastrukturi, predvsem novih virih financiranja za tehnologije z nižjimi emisijami ter širitvi polnilnih postaj. Ugotovili smo, da je zanimanje za alternativne pogone raznoliko, vendar večina trenutno še vedno uporablja dizel in bencin, kar bi lahko nakazovalo na infrastrukturne in finančne ovire.

Oblikovanje ciljanih finančnih shem in lažja dostopnost do kreditov bi pospešila vlaganja v nizkoemisijske tehnologije. Še ena praktična implementacija bi lahko bila širitev in enotna mreža polnilnih (električnih in vodikovih) postaj znotraj regije ali po celotni Sloveniji, ki bi zmanjšala infrastrukturne prepreke in spodbudila operaterje k prehodu.

Ena izmed najpomembnejših omejitev raziskave je nizek odzivni delež udeležencev (7,8%), ki omejuje reprezentativnost rezultatov in otežuje širšo generalizacijo. Vzorec prevladujejo majhna in mikropodjetja iz cestnega prometa, medtem ko so drugi segmenti podzastopani. Zbiranje podatkov je bilo izvedeno v kratkem časovnem oknu, brez možnosti dolgoročnega spremljanja sprememb praks in mnenj.

V prihodnjih raziskavah na področju energetske učinkovitosti v prometnem sektorju priporočamo, da raziskovalci izvedejo longitudinalno študijo, ki bi spremljala implementacijo ukrepov in spreminjanje stališč sodelujočih podjetij skozi čas. V sklopu raziskave poudarjamo še vključitev dodatnih kvalitativnih metod – na primer intervjuji s predstavniki podjetij, ki bi omogočili globlji vpogled v specifične izzive posameznih segmentov, podjetij ter njihovih oddelkov, ki skrbijo za predstavljeno področje. Razširitev raziskave na vse regije Slovenije bi omogočila primerjavo praks in razvoj nacionalnih smernic za trajnostno mobilnost.

6 Zahvala

Študija je bila financirana v okviru projekta ADCCAM2ZERO (Adopting CCAM 2ZERO through ADRION Programmed Partnerships) v programu Interreg IPA ADRION, št. pogodbe IPA-ADRION00215. Izvedbo študije je prav tako podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije, št. pogodbe P5-0399 (programska skupina Internetno raziskovanje).

Literatura

- [1] Hana Brůhová Foltýnová, Eliška Vejchodská, Kristýna Rybová, and Viktor Květoň. 2020. Sustainable urban mobility: One definition, different stakeholders' opinions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102465.
- [2] Aleksy Kwilinski, Oleksii Lyulyov, and Tetyana Pimonenko. 2024. Reducing transport sector CO₂ emissions patterns: Environmental technologies and renewable energy. *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*, 10, 1, 25.
- [3] DNV. 2023. *Transport in Transition*. Pridobljeno iz DNV: <https://www.dnv.com/Publications/transport-in-transition-242808/>
- [4] Debra Lam and Peter Head. 2012. Sustainable urban mobility. In O. Inderwildi and S. King (Eds.), *Energy, Transport, & the Environment* (pp. 359–371). Springer, London, UK.
- [5] Interreg-IPA Adrion, n.d. Project summary: Adopting CCAM 2ZERO. Available at: <https://adccam2zero.interreg-ipa-adrion.eu/> [accessed 11 Aug 2025].
- [6] Juan de Dios Ortúzar. 2019. Sustainable urban mobility: What can be done to achieve it? *Journal of the Indian Institute of Science*, 99, 5, 683–693.
- [7] Can Biyik, Ahmad Abareshi, Alexander Paz, Rosa Arce Ruiz, Rosaria Battarra, Christopher D. F. Rogers, and Carmen Lizarraga. 2021. Smart mobility adoption: A review of the literature. *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*, 7, 3, 170.
- [8] Douglas Mitić, Rose Luke, Hossana Twinomurizi, and Joash Mageto. 2023. Smart mobility in urban areas: A bibliometric review and research agenda. *Sustainability*, 15, 5, 4201.
- [9] Georgina Santos. 2018. Sustainability and shared mobility models. In *Sustainable Transport: Transport, Environment, and Development*. Routledge, London, UK.
- [10] Cláudia A. Soares Machado, Nicolas Patrick Marie De Salles Hue, Fernando Tobal Berssaneti, and José Alberto Quintanilha. 2019. An overview of shared mobility. In *Smart Mobility for Future Cities*. Springer, Cham, Switzerland.
- [11] Luis G. Orzco, Luca Alessandretti, Mehdi Saberi, Márton Szell, and Fabio Battiston. 2023. Multimodal urban mobility and multilayer transport network. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 50, 5, 2038–2070.
- [12] Rahul Tanwar and Pradeep Kumar Agarwal. 2025. Multimodal integration in India: Opportunities, challenges and strategies for sustainable urban mobility. *Multimodal Transportation*, 7, 100210.
- [13] Eleni Aloupogianni, Faiyaz Doctor, Charalampos Karyotis, Tomasz Maniak, Raymond Tang, and Rahat Iqbal. 2024. An AI-based Digital Twin Framework for Intelligence Traffic Management in Singapore. In *Proceedings of the IV International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2024)*. IEEE, Sydney, Australia, 1–6.
- [14] Hyeokju Yeon, Taebum Eom, Kitae Jang, and Jiho Yeo. 2023. DTUMOS, digital twin for large-scale urban mobility operating system. *Scientific Reports*, 13, 12345.
- [15] Andrea Grotto, Pau Fonseca i Casas, Alyona Zubaryeva, and Wolfram Sparber. 2024. Formalizing sustainable urban mobility management: An innovative approach with digital twin and integrated modeling. *Logistics*, 8, 1, 17.
- [16] Gleb Papyshev and Masaru Yarime. 2021. Exploring city digital twins as policy tools: A task-based approach to generating synthetic data on urban mobility. *Data & Policy*, 3, e16.
- [17] Chiara Bachechi. 2022. Digital Twins for Urban Mobility. In *Proceedings of the European Conference on Advances in Databases and Information Systems*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 657–665.
- [18] Ville Uusitalo, Antti Huttunen, Elina Kareinen, Thomas V. Wright, Markus Valjakka, Antti Pitkanen, and Jari Levanen. 2022. Using personal carbon trading to reduce mobility emissions: A pilot in the Finnish city of Lahti. *Transport Policy*, 119, 177–187.
- [19] Xiangyang Yu and Xiaojing Wang. 2023. Research on carbon-trading model of urban public transport based on blockchain technology. *Energies*, 16, 2606.
- [20] Boqiang Lin and Chenchen Huang. 2022. Analysis of emission reduction effects of carbon trading: Market mechanism or government intervention? *Sustainable Production and Consumption*, 30, 28–37.
- [21] Arezou Entezaminia, Ali Gharbi, and Mustapha Ouhimmou. 2021. A joint production and carbon trading policy for unreliable manufacturing systems under cap-and-trade regulation. *Journal of Cleaner Production*, 321, 125973.

Asset-Risk-Weighted Spectral Partitioning to Improve the Resilience of Water Distribution Networks

Daniel Kozelj[†]

Faculty of Civil and Geodetic
Engineering
University of Ljubljana
Ljubljana, Slovenia
daniel.kozelj@fgg.uni-lj.si

Abstract

District Metered Areas (DMAs) are central to leakage control, but partitions based only on topology or demand ignore local failure risks. We propose an asset risk weighted spectral partitioning XGBoost-derived pipe failure probabilities (PFp) are integrated into a generalized normalized cut (GNC) framework. The pipe level PFp are length-weighted and aggregated into nodes to form vertex weights, that guide the spectral solver to balance clusters by state risk. Using the Ljubljana-Šentvid case, we compare PFp-weighted GNC with a demand-balanced baseline across representative edge weighting cases (unweighted u , diameter d , length l , minimum-cost C_{min} , and topological case w_1), identical clustering (squared-euclidean). The condition dependent balancing favors fewer, more compact DMAs, and concentrates pipes networks poor-condition pipes on smaller DMAs. The method is reproducible and data-based and embeds PFp directly into the partitioning to provide hydraulically coherent, operationally tractable, and risk-oriented DMAs for aging WDNs.

Keywords

Water loss, District Metered Areas, Spectral Graph Partitioning, Pipe Failure Probability, XGBoost

1 Introduction

Public water supplies are energy-intensive to extract, transport, treat and deliver. As a recent comprehensive US analysis showed, energy intensity has increased from 2001 to 2020 - by 12% for large (0.49 kWh/m³), 8% for medium (0.53 kWh/m³), and 28% for small (0.67 kWh/m³) utilities. These trends confirm that water supply is becoming increasingly energy intensive, underlining the need for sustainable, integrated water-energy management [1]. Although utilities cannot control final energy, leakages in water distribution systems are an increasingly critical problem [2], exacerbated by post-World War II pipes

that are in poor condition [3]. In Slovenia, annual water abstraction for water supply amounts to about 168 million m³, with reported losses of about 50 million m³; leakages vary widely between utilities (about 20–70%) [4]. Water leaks are recognized as one of the driving forces for higher costs, as the water is treated and pumped into the distribution network. The loss of this valuable resource is not only an economic concern but is also increasingly jeopardizing water security as droughts have become more severe in recent years [5]. The main cause of inefficiency in water distribution is aging infrastructure, which is a key challenge for utilities, municipalities and customers alike.

Scientific and technical literature has established and confirmed that one of the most effective measures to identify water losses is the establishment of District Metered Areas (DMAs) – sub-areas in which inflow and/or outflow are measured simultaneously to equalize water volumes [6]. DMAs are realized through the installation of flow meters and valves and also enable the calculation of the water balance and its components for the respective network. As important as DMAs are in combating water loss, they require significant investment. So while DMAs reduce inefficiencies in the WDN, they are themselves prone to inefficiencies in design and investment costs, as well as in the insights they can provide through their mass balancing.

As one of the most common approaches to control and reduce real water losses for water utilities, DMA design reduces unearned water and clarifies hydraulic conditions in the WDN. Partitioning the WDN is complex and prone to weighting case selection to guide the partitioning method for efficiency and expediency [7], [8]. The method used in this study employs spectral partitioning algorithms, which are classified into three coding types, namely the Ratio Cut (RC), the Normalized Cut (NC), and the Generalized Normalized Cut (GNC). The latter, GNC, decouples the weighting of vertex (balance) and edge (cut) and thus enables balanced partitions and flexible weighting [9]. The GNC method can further control the network partition by balancing and controlling the network partition objectives such as water loss control and reduction [7], [9], [10], [11].

The probability of pipe bursts and their subsequent impact on water loss is a promising proposal to balance the DMA and improve the efficiency and effectiveness of leak detection, localization and remediation. Recent advances in machine learning (ML) have significantly improved pipe failure prediction and leak detection capabilities [12], [13], [14], [15], [16]. However, ML models for pipeline failures are still

*Article Title Footnote needs to be captured as Title Note

[†]Author Footnote to be captured as Author Note

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

© 2025 Copyright held by the owner/author(s).

<http://doi.org/10.70314/is.2025.miti.3>

constrained by limited data, heterogeneous degradation, utility-specific calibration, and weak data integration [17], [18].

Greater integration of various infrastructure data has shown improvements in quantifying the probability of pipeline failure and subsequent condition assessment for strategic planning and proactive asset management. Kozelj and Abert Fernández [19] have shown that ML models are very effective when they incorporate a multidimensional approach to quantitatively assess non-WSS features (i.e., neighboring infrastructure systems) in the prediction of pipeline failures, such as construction activity, operational loads from nearby transportation infrastructure, and environmental impacts from neighboring utilities. The multi-system interdependency of buried supply infrastructures can restructure the occurrence of water losses and operational prioritization.

As Slovenian utilities report high water losses (~20-70% in NRW), budgets are limited and assets are outdated, the limited investment in monitoring and analysis must provide the greatest benefit to the goal of combating water losses. Therefore, our study focuses on whether condition-based vertex weighting – using ML-based pipe break probabilities (PFp) – can make spectral partitioning and DMA design more feasible by prioritizing high-risk zones without compromising hydraulic performance or increasing implementation costs. Embedding PFp as vertex weights in the GNC formulation and comparison with on-demand GNC in the same case of Ljubljana [9].

2 Spectral Graph Partitioning – GNC method

A WDN strongly resembles the structure of a graph $G = (V, E)$, where V is a set of n vertices and E is a set of undirected edges between these n vertices. The constat nodes and pipes correspond to vertices and edges, respectively. In this study, spectral graph partitioning is used to partition graph G into subgraphs $G_1, G_2, \dots, G_p$ where $p \leq n$. In a subgraph $G_k = (V_k, E_k)$, where $k = 1, \dots, p$, all the edges connecting the vertices V_k are referred to as intracluster E_k , while edges connecting vertices from different subgraphs are referred to as intercluster edges B , which represent links between different subgraphs. A complete partition is therefore referred to as [9]:

$$\mathcal{P} := \{G_1, G_2, \dots, G_p\}. \quad (1)$$

To achieve a more balanced partitioning, we can use different objective functions for our partitioning problem. Our research uses the generalized normalized cut (GNC) since it balances the sum of vertex weights (w_v) within each cluster while minimizing the sum of intercluster edge weights ($w_{vv'}$). For a partition $\mathcal{P} := \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ the objective therefore is [9]:

$$\eta(\mathcal{P}) := \min_{V_1, V_2, \dots, V_p} \sum_{k=1}^p \frac{\text{vol}(\partial(V_k))}{\text{vol}(V_k)}, \quad (2)$$

where $\text{vol}(\partial(V_k))$ is the sum of the weights of all intercluster edges in $\partial(V_k)$; and $\text{vol}(V_k)$ is the sum of the weights of the vertices in V_k [9]:

$$\begin{aligned} \text{vol}(\partial(V_k)) &= \sum_{vv' \in \partial(V_k)} w_{vv'}, \\ \text{vol}(V_k) &= \sum_{v \in V_k} w_v. \end{aligned} \quad (3)$$

The corresponding generalized eigenvalue problem is written as follows:

$$LU = WUL, \quad (4)$$

where L is the Laplacian matrix; U is the eigenvector matrix; and $W = D_V$ is the diagonal matrix of vertex weights:

$$D_{V_{ij}} := \begin{cases} w_{v_i}, & i = j, \\ 0, & \text{sicer} \end{cases} \quad (5)$$

with $i, j = 1, \dots, n$ [9]. By solving equation (4) we obtain the p smallest eigenvalues and their corresponding eigenvectors, which are then clustered by rows into p clusters using the k -means++ clustering algorithm, where the cosine or squared Euclidean distance is used to determine the cluster centroids [20]. The clustering algorithm assigns each node to a corresponding DMA. After partitioning the spectral graph, the characteristics of each established DMA can be extracted. The determined subgraphs $G_1, G_2, \dots, G_p$ are then interconnected by any combination of the edges from the intercluster set B to obtain the final graph.

The efficiency of connecting subgraphs is ensured by using spanning trees, which identify all topologically valid possibilities for connecting subgraphs from the partition $\mathcal{P}$ with the smallest possible number of edges [9]. A connected unweighted multigraph $H = (V_H, E_H)$ is constructed, where V_H are vertices representing one of the subgraphs G_p , and E_H are the intercluster edges in B . The spanning tree method over k -shortest weighted (hydraulic resistances) paths prioritizes the identified water mains, reduces the combinatorial space, and simultaneously preserves hydraulic sufficiency [9].

As described in the previous subsection, the spectral graph partitioning algorithms provide balanced partitions with the lowest cut values, i.e., the sums of the intercluster edge weights. The GNC partitioning method uses two different sets of weights, i.e., edge (cut) weights for the weighted Laplacian matrix L , and an independent set of vertex (balancing) weighting for the matrix D_v . The weight cases are as follows:

- Laplacian matrix L : unweighted (u), pipe diameter (d), pipe length (l), minimum edge costs (uC), and a topological weighting ($w1$) which includes additional topological characteristics (i.e., gate valves, bridges in the graph, and water mains).
- Diagonal matrix D_v : considers the pipe failure probabilities (PFp).

The selected weight cases are compared with the published results of Zevnik et al. [9]. The most important comparison is the introduction of pipe failure probabilities (PFp) as balancing weights to make spectral partitioning more suitable for its

primary purpose of efficiently detecting and reducing water losses.

2.1 Pipe failure probability (PFp) modeling

The PFp weights come from a recent study by Kozelj and Abert Fernández [19], which are obtained by training an ML algorithm with data from the Ljubljana WSS (Ljubljana, Slovenia). Three datasets were used for the study, namely 52,605 records of pipe sections from the national utility cadastre managed by GURS [21], a register of 2,281 documented pipe bursts from the utility for the period from 2010 to 2025 [22], and several cross-utility infrastructure networks that showed meaningful predictive power for pipe burst risk [21]. The ML model was built using the XGBoost algorithm and validated by stratified K-fold cross-validation, and achieved high performance (ROC AUC: 0.9102; recall: 0.7750; accuracy: 0.8750; F1 score: 0.2261; and LogLoss: 0.2500), confirming its reliability [19].

The XGBoost algorithm [23] was validated by stratified five-fold cross-validation [24], which yields out-of-fold PFp for each pipe, which were later grouped into five classes [0 – 0.2], (0.2 – 0.4], (0.4 – 0.6], (0.6 – 0.8], and (0.8 – 1] (Figure 1). The metric of feature importance showed that the most influential predictors of the model were pipe material, installation year, and pipe diameter, but also influential gains from adjacent infrastructure systems, such as electricity grids, sewage systems, and roads.

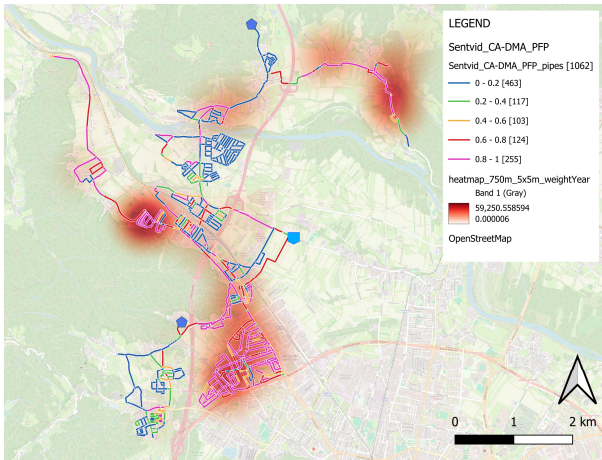


Figure 1: Pipe failure probabilities (PFp) and heatmap the spatial distribution of historical failures

In addition, to the spatial representation of the probabilistic results generated by the XGBoost algorithm (Figure 1), we can view the pipeline segments in a statistical analysis by looking at the distribution of pipe-specific characteristics, such as material and diameter, in the classes of failure probability. Figure 2 illustrates the probability of pipe failure as a function of pipe age and age.

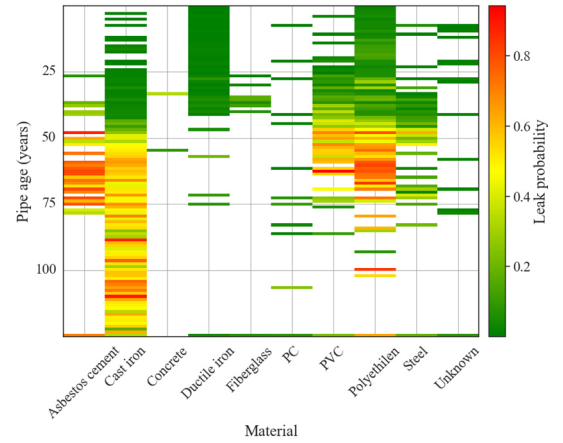


Figure 2: Heat map of pipe failure probabilities (PFp - leak) as a function of pipe material and age

The assignment of PFps for the GNC method was carried out by embedding the condition risk in the weighting term of GNC, whereby the PFp probabilities of the pipes $pf_e \in [0,1]$ were transferred to the vertex weights w_v via an incident pipe aggregation:

$$w_v = \frac{\text{Agg}_{e \in \delta(v)}(pf_e \cdot l_e)}{\text{Agg}_{e \in \delta(v)}(l_e)}, \quad (6)$$

where $\delta(v)$ is the set of pipes belonging to vertex (node) v , l_e is edge (pipe) length, and Agg is the (length-weighted) mean value. This concentrates the compensation probabilities for possible current or future water losses in areas with many or long high-risk pipes. The edge-weighted cases (u , d , l , C_{min} , and w_1) remain unchanged from the baseline [9].

3 Results and discussion of the GNC Spectral Graph Partitioning

Following the baseline study of Zevnik et al. [9] the computation k -means++ clustering was performed using squared Euclidean distance [20], although the cosine distance was also investigated, but yielded poorer results compared to the squared Euclidean distance, as noted in the previous study. Each partition $\mathcal{P}$ was subjected to: (i) an internal connectivity testing; (ii) efficient connection selection using spanning trees, and (iii) hydraulic screening using the generalized resilience index I_r [25] and tank-flow. The final alternatives are evaluated using the six-criteria model and the journalistic weights mentioned above [9]. The values of the selected criteria are normalized according to Liu and Han [26] considering a positive or negative influence. The final score of each partition is calculated as a weighted sum of the scores for a particular criterion. The higher the values of the final score, the better the alternatives of the DMA design.

The evaluation of the PFp-balanced GNC, i.e. vertex weights corresponding to the aggregated PFp risk of the node, w_v (length-weighted), was evaluated over the same five

representative cases of weighting: unweighted (u), pipe diameter (d), pipe length (l), minimum edge costs (C_{min}), and a topological weight case (w_1). Clustering by squared Euclidean distance was performed for $p = 2, \dots, 20$, with summaries of performance, best- p , and evaluation criteria (final score) provided for each case.

p	u	d	l	C_{min}	w_1
2	0.397	0.573	0.364	0.393	0.294
3	0.592	0.432	0.595	0.588	0.514
4	0.631	0.711	0.618	0.623	0.506
5	0.715	0.572	0.637	0.709	0.604
6	0.675	0.643	0.709	0.670	0.708
7	0.672	0.647	0.829	0.671	0.710
8	0.849	0.680	0.809	0.859	0.837
9	0.848	0.688	0.815	0.864	0.692
10	0.841	0.688	0.826	0.851	0.828
11	0.816	0.678	0.861	0.818	0.836
12	0.797	0.665	0.853	0.800	0.817
13	0.561	0.622	0.826	0.590	0.572
14	0.544	0.611	0.823	0.548	0.555
15	0.737	0.596	0.804	0.549	0.547
16	0.721	0.574	0.542	0.744	0.550
17	0.704	0.561	0.731	0.710	0.539
18	0.696	0.554	0.720	0.706	0.700
19	0.690	0.543	0.699	0.704	0.700
20	0.523	0.487	0.632	0.692	0.687
Q_2	0.696	0.611	0.731	0.704	0.690
Max	0.849	0.711	0.861	0.864	0.837

Figure 3: The final scores of the PFp-balancing GNC partitioning for all edge weights

As you can see from Figure 3, the best- p under the PFp-balancing GNC reached peak scores close to 7 (and occasionally $p = 4$ or $p = 6$) for many weight classes. Averaging the final scores over p for each edge weighting case shows that PFp-balanced GNC produces a stable topological clustering with hydraulically viable solutions, as indicated by the hydraulically sound solutions found. Figure 3 shows the final scores for all edge weighting cases, with length edge weighting (l) leading ($Q_2 = 0.731$), followed by C_{min} (0.704) and unweighted (u) (0.696), while diameter (d) lags behind (0.611). The maxima reinforce this hierarchy: C_{min} achieves the best overall score ($max = 0.864$ at $p = 9$), with l almost on a par (0.861 at $p = 11$). The supplementary design metrics for l and C_{min} . Case p_{best} explain these patterns. The weighting case l produces the strongest mean value and almost the best maximum, albeit at the highest cost (€45,363), with a good balance ($\tilde{Q}_{DMA} = 7.43$; $\sigma_l = 4,003.8$). C_{min} combines a balanced performance with moderate cost (€31,494) and a solid hydraulic performance of quantities $\tilde{Q}_{DMA} = 8.82$; $\sigma_l = 4,982.2$ (Table 1, $p = 9$). Overall, C_{min} and l define the efficient frontier of the best alternatives among the graph partitions found, with C_{min} offering the most balanced compromise.

Table 1: Best solution of PFp-balanced GNC spectral partitioning ($p=9$)

p	Ir [—]	Cost [€]	$\tilde{Q}_{DMA}$ [l/s]	σ_l [m]	Score [—]
9	0.832	31,494	8.82	4,982.2	0.864

In the solution, C_{min} , $p = 9$ solution (Figure 4), the stacked risk-length profiles show that the PFp-balanced segmentation has effectively concentrated pipes with poorer condition (orange/red, $p > 0.6$) in smaller DMAs, while larger DMAs are comparatively dominated by lower-risk classes (green/yellow, $p < 0.4$). Compact districts such as DMA-2, DMA-4, and DMA-9 have a high percentage of orange/red segments despite their modest overall pipe length, suggesting deliberately carved ‘maintenance cells’ where targeted leak detection and renewal can be efficiently staggered. In contrast, DMA-5, DMA-6, and DMA-8 have a much greater absolute length, but also a significantly higher proportion of green/yellow segments. This indicates more homogeneous, lower-risk operating zones that are more suitable for monitoring rather than immediate rehabilitation.

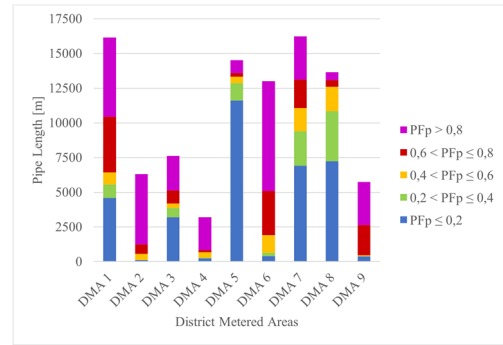


Figure 4: Length of pipes classified by DMA and pipe failure probabilities

A notable caveat is DMA-1, which combines a large overall length with a sizable red component, making it a priority corridor where incremental renewal or boundary secondary refinement may be warranted. Overall, the distribution confirms the intended behavior of risk-weighted vertex balancing: it locates high-risk assets in smaller, more manageable DMAs, while retaining hydraulically coherent, lower-risk areas at a larger scale. In this way, operational monitoring is aligned with condition-based maintenance and CAPEX/OPEX is concentrated where the expected returns are highest.

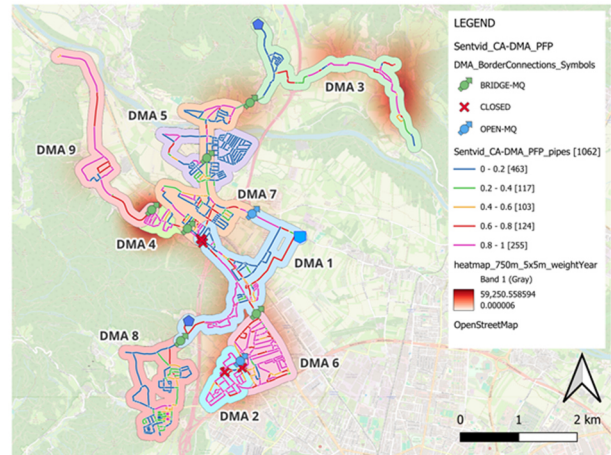


Figure 5: Heat map of the pipe failure probabilities (PFp - leak) depending on the pipe material and age

The map in Figure 5 shows the DMA layout of Ljubljana-Šentvid (DMAs 1–9) with symbols (open/closed points and bridge-MQ). The pipe segments are color-coded by PFp: green (≤ 0.2) to magenta (≥ 0.8), indicating higher-risk corridors around DMAs 1 and 6 and generally lower-risk networks in areas such as DMAs 3, 5, and 9. A red colored background heatmap shows the spatial distribution of historical failures (2010–2025).

4 Conclusions

This paper, presents a unified framework that incorporates predictive failure risk into spectral DMA segmentation by using ML-based failure probabilities for pipes. PFps were mapped from pipes to node weights using an XGBoost model and a generalized normalized cut (GNC) over standard edge weight cases were solved as vertex weights within the GNC spectral partitioning method. In the case of Šentvid Ljubljana, the risk-weighted formulation resulted in superior composite scores compared to the demand-balanced baselines of Zevnik et al. [9]. The preferred solution – C_{min} – Weighting at $p = 9$ – achieved a composite score ~ 0.864 , with moderate implementation costs ($\sim \text{€}31.5\text{k}$), and reasonable spatial uniformity ($\sigma_l \approx 5$ km). In practice, the split equalizes pipe failure probabilities (PFp) and concentrates pipes in poor condition on actionable DMAs, while reserving larger, lower-risk zones for routine monitoring. On a system scale, the approach strengthens proactive asset management, accelerates leak reduction in aging WDNs, and supports energy and emissions savings through avoided production and pumping operations.

Acknowledgments

This paper was reviewed and corrected for grammar and style using InstaText (instatext.io).

References

- [1] R. B. Sowby and A. C. Siegel, 'The increasing energy intensity of drinking water supply', *Energy Reports*, vol. 11, pp. 6233–6237, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.06.014.
- [2] T. AL-Washali, S. Sharma, and M. Kennedy, 'Methods of Assessment of Water Losses in Water Supply Systems: a Review', *Water Resour. Manage.*, vol. 30, no. 14, pp. 4985–5001, Nov. 2016, doi: 10.1007/s11269-016-1503-7.
- [3] P. Rizzo, 'Water and Wastewater Pipe Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: A Review', *Advances in Civil Engineering*, vol. 2010, pp. 1–13, 2010, doi: 10.1155/2010/818597.
- [4] MNVP, 'Information System of Public Environmental Protection Services = Informacijski sistem za spremljanje gospodarskih javnih služb varstva okolja (IJSVO)', Ministry of Natural Resources and Spatial Planning, Ljubljana, Slovenia, 2025. Accessed: Jul. 15, 2025. [Online]. Available: <https://ipi.eprorator.gov.si/jgp/data>
- [5] European Commission, 'European Water Resilience Strategy (COM(2025) 280 final)', European Commission, Brussels. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/publications/european-water-resilience-strategy_en
- [6] J. Morrison, D. Rogers, and S. Tooms, *District metered areas guidance notes*, 1st ed. in Water Loss Task Force. London: IWA Publications, 2007.
- [7] T. Zhang, H. Yao, S. Chu, T. Yu, and Y. Shao, 'Optimized DMA Partition to Reduce Background Leakage Rate in Water Distribution Networks', *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 147, no. 10, p. 04021071, Oct. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001465.
- [8] C. Fan, Z. Cui, and X. Zhong, 'House Prices Prediction with Machine Learning Algorithms', in *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Machine Learning and Computing*, Macau China: ACM, Feb. 2018, pp. 6–10. doi: 10.1145/3195106.3195133.
- [9] J. Zevnik, M. Kramar Fijavž, and D. Kozelj, 'Generalized Normalized Cut and Spanning Trees for Water Distribution Network Partitioning', *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 145, no. 10, p. 04019041, Oct. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001100.
- [10] A. Di Nardo, M. Di Natale, C. Giudicianni, R. Greco, and G. F. Santonastaso, 'Weighted spectral clustering for water distribution network partitioning', *Appl. Netw. Sci.*, vol. 2, no. 1, p. 19, Dec. 2017, doi: 10.1007/s41109-017-0033-4.
- [11] Q. Fang, H. Zhao, C. Xie, and T. Chen, 'A method for water supply network DMA partitioning planning based on improved spectral clustering', *Water Supply*, vol. 23, no. 8, pp. 3432–3452, Aug. 2023, doi: 10.2166/ws.2023.180.
- [12] Y. Asadi, 'Employing machine learning in water infrastructure management: predicting pipeline failures for improved maintenance and sustainable operations', *Industrial Artificial Intelligence*, vol. 2, no. 1, p. 8, Nov. 2024, doi: 10.1007/s44244-024-00022-w.
- [13] B. Bakhtawar, T. Zayed, and N. Elshaboury, 'Time-to-failure based deterioration factors of water networks: Systematic review and prioritization', *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 263, p. 111246, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111246>.
- [14] M. Cabral, D. Gray, B. Brentan, and D. Covas, 'Assessing Pipe Condition in Water Distribution Networks', *Water*, vol. 16, no. 10, p. 1318, May 2024, doi: 10.3390/w16101318.
- [15] A. A. M. Warad, K. Wassif, and N. R. Darwish, 'An ensemble learning model for forecasting water-pipe leakage', *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 10683, May 2024, doi: 10.1038/s41598-024-60840-x.
- [16] M. Latifi, R. B. Zali, A. A. Javadi, and R. Farmani, 'Efficacy of Tree-Based Models for Pipe Failure Prediction and Condition Assessment: A Comprehensive Review', *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 150, no. 7, p. 03124001, 2024, doi: 10.1061/JWRMD5.WRENG-6334.
- [17] R. Jafar, I. Shahrour, and I. Juran, 'Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains', *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 51, no. 9–10, pp. 1170–1180, May 2010, doi: 10.1016/j.mcm.2009.12.033.
- [18] Y. Le Gat, C. Curt, C. Wery, K. Caillaud, B. Rulleau, and F. Taillandier, 'Water infrastructure asset management: state of the art and emerging research themes', *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 539–562, Apr. 2025, doi: 10.1080/15732479.2023.2222030.
- [19] D. Kozelj and D. A. Fernández, 'Predicting Water Distribution Pipe Failures Using Machine Learning and Cross-Infrastructure Data', *Acta hydrotechnica*, pp. 53–64, Jun. 2025, doi: 10.15292/acta.hydro.2025.05.
- [20] D. Arthur and S. Vassilvitskii, 'K-means++: The advantages of careful seeding', in *Proc., 18th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms*, Philadelphia (USA): Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007, pp. 1027–1035.
- [21] GURS, 'Data on public infrastructure = Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture', Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia (GURS), Ljubljana, Slovenia, 2025. Accessed: Jul. 15, 2025. [Online]. Available: <https://ipi.eprorator.gov.si/jgp/data>
- [22] VOKAS, 'Pipe burst register', JP VOKA SNAGA d.o.o., 2025.
- [23] T. Chen and C. Guestrin, 'XGBoost: A Scalable Tree Boosting System', in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, San Francisco California USA: ACM, Aug. 2016, pp. 785–794. doi: 10.1145/2939672.2939785.
- [24] T. Akiba, S. Sano, T. Yanase, T. Ohta, and M. Koyama, 'Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework', in *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, Anchorage AK USA: ACM, Jul. 2019, pp. 2623–2631. doi: 10.1145/3292500.3330701.
- [25] E. Creaco, M. Franchini, and E. Todini, 'Generalized Resilience and Failure Indices for Use with Pressure-Driven Modeling and Leakage', *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 142, no. 8, p. 04016019, Aug. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000656.
- [26] Z. Liu, Y. Kleiner, B. Rajani, L. Wang, and W. Condit, 'Condition assessment technologies for water transmission and distribution systems', U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-12/017, Apr. 2012. [Online]. Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=241510&Lab=NRMRL

Prioritizing Leaks that Matter: Evidence-Based Assessment of Water Loss KPIs

Daniel Kozelj[†]

Faculty of Civil and Geodetic
Engineering
University of Ljubljana
Ljubljana, Slovenia
daniel.kozelj@fgg.uni-lj.si

Abstract

This study presents a comprehensive assessment of water losses in Slovenian public water supply systems for the period 2014–2024. Key performance indicators derived from the IWA water balance, in particular Non-Revenue Water (NRW%) and the Infrastructure Leakage Index (ILI), have been calculated, segmented and uncertainties added to assess performance at national and system level. The results indicate persistently moderate to high levels of leakage, with 60 systems reporting NRW percentages above 40% and nine large utilities reporting ILI values above 8. The uncertainty analysis showed that 54.5% of systems could change performance classes. The results highlight the critical role of data quality, uncertainty quantification and targeted measures to improve efficiency and resilience.

Keywords

Water supply systems, Water losses, Infrastructure Leakage Index (ILI), Non-Revenue Water (NRW), Uncertainty quantification

1 Introduction

Following the European Citizens' Initiative 'Right2Water' in 2013, the European Commission launched procedures to assess the regulatory fitness and performance (REFIT) of Directive 98/83/EC [1]. This identified a general lack of awareness of water leakage caused by insufficient investment in the maintenance and renewal of water infrastructure [2]. Directive (EU) 2020/2184 on water intended for human consumption (recast) introduced new obligations to carry out an assessment of water losses in public water supply systems (WSS) using the Infrastructure Leakage Index (ILI) assessment method, with the aim of reducing losses to an acceptable level [3]. The public water suppliers must carry out the assessments of water losses in their respective supply areas. Based on these assessments, the Ministry of Natural Resources and Spatial Planning (MNVP)

will prepare a consolidated assessment of water losses for the entire territory of the Republic of Slovenia, the results of which must be submitted to the European Commission (EC) by January 12, 2026. Thereafter, the EC will adopt a delegated act by January 12, 2028, in which the acceptable loss threshold will be set. Member states whose losses fall outside the prescribed limits must adopt national action plans to reduce losses by 2030 [3].

The obligations of Directive (EU) 2020/2184 are implemented by the Law on Drinking Water Supply and the Discharge and Treatment of Urban Wastewater (ZOPVOOV) [4], which requires utilities and municipalities to ensure a reduction in water losses, maintain and submit data on volumes/water balance/losses to the state register, prepare four-year drinking water supply programs that include leakage reduction targets, and publish annual reports. The government has yet to set detailed service standards and technical/maintenance measures by law. The executive order implements this by requiring operators to monitor and record losses in the water balance and to develop and implement loss reduction programs, with the infrastructure owner being responsible for financing the necessary investments.

Reliability and security depend on the stability and long-term availability of water resources and the resilience and efficiency of existing infrastructure [5]. The Operational Program for Drinking Water Supply 2022–2027 [6] and ZOPVOOV [4] identify systematic loss reduction as a strategic priority. As each component of the water balance is subject to measurement/estimation errors, the derived KPIs - net water consumption, water/real losses and especially the Infrastructure Leakage Index (ILI) — are inherently uncertain and, if not quantified, can steer operational decisions and large capital investments in the wrong direction. The key finding of Babić et al. [7] is that the uncertainty of the ILI is dominated by the uncertainty of the UARL inputs - in particular the average pressure and the length or number of service connections. Therefore, the most effective mitigation measure is the systematic improvement of data (pressure/flow capture in the DMAs, calibrated models and robust asset inventories) prior to benchmarking. Given the upcoming investments in water supply, municipalities, utilities and the government need to improve the reliability, consistency and accuracy of data.

1.1 Water Resources and Security of Supply

Data from the Statistical Office of the Republic of Slovenia [8] and the Operational Program for Drinking Water Supply 2022–

*Article Title Footnote needs to be captured as Title Note

[†]Author Footnote to be captured as Author Note

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

© 2025 Copyright held by the owner/author(s).

<http://doi.org/10.70314/is.2025.miti.4>

2027 [6] show that Slovenia withdraws about 185 million m³ per year for public supply, while water consumption has increased by 10.3%, while household consumption has increased by 4.1% and industrial consumption by 33.6% [8]. For the same observation period from 2014 to 2023, water losses have also increased by 17.1% to a total of 53.7 million m³ per year. Although the national permits for water abstraction offer a potential of about twice the current consumption, we must be concerned about the regional imbalances in the availability of water sources — especially in the south-eastern part of Slovenia, in Slovenske gorice and in the coastal karst region.

In terms of reliability and security, the sparse backup sources pose an additional risk: Only about one-fifth (21%) of WSS have technically adequate, functioning backups, leading to high vulnerability in emergencies (natural disasters, drought, pollution or system failures). This is particularly acute in coastal communities, where the failure of the main source (e.g. Rižana) is often irreplaceable and jeopardizes the stability of the summer supply.

The Slovenian water supply sector is highly fragmented, which undermines economies of scale and integrated management. In 2024, there were 82 public service providers and over 1,114 physical WSS, but only 85 serve more than 5,000 inhabitants [9]. These large WSS serve about 1,701,500 inhabitants (79.9% of the population); the remaining 20.1% rely on smaller, capacity-constrained utilities that often do not meet quality and reliability standards. Fragmentation leads to limited network optimization, higher unit costs, weak long-term planning and limited access to EU/national funding. Small systems ($\leq 5,000$ customers) typically lack capital and staff for modernization, increasing vulnerability to crisis. Limited investment and inadequate damage control lead to a disproportionate amount of water loss, further straining resources and increasing environmental and economic pressure on communities [10].

1.2 Water Losses and Condition of Infrastructure

The regulatory framework for dealing with water losses in the Slovenian public water supply is set out in the Ordinance on the Methodology for Determining Prices for Compulsory Municipal Environmental Services [11]. Although it was adopted in 2012, its implementation has been repeatedly postponed, reflecting the complexity of reconciling municipal infrastructure ownership, utility operations and consumer price regulation. The measure is intended to encourage municipalities and operators to actively seek to reduce water losses while preventing all financial burdens from being passed on to end users. For systems serving more than 5,000 inhabitants, the regulation sets the allowable level of losses as a condition for the inclusion of water balancing costs in tariffs [6]. Recognizing that structural improvements take time, the allowable thresholds have been set above the long-term policy target of an Infrastructure Leakage Index (ILI) ≤ 4 , but will gradually decrease from ILI 6 (2022–2023) to ILI 5 (2024–2026), reaching ILI 4 in 2027 [6].

Against this regulatory background, the performance data reveal persistent structural inefficiencies. On average, Slovenia's public systems have water losses of 29%, well above the ~20% benchmark generally considered sustainable in EU practice [8]. Larger municipal utilities perform slightly better at

~25%, while smaller and technologically outdated systems reach ~45%, revealing a systemic vulnerability. The national ILI is currently 3.6, which according to the IWA methodology indicates weak operational control and underdeveloped active leak detection, coupled with limited use of advanced optimization and pressure management. Without targeted action, these weaknesses will affect the long-term resilience of the supply and exacerbate vulnerability to climate-induced hydrological stress [5].

The time series indicators [8] further illustrate this dynamic. The total system input volume (SIV) increased by 12.2% between 2014 and 2023, accompanied by growth in billed authorized consumption (BAC), which increased by 12.6% (Figure 1). At the same time, water losses increased by 17%, confirming that improvements in billing have not led to lower leakages [8]. Unbilled authorized consumption (UAC) decreased significantly (~30%), a positive result reflecting better control of administrative and non-income categories [8]. However, the amount of unaccounted for water (NRW) increased by 11.2%, while the percentage of NRW remained essentially unchanged, indicating that absolute losses increased in parallel with system inputs [8].

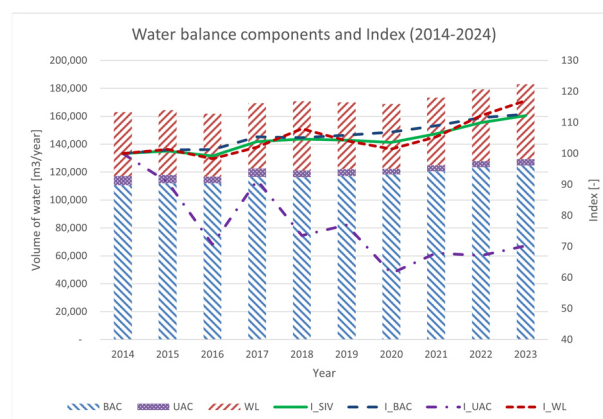


Figure 1: Water balance components from the observed period 2014-2024 [8]

The expansion of the infrastructure is a decisive explanatory factor. The total length of the network has increased by 86% during this period, while the number of connections has risen by 21%. As a result, the connection density fell from an indicated value of 100 in 2014 to 65 in 2023, reflecting the integration of additional, predominantly rural networks with fewer customers per kilometer of pipeline. Such networks are inherently more prone to losses as higher infrastructure costs per unit go hand in hand with lower consumer density, which reduces economies of scale and operational efficiency. The observed increase in water loss (WL), BAC and SIV is therefore closely linked to the inclusion of these less efficient rural systems [8].

To summarize, the Slovenian water supply sector faces a double challenge: regulatory thresholds increasingly demand efficiency improvements, while the ongoing expansion into rural networks with low connection density increases structural vulnerability to losses. Addressing these challenges requires targeted investment in leakage management, systematic pressure optimization and strategies tailored to the

specific vulnerabilities of distributed systems. To better understand these dynamics and identify actionable priorities, the following chapter turns from national-level statistics to the detailed IJSVO dataset [9], which enables an assessment of individual systems (WSS_ID) in all relevant categories.

The condition of the public water supply networks in the Republic of Slovenia is worrying, as the average age of the pipelines is over forty years, which means that a large part of the network has long exceeded its intended economic and technical lifespan. More specifically, over 35 percent of the pipeline infrastructure is depreciated, technically obsolete and no longer meets the basic standards of reliability and safety required for a modern drinking water supply. Between 2007 and 2012, investments in Slovenia's public water supply amounted to 356.5 million euros, rising to 606.3 million euros in the period 2013–2018 [6]. Despite this upward trend, financial efforts remain insufficient to cope with the scale of infrastructure renewal needs. By the end of 2027, it is estimated that 6,551 km of pipelines will have exceeded their depreciation period, meaning that around €1.311 billion will be needed for replacement [6]. Given the time and budget constraints, the current program envisages an annual refurbishment of only 1.5% of the pipelines (≈380 km), which equates to around 2,280 km nationwide, falling short of the 3% replacement rate deemed necessary to maintain system condition and service reliability [6].

2 Methods

The IJSVO database is the national database for structured reporting on Slovenian public water supply systems [9]. It provides utilities with a harmonized framework for reporting technical, operational and performance data in a way that supports regulatory oversight, sector benchmarking and scientific analysis. The structure of the database is modular: Each table corresponds to a specific aspect of system operation or infrastructure, while together they form a comprehensive database covering water sources, abstraction, treatment, distribution, consumption, losses and household connections. Reporting begins with contextual overview tables that describe system identification, organizational data and general service coverage. The VT series tables then provide increasingly detailed records of operational and physical parameters:

- VT1 and VT2 deal with water sources, abstraction points, and treatment characteristics;
- VT3 and VT3a report on the system's input volumes, billed authorized consumption, apparent and real losses, imports/exports of water, and the number of connections;
- VT4 and VT5 deal with water quality monitoring and compliance;
- VT6 provides an insight into continuity of supply and service coverage, including breakdown by customer category;
- VT7 and VT8 document the physical network, pressure levels, length of connection, and other key infrastructure features.

Together, these data sets make it possible to reconstruct the overall water balance of a system and to quantify performance against technical and political benchmarks. An in-depth analysis will primarily focus on the VT3 and VT8 tables, as they form the analytical backbone for water balance and loss assessment and their data quality directly influences the robustness of derived KPIs, such as water losses, Infrastructure Leakage Index (ILI) and service continuity metrics, while allowing cross-comparison between utilities of different sizes and contexts.

2.1 ETL, Data Cleaning and Quality Control

The extract, transform and load (ETL) process formed the basis of the analytical workflow, in which IJSVO tables VT3, VT3a, VT6 and VT8, covering the period 2014–2024 [9], were batch imported into a unified SQLite database to enable cross-year comparability. The schema harmonization was necessary to compensate for attribute inconsistencies resulting from successive changes to the IJSVO database structure and thus ensure methodological continuity. Subsequent data cleansing, validation and quality control steps involved deduplication, record consolidation and integrity checking of system identifiers to ensure consistency throughout the analysis period. Validation routines included range checks (e.g., non-negativity) and cross-table coherence constraints, such as ensuring $SIV \geq BAC$, given the overlap of input components across multiple tables. Missing or conflicting values were resolved via rule-based selection, favoring VT3 as the primary source. For isolated gaps, interpolation to the next year was performed with rate of change controls unless all four consecutive years were missing, thereby maintaining structural consistency of the reconstructed dataset.

2.2 Water loss key performance indicators KPIs

The key performance indicators (KPIs) for water losses are derived from the standardized IWA water balance (Figure 2), which is also anchored in Slovenian regulatory practice. Their quantification is not only based on the components of the balance, but is further refined by integrating variables of the water distribution system such as network length, number and length of house connections and average operating pressure. These enriched indicators provide a consistent framework for benchmarking and are important for supporting management decisions, guiding operational practices such as leak detection and pressure control, and for long-term investment planning to improve the efficiency, resilience and sustainability of water supply systems [10].

All performance indicators used in the regulatory assessment are derived from the standardized IWA water balance to ensure methodological consistency between systems of different sizes. In Slovenia, regulatory requirements are based in particular on the Infrastructure Leakage Index (ILI) and the percentage of non-revenue water (NRW%) [4], [6]. The classification is population-based: water systems serving more than 5,000 inhabitants are assessed using the ILI, which is a more robust, infrastructure-adjusted metric, while systems with less than 5,000 inhabitants are assessed using NRW%, which is a simpler yet practical measure of efficiency suitable for smaller

networks with limited data availability and monitoring capacity [4], [6].

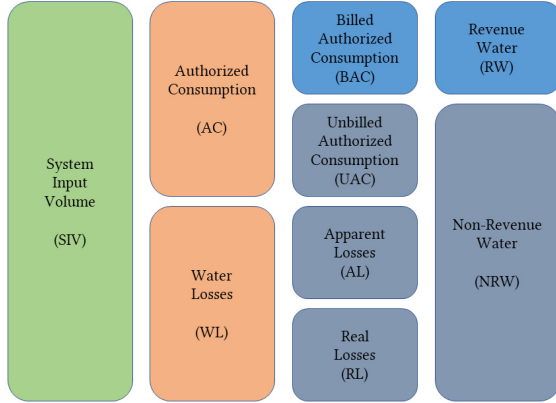


Figure 2: IWA water balance components [12]

The two key metrics used to calculate water losses are [12]:

- Non-Revenue Water (NRW) in percent:

$$NRW = \frac{SIV - BAC}{SIV} * 100 \quad (1)$$

where SIV is the system input volume ($m^3/year$), and BAC is the billed authorized consumption ($m^3/year$).

- Infrastructure Leakage Index (ILI):

$$ILI = \frac{CARL}{UARL}, \quad (2)$$

where $CARL = RL$, and

- Unavoidable Current Annual Losses (AURL):

$$UARL = (6.57 * L_m + 0.292 * N_c + 9.132 * L_p) * P, \quad (3)$$

where L_m is the total length of the pipe network (km), N_c is the number of service connections (from the main pipe to the property boundary), L_p is the total length of underground pipes, from property boundary line to the meter (km), and P is the average pressure (m).

The UARL formula is a practical, user-friendly tool for assessing a system-specific lower limit for the annual amount of real losses that would be technically achievable at the current operating pressure, taking into account global "best practice" for the speed and quality of repairs, active leakage control and management of pipelines and facilities when economics are not a constraint (i.e. for systems where water is scarce or has a very high marginal cost). The ILI index is regarded to be less reliable for systems with $>5,000$ connections, >20 conn/km, and >25 m average pressure [12].

All performance indicators used in this study were derived from the standardized IWA water balance, which provides a consistent basis for benchmarking water supply performance.

To enable a comparative assessment, the results for both the Infrastructure Leakage Index (ILI: A1–D) and the percentage of non-revenue water (NRW%) were divided into fixed classes that follow internationally recognized thresholds [2], [13]. In addition, a regulatory size lens was introduced to differentiate between systems serving more than 5,000 customers (urban-like) and those with less than 5,000 customers (rural), while temporal segmentation was performed on an annual basis (2014–2024) for each WSS_ID to ensure both structural comparability and longitudinal analysis.

2.3 Uncertainty quantification of KPIs

The accuracy of water balance components and performance indicators in water distribution systems is limited by the reliability of their input data. Therefore, uncertainty must be systematically quantified and included in all subsequent calculations. In this study, uncertainty at the input data level is treated as first-order information rather than noise, with year-to-year variability assessed per WSS_ID and 95% confidence limits given using t-based intervals (if $n > 2$) or nonparametric bootstraps otherwise. For proportional KPIs such as NRW% and ILI, closed confidence intervals are derived using the delta method. To capture dispersion effects, Monte Carlo simulation with Latin Hypercube Sampling (10,000 draws, seeded) is applied to empirically based input distributions (Normal, Lognormal, Triangular) that generate KPI distributions from which two-sided 95% intervals are extracted [14]. Results are presented in the form of medians, confidence limits and relative half-widths, while uncertainty indicators facilitate interpretation. Ultimately, accurate water loss estimation requires robust input data, which is ensured by systematic infrastructure inventories, source and water integration, advanced monitoring platforms and satellite-based detection [15].

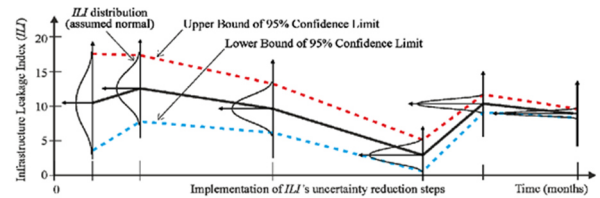


Figure 3: ILI estimations and confidence intervals by reducing uncertainty [7]

By systematically including uncertainties in the assessment of water balance components and performance indicators, the methodology applied ensures that the results obtained are not only statistically robust, but also more meaningful for decision-making [7]. Instead of treating variability as noise, the approach explicitly quantifies confidence limits and thus clarifies the degree of reliability associated with each KPI (Figure 3). This improves the interpretability of water loss assessments as both optimistic and pessimistic bounds are made transparent, allowing for more nuanced comparisons between systems and years. As a result, the results presented in the following section are more meaningful and provide a deeper insight into the extent, distribution and causes of water loss and leakage in Slovenian water supply systems.

3 Results

The primary sources of information for this analysis are the IJSVO tables VT3 and VT8, with VT3 forming the basis for the water balance for the period 2014–2024 [9]. However, VT3 data is very sparse, particularly in terms of quantifying water losses and dividing them into apparent and actual losses, the availability of which rarely exceeds 50%. Even greater challenges are associated with VT6, where implausible entries—including negative values and unrealistic variations from year to year for the same attribute—are common (Figure 4). In addition, critical infrastructure descriptors such as service connection length and average system pressure are not available until 2021, with coverage stabilizing at 64–70% for connection length and above 85% for pressure. This uneven availability over time and the inconsistency of the core variables highlight the limitations of the dataset. They complicate longitudinal assessments of water loss performance and limit the robustness of regulatory KPIs without the application of imputation, harmonization and strict quality control rules.

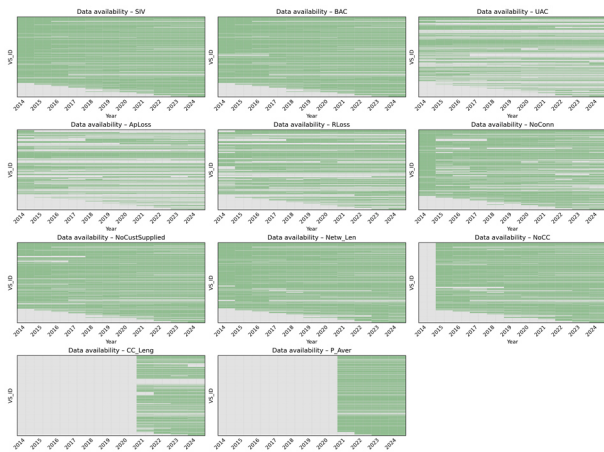


Figure 4: Selected attribute data availability from tables VT3 and VT6 in period 2014–2024 [9]

The spatial distribution of non-revenue water (NRW%) in the Slovenian water supply systems (WSS) shows pronounced regional differences, as shown in Figure 5. A total of 60 WSS have a very high NRW share of more than 40%, 15 of them even more than 70%, which indicates severe inefficiencies. A further 65 WSS fall into the high category (30–40%), while 34 are classified as moderate (25–30%). Conversely, 121 WSS perform relatively well, with NRW between 15–25%, and 81 fall into the excellent category (<15%). Within the latter group, 24 WSS report an NRW value of less than 5%, a value that is considered implausibly low and suggests possible data inconsistencies or reporting errors. For 52 WSS, the NRW% value could not be determined due to incomplete data. Overall, the NRW% map highlights the areas where losses are most critical and underlines the dual challenge posed by excessive real losses in certain networks and the questionable reliability of data in others.

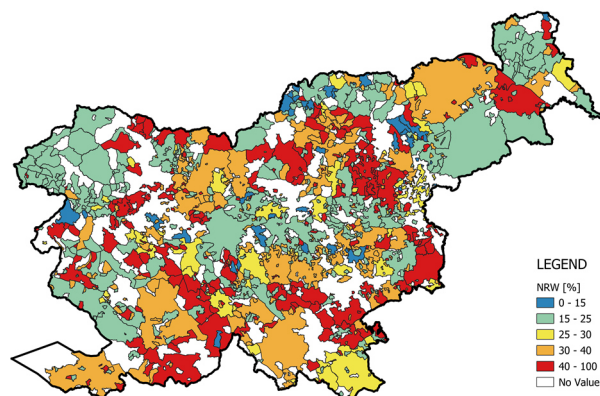


Figure 5: NRW (in %) for 2024

The spatial assessment of the Infrastructure Leakage Index (ILI) provides a clearer picture of leakage intensity in larger water supply systems (WSS) in Slovenia. As shown in Figure 6, only 74 WSS exceed the legal threshold of 5,000 customers supplied, making them eligible for an ILI-based assessment. Of these, 9 WSS fall into the very high loss category (ILI > 8), with the most extreme case reaching an ILI = 28, due to severe structural inefficiencies and persistent leakage. A further 15 WSS fall into the high range (4–8), while the majority, 26 WSS, have a moderate performance with ILI values between 2–4. At the lower end of the scale, 6 WSSs achieved good scores (1.5–2) and 12 WSSs showed excellent performance (≤1.5), which is in line with international best practice. These results highlight the heterogeneity of leakage management, where a significant proportion of larger systems continue to face significant challenges despite regulatory focus and resources. In contrast, only a minority of utilities achieve consistently low levels of leakage.

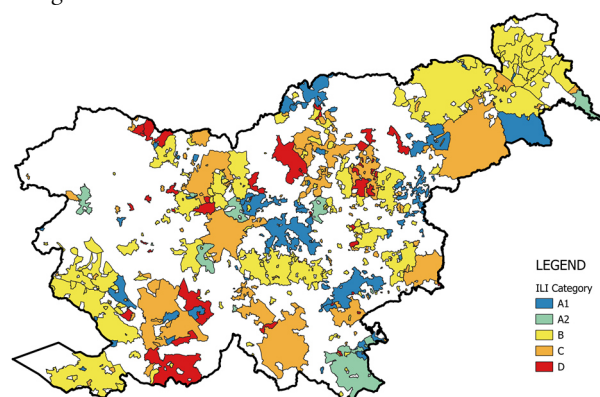


Figure 6: ILI for 2024

Comparing the ILI-based classification with the corresponding percentage of non-revenue water (NRW%) for the same group of larger WSS provides further insights into the alignment of the indicators. The results show that 27 WSS fall into the very high category with an NRW of over 40%, while 26 fall into the high category (30–40%). Thirteen WSS are classified as moderate (25–30%), 17 fall into the good category (15–25%) and only 3 systems achieve an excellent level (<15%), with the lowest NRW at 8.4%.

These values suggest that NRW% provides a more realistic and consistent representation of water loss for larger utilities, particularly because such utilities are typically managed by organizations with greater staff capacity, technical expertise and monitoring resources [12]. This underlines the importance of considering ILI and NRW% together: While the ILI captures the structural efficiency of the infrastructure, NRW% provides a more intuitive measure, and their joint interpretation strengthens the robustness of leakage assessments in large systems [7].

The inclusion of the uncertainty analysis in the KPI classification shows that the assignments to the categories are often less stable than the mean values alone would suggest. For the Infrastructure Leakage Index (ILI), more than half of the systems assessed (54.5%) have at least a 95% confidence limit that falls into a different performance band than their mean. This suggests that class membership is sensitive to the variability of inputs and the rankings should therefore be interpreted with caution. In practice, a system classified as “moderate” can plausibly fall into either the “good” or “high” category within its confidence limits. This highlights the need for regulators and operators to consider uncertainty ranges when using banded KPIs for benchmarking or compliance purposes.

Table 1: Switch of ILI class based on high / low confidence interval

Switch ILI class	No. of WSS	Example
Any	48 (54.5%)	B → A2 or B → C
to better ILI	33 (37.5%)	B → A2
to worse ILI	24 (27.3%)	B → C

A closer examination of Table 1 shows the directionality of the uncertainty effects and shows that 37.5% of the systems could fall into a better category at the lower 95% confidence limit, while 27.3% could move into a worse category at the upper limit. These proportions highlight that while there is optimism in some cases, the potential for underestimation of losses is significant and should not be overlooked. Consequently, median values and band classifications should be considered together with their confidence intervals, as together they define the robustness of the assessment of system performance. The results underline the importance of integrating uncertainty indicators into reporting to ensure that both operators and policy makers recognize the probabilistic nature of KPI-based assessments [10].

4 Analysis and Discussion

The analysis of Slovenian water supply systems confirms that national leakage remains a structural challenge, with the corrected Infrastructure Leakage Index (ILI) serving as a key benchmark. The national median and confidence intervals show that while a proportion of systems achieve excellent or good performance (A1–A2), a significant proportion remain in the problematic C and D ranges, indicating chronic inefficiency. These patterns anchor the broader story: despite targeted initiatives to reduce leakage, structural losses persist and are

often concentrated in larger, more complex networks. Analysis over time from 2014–2024 shows mixed progress: Billed authorized consumption has improved and unbilled consumption has decreased, but water losses have increased by 17%. The annual shifts in band shares highlight the stagnation in structural efficiency, with non-accidental omissions and inconsistencies in reporting complicating interpretation. The robustness of these conclusions is further strengthened by the quantification of uncertainty. It shows that more than half of the systems could change bandwidths within the confidence intervals, underlining the importance of probabilistic rather than deterministic performance assessments.

At the same time, the representativeness of the data set and the regulatory split between large ($\geq 5,000$ customers) and small systems ($< 5,000$ customers) shape the scope of the conclusions. While the larger systems - which account for nearly 80% of the population and the majority of national system input volume - are reliably assessed using the ILI, smaller systems remain dependent on NRW%, a less precise indicator that is prone to billing apportionment errors. This distinction is crucial for national compliance with EU Directive 2020/2184 and highlights the need for greater investment, monitoring and methodological adjustments to ensure fair comparability between scales.

Building on the results at the national level, spatial concentration patterns indicate persistent hotspots of water loss, where ILI values in areas C and D and rural NRW% values indicate regions that require coordinated action. These areas often overlap with zones that have high FLAG rates, highlighting data and operational vulnerabilities that need to be addressed simultaneously. A Pareto analysis of current annual real losses (CARL), weighted by system input volume, shows that a small group of systems in the top decile contribute disproportionately to national losses, suggesting that targeted improvements could deliver the greatest absolute savings. However, the analysis of the band stability with uncertainty factor shows that many systems are close to the thresholds, underlining the need for cautious interpretation. Finally, the categorization into operational typologies- such as urban high-pressure systems with high losses compared to rural networks with long networks - allows measures to be adapted to structural and contextual conditions rather than applying a one-size-fits-all solution.

In order to understand why water loss occur unevenly in different systems, the structural and operational causes must be investigated. Correlation analyses indicate that higher average pressure (P) is consistently associated with higher losses, while lower customer density (connections per kilometer) and longer length of supply lines also correlate with poorer performance, supporting the known hydraulic and plant-related mechanisms. The source mix appears to be less influential, but can modulate the results in groundwater-fed systems compared to spring-fed systems. Comparisons between the metrics show broad agreement between the ILI and operational indicators, although there are cases where the denominators differ or data quality issues are suspected. Importantly, ILI comparability becomes weaker in systems with atypical density or pressure profiles, emphasizing the need for contextual interpretation rather than universal ranking. Preliminary machine learning readiness checks show stable predictive signals across folds, with

pressure, density and link length repeatedly emerging as explanatory variables, confirming their suitability for factor analysis and hypothesis-driven exploration in future modeling work.

The Slovenian regulation on water supply and loss reduction obliges utilities to prepare water balance analyzes and to implement structured measures to reduce leakages. The results of this study show that national water losses are still high. 60 utilities exceed 40% NRW and nine major systems have ILI scores above 8, highlighting the urgent need for a coordinated national approach. To address these challenges, measures need to be systematized into a comprehensive program that prioritizes both data reliability and operational efficiency and enables utilities to translate analytical findings into actionable plans [15], [16].

Table 2: Measures of a national for water loss reduction program [16]

Responsibility	No.	Measure
Municipal / utility level	I	Measures for improving WSS data
	II	Measures for optimizing WSS
	III	Measures for dividing WSS into DMA zones
	IV	Measures for pressure control and management in the WSS
	V	Measures for active leakage control
	VI	Measures for addressing apparent losses
	VII	Measures for pipeline planning and replacement
	VIII	Measures for institutional strengthening
	IX	Measures for analysis and reporting
National level	X	Technical (external) assistance to water utilities for implementing measures
	XI	Costs of the national body for loss reduction

The first group of measures in Table 2 focuses on improving system data, including asset records, breakdown history, consumption patterns and operating parameters, which are consolidated on a GIS platform. This step is essential as nearly half of utilities still report gaps or inconsistencies in water balance components and coverage of apparent and actual losses in VT3 data rarely exceeds 50%. Building on the improved knowledge of the system, further measures include hydraulic optimization, including pressure management and segmentation of the system into DMA and PMA zones [17]. Such steps are crucial in Slovenia as the average system pressure is more than 40 m and the connection density varies greatly, increasing the risk of structural loss [10].

Other measures include the active control of leaks through specialized detection, the reduction of obvious losses through

the targeted replacement of meters and the prioritization of pipeline rehabilitation, especially in networks where over 35% of the infrastructure is already depreciated. Equally important is institutional strengthening to ensure that utilities have the organizational capacity and trained staff to implement the measures sustainably. Complementary steps such as regular analyzes, reports and external technical support will strengthen national efforts [16]. Finally, the establishment of a benchmarking system with indicators, supported by a central database, will enable systematic monitoring of progress and ensure accountability. This structured program reflects the evidence base of current losses in Slovenia and provides a way to achieve regulatory thresholds while improving operational resilience.

5 Conclusions

Slovenia's public water supply systems continue to struggle with significant leakage problems, with national water losses averaging well above sustainable EU benchmarks. The analysis confirmed that 60 utilities report NRW values of more than 40% and nine larger systems record ILI values of more than 8, placing them among the most problematic categories. Data availability and quality remain decisive factors in interpreting these results, as gaps in the VT3 and VT6 tables limit the accuracy of loss quantification. Nonetheless, the integration of harmonized ETL processes, rule-based imputation and uncertainty quantification enables the creation of a credible national overview. The combined use of ILI and NRW, represented by spatial mapping and stratified by system size, provides a robust framework for benchmarking. Importantly, the uncertainty analysis shows that 54.5% of systems can change class within confidence limits, highlighting the need for a probabilistic interpretation rather than a deterministic classification. These results show both the scale of the problem and the methodological tools that are now available to address it.

Strengthening the national data system is the first and most important measure in the Slovenian strategy to reduce water losses. Improved reporting, coupled with advanced monitoring and analysis, will enable more realistic assessments of ILI and NRW and thus provide the basis for effective planning. Technical measures such as pressure management, active leakage control and pipeline rehabilitation need to be pursued in parallel, supported by institutional capacity building and benchmarking systems. Together, these measures will not only ensure compliance with EU Directive 2020/2184, but also improve the efficiency, resilience and long-term sustainability of Slovenia's water supply.

References

- [1] Council of the European Union, *Directive 98/83/EC of the Council of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption*, vol. L 330. 1998, pp. 32–54.
- [2] European Court of Auditors, "Implementing the Drinking Water Directive: Water Quality and Access to it Improved in the EU; Commission needs to better support Member States," Luxembourg, Special Report No. 12/2017, May 2017.
- [3] European Union, *Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast)*. 2020. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>

- [4] Official Gazette of the Republic of Slovenia, *Zakon o oskrbi s pitno vodo ter odvajanju in čiščenju komunalne odpadne vode*. 2025, pp. 2117–2134. [Online]. Available: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO9092>
- [5] European Commission, "European Water Resilience Strategy (COM(2025) 280 final)," European Commission, Brussels. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/publications/european-water-resilience-strategy_en
- [6] Ministry of Environment and Spatial Planning, *Operational Program for Drinking Water Supply for the Period 2022–2027*. 2022, p. 102. [Online]. Available: https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Dokumenti/Voda/Pitna_voda/op_oskrba_pitna_voda_2022_2027.docx
- [7] B. Babić, M. Stanić, D. Prodanović, B. Džodanović, and A. Đukić, "Reducing Uncertainty of Infrastructure Leakage Index – A Case Study," *Procedia Engineering*, vol. 89, pp. 1577–1584, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.459.
- [8] SURS, "SiStat Database - Public Water Supply," Public Dataset, Statistical Office of the Republic of Slovenia. Accessed: May 15, 2018. [Online]. Available: <https://pxweb.stat.si/SiStat/en>
- [9] MNVP, "Information System of Public Environmental Protection Services = Informacijski sistem za spremljanje gospodarskih javnih služb varstva okolja (IJSVO)," Ministry of Natural Resources and Spatial Planning, Ljubljana, Slovenia, 2025. Accessed: July 15, 2025. [Online]. Available: <https://ipi.eprstor.gov.si/jgp/data>
- [10] A. Ociepa-Kubicka, I. Deska, and E. Ociepa, "Issues in Implementation of EU Regulations in Terms of Evaluation of Water Losses: Towards Energy Efficiency Optimization in Water Supply Systems," *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 633, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17030633.
- [11] Official Gazette of the Republic of Slovenia, *Ordinance on the Methodology for Determining Prices for Compulsory Municipal Environmental Services*, vol. 87/2012.
- [12] H. Alegre, "Performance Indicators for Water Supply Services - Second Edition," *wio*, vol. 12, May 2013, doi: 10.2166/9781780405292.
- [13] WAREG, "An Analysis of Water Efficiency KPIs in WAREG Member Countries," 2017. [Online]. Available: <https://www.wareg.org/documents/an-analysis-of-water-efficiency-kpis-in-wareg-member-countries/>
- [14] J. C. Helton and F. J. Davis, "Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 81, no. 1, pp. 23–69, July 2003, doi: 10.1016/S0951-8320(03)00058-9.
- [15] A. V. Serafeim, N. Th. Fourniotis, R. Deidda, G. Kokosalakis, and A. Langousis, "Leakages in Water Distribution Networks: Estimation Methods, Influential Factors, and Mitigation Strategies—A Comprehensive Review," *Water*, vol. 16, no. 11, p. 1534, May 2024, doi: 10.3390/w16111534.
- [16] World Bank, "National Water Loss Reduction Action Plan," Washington DC, US, TF073805, Nov. 2023.
- [17] D. Kozelj and D. A. Fernández, "Predicting Water Distribution Pipe Failures Using Machine Learning and Cross-Infrastructure Data," *Acta hydrotechnica*, pp. 53–64, June 2025, doi: 10.15292/acta.hydro.2025.05.

Intenziviranje reje krav molznic zmanjšuje dušikov odtis prireje mleka

Intensification of dairy farming reduces the nitrogen footprint of milk production

Jože Verbič
Oddelek za živinorejo
Kmetijski inštitut Slovenije
Ljubljana, Slovenija
joze.verbic@kis.si

Janez Jeretina
Oddelek za živinorejo
Kmetijski inštitut Slovenije
Ljubljana, Slovenija
janez.jeretina@kis.si

Povzetek

V Sloveniji rejne živali letno z blatom in sečem izločijo 33.625 t dušika, od tega 74,9 % govedo. Več kot 40 % izločenega dušika v govedoreji prispevajo krave molznice. Na podlagi podatkov o mlečnosti, vsebnosti beljakovin in sečnine v mleku in na podlagi deleža bregih živali smo ocenili, da se intenzivnost izločanja dušika pri prireji mleka zmanjšuje. O obdobju zadnjih dvajsetih let se je izločanje dušika z blatom in sečem zmanjšalo od približno 19 g na kg prirejenega mleka na približno 17 g na kg prirejenega mleka. Izkoristek beljakovin pri prireji mleka se je pri tem izboljšal od približno 22 % na 24,5 %. Ugodne trende pripisujemo povečanju intenzivnosti reje, ki se kaže v izboljšanju mlečnosti krav molznic. Ob upoštevanju nekaterih informacij o učinkih intenziviranja reje na intenzivnost izpustov toplogrednih plinov, na biotsko pestrost in na zdravje živali smo sklenili, da učinki intenziviranja prireje mleka niso enoznačni. Z vidika dušikovega odtisa mleka je učinek nedvomno pozitiven.

Ključne besede

krave molznice, intenzivnost prireje mleka, izločanje dušika, izkoristek beljakovin

Abstract

In Slovenia, livestock excrete 33,625 tonnes of nitrogen in the form of faeces and urine, every year. 74.9% of this is excreted by cattle. More than 40% of the excreted nitrogen in cattle farming is contributed by dairy cows. Based on data on milk yield, the protein and urea content of milk and the proportion of pregnant animals, we have estimated that the intensity of nitrogen excretion in milk production is decreasing. In the last twenty years, nitrogen excretion via faeces and urine has decreased from about 19 g per kg of milk produced to about 17 g per kg of milk produced. Protein utilisation in milk production has improved from about 22% to 24.5%. We attribute the favourable trends to

the increase in production intensity, which is reflected in the improvement in milk yield of dairy cows. Taking into account some information on the impact of livestock intensification on greenhouse gas emissions, biodiversity and animal health, we conclude that the impact of intensification of milk production is ambiguous. From the perspective of the nitrogen footprint of milk, it is definitely positive.

Keywords

dairy cows, milk production intensity, nitrogen excretion, protein utilization

1 Uvod

Dušik je splošno razširjen kemijski element. Sestavlja 78 % zemeljske atmosfere in je eden od ključnih elementov, ki sestavljajo žive organizme. Uvrščamo ga med osnovna rastlinska hranila, kot sestavina beljakovin pa je nujno potreben za živali in ljudi. V zraku se nahaja v molekularni obliki (N_2). Višje rastline, živali in ljudje molekularnega dušika ne morejo neposredno izkoristiti. Neposredno izkoristljiv je le reaktivni dušik, s katerim označujemo vse druge oblike dušika (razen N_2).

Pridelava hrane je velik porabnik reaktivnega dušika. Pretvorba molekularnega dušika v reaktivni dušik lahko teče po naravni poti – gre za biološko vezavo, ki je rezultat simbioze med nekaterimi bakterijami ali glivami z rastlinami. V zadnjem stoletju je postala pomembna tudi industrijska vezava dušika, ki je osnova industriji mineralnih gnojil. Po grobih ocenah je polovica svetovne pridelave hrane odvisna od dušika iz mineralnih gnojil [1].

Ob pozitivnih učinkih pa ima reaktivni dušik tudi negativne posledice za okolje, naravo in ljudi. Med pogosto omenjenimi posledicami so onesnaženje podzemnih voda z nitrati in evtrofikacija naravnega okolja. Izpusti didušikovega oksida povzročajo podnebne spremembe, izpusti amonijaka pa nastajanje prašnih delcev v atmosferi.

Z industrijsko vezavo dušika iz zraka se je količina reaktivnega dušika v okolju zelo povečala. Med leti 1900 in 2000 se je količina industrijsko vezanega dušika v EU povečala od 0,2 do 11,2 Tg, količina reaktivnega dušika, ki nastane pri zgorevanju

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

© 2025 Copyright held by the owner/author(s).

<https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.5>

pri visokih temperaturah (predvsem v motorjih z notranjim izgorevanjem) in v industriji pa od 0,6 na 3,4 Tg. Biološka vezava dušika se je v tem obdobju zmanjšala od 4,0 na 1,0 Tg [1]. Slednje kaže, da je postalo zaradi industrijske vezave dušika kmetijstvo manj odvisno od biološke vezave dušika. V daljšem časovnem obdobju (> 100 let) se je količina dušika, ki kroži v evropskem kmetijstvu znatno povečala. Zaradi prizadevanj na področju zmanjševanja vplivov kmetijstva na okolje in zaradi povečanih cen industrijsko vezanega dušika pa se količina vnosa dušika na kmetijska tla v zadnjih desetletjih zmanjšuje. V Sloveniji se je skupni vnos od leta 1992 zmanjšal za približno četrtno, s tem, da se pridelek beljakovin s kmetijskimi rastlinami ni zmanjšal. To pripisujemo izboljššanemu izkoristku dušika v kmetijski pridelavi, ki se je v zadnjih treh desetletjih povečal od 55 na 69 % [2].

Izboljšanje izkoristka dušika v kmetijstvu in s tem zmanjšanje potreb po reaktivnem dušiku ostaja še naprej med ključnimi izzivi slovenskega kmetijstva. Gre tako za okoljski izziv kot tudi za izziv na področju konkurenčnosti. Dušik iz mineralnih gnojil postaja vse dražji in s tem vse pomembnejša postavka pri obvladovanju stroškov na kmetiji. Povprečna cena se je v zadnjih 20 letih povečala skoraj za štirikrat (od 0,21 € na kg N v 2003 na 0,83 € na kg N v 2023) [3]. Nič manj pomembno kot v rastlinski pridelavi, je izboljšanje izkoristka dušika oz. beljakovin v živinoreji. Večino dušika, ki ga rejne živali zaužijejo z beljakovinami krme, izločijo z blatom in sečem. Za EU-27 je bilo ocenjeno, da krave molznice z blatom in sečem izločijo 77 % vsega zaužitega dušika, goveji pitanci 91 %, prašiči pitanci 67 %, kokoši nesnice 74 % in pitovni piščanci 60 % [4]. V Sloveniji so rejne živali v letu 2024 z blatom in sečem izločile 33.625 t dušika, od tega 74,9 % govedo, 8,9 % perutnina, 8,5 % prašiči, 4,0 % ovce, 2,5 % konji, 0,9 % koze in 0,2 % kunci [5]. V tem prispevku se osredotočamo na krave molznice, ki izločijo 41,1 % dušika v govedoreji (KIS, 2025). Gre za kategorijo rejnih živali, za katero razpolagamo s kakovostnimi podatki o prireji in sestavi mleka na ravni posameznih živali. Namen tega prispevka je prikazati, kako se je gibal intenzivnost izločanja dušika, t.j. količina izločenega dušika na kg prirejenega mleka, v obdobju 2004-2024 in prikazati, kako je intenzivnost izločanja dušika povezana z intenzivnostjo rejne.

2 Metode

Količino dušika, ki ga krave molznice izločijo z blatom in sečem ($N_{izl.}$, v kg na molznico na leto) smo ocenili na podlagi letnih mlečnosti (M_{365} , kg na kravo na leto) in sečnine (uree) v mleku (U_M , mg na 100 ml) po enačbi 1 [6].

$$N_{izl.} = 129,9 + 0,0089 \times (M_{365} - 7744) + 1,7 \times (U_M - 26) \quad (1)$$

Podatke za M_{365} smo izračunali kot kvocient med letno prirejo mleka v Sloveniji in številom molznic, kot jih poroča Statistični urad RS [7]. Podatke o U_M smo pridobili iz Centralne podatkovne zbirke GOVEDO [8], ki hrani mesečne podatke za približno 80 % vseh molznic v Sloveniji [9].

Količino zaužitega dušika (N_z , kg na molznico na leto) smo izračunali ob predpostavki, da žival ves zaužit dušik naloži v mleko (N_M , kg na leto) in plod (N_B , kg na leto) ali pa ga izloči z

blatom in sečem ($N_{izl.}$, v kg na leto) ter z odpadlo dlako in odmrliimi celicami kože (N_K , v kg na leto) (enačba 2).

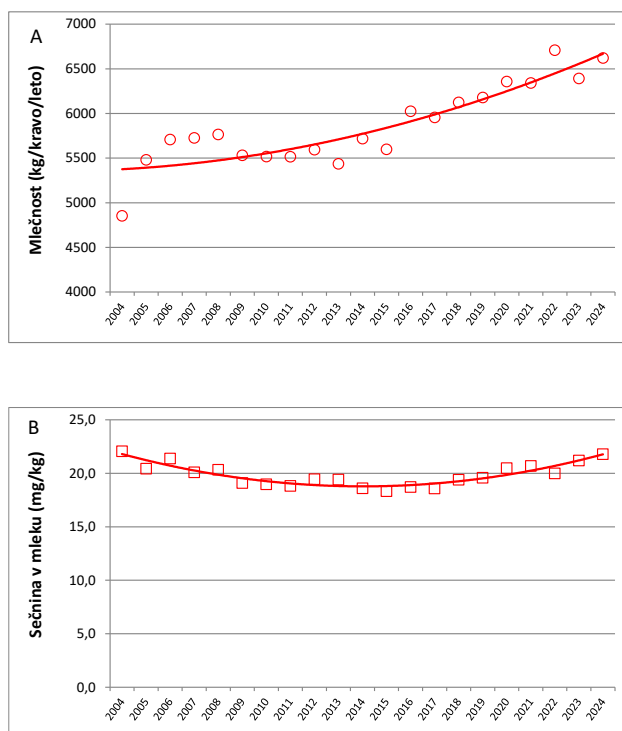
$$N_z = N_M + N_B + N_{izl.} + N_K \quad (2)$$

N_M smo izračunali na podlagi mlečnosti (M_{365}) in vsebnosti beljakovin v mleku, kot jih poroča Statistični urad RS [7], ob upoštevanju, da vsebuje 100 g mlečnih beljakovin 15,674 g N (standardna vrednost). $N_{izl.}$ smo izračunali po enačbi 1. Količino dušika, ki ga molznice naložijo v plod (N_B) smo ocenili po nemških smernicah [10] ob upoštevanju deležev bregih živali, kot so zabeleženi v Centralni podatkovni zbirki GOVEDO [8]. Dušik v odpadli dlaki in odmrlih celicah kože (N_K) smo ocenili po [10], pri čemer smo upoštevali povprečno telesno maso slovenskih krav 581 kg [11].

Intenzivnost izločanja dušika pri prireji mleka smo izračunali kot kvocient med letno količino z blatom in sečem izločenega dušika ($N_{izl.}$) in letno količino prirejenega mleka (M_{365}), izkoristek beljakovin pa kot kvocient med količino dušika v mleku in plodu na eni strani ($N_M + N_B$) in količino zaužitega dušika na drugi (N_z). Izkoristek dušika smo izrazili v %.

3 Rezultati in razprava

V zadnjih 20 letih se je letna mlečnost krav molznic v Sloveniji povečala za nekaj več kot 1000 kg (slika 1A). Povečanje je predvsem posledica boljše oskrbe živali, uspešnega selekcijskega dela in delne zamenjave kombiniranih pasem za prirejo mleka in mesa (rjave in lisaste) z mlečno črno-belo pasmo. S povečevanjem mlečnosti krav molznic se povečujejo tudi njihove potrebe po energiji in beljakovinah. Molznice se na povečane potrebe odzovejo s povečanim zauživanjem krme, rejci pa kravam molznicam z velikimi mlečnostmi praviloma ponudijo tudi obroke z večjimi vsebnostmi (koncentracijami) energije in beljakovin v krmnih obrokih. Vsebnost beljakovin v krmnih obrokih je mogoče oceniti na podlagi vsebnosti sečnine v mleku [12]. Slednja se je v obdobju po letu 2004 zmanjševala, v zadnjih letih pa se je začela spet povečevati in dosega podobne vrednosti kot pred 20 leti (slika 1B). Zmanjšanje vsebnosti sečnine po letu 2004 pripisujemo vzpostavitvi rednega (mesečnega) informiranja rejcev o vsebnosti sečnine v mleku posameznih krav. S tem se je zmanjšal delež krav, ki so dobile s krmnimi obroki preveč beljakovin [13]. Podrobnih analiz o vzrokih za povečevanje vsebnosti sečnine v mleku po letu 2017 nimamo. Verjetno so k temu prispevali rejci, ki so v preteklosti molznicam krmili premalo beljakovin in so v zadnjem obdobju rejo opustili ali pa spremenili način krmljenja. V povprečju so molznice v Sloveniji optimalno oskrbljene z beljakovinami. Na to kažejo povprečne vsebnosti sečnine v mleku (slika 1B), ki so bile v preteklih letih ravno v sredini optimalnega razpona (15-25 mg/kg, [14]). Optimalne povprečne vrednosti ne pomenijo, da na področju oskrbljenosti molznic z beljakovinami ni možnosti za izboljšanje, saj so v slovenski čredi tako molznice, ki presegajo priporočene vsebnosti sečnine v mleku kot molznice, pri katerih je vsebnost sečnine premajhna [13].

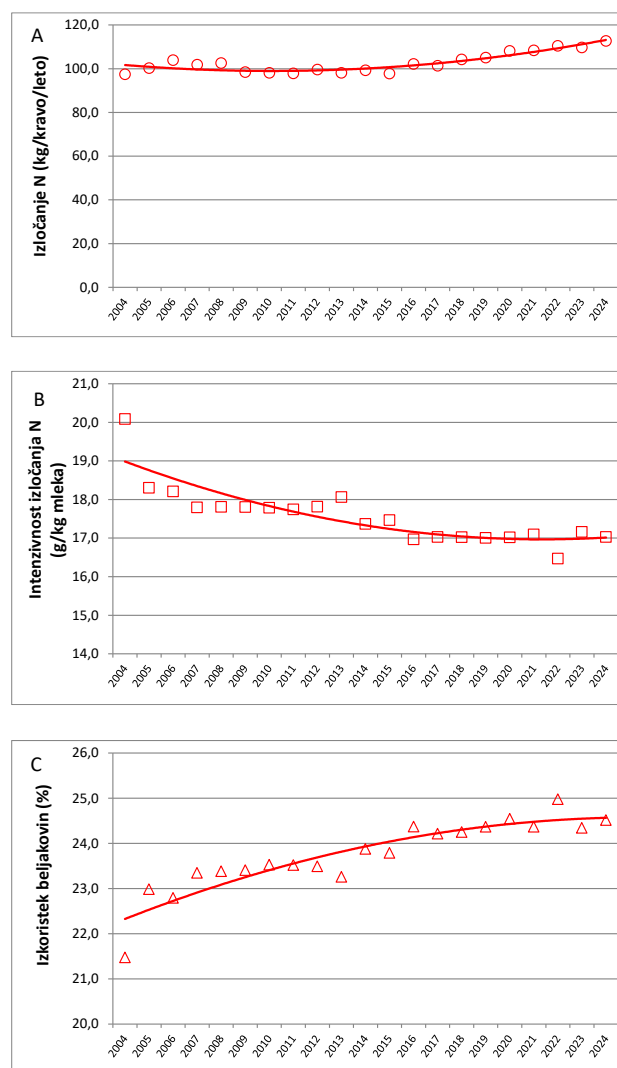


Slika 1: Mlečnost krav molznic (A) in vsebnost sečnine (B) v mleku slovenskih krav v obdobju 2004-2024.

Izločanje dušika z blatom in sečem se je pri kravah molznicah v zadnjih 2 desetletjih povečalo od približno 100 kg na molznico na leto na približno 110 kg na molznico na leto (slika 2A). Zaradi sočasnega povečevanja mlečnosti, se je intenzivnost izločanja dušika v tem obdobju zmanjšala od približno 19 g na kg prirejenega mleka na približno 17 g na kg prirejenega mleka (slika 2B). Izkoristek beljakovin pri prireji mleka se je pri tem izboljšal od približno 22 % na 24,5 % (slika 2C).

Ugotavljamo, da se je v Sloveniji z intenziviranjem prireje mleka dušikov odtis mleka v zadnjih dveh desetletjih zmanjšal za približno 10 %. Gre za tako imenovani proces trajnostnega intenziviranja dejavnosti, pri čemer z intenziviranjem (v tem primeru izboljšanjem mlečnosti molznic) izboljšamo snovni izkoristek in s tem zmanjšamo količino inputov na enoto proizvoda. Podobna zakonitost velja za izpuste toplogrednih plinov, pri katerih se je intenzivnost emisij med leto 1990 in 2022 zmanjšala od 1,214 na 0,757 kg ekv CO₂ na kg mleka [15]. Ob tem velja opozoriti, da lahko intenziviranje reje ob nekaterih pozitivnih okoljskih učinkih, kot sta ogljikov in dušikov odtis mleka, neugodno vpliva na biotsko pestrost ter zdravje in počutje živali. Molznice z veliko mlečnostjo potrebujejo krmo z boljšo energijsko vrednostjo kot molznice z majhno mlečnostjo. To pomeni, da je treba izboljšati kakovost voluminozne krme (paša, silaža, seno) in/ali povečati količino močne krme (žita, oljne tropine) v krmnih obrokih. Negativni učinki intenziviranja prireje mleka so bili identificirani tudi v Sloveniji. Podrobna analiza gospodarjenja na kmetijah širšega kraškega območja in Posočja je pokazala, da pridelamo na gnojenih travnikih približno dvakrat več neto energije za laktacijo in surovih beljakovin kot na ekstenzivnih travnikih, imamo pa približno

dvakrat manj rastlinskih vrst [16]. Popis načinov prireje mleka na več kot 5.000 kmetijah je pokazal, da so obolenja nog in parkljev na kmetijah z zelo velikimi količinami močne krme v obrokih za molznice za več kot dvakrat pogostejše kot na kmetijah z zelo majhnimi količinami [17]. Učinki intenziviranja prireje mleka torej niso enoznačni, z vidika dušikovega odtisa mleka pa so vsekakor pozitivni.



Slika 2: Izločanje dušika (A), intenzivnost izločanja dušika (B) in izkoristek beljakovin (C) pri prireji mleka v Sloveniji v obdobju 2004-2024.

Doseganje ravnovesja med intenziviranjem in ekstenziviranjem je že dolgo časa eno od osnovnih vprašanj kmetijstva. Nedavno izdani Agronomski terminološki slovar [18] definira intenzivno pridelavo kot pridelavo, za katero je značilna velika količina vlaganj, zaradi česar so pričakovani končni rezultati večji (npr. večji hektarski pridelek). Nasproti temu stoji ekstenzivna pridelava, za katero sta značilni majhna količina vlaganj in manjši pričakovani končni rezultati. Odnos javnosti do ekstenziviranja kmetijske pridelave in prireje je na splošno pozitiven, do intenziviranja pa negativen ali zadržan. Ob tem se moramo zavedati, da pri vlaganjih v kmetijsko dejavnost ne gre

le za vložke materiala (npr. gnojil, sredstev za varstvo rastlin, energije) in dela. Gre tudi za kmetijska zemljišča. Ekstenziviranje kmetijske pridelave lahko razumemo tudi kot širjenje na zemljišča, ki so bila do sedaj neobdelana [19]. V tem pogledu ima lahko ekstenzivno kmetijstvo negativne okoljske učinke, kot je npr. izguba biodiverzitete zaradi širjenja kmetovanja v naravno okolje. Večino krčenja gozdov (približno 70 %) lahko pripišemo prav ekstenziviranju kmetijstva [19].

Rezultati te študije dokazujejo, da ima lahko intenziviranje reje tudi pozitivne okoljske učinke. Na primeru prireje mleka v Sloveniji je prikazano, da se z intenziviranjem reje (t.j. s povečanjem mlečnosti) intenzivnost izločanja dušika z blatom in sečem zmanjšuje. Opažanje ima teoretične osnove. Izločanje dušika pri rejnih živalih je povezano s prebavo in presnovo beljakovin. Krave molznice porabijo znatno količino beljakovin za vzdrževanje mišične mase in osnovnih telesnih funkcij [20] in v primeru zelo ekstenzivne reje (ko se mlečnosti približujejo 0) se intenzivnost izločanja dušika (količina izločenega dušika na enoto prirejenega mleka) povečuje proti neskončnosti. Pri usmerjanju bodočega razvoja panoge bi bilo treba izkoristiti pozitivne učinke intenziviranja reje (predvsem gre za področja gospodarnost reje, izkoriščanje energije in beljakovin, izpusti toplogrednih plinov, ohranjanje biodiverzitete na globalni ravni), hkrati pa obvladovati negativne, kot so poraba žit za krmljenje živali, slabše počutje živali in negativni učinki na biodiverzitetu na lokalni ravni.

4 Zahvala

Prispevek je bil pripravljen v sklopu programa »Okoljsko, ekonomsko in družbeno odgovorna živinoreja«, ki ga sofinancirata Evropski Kmetijski sklad za razvoj podeželja in proračun Republike Slovenije in v sklopu raziskovalnega programa »Trajnostno kmetijstvo« (P4-0133), ki ga sofinancira Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARIS) iz državnega proračuna.

5 Literatura

- [1] Mark A. Sutton, Clare M. Howard, Jan Williem Erisman, Gilles Billen, Albert Bleeker, Peringe Grennfelt, Hans van Grinsven in Bruna Grizzetti (uredniki), 2011. The European Nitrogen Assessment: sources, effects and policy perspectives. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- [2] Janez Sušin in Jože Verbič, 2025. Bilančni presežek dušika v kmetijstvu. Kazalci okolja v Sloveniji. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana. <https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/bilancni-presezek-dusika-v-kmetijstvu-3>
- [3] KIS, 2024. Modelne kalkulacije KIS. Zbirka maloprodajnih cen mineralnih gnojil, Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije, 10. dec. 2024 (interni podatki).
- [4] Yong Hou, Zhaohai Bai, Jan Peter Lesschen, Igor G. Staritsky, Natasa Sikirica, Lin Ma, Gerard L. Velthof in Oene Oenema, 2016. Feed use and nitrogen excretion of livestock in EU-27 Agric. Ecosyst. Environ., 218, (Feb. 2016), 232-244. DOI: [10.1016/j.agee.2015.11.025](https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.025)
- [5] KIS, 2025. Emisije metana, didušikovega oksida, ogljikovega dioksida, amonijaka, NMVOC, NOX, PM10 in PM2,5 v kmetijstvu. Emisijske evidence, Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije. 25. avg. 2025 (interni podatki).
- [6] Leon B. Šebek, Paul Bikker, Ad M. van Vuuren in Marinus van Krimpen, 2014. Nitrogen and phosphorous excretion factors of livestock. Task 2: In-depth analyses of selected country reports. In Nitrogen and phosphorous excretion factors of livestock. Task 2: in-depth analyses of selected country reports. UR Livestock Research Wageningen.
- [7] SURS, 2025. Podatkovna baza SiStat. Kmetijstvo, gozdarstvo in ribištvo. Statistični urad RS. <https://pxweb.stat.si/SiStat/sl/Podrocja/Index/85/kmetijstvo-gozdarstvo-in-ribistvo> (24.jul. 2025).
- [8] Centralna podatkovna zbirka GOVEDO, 2025. Kmetijski inštitut Slovenije, 18. jul. 2025 (interni podatki).
- [9] Marija Sadar, Janez Jeretina, Betka Logar, Žan Pečnik, Tomaž Perpar, Peter Podgoršek in Urban Vodopivec, 2025. Rezultati kontrole prireje mleka in mesa: Slovenija 2024. Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije, https://www.govedo.si/wp-content/uploads/2025/07/POROCILO-2024_Kontrola_in_naslovnica.pdf
- [10] GfE, 2023. Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 12. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Milchkühen. DLG-Verlag, Frankfurt (Main).
- [11] Jana Obšteter, Jože Verbič, Tomaž Perpar, Andreja Žabjek in Drago Babnik, 2016. Ocena učinkovitosti izrabe energije pri kravah molznicah rjave, črno-bele in lisaste pasme. Tatjana Čeh, Stanko Kapun urednika, Zbornik predavanj 25. mednarodno znanstveno posvetovanje o prehrani domačih živali Zadravčevi-Erjavčevi dnevi, Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod Murska Sobota, Murska Sobota, 109-117.
- [12] Juha Nousiainen, Kevin John Shingfield in Pekka Huhtanen, 2004. Evaluation of Milk Urea Nitrogen as a Diagnostic of Protein Feeding, J. Dairy Sci., 87, 2, 386-398. DOI: [10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73178-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73178-1).
- [13] Jože Verbič, Janez Jenko, Jože Glad, Drago Babnik in Tomaž Perpar, 2009. Vsebnost sečnine v mleku krav v Sloveniji. Tatjana Čeh, Stanko Kapun, Jože Verbič, Branko Kramberger, Herbert Steingass in Andreas Steinwider uredniki, Zbornik predavanj - 18. mednarodno znanstveno posvetovanje o prehrani domačih živali Zadravčevi-Erjavčevi dnevi, Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod Murska Sobota, 91-102.
- [14] Julia Glatz-Hoppe, Bernd Losand, Detlef Kampf, Folkert Onken in Hubert Spiekers, 2020. Nutzung von Milchkontrolldaten zur Fütterungs- und Gesundheitskontrolle bei Milchkühen. DLG-Merkblatt 451, Frankfurt am Main, DLG e. V.
- [15] Jože Verbič in Žan Pečnik, 2023. Intenzivnost izpustov TGP pri prireji mleka in govejega mesa. Kazalci okolja v Sloveniji. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana. <https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/intenzivnost-izpustov-tgp-pri-prireji-mleka-govejega-mesa>
- [16] Tomaž Žnidaršič, Jože Verbič, Igor Dakskobler, Branko Vreš in Urban Šile, 2019. Vpliv načina gospodarjenja na vrstno bogatih travnikih na pridelke, krmno vrednost, količino hranil v tleh in botanično pestrost. Tatjana Čeh, Stanko Kapun urednika, Zbornik predavanj 28. mednarodno znanstveno posvetovanje o prehrani domačih živali Zadravčevi-Erjavčevi dnevi, Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod Murska Sobota, Murska Sobota, 249-255.
- [17] Jože Verbič, Drago Babnik, Janez Jeretina in Tomaž Perpar, 2006. Navade rejcev pri krmljenju krav v Sloveniji in njihov vpliv na mlečnost, sestavo mleka in zdravstveno stanje. Tatjana Čeh, Stanko Kapun urednika, Zbornik predavanj 15. mednarodno znanstveno posvetovanje o prehrani domačih živali Zadravčevi-Erjavčevi dnevi, Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod Murska Sobota, 119-135.
- [18] Rajko Bernik, Franci Aco Celar, Rozalija Cvejić, Jure, Čop, Zalika Črepinšek, Tanja Fajfar, Marko Flajšman, Matjaž Glavan, Helena Grčman, Metka Hudina, Mateja Jemec Tomazin, Nina Kacjan-Maršič, Lučka Kajfež-Bogataj, Darja Kocjan Ačko, Miran Lakota, Rok Mihelič, Gregor Osterc, Anton Perpar, Marina Pintar, Tjaša Pogačar, Tomaž Prus, Denis Rusjan, Andrej Simončič, Denis Stajnik, Andreja Sušnik, Stanislav Trdan, Valentina Usenik, Janko Verbič, Matej Vidrih, Vesna Zupanc in Ana Žust, 2025. Agronomski terminološki slovar. Tanja Fajfar, Mateja Jemec Tomazin in Valentina Usenik uredniki, 1. izd. Založba ZRC, Ljubljana, DOI: [10.3986/9789610509486](https://doi.org/10.3986/9789610509486).
- [19] Robert Goodland in David Pimentel, 2000. Environmental sustainability and integrity in the Agricultural sector. V: Ecological integrity. Integrating environment, conservation and health. David Pimentel, Laura Westra in Reed F. Noss uredniki, Island Press, Covelo, California.
- [20] Jože Verbič in Drago Babnik, 1998. Vrednotenje oskrbljenosti prežvekovalcev z beljakovinami. Navodila-normativi-preglednice. Prikazi in informacije 195, Kmetijski inštitut Slovenije, Ljubljana

Conformity of LCA Data to Benford's Law: A Country-Level Perspective

Ujemanje podatkov LCA z Benfordovim zakonom: pogled na ravni držav

Bogdan Šinik
bogdan.sinik@famnit.upr.si
UP FAMNIT
Koper, Slovenia

Aleksandar Tošić
aleksandar.tosic@upr.si
UP FAMNIT, InnoRenew CoE
Koper, Slovenia

Abstract

Life cycle assessment (LCA) data is essential for evaluating the environmental impacts of products, services, and processes throughout their life cycle. Its accuracy depends largely on the underlying life cycle inventory. Currently, few tools exist to verify the integrity of such data. In earlier work, we introduced a novel approach to this issue by applying Benford's law as a preliminary data quality indicator. Benford's law describes the distribution of leading digits in naturally occurring numerical datasets. We first demonstrated that overall LCA datasets conform to Benford's law and that substantial differences exist among continents when analyzed in more detail.

In this study, we examined conformity at the country level to assess whether certain countries could represent their continents. All countries showed conformity when data were aggregated. However, performance varied: for example, Brazil aligned with the positive trend of its continent, while Switzerland performed notably worse. Similar patterns were observed when data were aggregated by compartments (air, water, soil, natural resources) and by selected elementary flow groups. Brazil again showed the strongest conformity, followed by the EU.

Our results confirm that country-level LCA data generally conform to Benford's law and that some countries can serve as continental representatives. At the same time, caution is needed when using data from countries with weaker conformity, as these datasets may require additional verification.

Keywords

Anomaly Detection, Benford's law, Data Integrity, Life-cycle assessment

1 Introduction

Life-Cycle Assessment (LCA) has established itself as a principal methodology for quantifying the environmental impacts of products and processes throughout their entire life cycle [12]. Given its extensive application across industrial sectors and in policy formulation, the verification of data integrity represents a critical requirement [5, 13]. The process of data acquisition is particularly decisive, as it directly conditions the accuracy of LCA outcomes and thereby determines the robustness and credibility of subsequent analyses [4]. Data collection is the crucial step in assuring accuracy of LCA results and it influences all subsequent

steps of the analyses [4]. As there is no universal tool that is used for this, we aimed to employ Benford's law, widely known statistical tool for testing integrity of the underlying data and fraud detection [11]. Benford's law, also known as first-digit law, describes distribution of the first digits of numbers in naturally generated datasets. It is widely used in many fields, from finances and banking to fields such as astronomy [1], election result analysis [10], and scientific publishing networks [20]. As the general conformity of LCA data to Benford's law has been demonstrated [17], and prior research has also identified differences in conformity across continents and environmental compartments [18], we extend this analysis by testing several countries to assess whether conformity can also be expected at the national level. Furthermore, we investigate whether individual countries can serve as suitable representatives of their respective continents.

2 Literature review

In our previous research, we examined differences in LCA data across continents with respect to heavy metals, greenhouse gases, toxic substances and carbon-based parameters. The results revealed significant intercontinental variation, particularly between Europe and Africa [18]. Not only did we demonstrate differences across continents, but we also validated these findings by establishing a correlation between Benford's conformity levels and environmental performance scores for the respective continents. Building on these results, we aimed to investigate whether similar patterns could also be observed at the country level.

Beyond our own application of Benford's law to environmental datasets, numerous studies have employed the same approach in related contexts. In the environmental field, Benford's law has been used to test ecotoxicological data for anomalies [9], verify the conformity of large biodiversity datasets [19], and assess the validity of reported emission reduction claims [6]. These applications demonstrate the versatility of Benford's law as a diagnostic tool for evaluating the integrity of environmental data.

In parallel, several studies have analyzed differences in LCA results among countries. For instance, one study compared LCA outcomes for dwellings in Spain, a developed country, and Colombia, a country under development. The results showed substantial differences driven by electricity mix, climate, and consumption habits: Spain's fossil fuel-intensive energy system and higher household demand produced larger impacts, whereas Colombia's reliance on hydropower and distinct usage patterns lowered overall burdens [15]. This evidence underscores the importance of examining LCA data at the national level, rather than relying solely on continental or global averages.

Finally, research has also pointed to the issue of uneven data quality across countries. A study from 2019 highlighted that LCA data coverage and completeness are generally more reliable for

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2025, Ljubljana, Slovenia

© 2025 Copyright held by the owner/author(s).

<https://doi.org/https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.6>

Europe and major economies, whereas many developing countries suffer from significant uncertainties, often requiring extrapolations or proxies [7]. Such discrepancies emphasize the need for careful validation when comparing national-level LCA data, and they provide further justification for assessing the integrity of country-level datasets.

3 Methodology

The first-digit law describes the characteristic frequency distribution of leading digits in numerical datasets. It is also referred to as Newcomb–Benford’s law or simply Benford’s law. According to Benford’s law [16], the leading digits of many naturally occurring datasets follow a fixed probability distribution, provided that the data meet several conditions:

- Values are generated through mathematical combinations of numbers from multiple distributions.
- The dataset spans a wide numerical range (e.g., including values in the hundreds, thousands, tens of thousands, etc.).
- The dataset is sufficiently large, with at least 50–100 observations as a general guideline [14].
- The data are right-skewed, with the mean exceeding the median and a long right tail rather than a symmetric distribution.
- The dataset lacks a strict upper or lower bound, aside from a minimum of zero.

The equation for the distribution of the first digits of observed data is given in Equation 1.

$$P(d) = \log_{10}(d + 1) - \log_{10}(d) = \log_{10}\left(1 + \frac{1}{d}\right) \quad (1)$$

One important aspect that needs to be decided when using Benford’s law is minimal sample size. Although Benford’s Law can be applied to relatively small samples ($50 \leq N \leq 100$) [14], recent studies recommend employing Monte Carlo simulations for more robust evaluation of sample size adequacy [8, 2]. One study suggests that conformity tests are most reliable when $N \geq 200$ [2], while for $N < 1000$, researchers should allow for larger deviations before inferring non-conformity, consistent with Nigrini’s recommendations [8].

In our previous continent-level study [18], we applied Monte Carlo sampling of the ecoinvent database to determine an appropriate sample size. We showed that conformity rates rise with sample size up to about $N = 500$, after which the results stabilize with more than 95% of samples conforming. Based on this, we established $N = 500$ as the threshold for analysis, consistent with recent recommendations [8], and we adopt the same threshold in the present country-level research.

The dataset employed in this study was ecoinvent version 3.10 (cut-off cumulative LCI), which is available under a paid license. We conducted the analysis in R using the `benford.analysis` package [3]. Zero values were automatically excluded, and we adapted the Benford function to handle negative numbers. From the 2654 columns in the ecoinvent dataset, 2648 numeric columns were used, representing 1190 distinct chemical substances. These were classified into five categories based on place of disposal: Air, Water, Soil, Natural Resources, and Inventory Indicator.

For this study, we focused on four groups of elementary flows from ecoinvent: carbon-based flows, heavy metals, toxic substances, and greenhouse gases. These groups were analyzed only for countries with sufficient observations (≥ 500), which included

China, India, Switzerland, the USA, Canada, and Brazil. In addition, all EU member states were combined and reported under a single ‘EU’ category.

4 Results

The results for overall conformity across the countries align closely with those for the continents [18]. All examined countries demonstrated close conformity when their data were aggregated. All MAD values were less than 0.001, and all p-values were either 0 or extremely close to it (see Table 1).

Upon individually evaluating each elementary flow, the discrepancies are clearly visible. Brazil is clearly the superior performer, with less than 30% of elementary flows classified as non-conforming and over 40% exhibiting acceptable conformity. It is the only country that have multiple close conforming columns. It is succeeded by the EU, however it already exhibits a majority of non-conforming columns. India and China have less than 2% of conforming columns in total (Table 2). It is noteworthy that Switzerland exhibits poor results despite ecoinvent being based in the country.

After evaluating the selected categories of elementary flows, a consistent pattern emerged in the performance of individual countries. Notably, Brazil was the only nation to exhibit ‘close conformity’ for any elementary flows within these specific subgroups. Throughout the analysis, Brazil consistently demonstrated the highest level of conformity, whereas China and India consistently ranked the lowest, with their elementary flows being almost entirely non-conforming (see Table 3).

In the analysis of carbon-based flows, Brazil is the most prominent performer, with approximately 22% of its elementary flows classified as non-conforming. The performance of Canada matched that of the EU, showing one fewer non-conforming column. In contrast, China, India, and Switzerland did not have conforming columns at all. Notably, four elementary flows were non-conforming across all tested countries: fossil carbon-dioxide in the lower stratosphere and upper troposphere ($X=1$), non-fossil carbon dioxide in the air ($X=9$), carbon dioxide in the soil ($X=12$), and fossil carbon monoxide in the lower stratosphere and upper troposphere ($X=17$) (Figure 1).

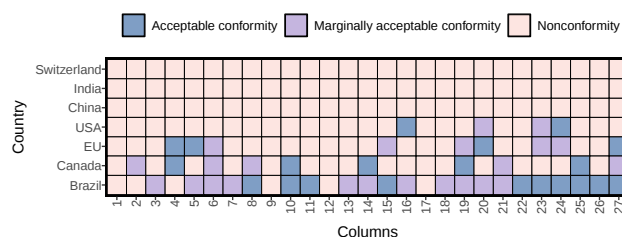


Figure 1: Conformity to Benford’s law for carbon-based elementary flows across selected countries in the ecoinvent database.

A similar situation is present in the results for toxic substances. Brazil retains the top position, closely followed by the EU in this instance. At the bottom of the list, China and India again show 100% non-conforming flows, whereas Switzerland now exhibits more than 17% conforming columns. Only one flow, Lead-210 in urban air close to the ground ($X=14$), did not conform for any country. It is also interesting to note that Lead II in surface water ($X=13$) only marginally conforms for Switzerland (Figure 2).

Table 1: Statistical tests on Benford's conformity for all observations in the selected LCI database by country.

Country	ChiSq	ChiSq(P)	MantissaArc	MantissaArc(P)	MADConformity	MAD	Observations
Switzerland	266.6629	0.0000	0.0000	0.0000	Close conformity	0.0006	4,828,955
European Union	71.5715	0.0000	0.0000	0.0000	Close conformity	0.0004	4,700,559
Brazil	7.6982	0.4635	0.0000	0.1694	Close conformity	0.0002	1,658,861
China	69.9057	0.0000	0.0000	0.5208	Close conformity	0.0005	1,936,686
Canada	23.3071	0.0030	0.0000	0.2541	Close conformity	0.0003	1,719,686
India	88.8233	0.0000	0.0000	0.0371	Close conformity	0.0006	1,200,466
USA	33.5820	0.0000	0.0000	0.1689	Close conformity	0.0004	1,240,267

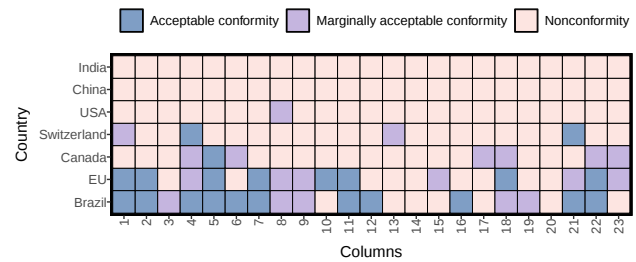
Table 2: MAD Conformity counts and percentages by country, sorted in increasing order by number of nonconforming values, where CC = Close conformity, AC = Acceptable conformity, MAC = Marginally acceptable conformity, and NC = Non-conformity

Country	CC (%)	AC (%)	MAC (%)	NC (%)	Dataset
Brazil	41 (1.87%)	900 (41.1%)	620 (28.31%)	629 (28.72%)	ecoinvent
EU	9 (0.41%)	400 (18.26%)	464 (21.19%)	1317 (60.14%)	ecoinvent
Canada	1 (0.05%)	125 (5.71%)	287 (13.11%)	1777 (81.14%)	ecoinvent
USA	1 (0.05%)	114 (5.21%)	262 (11.96%)	1813 (82.79%)	ecoinvent
Switzerland	0 (0.0%)	38 (1.74%)	117 (5.34%)	2035 (92.92%)	ecoinvent
China	0 (0.0%)	7 (0.32%)	27 (1.23%)	2156 (98.45%)	ecoinvent
India	0 (0.0%)	5 (0.23%)	25 (1.14%)	2159 (98.63%)	ecoinvent

Table 3: MAD Conformity counts per country, where CC = Close conformity, AC = Acceptable conformity, MAC = Marginally acceptable conformity, and NC = Non-conformity

Country	CC (%)	AC (%)	MAC (%)	NC (%)	Data
Brazil	0 (0.0%)	18 (37.5%)	13 (27.08%)	17 (35.42%)	Green house gases
European Union	0 (0.0%)	8 (16.67%)	8 (16.67%)	32 (66.67%)	Green house gases
Canada	0 (0.0%)	3 (6.25%)	5 (10.42%)	40 (83.33%)	Green house gases
Switzerland	0 (0.0%)	0 (0.0%)	2 (4.17%)	46 (95.83%)	Green house gases
USA	0 (0.0%)	1 (2.08%)	1 (2.08%)	46 (95.83%)	Green house gases
India	0 (0.0%)	1 (2.08%)	0 (0.0%)	47 (97.92%)	Green house gases
China	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	48 (100.0%)	Green house gases
Brazil	4 (0.02%)	56 (34.15%)	47 (28.65%)	57 (34.75%)	Heavy metals
European Union	0 (0.0%)	34 (20.73%)	39 (23.78%)	91 (55.49%)	Heavy metals
Canada	0 (0.0%)	7 (4.27%)	23 (14.02%)	134 (81.71%)	Heavy metals
Switzerland	0 (0.0%)	6 (3.66%)	19 (11.59%)	139 (84.76%)	Heavy metals
USA	0 (0.0%)	3 (1.83%)	10 (6.1%)	151 (92.07%)	Heavy metals
India	0 (0.0%)	0 (0.0%)	3 (1.84%)	160 (98.16%)	Heavy metals
China	0 (0.0%)	2 (1.22%)	1 (0.61%)	161 (98.17%)	Heavy metals
Brazil	0 (0.0%)	10 (37.04%)	11 (40.74%)	6 (22.22%)	Carbon
Canada	0 (0.0%)	5 (18.52%)	5 (18.52%)	17 (62.96%)	Carbon
European Union	0 (0.0%)	4 (14.81%)	5 (18.52%)	18 (66.67%)	Carbon
USA	0 (0.0%)	2 (7.41%)	2 (7.41%)	23 (85.19%)	Carbon
China	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	27 (100.0%)	Carbon
India	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	27 (100.0%)	Carbon
Switzerland	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	27 (100.0%)	Carbon
Brazil	0 (0.0%)	11 (47.83%)	5 (21.74%)	7 (30.43%)	Toxic substances
European Union	0 (0.0%)	8 (34.78%)	6 (26.09%)	9 (39.13%)	Toxic substances
Canada	0 (0.0%)	1 (4.35%)	6 (26.09%)	16 (69.57%)	Toxic substances
Switzerland	0 (0.0%)	2 (8.7%)	2 (8.7%)	19 (82.61%)	Toxic substances
USA	0 (0.0%)	0 (0.0%)	1 (4.35%)	22 (95.65%)	Toxic substances
China	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	23 (100.0%)	Toxic substances
India	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	23 (100.0%)	Toxic substances

With respect to the elementary flows of greenhouse gases, a consistent trend was observed. China and India demonstrated the lowest conformity. However, India presented one conforming elementary flow, specifically trifluoromethane in urban air close to the ground (X=48). This particular flow exhibited acceptable conformity for both India and Brazil, which were the sole countries to conform for this elementary flow. Conversely, trifluoromethane in non-urban air or from high stacks (X=47) conformed exclusively in the European Union, although marginally. Furthermore, ten elementary flows were identified as non-conforming across all analyzed countries. (see Figure 3). Regarding heavy metal

**Figure 2: Conformity to Benford's law for toxic substances-based elementary flows across selected countries in the ecoinvent database.**

elementary flows, the observed trend remained consistent. Brazil continued to exhibit the lowest proportion of non-conforming columns, approximately 35%. Notably, Brazil demonstrated close conformity for four elementary flows: Chromium III in surface water (X=38), long-term Mercury II in ground water (X=130), Nickel II in soil (X=143), and Zinc II in surface water (X=160). For the first time, China exhibited conforming elementary flows. Specifically, conformity was observed for long-term Iron ion in air in low population density (X=71), Lead II in ground water (X=94), and Manganese II in water (X=117). China was the sole country to conform for Lead II in the ground water. India also demonstrated conformity for three elementary flows. Similar to China, India conformed for long-term Iron ion in air in low population density, though only marginally. The other two conforming flows were Mercury II in lower stratosphere and upper troposphere (X=122) and Nickel II in lower stratosphere and upper troposphere (X=136). It is important to note that for Nickel II in agricultural soil (X=140), insufficient data prevented calculation due to high incidence of missing values. Furthermore, a total of 27 elementary flows were non-conforming across all analyzed countries. (Figure 4).

5 Conclusion and Discussion

When testing the conformity of countries with sufficient data ($N \geq 500$ observations), the results clearly revealed which nations were driving continental patterns. China and India consistently exhibited non-conformity across nearly all elementary flows, aligning with the broader Asian trend. The European Union demonstrated moderate performance, while Switzerland frequently ranked among the poorest performers alongside China and India. Notably, none of these selected countries achieved conformity levels comparable to the overall European results, suggesting that Europe's superior performance may be attributed

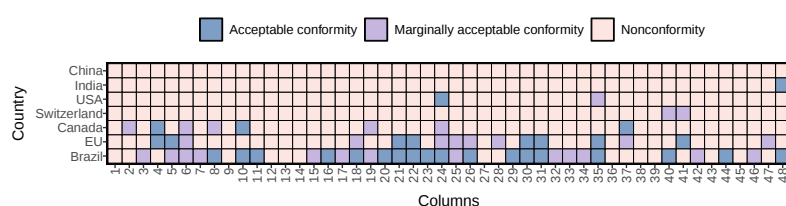


Figure 3: Conformity to Benford's law for greenhouse gases-based elementary flows across selected countries in the ecoinvent database.

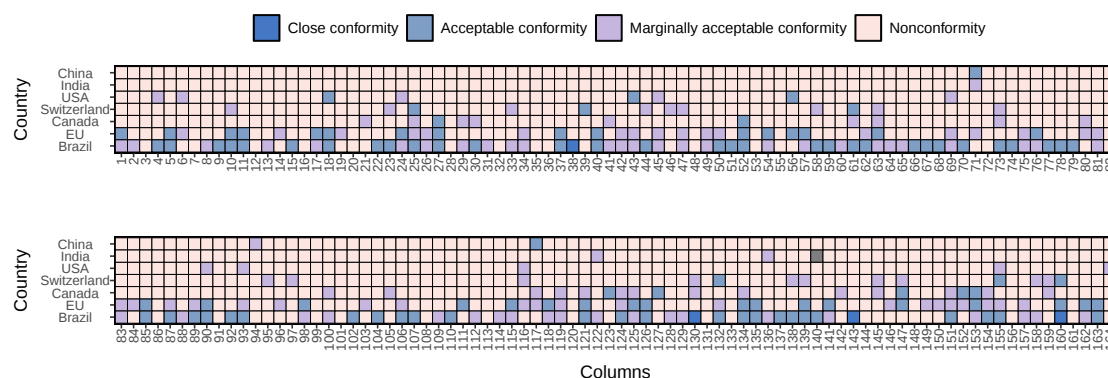


Figure 4: Conformity to Benford's law for heavy metal-based elementary flows across selected countries in the ecoinvent database.

to non-EU European countries not individually analyzed in this study.

Particularly interesting was Switzerland's poor performance despite ecoinvent being a Swiss-based database. This unexpected finding challenges assumptions about the relationship between database origin and data quality for specific geographical regions. Conversely, Brazil emerged as the clear standout performer, contributing substantially to South America's strong overall conformity results. Canada and the United States demonstrated similar performance levels, maintaining consistent middle-tier positioning relative to other countries, which aligned well with North America's intermediate continental ranking.

These country-specific results provide valuable insights into the regional variations observed at the continental level and highlight the importance of examining data quality at multiple geographical scales when assessing LCA database integrity.

References

- [1] Theodoros Alexopoulos and Stefanos Leontsinis. 2014. Benford's law in astronomy. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 35, 639–648.
- [2] Andrea Cerasa. 2022. Testing for benford's law in very small samples: simulation study and a new test proposal. *PLoS One*, 17, 7, e0271969.
- [3] Carlos Cinelli and Maintainer Carlos Cinelli. 2022. Package 'benford.analysis'. *Benford analysis for data validation and forensic analytics. Version 0.1*, 5.
- [4] Andreas Cirotha, Claudia Di Noia, Salwa Syed Burhana, and Michael Srockaa. 2019. Lca database creation: current challenges and the way forward. *Indonesian J. Life Cycle Assess. Sustain*, 3, 41–51.
- [5] Steven A Cohen. 2013. Life cycle assessment and the us policy-making context. *Emerging technologies: socio-behavioral life cycle approaches*, 217–44.
- [6] Matthew A Cole, David J Maddison, and Liyun Zhang. 2020. Testing the emission reduction claims of cdm projects using the benford's law. *Climatic Change*, 160, 407–426.
- [7] Eleonora Crenna, Michela Secchi, Lorenzo Benini, and Serenella Sala. 2019. Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for lca. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 10, 1851–1877.
- [8] Archibald de Araújo Silva and Maria Aparecida Gouvêa. 2023. Study on the effect of sample size on type i error, in the first, second and first-two digits excessmad tests. *International Journal of Accounting Information Systems*, 48, 100599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.accinf.2022.100599>.
- [9] Pepijn de Vries and Albertinka J. Murk. 2013. Compliance of lc50 and noec data with benford's law: an indication of reliability? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 98, 171–178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jecoen.2013.09.002>.
- [10] Joseph Deckert, Mikhail Myagkov, and Peter C Ordeshook. 2011. Benford's law and the detection of election fraud. *Political Analysis*, 19, 3, 245–268.
- [11] R. M. Fewster. 2009. A simple explanation of benford's law. *The American Statistician*, 63, 1, 26–32. eprint: <https://doi.org/10.1198/tast.2009.0005>. doi: 10.1198/tast.2009.0005.
- [12] Jeroen B Guinée, Reinout Heijungs, Gjal Huppes, Alessandra Zamagni, Paolo Masoni, Roberto Buonamici, Tomas Ekvall, and Tomas Rydberg. 2011. Life cycle assessment: past, present, and future. (2011).
- [13] Miao Guo and RJ Murphy. 2012. Lca data quality: sensitivity and uncertainty analysis. *Science of the total environment*, 435, 230–243.
- [14] David A Kenny. 2015. Measuring model fit. (2015). <http://davidakenny.net/cm/fit.htm>.
- [15] Oscar Ortiz-Rodríguez, Francesc Castells, and Guido Sonnemann. 2010. Life cycle assessment of two dwellings: one in spain, a developed country, and one in colombia, a country under development. *Science of The Total Environment*, 408, 12, 2435–2443. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.021>.
- [16] Tommie W Singleton. 2011. IT Audit Basics: Understanding and Applying Benford's Law. *Isaca Journal*, 3, 6.
- [17] Bogdan Šinik and Aleksandar Tošić. [n. d.] Lca data conforms to benford's law.
- [18] Bogdan Šinik and Aleksandar Tošić. 2025. Testing life-cycle assessment data quality with benford's law reveals geographic variation. *Ecological Informatics*, 103227.
- [19] Judit K. Szabo, Lucas Rodriguez Forti, and Corey T. Callaghan. 2023. Large biodiversity datasets conform to benford's law: implications for assessing sampling heterogeneity. *Biological Conservation*, 280, 109982. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.109982>.
- [20] Aleksandar Tošić and Jernej Vičič. 2021. Use of benford's law on academic publishing networks. *Journal of Informetrics*, 15, 3, 101163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2021.101163>.

Jedrski gorivni krog

Nuclear fuel cycle

Matjaž Valenčič
Zveza ekoloških gibanj Slovenije-ZEG
Krško, Slovenija
matjaz.valencic@gmail.com

Povzetek:

Atomska doba se je začela grozljivo, z eksplozijo atomskih bomb na Hirošimo in Nagasaki. Ameriškim atomskim bombam so z nekaj letno zamudo sledile sovjetske, britanske, francoske ...

Ameriški predsednik Dwight D. Eisenhower je leta 1953 z geslom »Atomi za mir« predstavljal mirnodobno rabo jedrske energije. Nekaj let kasneje je bila ustanovljena Mednarodna agencija za jedrsko energijo (IAEA), z dvema glavnima ciljema, spodbujanje miroljubne rabe jedrske energije in preprečevanje širjenja jedrskega orožja.

V mnogih državah so številni jedrski znanstveniki upali, da bo jedrsko cepitev mogoče izkoristiti kot čist vir energije, ki bo tako obilna in poceni, da bo omogočila blaginjo človeštva. Uresničitev teh sanj pa je bila odvisna od reaktorjev za razmnoževanje plutonija, ki bi lahko v celoti izkoristili cepitveno energijo, skrito v uranu.

Pa vendar, napovedi jedrskih fizikov se niso uresničile. Predelave jedrskih odpadkov so drage, nevarne, bremenijo okolje in predstavljajo varnostno tveganje. Pri jedrski reakciji nastajajo visoko radioaktivni elementi, ki trajno bremenijo okolje, odlaganje teh elementov v globoka podzemna skladišča pa je tako drago, da jih nikjer na svetu še ne odlagajo. Teoretično je sicer možno v posebnih reaktorjih predelati večino visoko radioaktivnih odpadkov, vendar obstajajo prevelike ovire, tega nikoli ne bo.

V prispevku želimo utemeljiti trditev, da le odprt jedrski gorivni krog, pri katerem se celotno izrabljeno gorivo odloži neposredno in enkrat za vselej v globoko odlagališče, zagotavlja zadostno jedrsko varnost. To trditev so zapisali avtorji Frank von Hippel, Masafumi Takubo in Jungmin Kang v knjigi »Plutonium – How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare«, prevod knjige v slovenščino pa bo izšel do konca leta.

Ključne besede: jedrski gorivni krog, atomi za mir, plutonij, nočna mora

Summary

The atomic age began horrifically, with the explosion of atomic bombs on Hiroshima and Nagasaki. American atomic bombs were followed by Soviet, British, French...

In 1953, US President Dwight D. Eisenhower introduced the peaceful use of nuclear energy with the slogan "Atoms for Peace". A few years later, the International Atomic Energy Agency (IAEA) was established, with two main objectives, promoting the peaceful use of nuclear energy and preventing the proliferation of nuclear weapons.

In many countries, many nuclear scientists hoped that nuclear fission could be used as a clean source of energy that would be so abundant and cheap that it would enable the well-being of humanity. The realization of this dream, however, depended on plutonium reactors that could take full advantage of the fission energy hidden in uranium.

And yet, the predictions of nuclear physicists did not come true. Nuclear waste recovery is expensive, dangerous, burdensome to the environment and poses a safety risk. A nuclear reaction produces highly radioactive elements that permanently burden the environment, and the disposal of these elements in deep underground storage facilities is so expensive that they are not disposed of anywhere else in the world. Theoretically, it is possible to process most of the high-level radioactive waste in special reactors, but there are too many obstacles, this will never happen.

In this paper, we want to substantiate the claim that only an open nuclear fuel cycle, in which all spent fuel is deposited directly and once and for all in a deep repository, provides sufficient nuclear safety. This claim was written by authors Frank von Hippel, Masafumi Takubo and Jungmin Kang in the book "Plutonium – How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare", and the translation of the book into Slovene language will be published by the end of the year.

Keywords: Nuclear Fuel Cycle, Atoms for Peace, Plutonium, Nightmare

Ekonomika jedrske energije

Jedrska energija ni poceni, v mirnodobni rabi pa mora biti konkurenčna drugim virom energije. Zato jedrski upravljavci prelagajo stroške, ki jih lahko predstavijo v prihodnost, kot nepotrebne. Eden od teh »nenujnih« stroškov je odlaganje izrabljenega jedrskega goriva (IG) oziroma visokoradioaktivnih odpadkov (VRAO) v globoko odlagališče. Še več, z odlašanjem gradnje odlagališča delajo vtis, da so skrbni, saj naj bi bilo možno izrabljeno jedrsko gorivo nekoč ponovno uporabiti, s tem pa bi se povečala ekonomika jedrskih elektrarn in zmanjšale količine visokoradioaktivnih odpadkov za odlaganje. Zamisli o ponovni rabi izrabljenega jedrskega goriva so prišle tudi v *Resolucijo o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom za obdobje 2023–2032* (ReNPROIG23–32). V uvodu tega pravilnika piše: »IG slovenska zakonodaja opredeljuje kot "jedrsko gorivo, ki je bilo obsevano v reaktorski sredici in je trajno iz nje odstranjeno". IG se lahko obravnava kot koristna snov, ki jo je mogoče predelati, ali kot radioaktivni odpadki, ki ga je treba odložiti. S predelavo IG lahko pridobimo predelan uran in plutonij, ki se lahko uporabljata kot koristna snov za novo jedrsko gorivo. RAO, nastale ob predelavi IG, štejemo med VRAO, ki vsebujejo radionuklide, katerih razpad sprošča toliko toplote, da jo je treba upoštevati pri ravnanju z njimi.«

V strokovnih in poljudnih medijih beremo, da ima jedrska energija vse možnosti, da jo označimo za trajnostno, da je izrabljeno jedrsko gorivo [državna strateška zaloga](#) in da izrabljeno gorivo ni odpadki. To je zgolj pragmatizem kot v pregovoru "If You Can't Beat Them, Join Them!". Menda je izrek "Fake it 'til You make it!", pisan na kožo zagovornikom jedrske energije.

Oba izreka je možno posloveniti. Prvega kot: "Če jih ne moreš premagati, se jim pridruži"; drugega pa kot "Potvarjaj, dokler ne postane resnica."

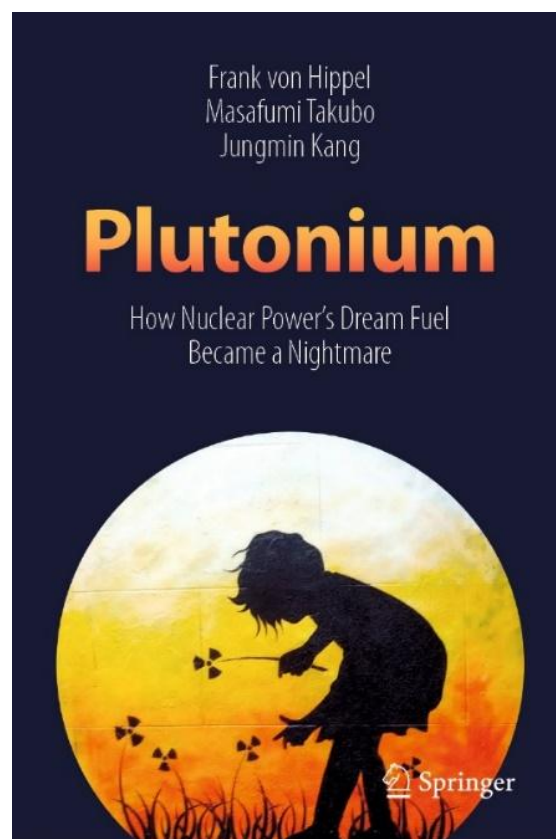
Odlaganje VRAO oziroma IG pač ni nepomembna malenkost, ki bi jo smeli jedrski lobisti spregledati.

- Nekdanji direktor družbe GEN-I je leta 2021 nedvoumno povedal, da za odlaganje VRAO nimamo tehničnih rešitev niti denarja: »morda bodo čez dvesto let zanesljivo našli tehnično rešitev«.
- Slovenija je ena redkih, če ne celo edina jedrska država na svetu, ki **nima urejenega odlaganja nobenih radioaktivnih odpadkov**. Avtor citata, da so jedrski odpadki [dragocena neprecenljiva dediščina zanamcem](#), je ekonomist, ki je bil upravitelj državnega jedrskega premoženja.

Na srečo pa je imelo vodstvo NEK dovolj modrosti. V okviru varnostne nadgradnje so postavili suho skladišče za izrabljeno jedrsko gorivo. V sklopu

varnostne nadgradnje začasnega skladiščenja izrabljenega goriva v bazenu so zgradili suho skladišče IG in postopno prestavljajo izrabljene gorivne elemente iz bazena v odporne, neprepustno zaprte zabojnike s pasivnim hlajenjem. Za zagotavljanje hlajenja niso potrebne dodatne naprave, sistemi ali energenti. IG se po približno petih letih hlajenja v bazenu dovolj ohladi, da ga je možno prestaviti v suho skladišče, ki omogoča varnejše in cenejše skladiščenje. Seveda pa suho skladišče IG ni trajna rešitev, zato je gradnja globokega odlagališča nujna.

Plutonij – kako se je sanjsko jedrsko gorivo spremenilo v nočno moro



Vsebina knjige podrobno prikazuje 200 milijard dolarjev izgubljenega truda pri razvoju reaktorjev za predelavo in razmnoževanje plutonija. Podaja pregled statusa globalnih programov predelave in obravnava družbena vprašanja, kot so širjenje jedrskega orožja, jedrska varnost, skladiščenje goriva, vpliv na okolje in jedrski terorizem. Poleg tega upošteva znanstvene, gospodarske in družbene dejavnike, napisano na ravni, primerni za oblikovalce politik in znanstveno pismene splošne bralce.

Ta knjiga spodbuja k razmišljanju analizo vprašanj v zvezi s predelavo jedrskega goriva in reaktorje na hitre nevtrone, vključno z razpravo o virih, ekonomiji, radiološkem tveganju in odpornosti proti širjenju jedrskega orožja. Opisuje zgodovino in znanost v ozadju ponovne obdelave ter daje pregled statusa programov ponovne obdelave po svetu. Še več,

ugotavlja, da je treba programe ponovne rabe izrabljenega goriva prekiniti. Mnogi predstavljajo jedrsko energijo kot edino možno rešitev za težave emisij ogljikovega dioksida, nekatere nacionalne jedrske ustanove si celo prizadevajo za razvoj in uvedbo natrijevo hlajenih reaktorjev za razmnoževanje in recikliranje plutonija. Njihovi zagovorniki trdijo, da bi ta sistem ponudil znatne prednosti glede na sedanjo tehnologijo lahkovodnih reaktorjev, v smislu večje učinkovitosti izkoriščanja urana, poleg tega naj bi ločevanje dolgoživega plutonija in drugih transuranov iz izrabljenega goriva ter njihova cepitev v hitrih reaktorjih močno skrajšala trajanje toksičnosti radioaktivnih odpadkov. Vendar so bila prizadevanja za komercialno uvedbo tega sistema v številnih državah v zadnjih šestih desetletjih gospodarsko in tehnično neuspešna, v nekaterih primerih pa so bila uporabljena za prikrivanje skrivnih programov razvoja jedrskega orožja.

...se nadaljuje...

Razprava o plutoniju še zdaleč ni končana. Pravzaprav so v Združenih državah Amerike zagovorniki ločevanja plutonija od izrabljenega jedrskega goriva in njegove ponovne uporabe v plutonijevo-uranovem gorivu spet na oblasti. Upajmo, da ne za dovolj dolgo, da bi povzročili resnično škodo.

23. maja 2025 je predsednik Trump odredil »*analizo pravnih, proračunskih in političnih vidikov, povezanih z učinkovitim prenosom izrabljenega jedrskega goriva iz reaktorjev v vladni, zasebno upravljani obrat za predelavo in recikliranje*« ter ustavitev redčenja in odstranjevanja presežnega ameriškega plutonija iz orožja hladne vojne, da bi ga lahko »*industriji dali na voljo v obliki, ki jo je mogoče uporabiti za izdelavo goriva za napredne jedrske tehnologije*«.

Nič se ni spremenilo v moči argumentov ekonomike, okolja in neširjenja, proti ločevanju in ponovni uporabi plutonija. Celo francoska nacionalna jedrska družba Électricité de France je prisiljena podpirati plutonijevo industrijo v Franciji, tega nočejo storiti v Združenem kraljestvu, katerega jedrske reaktorje tudi upravlja EDF. Britanska vlada je končala predelavo izrabljenega goriva in se je začasno odločila, da bo odstranila svoje nakopičene zaloge 117 ton ločenega civilnega plutonija, kar zadostuje za 15.000 jedrskih orožij, kar bo povzročilo precejšnje stroške z globokim zakopom po redčenju in imobilizaciji v keramiki – v bistvu v obliki, ki jo ima v izrabljenem gorivu iz vodno hlajenih reaktorjev.

Od 31 držav, ki danes upravljajo jedrske elektrarne, le štiri države z jedrskim orožjem: Kitajska, Francija, Indija in Rusija, predelujejo izrabljeno gorivo iz reaktorjev. Japonska gradi obrat za predelavo. Vsaka država ima za svojo izbiro poseben razlog, ki nima nobene zveze z ekonomijo ali okoljskimi vprašanji:

- Rusija je zgradila tri izolirana mesta za proizvodnjo plutonija za svoj ogromen jedrski arzenal iz hladne vojne. Zdaj ne potrebuje več plutonija za orožje, ker lahko plutonijeve »jame«, osrednje dele primarne jedrske bombe, v svojem močno zmanjšanem arzenalu jedrskega orožja predela iz plutonija, pridobljenega iz starih jam. Pravzaprav je Rusija leta 2000, vzporedno z ZDA, razglasila 34 ton presežnega plutonija za orožje. Rusija ima tudi 58 ton ločenega civilnega plutonija. Da bi ohranila zaposlenost, pa ROSATOM še naprej upravlja pilotne obrate za predelavo v dveh od treh mest, kjer predelujejo dodaten civilni plutonij iz izrabljenega goriva iz energetskih reaktorjev za gorivo prihodnjih demonstracijskih reaktorjev za razmnoževanje plutonija, zgrajenih za vzdrževanje drugega dela svojega ogromnega jedrskega kompleksa.

- Francija je zgradila ogromen kompleks za predelavo v Normandiji v upanju, da bodo druge države tam sklenile pogodbo za predelavo izrabljenega goriva. To se je zgodilo med sedemdesetimi in devetdesetimi leti prejšnjega stoletja. Druge države, ki niso videle prihodnosti v plutonijevem gospodarstvu, kasneje niso podaljšale svojih pogodb, podjetje Électricité de France in njegove stranke pa so bile prisiljene nositi skoraj celotno breme vzdrževanja kompleksa.

- Glavni namen kitajskih in indijskih obratov za predelavo naj bi bil zagotavljanje plutonija za njune rastoče arzenale jedrskega orožja.

- Japonska je leta 1993 začela graditi obrat za predelavo, ki ga je zasnovala Francija, z zmogljivostjo 800 ton/leto. V času pisanja tega besedila obrat še vedno ne obratuje, ker se upravljavec trudi izpolniti zahteve po posodobitvah japonskih predpisov o jedrski varnosti po dogodkih v Fukušimi. Vendar vlada noče spremeniti svoje politike s predelave na neposredno odlaganje izrabljenega goriva v globoko geološko odlagališče. Japonska trma je privedla do suma, da ohranja predelavo kot latentno zmogljivost proizvodnje jedrskega orožja, če bi se ameriško varnostno jamstvo izkazalo za nezanesljivo – čeprav bi bil za ta namen več kot zadosten veliko manjši objekt, kot je zaprti pilotni obrat za predelavo v Tokaiju.

Osnovno stanje, opisano v knjigi, torej ostaja nespremenjeno, razen odločitve Trumpove administracije, da »Ameriko spet naredi veliko« tako, da jo bo premaknila nazaj.

Tukaj in sedaj

Izrabljeno jedrsko gorivo (IG) nastaja v Sloveniji le v NEK in v raziskovalnem reaktorju TRIGA Mark II. Leta 2022 je bila količina IG približno 550 ton urana in 6,8 tone plutonija, v jedrskem žargonu je to »majhna količina«. V primerjavi z drugimi jedrskimi

državami bodo te količine izredno majhne tudi po prenehanju obratovanja obeh reaktorjev. Hkrati pa Slovenija načrtuje gradnjo nove jedrske elektrarne. Investitor GEN izbira med tremi, Westinghouse AP 1000 moči 1.117 MW, EDF moči 1.200 MW in EDF moči 1.650 MW, izbrana elektrarna pa naj bi delovala 60 do 80 let. Do konca obratovanja obeh jedrskih elektrarn naj bi nastalo več kot 2.000 ton IG (od tega več kot 25 t plutonija). Skrb vzbujajoče je, da investitorji načrtujejo obratovanje sedanje in gradnjo nove jedrske elektrarne brez načrtovanja odlagališča visokoradioaktivnih odpadkov. Pretvarjajo se, da so radioaktivni odpadki koristna snov, saj tako piše v Uradnem listu. Se motijo ali zavajajo?

Prevod knjige »Plutonij – kako se je sanjsko jedrsko gorivo spremenilo v nočno moro« bo strokovni javnosti pojasnil nujnost trajnega odlaganja radioaktivnih odpadkov. Bo jedrska stroka hotela razumeti? Upton Sinclair, ameriški pisatelj in socialni reformator je zapisal: "Težko je prepričati človeka, da nekaj razume, če je njegova plača odvisna od tega, da tega ne razume."

Jedrski gorivni krog mora biti odprt. Ohlajeno izrabljeno gorivo, visokoradioaktivni odpadek, je treba trajno odložiti v globoko geološko odlagališče.

Literatura/References:

- Von Hippel, F., Takubo, M., & Kang, J., (2019 december). Plutonium – How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare. Springer Singapore
- Resolucija o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom za obdobje 2023–2032 (ReNPROIG23–32). 2023. Uradni list RS, št. 14/23
- Valenčič, M. (2020 februar). Dragocena neprecenljiva dediščina zanamcem!. Pridobljeno 04.09.2025 s <https://zaensvet.si/dragocena-neprecenljiva-dediscina-zanamcem/>.
- Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije. (2022 april). Pojmovnik jedrske energetike. Pridobljeno septembra 2025 s <https://www.djs.si/pojmovnik/PojmovnikDJS.pdf>

Kako "obnovljivi viri energije niso bili vzrok letošnjega razpada španskega elektroenergetskega sistema"

How "Renewable Energy Sources were not Cause of This Year's Blackout of Spanish Power System"

Rafael Mihalič

UL, Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška 25

Ljubljana, Slovenija rafael.mihalic@fe.uni-lj.si

Urban Rudež

UL, Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška 25

Ljubljana, Slovenija

urban.rudez@fe.uni-lj.si

POVZETEK

Dan po letošnjem razpadu elektroenergetskega sistema (EES) na Iberskem polotoku, torej 29. aprila, je španski premier Pedro Sánchez izjavil, da razpada niso povzročili ne prevelik delež obnovljivih virov energije (OVE) ne pomanjkanje moči jedrskih elektrarn. Izjava je bila precej prenaplajena, saj raziskave tehničnih vzrokov tovrstnih pojavov praviloma trajajo več mesecev, analiza konceptualnih vzrokov na ravni evropske celinske interkonekcije pa še dlje.

V prispevku povzemamo analizo in podajamo komentarje o fizikalnih dogajanjih v španskem in evropskem EES, ki so privedla do obratovalnih parametrov, zaradi katerih so se sprožili določeni zaščitni ukrepi in s tem praktično onemogočili obratovanje EES na Iberskem polotoku. Drugače povedano, predstavljamo in razlagamo sosednje dogodke, ki je vodilo do razpada EES na Iberskem polotoku.

Osnovno vprašanje je, zakaj je do takih odstopanj parametrov EES sploh prišlo in ali so v dani situaciji vsi sistemi (zlasti zaščitni) odreagirali ustrezno. Dosedanja analiza je pokazala, da gre po eni strani za izjemno tehnično zahteven sistem, ki ga fiziki opisujejo kot samoorganizirajoči se kritični sistem, katerega stanje in dogajanje skoraj ni mogoče povsem dognati, po drugi strani pa za kompleksen preplet vzrokov in posledic, pri katerem so OVE enako vpleten akter kot kateri koli drugi.

V tako kompleksnih sistemih, kot je EES, okvar in razpadov ni mogoče povsem preprečiti, lahko pa njihovo verjetnost zmanjšamo s pravilnim načrtovanjem in vodenjem. Kaže pa se, da bo prehod iz konvencionalnega koncepta vodenja in delovanja EES, ki je temeljil na obnašanju elementov v skladu z njihovimi fizikalnimi lastnostmi, v na programski opremljen temelječ EES (pretvorniki, kompenzacijske naprave na osnovi močnostne elektronike ipd.) povezan z več tveganji, kot si jih je marsikdo pripravljen priznati.

ABSTRACT

The day after this year's blackout in the Iberian Peninsula, that is, on April 29, Spanish Prime Minister Pedro Sánchez stated

that the blackout was not caused either by an excessive share of renewable energy sources (RES) or by a shortage of nuclear power capacity. His statement was rather premature, since investigations into the technical causes of such events usually take several months, while the analysis of conceptual causes at the level of the continental European interconnection takes even longer.

This paper summarizes the analysis and provides discussion on the physical processes in the Spanish and European electric power systems (EPS) that led to operating parameters which triggered certain protective measures, thereby effectively disabling the operation of the Iberian EPS. In other words, we present and explain the sequence of events that resulted in the blackout.

The key question is why such deviations in EPS parameters occurred in the first place and whether all systems (particularly protection systems) responded appropriately under the circumstances. The analysis carried out so far has shown that, on the one hand, the EPS is an extremely technically demanding system, described by physicists as a self-organizing critical system whose states and processes are almost impossible to fully grasp. On the other hand, it is a complex interplay of causes and consequences, in which RES are just as involved an actor as any other.

In systems as complex as the EPS, faults and blackouts cannot be completely prevented, but their likelihood can be reduced through proper planning and management. However, it appears that the transition from the conventional concept of EPS operation and control, based on the physical behaviour of its components, to a software-based system (converters, powerelectronics-based compensation devices, etc.) will be associated with more risks than many are willing to acknowledge.

KLJUČNE BESEDE

Elektroenergetski sistem, Španija, Iberski polotok, razpad elektroenergetskega sistema, obnovljivi viri električne energije.

KEYWORDS

Electric power system, Spain, Iberian Peninsula, power system blackout, renewable energy sources.

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s). Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia © 2025 Copyright held by the owner/author(s). <https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.9>

1 UVOD

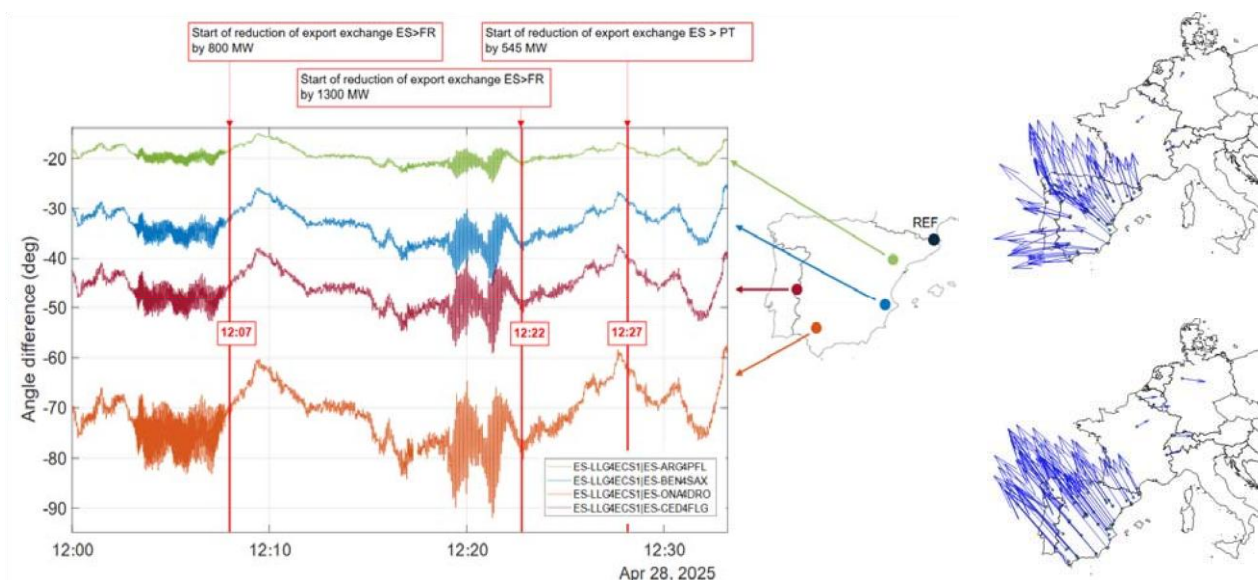
Elektroenergetski sistem (EES) Iberskega polotoka je 28. aprila 2025 doživel popoln razpad, ki je prizadel več kot 50 milijonov prebivalcev Španije in Portugalske. Nenadna prekinitev oskrbe z električno energijo je bil eden največjih tovrstnih dogodkov v Evropi v zadnjih desetletjih in je opozoril na ranljivost sodobnih EES v obdobju tako imenovane energetske tranzicije. Dogodek je izpostavil vrsto tveganj, od odvisnosti od nestanovitnih obnovljivih virov električne energije, pomanjkanja sistemskih vztrajnostnih mas, neprilagojenih zaščitnih mehanizmov vse do omejenih čezmejnih prenosnih zmogljivosti in s tem čezmejne podpore v kriznih stanjih.

Razpad EES na Iberskem polotoku se je zgodil v času, ko je bila tam proizvodnja v večinskem deležu odvisna od sončne in vetrne energije, medtem ko so konvencionalne termoelektrarne večinoma mirovale. Prvi znaki nestabilnosti so se pokazali okoli poldneva, ko so bile nekajkrat zaporedoma zaznane oscilacije (nihanja) frekvence in napetosti. Ukrepi za odpravo teh nihanj so privedli EES v stanje, ko so se sprožili nekateri zaščitni sistemi, kar je stanje hitro poslabšalo. Izpadlo je namreč več velikih proizvodnih enot, po preliminarnih poročilih izključno OVE.

proizvodnje, škode v turizmu in izgub v maloprodaji še bistveno višje, skupaj 10 - 12 milijard evrov. Mednarodni analitiki (npr. Reuters, S&P Global) omenjajo razpon 5 - 15 milijard evrov, odvisno od tega, kako hitro se je industrija po izpadu ponovno zagnala. Skupna škoda torej še ni natančno določena, a strokovna skupnost jo večinoma postavlja v okvir desetih milijard evrov.

Poleg neposrednih posledic za prebivalstvo in gospodarstvo je dogodek sprožil tudi razprave o dolgoročni varnosti oskrbe z električno energijo ter o nujnosti novih tehničnih in regulativnih ukrepov.

Analiza razpada EES na Iberskem polotoku je zato pomembna tako za tehnično stroko kot tudi za oblikovalce energetskega politika. Ponuja namreč dragoceno izkušnjo o aktualnih težavah EES, ki prehajajo iz koncepta vodenja na osnovi predvidljive konvencionalne proizvodnje z velikimi rotirajočimi masami na koncept vodenja s stohastično proizvodnjo z majhno ali ničelno vztrajnostjo. Ta prehod je veliko kompleksnejši, kakor si to predstavlja laična javnost, in bo zahteval množico dodatnih ukrepov (in s tem finančnih sredstev), da bi zagotovili zadovoljivo stopnjo robustnosti oziroma odpornosti EES tudi v prihodnje.



Slika 1: WAMS meritve Red Eléctrica, REN in ostalih TSO: potek razlike napetostnih kotov (levo), pripadajoča nihajna načina (desno) [1]

Zaradi hitrega posledičnega upada frekvence na polotoku je zaščita povezavo z evropskim omrežjem povsem upravičeno prekinila. Kot zadnji urgentni ukrep se je v Španiji in na Portugalskem sprožila še sistemska zaščita pod-frekvenčnega razbremenjevanja, katere poseg pa ni bil učinkovit. Vzroke za to je mogoče iskati v domnevno prenizkih vztrajnostnih masah v tistem trenutku in posledično prehitremu upadu frekvence za uspešno delovanje omenjene zaščitne sheme. Kakorkoli, v roku nadaljnjih nekaj sekund je Iberski EES razpadel.

Posledice so bile obsežne. Brez elektrike je ostalo več deset milijonov ljudi, prizadeta so bila mesta, industrija, prometna infrastruktura in telekomunikacijska omrežja. Bolnišnice so morale preiti na zasilna napajanja z agregati, javni promet se je ustavil, številna podjetja so utrpela proizvodne izgube, ocene gospodarske škode se (razumljivo) razlikujejo.

Prve ocene španske vlade so kazale, da neposredna škoda (izgubljena proizvodnja, stroški nujnih ukrepov, motnje v prometu) znaša okoli 4 - 6 milijard evrov. Gospodarske zbornice so opozorile, da bodo posredne posledice zaradi ustavljene

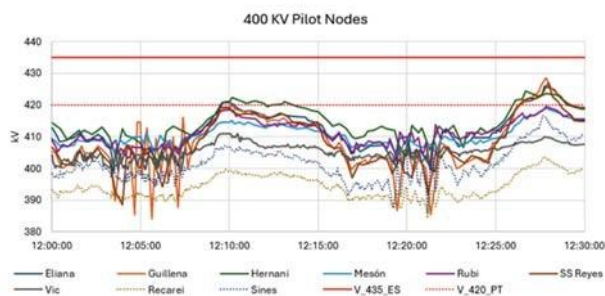
2 Zaporedje dogodkov pred razpadom

Dan se je na Iberskem polotoku začel brez posebnih opozorilnih znakov. Proizvodnja iz obnovljivih virov, predvsem sončnih elektrarn (SE) je bila visoka. Poraba se je gibala okoli 27 GW, proizvodnja sončne energije je dopoldan hitro naraščala. Tako je že nekaj po 9. uri 60 % vsega odjema pokrivala sončna energija, in sicer ob podpori vetrnih elektrarn in manjšega deleža iz jedrskih elektrarn. Kljub temu, da je bil sistem (navidežno) varno v stabilnem področju, so se kmalu po 9. uri pojavile povišane napetosti v visokonapetostnem omrežju. Te so še ostajale v dovoljenih mejah, a so nakazovale, da se razmerje med proizvodnjo in odjemom jalove moči ruši in nagiba v smeri njenega presežka.

Med 10. in 11. uro je sončna proizvodnja dosegla skoraj vrh, medtem ko so bile konvencionalne elektrarne (plinske, termoe in jedrske) v obratovanju z minimalnimi obremenitvami. Sistem je bil tako izpostavljen netipičnim pogojem: presežkom moči ob zelo nizkih vztrajnostnih masah. Po 11. uri so se pojavila prva regionalna elektromehanska nihanja med sinhronskimi generatorji

s lastno frekvenco 0,64 Hz. Operater REE je poskušal nihanja zadušiti z vnaprej predvidenimi ukrepi, t.j. vključevanjem dodatnih prenosnih vodov in zmanjševanjem pretokov proti Franciji. Enosmerno HVDC povezavo s Francijo so nastavili na način obratovanja z nastavljenim prenosom moči (angl. fixed power mode). Ti ukrepi so sicer učinkovali, a so imeli stranski učinek: ob nižjih obremenitvah prenosnega omrežja se je napetost v njem dodatno dvignila, zaradi česar so se obratovalne točke sinhronskih generatorjev v konvencionalnih elektrarnah pomaknile še bolj v pod-vzbujeno področje. Slednje je manj stabilno zaradi zmanjšanja tako imenovanega sinhronizacijskega koeficienta. To pomeni slabšanje dušenja sistema in povečanje tveganj za dodatna nihanja.

Okrog 12:10 je dejansko prišlo do novega nihanja, tokrat med-sistemskega značaja z lastno frekvenco 0,21 Hz. Šlo je za nihajni način med Iberskim polotokom in Baltskimi državami. Operaterji so za zadušitev tega uporabili podobne ukrepe kot v prvem primeru; pretok energije v Francijo so še zmanjšali in priklopili dodatne vode na jugu Španije. In rezultat je bil identičen kot prvič: dodaten dvig napetosti v prenosnem omrežju, katerega časovni potek ilustrira Slika 2. Pri tem črtkana rdeča vodoravna črta označuje maksimalno dovoljeno obratovalno napetost na Portugalskem, polna rdeča vodoravna črta pa v Španiji.



Slika 2: časovni potek napetosti 400 kV pilotnih vozlišč [1]

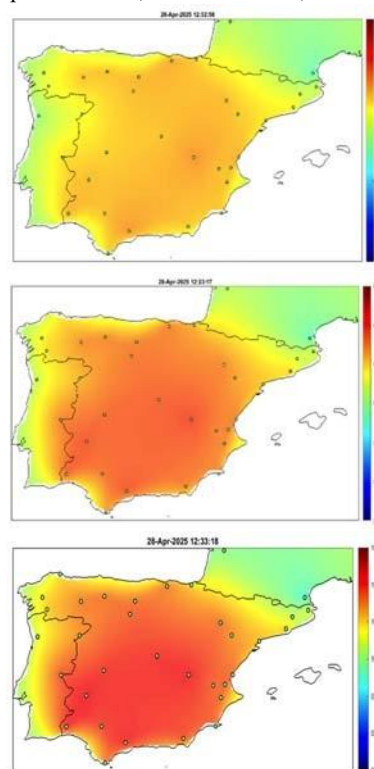
Omenjeni dvigi napetosti pred 12:30 uro na videz niso imeli večjih posledic, vendar je podrobnejši pregled pokazal nepričakovano hiter porast odjema španske porabe ob ca. 11:00, 12:10 in 12:25 za skupaj približno 2000 MW. Možno je, da je šlo za navidezni dvig odjema kot posledica izpada razpršene proizvodnje električne energije – konkretno SE, ki so locirane na lokaciji odjema. Na tem mestu je smiselna obrazložitev, da je ob zasuku smeri pretoka energije v primerjavi s klasičnim EES (kjer energija vedno teče v smeri od prenosnega omrežja proti odjemu), mogoče na nizkonapetostnih nivojih omrežja pričakovati procentualno višjo napetost kot na visokonapetostnem omrežju. Potrditev te domneve v tej fazi pa še ni mogoča, saj podatki razmer na srednje-napetostnih in nizkonapetostnih nivojih omrežja javnosti zaenkrat še niso dosegljivi.

Prelomni trenutek (glej ŽiT 2021/10 do ŽiT 2022/1, str. 16, 20, 22 in 26) se je zgodil ob 12:32:57. Takrat je izpadel

<https://doi.org/???>

transformator v bližini Granade, ki je prenašal energijo fotovoltaičnih, termo-solarnih in vetrnih elektrarn v omrežje. S tem je izpadlo približno 355 MW delovne moči s pripadajočo podporo jalove moči. Sledil je še izpad SE in termo solarnih elektrarn v območju Badajoz 725 MW moči. V nadaljnji sekundi je izpadlo na različnih lokacijah 1100 MW moči. V manj kot 20 sekundah se je napetost prenosnega omrežja močno povišala, kar

kaže Slika 3 s tremi zaporednimi posnetki stanja (zelena barva označuje napetost 400kV, rumena 420 kV, rdeča 440 kV).

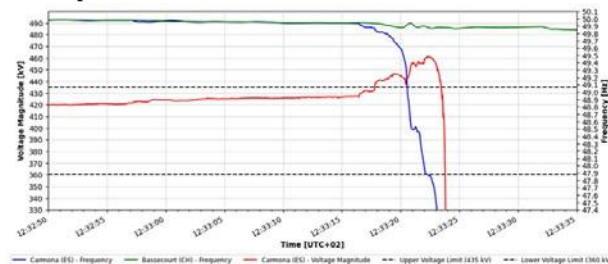


Slika 3: Posnetki 400 kV napetosti pilotnih vozlišč od 12.32.58 do 12.33.18 [1]

Ob 12:33:19 je španski EES zaradi pomanjkanja proizvodne moči začel padati iz sinhronizma s preostalim celinskim delom ENTSO-E. V naslednjih treh sekundah se je najprej aktiviral sistem zaščite pod-frekvenčnega razbremenjevanja, vendar ni bil uspešen pri stabilizaciji frekvence. Ob 12:33:20 se je prekinila povezava z Marokom, ob 12:33:21 so se izklopile AC povezave med Španijo in Francijo, ob 12:33:24 se je prekinila še HVDC povezava s Francijo. S tem je EES na iberškem polotoku razpadel.

V manj kot petih sekundah je torej iz omrežja izpadlo približno 15 GW proizvodnje, kar je predstavljalo skoraj 60 % celotne španske porabe. Razmere ilustrira Slika 4, kjer je z zeleno krivuljo prikazana frekvenca v Švici, z modro v Španiji in z rdečo napetost na 400 kV omrežju v Španiji.

Večji del Iberskega polotoka je ostal več kot deset ur brez električne energije. V Madridu je bila ponovna vzpostavitev omrežja po razpadu še posebej zahtevna zaradi preobremenjenih mestnih omrežij. Do poznega večera so bile vključene prve otočne enote za kritično infrastrukturo. Popolna resinhronizacija s preostalim celinskim delom ENTSO-E je bila dosežena šele naslednji dan ob 04:00, do 07:00 pa je bilo že skoraj 100 % porabe ponovno pokrite.



Slika 4: frekvenca in napetost med razpadom [1]

3 Možni vzroki za razpad

Takoj po dogodku so se pojavile številne razlage možnih vzrokov razpada, ki vse po vrsti sodijo na področje špekulacij, saj analize tovrstnih dogodkov običajno trajajo nekaj mesecev, končno poročilo je predvideno za 3. oktober. Med najbolj bizarne hipoteze spadajo tako imenovane inducirane atmosferske vibracije, ki so se hitre znašli v precejšnjem številu medijev. Šlo naj bi za pojav, ki bi naj povzročil mehanske oscilacije vodnikov daljnovodov. Nekatere hipoteze so sumile kibernetiki napad, nekatere hiter in nepredviden pojav oblačnosti nad Španijo.

V resnici bi lahko tudi tik pred objavo končnega poročila ENTSO-E o dogodku težko pokazali s prstom na en sam vzrok. Pri tako kompleksnem sistemu, kot je EES, je funkcionalna prepletenost medsebojnih vplivov posameznih elementov v vsakem obratovalnem stanju tako izrazita, da je iskanje osnovnega vzroka izjemno težko. Sprožilni dogodek namreč ne pomeni hkrati tudi vzroka. Nenazadnje se sistemski operaterji pri obratovanju in načrtovanju EES strogo držijo spoštovanja tako imenovanega »n-1« kriterija in pogosto tudi natančne analize bolj verjetnih »n-2« stanj. Iskanje vzroka je v takšnih primerih podobno kot ugotavljanje kateri mehanski del iztrošenega več desetletij starega avtomobila je kriv za trk divjadi. Sicer bi do česa takšnega lahko prišlo tudi ob dobro vzdrževanem vozilu a bi bila takšna nezgoda bistveno manj verjetna.

Kot smo razložili v [2], so EES nelinearni sistemi ali določene samoorganizirajoči se kritični sistemi, v katerih neizogibno prihaja do motenj vseh razsežnosti. Tega ne moremo preprečiti, lahko pa s pravilnim načrtovanjem in vodenjem njihovo verjetnost zmanjšamo. Drugače rečeno, razpadov EES ne moremo preprečiti, od našega ravnanja oziroma načrtovanja pa bo odvisno, ali nas bo doletel pogosto ali le enkrat na nekaj desetletij.

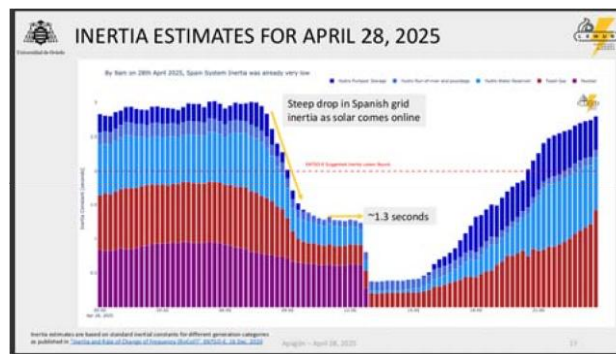
Čeprav torej težko izpostavimo en sam vzrok, pa nekatere splošne zaključke oziroma razloge, ki so pripeljali do situacije, ki je, kljub morebitnemu povsem ustreznemu odzivu elementov EES (recimo zaščite), privedla do razpada EES, lahko izpostavimo.

V času pred razpadom je prevladovala proizvodnja iz virov brez rotirajočih mas (okrog 75%).

Težki rotorji v konvencionalnih elektrarnah delujejo kot vztrajnostne mase, ki blažijo hitre spremembe hitrosti vrtenja strojev in s tem frekvence izmenične napetosti. Če ena od proizvodnih enot nenadoma izpade, preostali rotirajoči stroji še nekaj trenutkov ohranjajo ravnotežje moči in s tem podaljšajo čas za intervencijo bodisi operaterja bodisi kakšnega od avtomatiziranih mehanizmov. Na Iberskem polotoku je bilo teh mas v času pred mrkom precej malo. Tu velja iskati enega od morebitnih vzrokov, zakaj sistemska zaščita pod-frekvenčnega razbremenjevanja po ločitvi iberskega polotoka od preostale

R. Mihalič, U. Rudež

celinske interkonekcije ni bila dovolj učinkovita. Povsem mogoče je, da je bil padec frekvence preprosto prehiter. Slika 5 prikazuje, da so bile vztrajnostne mase po 9. uri daleč pod priporočeno minimalno vrednostjo s strani ENTSO-E (označena z rdečo črtkano črto).



Slika 5: Vztrajnostne mase španskega EES 28. apr. 2025 [3]

Od 9. ure naprej so se pojavile težave z zagotavljanjem ravnotežja jalove moči v EES in s tem vzdrževanja napetosti na visokonapetostnem omrežju znotraj predpisanih meja.

Stanje glede omenjenega dejstva na videz ni bilo posebno problematično, je pa zahtevalo obratovanje konvencionalnih generatorjev v skrajno pod-vzbujenem področju. To pomeni, da se zaradi tega njihov kolesni kot poveča in s tem sinhronizacijski moment zmanjša. Z drugimi besedami: stabilnost takšnega obratovanja je slabša.

Velika večina pretvorniško-priključenih virov nima (vključene) funkcije sprotne regulacije napetosti oziroma jalove moči.

To pomeni, da pretvorniško-priključeni viri obratujejo z maksimalno možno delovno močjo in nanjo vezano jalovo močjo pri nespremenjenem faktorju moči. S tem sprotne prilagajanja napetosti na priključni točki oziroma potrebam sistema po jalovi moči ne izvajajo. Poleg tega ima na nizko-napetostnem in srednje-napetostnem omrežju ravno proizvodnja delovne moči (in ne jalove!) največji vpliv na napetost. To sicer ne pomeni, da izvedba napetostnega regulacijskega mehanizma s strani pretvorniško-priključenih razpršenih virov v praksi ni mogoča, vendar je šele na stopnji razvoja, pripadajoča regulatorna in tržna okvira pa tudi.

Praktično vsi pretvorniki OVE so opremljeni z regulacijo sledenja omrežni napetosti (angl. grid following).

To pomeni, da frekvenco proizvedene izmenične napetosti prilagodijo frekvenci omrežja, na katerega so priključeni. Z rastjo deleža takšnih virov (in odjema) pa pridemo v situacijo, ko je njihov delež primerljiv z deležem moči konvencionalnih virov z rotirajočimi masami. Posledično se pretvorniki prilagajajo frekvenci, na katero sami vplivajo. Takšna situacija lahko

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

predstavlja izvor različnih vrst oscilacij v EES. Rešitve se išče v smeri pretvornikov z regulacijo oblikovanja omrežne napetosti (angl. grid forming), vendar ta tehnologija še ni na ustreznem nivoju zrelosti in še kar daleč od množične implementacije.

Velike termoelektrarne s funkcijo aktivnega dušenja nihanj so bile izključene.

To poudarjamo zaradi dejstva, da so velike termoelektrarne praviloma opremljene s funkcijo aktivnega dušenja nihanj (angl. Power System Stabilizer - PSS). Odsotnost termoelektrarn pomeni odsotnost tega mehanizma, čeprav se s tem odpira tudi vprašanje njihove ustrežne nastavitve pri spreminjajočem deležu OVE.

EES iberskega polotoka je zelo šibko povezan s svojimi sosedi.

Šibka povezanost pomeni, da ni mogoče izkoriščati vseh prednosti povezanosti v interkonekcijo, predvsem tistih vezanih na krizna stanja (torej pomoč sosedov). Obenem pomeni ozko grlo z relativno visoko impedanco, kar učinkuje kot električno podaljšanje sistema in s tem večja podvrženost možnosti nastanka elektromehanskih nihanj. V splošnem se priporoča moč povezav s sosedi vsaj v višini 20% moči konične porabe, medtem ko znaša ta odstotek za Španijo le 10%.

Spoznavnost stanja srednje in nizkonapetostnega omrežja je pomanjkljiva.

Eden osnovnih problemov pri raziskovanju vzrokov proučevanega dogodka in preprečevanju podobnih scenarijev je, da v bistvu skorajda ne vemo, kaj se dogaja na srednjenapetostnem in še posebej nizko-napetostnem omrežju. Cena sistemov za spremljanje električnih parametrov v realnem času in ustrezna zanesljiva komunikacija sta namreč veliko predragi za masovno uporabo kot jo spremljanje stanja na teh omrežjih zahtevata. To pa hkrati pomeni, da je tako tehnično kot tudi finančno velik delež OVE zelo težko vključiti v sistemsko zaščito pred podobnimi dogodki.

Glede na navedene točke lahko sklepamo, da je bil nastop regionalnega in kasneje med-sistemskega nihanja verjetno posledica več dejavnikov. V splošnem se verjetnost nastopa nihanj večja, če se delež rotirajočih mas manjša, če v sistemu ni PSS elementov, če imamo v sistemu aktivne elemente, ki so regulirani z zakasnitvami (recimo pretvorniki), če je impedanca omrežja visoka ter če je sinhronizacijski moment majhen. Večina navedenih pogojev je bila v obravnavanem primeru vsekakor izpolnjena, zato pojav nihanj ni nič nenavadnega. Natančnega vzroka njihovega nastopa verjetno ni mogoče določiti in je skupek večjega števila dejavnikov. Vsak, ki se je že ukvarjal s sistemsko analizo linearnih sistemov in teorijo lastnih vrednosti ve, da za nihanje sistema z njegovo resonančno frekvenco nikoli ni odgovoren zgolj en element ali vrsta elementa. Takšna nihanja v EES so bila in so dejstvo. V konkretnem primeru je bil problem to, da so nihanja dušili z ukrepi, ki so obstoječo, že tako težko vzdrževano bilanco jalovih moči, še poslabšali. Sistem je bil namreč v stanju, ko bi že relativno minoren dogodek sprožil kaskado dogodkov iz katere ni več povratka v stabilno obratovanje.

4 Kaj smo se naučili?

Za strokovnjake iz področja obratovanja EES ne bi smel biti razpad EES na iberskem polotoku nič nepričakovanega. Že v konvencionalnih EES je do razpadov včasih (sicer redko) prišlo, v razmerah drastičnih sprememb kakršnih smo pričala zaradi evropskih in nacionalnih politik, pa se njihovo število zgolj povečuje in obseg posledic širi. Odmev dogodka v javnosti pomeni med drugim tudi, da se strokovnjakom vsaj začasno bolj temeljito prisluhne.

V tem smislu je razpad na iberskem polotoku na ravni Evropske Unije (EU) sprožil (bolj ali manj) resno razpravo o energetske varnosti. Evropska komisija je izpostavila, da dogodek dokazuje potrebo po močnejši medsebojni integraciji evropskih nacionalnih omrežij. Iberski polotok je že dolgo obravnavan kot šibki člen, a politični in ekonomski interesi, predvsem francoski, so preprečevali gradnjo novih prenosnih povezav. Po razpadu so

se okrepili pozivi k evropski solidarnosti, a tudi tukaj so se pokazale razlike: medtem ko so severne države pozivale k vlaganjem v prenosne vode, so druge izpostavljale pomen nacionalne energetske suverenosti. In vse to pred objavo končnih ugotovitev ENTSO-E. Kljub temu je do določenih spoznanj, ki so relevantna za odločevalce, mogoče priti.

Potrebna je bolj premišljena integracija OVE.

Menjava konvencionalnih virov električne energije z masivno integracijo OVE zahteva bolj premišljene korake, predvsem pa sočasne prilagoditve celotnega EES. Med te prilagoditve spadajo razvoj ustreznih komunikacijskih sistemov, ustreznih algoritmov za regulacijo pretvornikov, ustreznih načinov koordinacije delovanja regulacijskih in zaščitnih sistemov, razširitev nabora meritev, predvsem na srednje in nizko-napetostnem omrežju ipd. Te prilagoditve ne smejo biti izvedene šele po razmahu OVE, ki se dogaja skoraj izključno zaradi ekonomskih dobrobiti, ki jih investitorji v tem vidijo. Če teh sočasnih prilagoditev ni, se tveganje za razpade EES večjih razsežnosti zelo poveča.

Razviti in tehnično dovršiti je treba tehnologije za nadomestitev vztrajnostnih mas konvencionalnih elektrarn.

Odziv pretvorniško-priključenih naprav je lahko zelo hiter in načeloma jih je mogoče opremiti z algoritmi za zagotavljanje tako imenovanih virtualnih oziroma sintetičnih vztrajnostnih mas. To je koncept, pri katerem regulacija pretvornika zgolj posnema obnašanje sinhronskega stroja. Cilj je, da ob hitrih spremembah omrežne frekvence pretvornik za kratek čas močno spremeni oddajo moči, podobno kot to stori sinhronski stroj inherentno. Ključna težava pri tem je ta, da je danes velika večina pretvorniško-priključenih proizvodnih enot opremljena z regulacijo sledenja omrežni napetosti, ki pa lahko sintetično vztrajnost zagotovi zgolj ob precejšnji časovni zakasnitvi. Zanesljivo meritev frekvence, na katere odstopanje naj bi se naprava odzvala, je mogoče dobiti z zakasnitvijo nekje med 100 ms in 1 s. Te zakasnitve imajo lahko drastične posledice, saj lahko namesto izboljšanja dušenja nihanj te celo poslabšajo in sistem privedejo v nestabilnost. Matematično gledano imajo takšni sistemi bistveno več resonančnih točk (v bistvu neskončno) [4], kar ustrezno koordinacijo vseh regulacijskih mehanizmov znatno oteži. Obetavna alternativa so že omenjeni pretvorniki z regulacijo oblikovanja omrežne napetosti, vendar bo najprej treba počakati na zadostno zrelost te tehnologije, nadalje pa še na njihovo implementacijo po vsej celine.

Ojačiti je treba čezmejne prenosne povezave.

Celinska evropska interkonekcija ni bila zasnovana za povezano obratovanje in čezmejna trgovanja z električno energijo, zato je njena struktura sub-optimalna. Primanjkuje zlasti tako imenovanih čezmejnih povezav (interkonekcij) med nacionalnimi omrežji oziroma državami. Glede na izkušnje z gradnjo 400 kV daljnovodov v Sloveniji lahko upravičeno domnevamo, da je ojačitev čezmejnih prenosnih poti oddaljena desetletja. Pri tem je pomemben faktor povsod po Evropi odpor javnosti proti umeščanju energetskih objektov v prostor.

Zavedati se je treba omejitev baterijskih hranilnikov električne energije.

Gre za pretvorniško-priključene baterijske sisteme, ki so sicer za hitro in kratkotrajno regulacijo delovne in/ali jalove moči skoraj

idealna rešitev (pri tem se seveda že omenjenim problemom z regulacijo pretvornikov ne moremo izogniti). Pomanjkljivosti so visoka cena in zato neprimernost za hranjenje velikih količin električne energije. Trenutno se ustrezen ekonomski model za implementacijo takšnih sistemov še išče, gre pa v smeri izkoriščanja večnamenske uporabe.

Izvesti je treba prilagoditve na nekaterih zaščitnih sistemih.

Zaščitni sistemi so temelj zanesljivega in varnega obratovanja EES. Obstoječi koncepti so se razvijali in preizkušali desetletja dolgo. Nepremišljene in prenapregnjene spremembe, posodobitve oziroma uvedba povsem novih konceptov so za kritično infrastrukturo takšnega pomena kot je EES preveč tvegane. Dejstvo je, da se da z ustrežno koordinacijo, ustrežno nastavitvijo in neprestanim spremljanjem stanja EES in preverjanja ustreznosti nastavitve zaščitnih elementov veliko narediti. Gre pa pri tem za zelo zahtevno in časovno intenzivno dejavnost, kar privede na plan vprašanje, kje najti ustrežno število vrhunskih strokovnjakov za zaščito in kje najti dovolj sredstev. Ta zahteva je sicer zelo smiselna, a povezana z večjimi praktičnimi težavami in finančnimi vložki, kot se zdi na prvi pogled.

Zagotoviti dovolj robustno digitalizacijo.

Ena glavnih ovir uvedbe digitalizacije v vse faze vodenja EES je bila v preteklosti njena (ne)zanesljivost. Nadomeščanje obvladljivega števila večjih in tehnološko dovršenih proizvodnih enot z enormnim številom pretvorniško-priključenih enot pogosto cenene kakovosti vsekakor predstavlja tveganje iz stališča njihovega daljinskega krmiljenja. Vprašanje je, kakšnemu kibernetškemu tveganju se s tem izpostavlja in kako to vpliva na zanesljivost obratovanja EES.

Rabimo politično zrelost, ki presega nacionalne interese.

Daljšega komentarja temu spoznanju avtorji ne bomo namenili. Ne glede na to kako utopično to spoznanje že zveni, ga smatramo kot ključno za uspešni prihodnost Evrope.

5 Razprava

Iz napisanega ugotavljamo, da je skoraj nemogoče izolirati zgolj en vzrok razpada EES na iberškem polotoku. Hkrati pa tudi, da je nemogoče trditi, da kateri od elementov (ali skupine elementov) ni bil vzrok razpada kot je to storil španski minister – glej Sliko 5.

R. Mihalič, U. Rudež

stabilnega področja obratovanja EES si kot družba enostavno ne moremo privoščiti na dolgi rok. Pred odločevalci energetskih politik bi torej moral biti temeljit premislek o načinu udejanjanja idej tako imenovanega zelenega prehoda, vendar ob skrbnem naslonu na mnenje stroke in upoštevanja vseh pastí, ki jih ta lahko s svojim strokovnim znanjem predvidi in napove.

REFERENCE

- [1] <https://www.entsoe.eu/publications/blackout/28-april-2025-iberianblackout/>
- [2] Življenje in tehnika : revija za poljudno tehniko, znanost in amaterstvo. okt. 2021 do jan. 2022, letn. 72 in 73, [št.] 10, 11, 12 in 1, str. 16, 20, 22 in 26
- [3] Universidad de Oviedo
- [4] BOKAL, Matevž. Stabilizacija digitalnih simulacij v realnem času s kompenzacijo časovnih zakasnitev : doktorska disertacija. Ljubljana: [M. Bokál], 2023. 109 str., [12] str. pril., ilustr.
- [5] <https://www.pv-magazine.com/2025/04/29/pedro-sanchez-says-spainblackout-not-triggered-by-excess-renewables/>

Spain blackout not caused by renewables, says prime minister

Spanish Prime Minister Pedro Sánchez says Spain's recent blackout was not triggered by excess renewables or a lack of nuclear power. He claims the government will reform the grid, seek an independent report from Brussels, and launch a national inquiry.

APRIL 29, 2025 PILAR SÁNCHEZ MOLINA

Sl. 5: Izjava španskega ministra dan po razpadu. Vir: [5]

Zato v skladu s predhodno razpravo izpostavljam potencialno vpletenost OVE pri celotnem poteku omenjenega razpada:

- vpliv OVE na precejšnje pomanjkanje vztrajnostnih mas za varno in stabilno obratovanje EES. Te bi sicer lahko nadomestili z virtualno vztrajnostjo, vendar do tega ni prišlo.
- vpliv OVE na pomanjkanje proizvodnih enot s funkcijo aktivnega dušenja nihanj. Podobne funkcije bi tehnično sicer lahko bile vgrajene v pretvorniško-priključene enote, vendar tudi do tega v praksi ne prihaja.
- vpliv OVE na pomanjkanje naprav za regulacijo jalove moči oziroma napetosti. To funkcijo je mogoče s pretvorniškopriključenimi napravami sicer izvajati, vendar je v praksi zaenkrat redka.
- vpliv delikatnosti pretvorniške opreme OVE na nastavitve zaščite. Polprevodniška elektronika, ki je ključna sestavina pretvornikov, je zelo občutljiva na kakršnekoli preobremenitve. Posledično je njihova zaščita z namenom zagotavljanja daljše življenjske dobe, nastavljena ostreje kot pri konvencionalnih proizvodnih enotah, ki lahko kratkotrajno prenesejo izjemne preobremenitve.

6 SKLEP

V čakanju na končno poročilo ENTSO-E, mnogi premišlujejo o morebitnih prispevkih OVE k obravnavanemu razpadu EES na iberškem polotoku. Naprav samih, t.j. fotovoltaičnih panelov, vetrnih turbin ali pretvornikov vsekakor ne moremo kriviti kot (vsaj ne edini) vzrok tega odmevnega dogodka. Ni pa mogoče zanikati, da bi z bolj premišljeno integracijo OVE in ustrežno ter celovito pripravo EES na visoke deleže pretvorniško-priključenih naprav verjetnost takšnega dogodka močno znižali. Seveda to ne more biti in tudi ne bo mogoče brez velikih investicij [6]. Zanašanje na dobro zasnovo, pre-dimenzioniranost in robustnost obstoječega EES nas lahko pripelje zgolj do določene točke, ko nas bodo razmere pripeljale do tega, da se ponovno globoko v sebi zavemo življenjsko pomembne funkcije EES v naši družbi. Neprestanega manjšanja

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

- [6] MIHALIČ, Rafael. Kako poceni je električna energija iz obnovljivih virov = How cheap is electricity from renewable sources. V: OGRIN, Tomaž (ur.), MIHALIČ, Rafael (ur.). Miti in resnice o varovanju okolja = Myths and Truths about Environmental Protection : Informacijska družba - IS 2023 = Information Society - IS 2023 : zbornik 26. mednarodne multikonference = proceedings of the 26th International Multiconference : zvezek D = volume D : 11. oktober 2023, 11 October 2023, Ljubljana, Slovenia. Ljubljana: Institut "Jožef Stefan", 2023. Str. 35-40, ilustr. Informacijska družba. ISBN 978-961-264-279-2. ISSN 2630-371X.
http://library.ijs.si/Stacks/Proceedings/InformationSociety/2023/IS2023_Volume-D%20-%20Okolje.pdf

Nekateri ostali uporabljeni viri

- [7] https://x.com/jacob_maroga/status/1916855033481597116?t=cRLySsKPujIoGfkm6GgA&s=03
- [8] <https://physics.stackexchange.com/questions/848666/what-is-induced-atmospheric-vibration>
- [9] <https://wattsupwiththat.com/2025/04/28/congrats-to-spain-nation-goes-100-renewable-as-of-april-16th-2025-but-then-mass-blackouts-hit-spain-portugal/>
- [10] https://x.com/Object_Zero/status/1916863929055154532
- [11] <https://www.youtube.com/watch?v=dzd6JvJecVY>
- [12] <https://www.netzerowatch.com/s/Porter-Blackouts-n33z.pdf>
- [13] https://www.telegraph.co.uk/business/2025/04/28/blackout-risk-made-worse-by-netzero/?WT.mc_id=e_DM572583&WT.tsrc=email&etype=Edi_FTE_New&utm_source=email
- [14] <https://eike-klima-energie.eu/2025/04/29/blackout-in-spanien-wie-die-energie-wende-europas-stromnetze-ueberfordert/>
- [15] <https://www.delo.si/mnenja/gostujoce-pero-nauki-razpada-spanskega-elektroenergetskega-sistema>
- [16] <https://www.youtube.com/watch?v=EqLeJE3j3-w>
- [17] https://www.youtube.com/watch?v=KaBx8rhN_Z4
- [18] NREL: April 28th 2025 Iberian Blackout:
Analysis of available information Jose Daniel Lara, Ben Kroposki, Tarek Elgindy, Rodrigo Henriquez-Auba, Jarrad Wright
- [19] ERSE explica, INVESTIGATION INTO THE IBERIAN BLACKOUT OF 28 APRIL 2025, Lisbon, 12 May 2025
- [20] Friedrich Alexander University, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther
Blackout and System Restoration on the Iberian Peninsula on April 28 and 29, 2025, Factual analysis based on publicly available data and information

O podnebni občutljivosti na vsebnost CO₂ v ozračju

On the Climate Sensitivity to Atmospheric CO₂ Concentration

Erik Margan
Experimental Particle Physics Dept.
Jožef Stefan Institute
Ljubljana, Slovenia
erik.margan@ijs.si

Povzetek

Medvladni odbor za podnebne spremembe (IPCC) v svojem zadnjem poročilu (AR6, 2020) določa za 3°C višjo globalno povprečno temperaturo kot najverjetnejšo vrednost podnebne občutljivosti na podvojitve koncentracije toplogrednih plinov v ozračju, kar naj bi se zgodilo do konca XXI stoletja, upoštevajoč scenarij BAU (*business as usual*). Ob tem navaja še najverjetnejše območje zanesljivosti med 2°C in 4,5°C. Pokazali bomo, da način določanja podnebne občutljivosti (ki temelji na termičnem sevalnem ravnovesju planeta) kot ga uporabljajo pri IPCC sloni na nekaterih napačnih predpostavkah in je zato zgrešen, tako določena vrednost občutljivosti pa je previsoka. Predstavili bomo pravičen način za določanje tega parametra, po katerem bomo dobili mnogo nižjo vrednost.

Ključne besede

Podnebna občutljivost, vsebnost toplogrednih plinov, sevalno ravnovesje, adiabatno segrevanje, prenos toplote v ozračju.

Abstract

Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) in its latest report (AR6, 2020) states a 3°C higher global average temperature as the most likely value of the climate sensitivity to a doubling of greenhouse gases concentration, which is predicted to occur by the end of the XXI century under the BAU (*business as usual*) scenario. A most likely range of 2°C to 4.5°C is also stated. It will be shown here that the method of estimating the climate sensitivity as used by the IPCC (which is based on the thermal radiative balance) is wrong, so the obtained sensitivity is too high. Here a correct method is given, by which a much lower sensitivity value is obtained.

Keywords

Climate sensitivity, concentration of greenhouse gases, thermal radiative balance, adiabatic warming, atmospheric heat transfer.

Opomba

Pričujoči prispevek je nastal na osnovi članka [6]; vsebina je posodobljena na osnovi novejših podatkov iz zadnjega poročila IPCC AR6 [1]. Hkrati so v ponujeni razlagi pravilnega načina izračuna podnebne občutljivosti popravljene nekatere manjše metodološke nedoslednosti, v skladu s standardno teorijo regulacije v povratnih zankah.

1 Definicija podnebne občutljivosti

IPCC v svojih poročilih uporablja dve definiciji podnebne občutljivosti, pri čemur se obe nanašata na spremembo globalne povprečne temperature pod vplivom podvojitve vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju. V prvem primeru gre za prehodno občutljivost (*transitional climate sensitivity*, TCS), kjer se količina toplogrednih plinov postopoma povečuje do podvojitve. Ta način se uporablja za določanje učinka različnih scenarijev omejevanja izpustov toplogrednih plinov in je dokaj zapleten za izračunavanje, ne prinaša pa spoznanja o dinamičnih lastnostih in odzivu podnebja kot sistema. Ravnovesna občutljivost (*equilibrium climate sensitivity*, ECS) pa predvideva podvojitve vsebnosti toplogrednih plinov v razmeroma kratkem času, nakar spremlja odziv sistema dokler ta ne doseže novo termično ravnovesje pri ustrezno višji temperaturi. Zato je ta način bolj primeren za določanje lastnosti sistema in njegove odzivnosti, poleg tega pa je razmeroma preprost za izračun. V nadaljevanju bomo uporabljali ECS in razložili ugotovitve, ki iz tega izhajajo.

2 Termično sevalno ravnovesje planeta

IPCC kot osnovo za izračun globalne povprečne temperature izhaja iz zahteve po termičnem sevalnem ravnovesju: koliko toplote sprejme planet od Sonca, toliko je mora tudi oddati, pri čemur pa je mogoče, da se del toplotnega toka začasno ohrani v snovi z visoko termično kapaciteto (v primeru Zemlje je to voda), zaradi česar se ravnovesje ob spremembi pogojev vzpostavi šele po razmeroma dolgem času.

Sevalno ravnovesje določajo poleg sončevega sevanja (s površinsko gostoto sevalne moči $S_0 = 1361 \text{ W/m}^2$) še geometrija in rotacija planeta. Vstopno sevanje je sorazmerno površini kroga z radijem enakim radiju planeta ($A_s = \pi R^2$), izstopno sevanje pa je sorazmerno celotni površini planeta ($A_p = 4\pi R^2$). Povprečna gostota sevalne moči vstopnega sevanja je zato enaka sončevemu sevanju pomnoženemu z razmerjem obeh površin:

$$j_v = S_0 A_s / A_p = S_0 / 4 = 340,25 \text{ W/m}^2$$

Vendar do površja planeta ne pride celotno sevanje, del se odbije od svetlih površin oblakov, ter poledenelih in zasneženih površin. Ocenjena povprečna vrednost albeda znaša $a = 0,294$. Zato

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).
Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia
© 2025 Copyright held by the owner/author(s).
<https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.10>

površje absorbira vstopno gostoto sevalne moči zmanjšano za albedo. Segreto površje nato oddaja enako gostoto moči izstopnega infrardečega sevanja:

$$j_i = (1-a)j_v = 240 \text{ W/m}^2$$

Dejanska vrednost, ki jo izmerijo sateliti je sicer nekoliko nižja:

$$j_{ii} = 232 \text{ W/m}^2$$

Razlika je majhna, ni pa nepomembna. Lahko jo pripišemo različnim vplivom, med drugimi tudi dejstvu, da satelitski senzorji niso enako občutljivi na vse dele sevalnega spektra. Tukaj bomo še naprej upoštevali teoretično vrednost 240 W/m^2 .

Gostota sevalne moči je odvisna od četrte potence absolutne temperature (v Kelvinih), kot določa Stefan-Boltzmannov zakon:

$$j = \sigma T^4$$

kjer je Stefanova konstanta $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Iz znanega sevanja lahko izračunamo sevalno temperaturo (čeprav to ni vedno možno zaradi spektralne odvisnosti, ki je lahko drugačna od Planckovega spektra za idealno črno telo), kar za izstopno sevanje 240 W/m^2 znaša:

$$T_i = (j_i/\sigma)^{1/4} = (240/5,67 \times 10^{-8})^{1/4} = 255 \text{ K}$$

kar je enako -18°C .

Del vstopnega sevanja se absorbira že v ozračju, in sicer okoli 23%, kar pomni, da tla v povprečju segreva le:

$$j_p = (1-0,23)(1-a)j_v = 185 \text{ W/m}^2$$

Ta delež potem tla tudi izsevajo. Vendar bi temu sevanju po Stefan-Boltzmannovem zakonu ustrezala temperatura tal:

$$T_p = (j_p/\sigma)^{1/4} = (185/5,67 \times 10^{-8})^{1/4} = 239 \text{ K}$$

To pa je samo -34°C . Na podlagi dolgoletnega povprečja temperaturnih meritev pa vemo, da mora biti povprečna temperatura zraka pri tleh okoli $+15^\circ\text{C}$, ali $T_i = 288 \text{ K}$. In tej temperaturi ustreza večja gostota sevalne moči:

$$j_i = \sigma T_i^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times 288^4 = 390 \text{ W/m}^2$$

Vidimo da je $j_i > j_p$ in seveda tudi $T_i > T_p$. Kako to lahko pojasnimo?

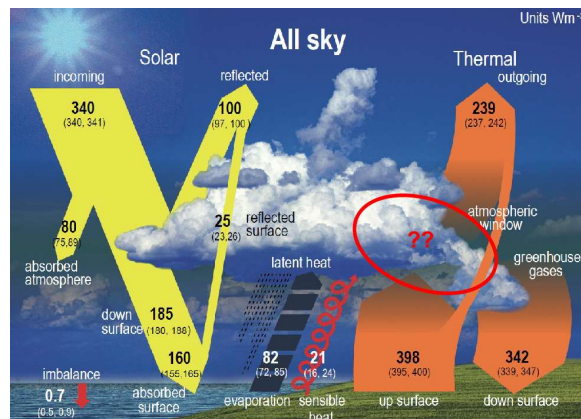
Vemo da temperatura zraka pada z višino in sicer za okoli 1°C za vsakih 100 m višine (suha adiabata), oziroma za okoli $0,6^\circ\text{C}$ (vlažna adiabata). Če je temperatura zraka pri tleh $T_i = 288 \text{ K}$ in je na neki višini $T_i = 255 \text{ K}$, pomeni, da mora biti razlika temperatur $\Delta T = T_i - T_i = 33 \text{ K}$. Ob vlažni adiabati potem lahko izračunamo višino, ki ustreza temperaturi zraka $T_i = 255 \text{ K}$:

$$h_i = 100 \times \Delta T/0,6 = 100 \times 33/0,6 = 5500 \text{ m}$$

To je višina, ki ustreza približno polovici debeline ozračja, kjer je tudi srednja specifična masna gostota ozračja $0,6 \text{ kg/m}^3$, torej pol manjša kot ob normalnih pogojih pri tleh ($1,2 \text{ kg/m}^3$), tlak na

tej višini pa je približno enak tretjini pritiska pri tleh (300 hPa v primerjavi s 1013 hPa). Plast zraka na tej višini je pretežno odgovorna za izstopno sevanje, ki ga merimo s sateliti.

Na podlagi teh števil so pri IPCC za AR6 sestavili diagram enakovrednih sevalnih pretokov moči v ozračju, SI.1. Iz tega diagrama lahko še razberemo, da zaradi močnega sevanja tal prihaja do absorpcije sevanja v ozračju, kar skupaj z deležem absorbiranega vstopnega sončevega sevanja predstavlja toplogredni učinek ozračja. Uradna klimatologija trdi, da zaradi toplogrednega učinka ozračje močnejše seva nazaj proti tlam, poleg deleža, ki ga izseva proti vesolju.



SI.1: Enakovredni sevalni pretoki moči v ozračju, AR6, ch7, p934. Manjka vrednost toplogrednega učinka.

Na SI.1 je vsota zgornjih števil premajhna za 1 W/m^2 , vsota spodnjih pa je prevelika za $1,7 \text{ W/m}^2$. Torej bi namesto neravnovesja (*imbalance*) za $0,7 \text{ W/m}^2$ morali zapisati $1,7 \text{ W/m}^2$. Sicer pa v poglavju 7 poročila AR6 na strani 925 (glej tudi Tabelo 7.1 na strani 938) takole opredeljujejo energijske pretoke v posameznih obdobjih:

The global energy inventory increased by 282 [177 to 387] Zettajoules (ZJ; 10^{21} Joules) for the period 1971–2006 and 152 [100 to 205] ZJ for the period 2006–2018. This corresponds to an Earth energy imbalance of 0.50 [0.32 to 0.69] W m^{-2} for the period 1971–2006, increasing to 0.79 [0.52 to 1.06] W m^{-2} for the period 2006–2018, expressed per unit area of Earth's surface.

SI.2: Opredelitev energijskih pretokov v besedilu AR6.

Vidimo, da so navedena območja nezanesljivosti dokaj široka.

A ne bodimo pikolovski. Precej večji problem predstavlja dejstvo, da poleg navedenih 12 števil manjka še (nesrečna?) 13. Ironično je da manjka ravno številka za absorpcijo sevalne moči toplogrednih plinov. Sicer v besedilu na str. 968 najdemo omenjeno, da mora biti toplogredni učinek $G = 159 \text{ W/m}^2$ (torej $398-239$). Potem je vsota vseh absorbiranih pretokov enaka $80+82+21+159 = 342$, kar ustreza sevanju toplogrednih plinov proti tlam. Ni pa jasno zakaj naj bi toplogredni plini sevali nesimetrično, 342 W/m^2 proti tlam in 239 W/m^2 proti vesolju. Fizikalno bi pričakovali, da bi morale biti sevanje simetrično, saj gre za sevanje istih molekul z isto temperaturo. Pa tudi sicer

lahko vidimo, da se v sistemu pretaka mnogo več moči, kot je Zemlja dobi od Sonca. Kratkoročno je to sicer možno, če bi sistem iz nekega razloga spremenil absorpcijske parametre, vendar le dokler se ne vzpostavi drugačno ravnovesje.

Sklepamo lahko, da ima model na Sl.1 resne pomanjkljivosti.

3 Modeliranje termičnega odziva

Vendar nas tukaj bolj zanima temperaturna razlika 33 K, ki naj bi bila posledica absorpcije toplogrednih plinov v ozračju. Ta temperaturna razlika je faktor, ki množi ostale vplive v ozračju, zaradi česar predvidevamo, da je tako izražena občutljivost na spremembe precej visoka.

A preden se lotimo problema občutljivosti pogledjmo, kako koncentracija toplogrednih plinov v ozračju (predvsem CO₂) vpliva na absorpcijo sevanja. Laboratorijske meritve nam nakazujejo, da je absorpcija sevanja CO₂ sorazmerna logaritmu koncentracije, empirično smo prišli do naslednje relacije:

$$\Delta j = k \ln(C/C_0)$$

Tu je C_0 začetna koncentracija CO₂, C pa je nova spremenjena koncentracija, $\ln$ je naravni logaritem (po bazi $e = 2,71828...$). Konstanta sorazmernosti $k = 5,35$ pa je bila določena z minimiziranjem odstopanja od izmerjenih podatkov.

Iz te relacije sledi, da se ob vsaki podvojitvi koncentracije CO₂ ($C/C_0 = 2$) absorpcija sevanja poveča za enako vrednost, in sicer:

$$\Delta j = 5,35 \ln(2) = 3,7 \text{ W/m}^2$$

Sprememba absorpcije sevanja kot posledica podvojene koncentracije CO₂ vpliva tudi na spremembo globalne povprečne temperature površja planeta po naslednjem obrazcu:

$$\Delta T_p = \Delta j \{T_p / [S_0(1-a)]\} = 3,7 \{288 / [1361(1-0,294)]\} = 1,1 \text{ K}$$

Če pa pogledamo zgodovinsko izmerjene koncentracije CO₂ in temperature lahko vidimo, da je bila leta 1850 $C_0 = 315$ ppm, danes (leta 2020 ob izidu IPCC AR6) pa je $C = 420$ ppm, torej se je koncentracija povečala za $420/315 = 1,33$ ali le za 33%. Zato po relaciji za absorpcijo sevanja pričakujemo manjšo spremembo, in sicer $\Delta j = 5,35 \ln(420/315) = 1,54 \text{ W/m}^2$. Posledično pa bi se temperatura povečala za samo $\Delta T_p = 0,46 \text{ K}$. Toda globalno povprečje izmerjenih temperatur kaže, da se je to v istem obdobju povečalo od okoli 14,5°C na 15,55°C (287,5 K na 288,55K), ali za 1,05 K.

Zaradi tega uradna klimatologija ugotavlja, da ji za pojasnitev zgodovinsko izmerjenih podatkov nekje manjka faktor 3. Tega pa najdejo v povratni zanki prek vodne pare in sicer sklicujoč se na Clausius-Clapeyronovo relacijo, po kateri vsako segrevanje zraka za 1 K omogoča povečanje vlažnosti zraka do 7%. Ker je vodna para močan toplogredni plin, katere absorpcijski spekter pokriva precej širši pas valovnih dolžin kot CO₂, je vpliv te povratne zanke lahko razmeroma velik.

Toda uradna klimatologija pri tem ne upošteva vpliva vodne pare same na temperaturo, kar razlaga s tem, da se ta vpliv natančno kompenzira s tvorbo oblakov in zato povečanim albedom, kar ohlaja površje. Pozitivna povratna zanka prek vodne pare torej zgolj ojačuje vpliv CO₂.

Vrnimo se problemu občutljivosti. V pogojih brez povratne zanke je občutljivost λ_0 (Planckova osnovna občutljivost) določena kot preprosto razmerje med spremembo temperature in spremembo sevalne absorpcije:

$$\lambda_0 = \Delta T_p / \Delta j_i = 1/4\sigma T^3 = T/4\sigma T^4$$

oziroma številčno:

$$\lambda_0 = 255/(4 \times 240) = 0,2656 \text{ KW}^{-1}\text{m}^2$$

Pri tem pa IPCC upošteva še odvisnost od geografske širine in za globalno povprečje določa nekoliko višjo vrednost:

$$\lambda_0 = 0,3125 \text{ KW}^{-1}\text{m}^2$$

To vrednost bomo uporabili tudi tukaj, da se držimo enakega postopka kot pri IPCC. Opozoriti pa je treba, da je v poročilih IPCC običajno navedena inverzna vrednost $3,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Celotna vrednost λ pa je enaka vsoti posameznih prispevkov ostalih povratnih vplivov:

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

Pri tem se nekatere komponente lahko s časom spreminjajo, nekatere pa so med seboj odvisne, na pr., suha in vlažna adiabatata sta seveda odvisni od količine vlage v zraku. Ker je to težko enoznačno določiti, so območja nezanesljivosti precej široka.

Lahko torej enačbo za spremembo temperature kot posledico delovanja povratnih zank zapišemo v naslednji obliki:

$$\Delta T = \lambda_0 (\Delta j + \lambda_1 \Delta T + \lambda_2 \Delta T + \lambda_3 \Delta T \dots + \lambda_n \Delta T)$$

Brezdimenzijski faktor povratne zanke f je določen kot produkt osnovne Planckove občutljivosti λ_0 in posameznih prispevkov λ_i :

$$f = \lambda_0 \lambda$$

V resnici, kot bomo videli kmalu, je v poročilih IPCC faktor f določen za nazaj iz zgodovinsko izmerjenih podatkov.

Analogno standardni teoriji regulacije v zaprti zanki faktor f ustreza izrazu βA_0 , kjer je β delež izhodne informacije, ki se vrača v sistem, A_0 pa je ojačenje sistema z odprto zanko, brez povratnega deleža. Toda v standardni teoriji regulacije želimo imeti stabilen sistem, zato imamo običajno opravka z negativno povratno zanko in izhodno informacijo atenuirano za faktor β peljemo na invertirajoči vhod sistema, zaradi česar imamo naslednji izraz za ojačenje zaprte zanke:

$$A_z = A_0 / [1 - (-\beta A_0)] = A_0 / (1 + \beta A_0)$$

V uradni klimatologiji pa velja domneva o nestabilnem sistemu s pozitivno povratno zanko, zato:

$$A_z = 1 / (1 - f)$$

Potem spremembo temperature sistema zaradi delovanja povratne zanke po ustreznem dolgem času lahko izrazimo kot produkt osnovne razlike temperature površja in ojačenja sistema:

$$\Delta T = A_z \Delta T_p$$

Brez povratne zanke je $f=0$, $A_Z = 1$ in $\Delta T = \Delta T_p$.

V sistemu z negativno povratno zanko je $f < 0$, $A_Z < 1$ in zato bo $\Delta T < \Delta T_p$, med tem ko v sistemu s pozitivno povratno zanko velja $f > 0$, $A_Z > 1$ in zato $\Delta T > \Delta T_p$.

Vrednosti, ki jih za f navajajo v poročilih IPCC, ter v tam citiranih člankih in v računalniških algoritmi (CMIP3-CMIP5) so relativno velike, pa tudi v širokem razponu, med 0,3 in 0,75. Zaradi tega je tudi ojačenje sistema razmeroma veliko, kar se ne ujema z izmerjenimi temperaturnimi trendi. V naslednjih vrsticah bomo videli zakaj je temu tako in kakšne so posledice.

Že smo določili spremembo temperature površja ΔT_p , kar lahko sedaj izrazimo takole:

$$\Delta T_p = \Delta j_0 \lambda_0 = 3,7 / 3,2 = 1.15 \text{ K}$$

Srednja ocena ravnovesne občutljivosti ΔT_s (Charney [2], pa tudi AR6) znaša 3,3 K (z območjem nezanesljivosti $\pm 1,5$ K). Iz tega lahko podamo oceno za srednjo vrednost f :

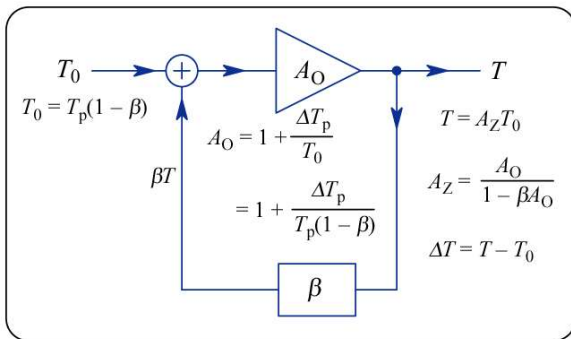
$$f = 1 - \Delta T_p / \Delta T_s = 1 - 1,15 / 3,3 = 0,65$$

Srednja ocena ojačenja sistema je potem enaka:

$$A_Z = 1 / (1 - 0,65) = 2,857$$

To nakazuje zakaj računalniški klimatski modeli napovedujejo v povprečju skoraj $3\times$ večje segrevanje, kot smo ga dejansko izmerili v zadnjih 30 letih, saj imajo vsi sistemsko vgrajeno preveliko ojačenje.

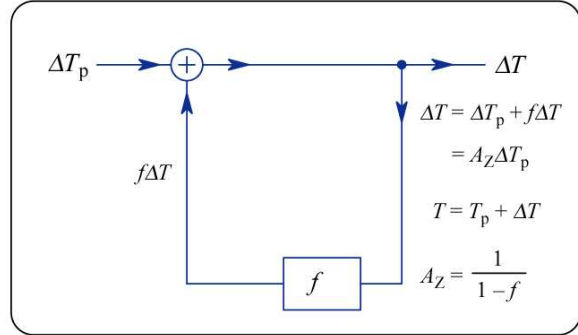
Ugotoviti moramo še zakaj pride do take visoke vrednosti ojačenja. To najpreprosteje ugotovimo, če primerjamo standardno (H. W. Bode, [16]) povratno zanko iz regulacijske teorije v elektroniki z znančnim modelom zgrajenim na osnovi enačb, kot jih uporabljajo v klimatologiji. Na Sl.3 je predstavljena Bodejeva pozitivna povratna zanka z ustreznimi relacijami za temperaturo:



Sl.3: Standardna Bodejeva regulacijska povratna zanka.

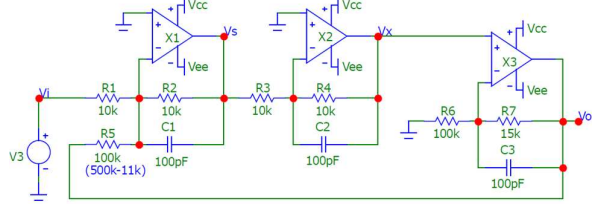
Na Sl.4 pa je predstavljena povratna zanka na osnovi relacij uporabljenih v uradni klimatologiji. Ključna razlika, ki jo je potrebno poudariti je v dejstvu, da povratna zanka v uradni klimatologiji ojačuje zgolj spremembo površinske temperature ΔT_p , kar je fizikalno nesmiselno. Ojačenje mora v sistemski odziv vključevati celotno vhodno količino T_0 , kot je to označeno

na Sl.3. Zaradi tega mora imeti zanka na Sl.4 veliko večje zanačno ojačenje A_Z za enak izstopni učinek, tudi če je ojačenje odprte zanke $A_O = 1$.



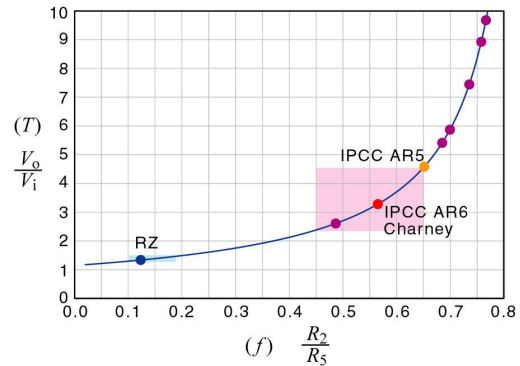
Sl.4: Povratna zanka na osnovi klimatoloških relacij IPCC.

Na Sl.5 je električna shema vezja zgrajenega na osnovi Sl.3, delovanje lahko preveri vsak elektrotehnik. Ojačevalnik X1 invertira vsoto vhodnega toka V_i/R_1 in povratnega toka V_o/R_5 , zaradi česar je potrebna napetost $V_s = -R_2(V_i/R_1 + V_o/R_5)$ spet invertirati (V_x) z ojačevalnikom X2, ojačenje katerega je enako $-R_4/R_3 = -1$. Ojačevalnik X3 ima ojačenje $1 + R_7/R_6 = 1,15$. Povratno zanko $\beta = R_2/R_5$ spreminjamo z vrednostjo R_5 v razponu med 500 kΩ in 11 kΩ, torej bo β med 0,02 in 0,909.



Sl.5: Shema dejanske vezave za simulacijo zanke na Sl.3.

Normirani odziv vezja V_o/V_i prikazuje Sl.6.

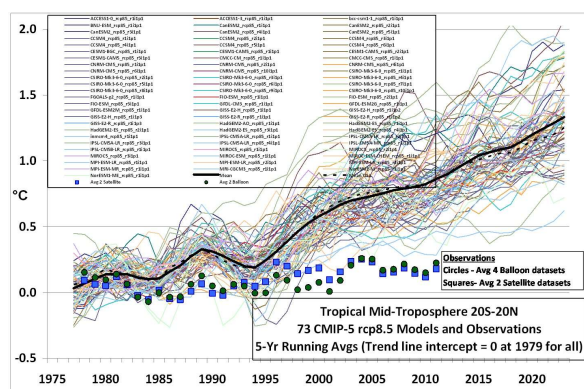


Sl.6: DC odziv vezja na Sl.5 na spremembo razmerja R_2/R_5 .

V Sl.6 modra točka RZ označuje odziv na parametre izračunane na osnovi regulacijske zanke. Rdeča točka označuje odziv na parametre kot so podani v IPCC AR6 [1], ter Charney [2].

Oranžna točka označuje odziv na parametre podane v IPCC AR5, vijolične točke pa so rezultati iz nekaterih člankov citiranih v poročilih IPCC. Izračuni skladni s standardno teorijo regulacije ob ojačenju odprte zanke $A_0 = 1,15$ in β v razponu med 0,1 in 0,2 dajo sistemsko občutljivost v razponu med 1,1 in 1,5 K. Ker pa pri IPCC uporabljajo napačno metodo, dobijo srednjo vrednost občutljivosti 3,2 K z območjem nezanesljivosti med 2,5 in 4,5 K. Pri nekaterih avtorjih, katerih članki so med citiranimi v poročilu IPCC, pa so vrednosti še višje, do 10 K.

Zaradi te napake, ki jo imajo v svojih algoritmi vgrajeno vsi računalniški klimatski programi, so vse njihove napovedi prihodnjih temperaturnih trendov preveliki za približno faktor 3. To lahko vidimo iz primerjave trendov računalniških napovedi in izmerjenega segrevanja ozračja, Sl.7, kar je ob svojem pričevanju v ameriškem Kongresu pokazal dr. John Christy [17].



Sl.7: Trendi računalniških napovedi segrevanja ozračja (73 CMIP-5 model po scenariju RCP8.5) v primerjavi s temperaturami izmerjenimi s sateliti (modri kvadratici) in meteorološkimi baloni (zeleni krogi). J. Christy, 2015.

4 Zaključek

Računalniški klimatski modeli s pomočjo katerih analizirajo in napovedujejo prihodnje segrevanje planeta vsebuje vsaj eno resno napako, zaradi katere je klimatska občutljivost na podvojitev vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju (predvsem CO₂) ocenjena 5-6 krat previsoko. Posledično so tudi računalniško napovedani trendi preveliki vsaj za faktor 3.

Faktor pozitivne povratne zanke, izračunan na osnovi standardne teorije regulacije je relativno majhen in v nobenem primeru ne povzroča klimatske nestabilnosti planeta. Negativne povratne zanke (predvsem zaradi tvorbe oblakov in posledično zniževanja albeda), ki jih tukaj nismo vključili v obravnavo, zlahka prevladujejo nad dejavniki pozitivne povratne zanke in zato dolgoročno ohranjajo relativno stabilne klimatske razmere. Manjše spremembe so posledica variacij v časovni zakasnitvi akumulirane toplote predvsem v oceanih, pa tudi posledica naključnih lokalnih sprememb.

Človeški vpliv zaradi izpustov toplogrednih plinov je majhen, večji vpliv imajo lokalne spremembe namembnosti zemljišča.

Datasets / Viri podatkov

- [1] CO₂ Emissions 1850-2022
<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>

- [2] CO₂ concentrations measured at Mauna Loa, 1958-2024
https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt
 [3] Berkeley Earth Temperature Anomaly 1850-2020
http://berkeleyearth.lbl.gov/auto/Global/Complete_TAVG_complete.txt
 [4] HadCRUT v5.0 Temperature Anomaly 1850-2023
https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis_gl.txt
 [5] University of Alabama, Huntsville, satellite era temperature anomaly
https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tlt/uahncdc_lt_6.0.txt

References / Literatura

- [1] IPCC AR6 Workgroup 1, The Physical Science Basis, Full Report
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
 [2] J.G. Charney, A. Arakawa, D.J. Baker et al., Carbon dioxide and climate: a scientific Assessment. Report of an ad-hoc study group on carbon dioxide and climate, Climate Research Board, Assembly of Math. Phys. Sci., Nat. Research Coun., Woods Hole, 1979.
 [3] J. Hansen, A. Lacis, D. Rind et al., Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms, in: J. Hansen, T. Takahashi (Eds.), Climate Processes and Climate Sensitivity, AGU Geophysical Monograph 29, Maurice Ewing Vol. 5, Amer. Geophys. Union, Washington DC (1984) 130–163.
 [4] R.S. Lindzen, Y.-S. Choi, On the observational determination of climate sensitivity and its implications, Asia-Pacific J. Atmos. Sci. 47 (2011) 377–390.
 [5] C.W. Monckton of Brenchley, W. W.-H. Soon, D.N. Legates and W.M. Briggs, Why models run hot: results from an irreducibly simple climate model, Sci. Bull. 60:1 (2015) 122–135, doi:10.1007/s11434-014-0699-2.
 [6] C.W. Monckton of Brenchley, The temperature feedback problem, Energy & Envir. 26:5 (2015) 829-840.
 [7] J.A. Curry, P.J. Webster, Thermodynamics of atmospheres and oceans, Acad. Press, Amsterdam, 1999.
 [8] T. Friedrich, A. Timmermann, M. Tigheelaar et al, Nonlinear climate sensitivity and its implications for future greenhouse warming. Sci Adv 2(11) (2016) e1501923, doi:10.1126/sciadv.1501923.
 [9] N.G. Andronova and M.E. Schlesinger, Objective estimation of the probability density function for climate sensitivity. J. Geophys. Res. Atmos. 106 (2001) 22605–22611.
 [10] G. Myhre, E.J. Highwood, K.P. Shine and F. Stordal, New estimates of radiative forcing due to well-mixed greenhouse gases, Geophys. Res. Lett. 25 (1998) 2715–2718.
 [11] J.M. Gregory, W.J. Ingram, M.A. Palmer et al., A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity, Geophys. Res. Lett. 31 (2004) L03205, doi:10.1029/2003GL018747.
 [12] R.D. Cess, M.-H. Zhang, G.L. Potter et al., Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general-circulation models. Science 262(5137) (1993) 1252–1255.
 [13] H. Harde, Radiative transfer calculations and assessment of global warming by CO₂, Int. J. Atmos. Sci (2017), doi:10.1155/2017/9251034.
 [14] G. Myhre, C.L. Myhre, P.M. Forster and K.P. Shine, Halfway to doubling of CO₂ radiative forcing. Nature Geoscience (2017) advance online publication, September 18.
 [15] R.B. Skeie, T.K. Berntsen, G. Myhre et al., Anthropogenic radiative forcing time series from pre-industrial times until 2010. Atmos. Chem. Phys. 11 (2011) 11827–11857, doi:10.5194/acp-11-11827-2011.
 [16] H.W. Bode, Network Analysis and Feedback Amplifier Design, Van Nostrand Reinhold, New York, 1945.
 [17] John Christy Testimony May 13, 2015, Natural Resources Committee
<https://www.youtube.com/watch?v=Cz45fETw078>

Kmetijstvo in podnebne spremembe

mag. Tomaž Ogrin

tomaz.ogrin@ijs.si

POVZETEK

Namen prispevka je razbremeniti kmetijstvo od skrbi za razogljičenje in »zeleni prehod«, saj se je pokazalo, da več CO₂ pomeni več hrane. Za Slovenijo je to še posebej pomembno, ker smo po velikosti kmetijskih površin na prebivalca na repu v Evropi.

Množijo se znanstveni dokazi na osnovi meritev, da izpusti ogljikovega dioksida (CO₂) iz človekovih dejavnosti ne upravljajo z vremenom in podnebji na Zemlji. Prav tako izpusti metana (CH₄) od govedi nimajo vpliva na vreme in podnebja na našem planetu.

Zaključki političnega organa Organizacije združenih narodov (OZN) Medvladnega foruma za podnebne spremembe (IPCC) o krivdi CO₂ za podnebne spremembe, predvsem za rast temperatur ozračja, so zgolj hipoteze (domneve). V znanosti odločajo meritve. Rast CO₂ je posledica rasti temperatur, predvsem oceanov (70% površine) in ne obratno.

Kmetijstvu je potrebno pomagati pri prilagajanju na podnebne spremembe. Ni znanstvenih dokazov, da bi slovensko kmetijstvo lahko vplivalo na podnebne spremembe.

Pri obravnavi podnebnih sprememb je pomembno ločevanje vremenskih pojavov od dejanskih sprememb podnebja določenega območja. Zgornje ugotovitve so povzete iz strokovne in znanstvene literature, ki je dostopna za neposredno komuniciranje z njihovimi avtorji.

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s). Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia © 2025 Copyright held by the owner/author(s). <https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.11>

Ključne besede

Kmetijstvo, podnebne spremembe, ogljikov dioksid, razogljičenje, Državni svet, Vlada

SUMMARY

The purpose of this article is to relieve agriculture of concerns about decarbonization and the "green transition," as it has been shown that more CO₂ means more food. This is particularly important for Slovenia, as we are at the bottom of the European rankings in terms of agricultural area per capita.

Scientific evidence based on measurements is mounting that carbon dioxide (CO₂) emissions from human activities do not control the Earth's weather and climate. Similarly, methane (CH₄) emissions from cattle have no impact on the weather and climate on our planet.

The conclusions of the United Nations (UN) political body Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) regarding CO₂'s responsibility for climate change, particularly for rising atmospheric temperatures, are merely hypotheses (assumptions). In science, measurements are decisive. The increase in CO₂ is a consequence of rising temperatures, especially in the oceans (70% of the surface), and not the other way around. Agriculture needs help in adapting to climate change. There is no scientific evidence that Slovenian agriculture could influence climate change.

When discussing climate change, it is important to distinguish between weather phenomena and actual climate change in a given area.

The above findings are summarized from professional and scientific literature, which is available for direct communication with their authors.

Keywords

Agriculture, climate change, carbon dioxide, decarbonisation, National Council, Government

UVOD

Splošno

Ločujemo vreme in podnebje. Po dogovoru v Svetovni meteorološki organizaciji (WMO) in Slovenskem meteorološkem društvu (SMD) termin *podnebje* pomeni značilnosti vremena skozi 30 let. Podatke o vremenu pri nas zbira Agencija RS za okolje (ARSO). Teh je veliko, med temi temperatura, vlažnost, padavine, osončenost/oblačnost in še več parametrov. (1)

Vreme napovedujejo za 15 dni, sprememb različnih podnebij pa še ni uspelo napovedati. Vseeno nekaj sprememb opazamo kot na primer "zelene zime", višje povprečne temperature, manj snega.

Večje pogostosti ali odsotnosti nekaterih vremenskih pojavov pa že lahko pomenijo spremembe lokalnega podnebja.

Slovenija ima pestro, razmeroma težko napovedljivo vreme. Imamo mešanico podnebnih vplivov, ki jih ARSO takole opredeli:

„V Sloveniji imamo tri prevladujoče tipe podnebja, na posameznih območjih pa se njihovi vplivi prepletajo: v vzhodni Sloveniji imamo zmerno celinsko podnebje, v osrednji Sloveniji subalpsko (v gorskem svetu alpsko) in zahodno od Dinarsko-Alpske pregrade submediteransko podnebje.“

Zato so v Sloveniji vplivi na kmetijstvo in gozdarstvo zelo različni po pokrajinah in po nadmorskih višinah.

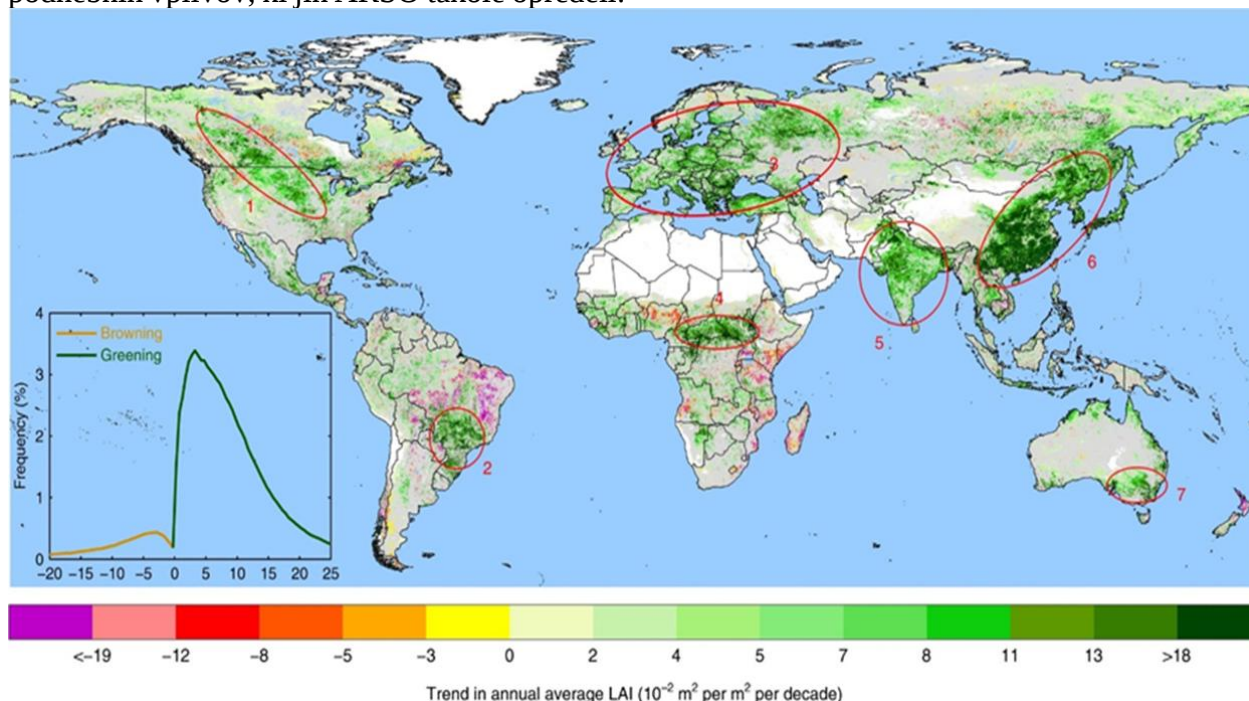
Med podnebnimi spremembami izstopa segrevanje ozračja planeta. Posebej za kmetijsko pridelavo poljščin in za rast gozdov pa je pozitivnega pomena rast ogljikovega dioksida v zraku (fotosinteza).

Vloga CO₂ v ozračju

Več CO₂ v zraku pomeni ozelenitev planeta.

Na primer: Satelitski posnetki in satelitski podatki v obdobju 2000 – 2017. (2)

Izpostavljena je ozelenitev v Indiji in na Kitajskem. Na sliki so obkrožena območja intenzivnejše ozelenitve:



Na Kitajskem **ozelenitev** izhaja iz gozdov (42 %) in obdelovalnih površin (32 %), v Indiji pa

predvsem iz obdelovalnih površin (82 %) z manjšim prispevkom gozdov (4,4 %). Kitajska

pripravlja ambiciozne programe za ohranjanje in širjenje gozdov, da bi ublažila degradacijo tal, onesnaževanje zraka in podnebne spremembe. Proizvodnja hrane na Kitajskem in v Indiji se je od leta 2000 povečala za več kot 35 %, predvsem zaradi povečanja pridelovalnih površin z večkratnimi posevki, ki jih omogoča uporaba gnojil ter namakanje površin in/ali podtalnice.

CO₂ v atmosferi pa ima še eno pomembno vlogo:

CO₂ reagira z vodo in s tem zadržuje pH morske vode na okrog 8,2. Vzorec morske vode, ki sem ga vzel pri Piranu, je v laboratoriju na Inštitutu Jožef Stefan pokazal prav tak pH.

Sicer pa pH morja redno meri Morska biološka postaja v Piranu, del Nacionalnega inštituta za biologijo v Ljubljani. Nad morsko gladino pa merijo tudi CO₂.

Za primerjavo: pH 8,2 dobimo, ko v vodi raztopimo sodo bikarbono, natrijev bikarbonat (NaHCO₃), ki jo včasih popijemo, da pomirimo želodec. In res, večina CO₂ v oceanih je v obliki bikarbonatnih ionov (HCO₃⁻), ob sproščanju kislih H⁺ ionov.

Samo bazične, raztopljene soli natrija, kalija pa kalcija in magnezija bi pH oceanov močno dvignile (na 11,4) in bi bilo življenje organizmov ogroženo.

Ni nobene bojazni, da bi morja postala kislila (pod pH 7). Če bi bilo dvakrat več CO₂ v zraku, bi pH padel iz 8,2 na 7,9. **(3)**

Deževnica (skoraj destilirana voda) je pa rahlo kislila, pod pH 7, ko izpira CO₂ iz zraka.

Prav reakcija CO₂ z vodo je vzrok, da se velike količine CO₂ iz ozračja raztapljajo v vodi, za razliko od drugih plinov v zraku, ki se samo raztapljajo, z vodo pa ne reagirajo, npr. kisik.

In še ena pomembna lastnost: v mrzlih oceanskih vodah se raztaplja še enkrat več CO₂ kot v toplem ekvatorialnem pasu. Vsak dvig temperature oceanov izžene CO₂ v ozračje.

To je tudi eden od vzrokov za zviševanje naravnega CO₂ v atmosferi.

Ogljikov dioksid je torej v dinamičnem odnosu do oceanov (temperatura ter delni tlak CO₂ v zraku – Henryjev zakon, ter ponor zaradi tvorbe apnenca CaCO₃), ki pokrivajo 70 % površine Zemlje, prav tako pa tudi do rastlinstva.

OBRAVNAVA PODNEBNIH SPREMEMB

Politika in znanost obravnavata podnebne spremembe največ iz dveh vidikov:

A. BLAŽENJE PODNEBNIH SPREMEMB B. PRILAGAJANJE NA PODNEBNE SPREMEMBE

A. Blaženje podnebnih sprememb

Podnebne spremembe, predvsem rast povprečne temperature ozračja (navidezna temperatura) naj bi ublažili tako, da bi zmanjšali izpuste CO₂ človeškega izvora in izpuste metana (CH₄) iz kmetijstva, pretežno iz govedoreje.

Blaženje podnebnih sprememb je privzela politika, npr.: s Pariškim sporazumom (2016). V smeri blaženja najdemo posebej v EU termina kot: *neto ničelne emisije toplogrednih plinov do leta 2050*, poznano tudi kot "*razogljičenje*" in *evropski zeleni dogovor*.

Cilj naj bi bil omejitev globalnega segrevanja pod 1,5 °C. Za blaženje so predvidena velika finančna sredstva in prisila v obliki davka na izpuste CO₂. **(4)**

Žal pa manjkajo poljudno predstavljena znanstvena dejstva, ki bi upravičila te ukrepe in velika denarna sredstva ter davek na CO₂.

Ljudje si ne morejo pomagati s Poročili IPCC, Medvladnega, torej političnega, foruma za podnebne spremembe na več tisoč straneh.

Ker gre za ukrepe, katerih posledice bi močno negativno prizadele kmetijstvo in ostalo gospodarstvo, vključno z energetiko. Nekateri posledice se že kažejo, odtod protesti, tudi v EU. **Zato je ključnega pomena pridobiti**

znanstvene podlage, ki upravičujejo te ukrepe.

Poleg tega pričakujemo tudi PSPG (SWOT) analizo blaženja podnebnih sprememb, prirejeno iz gospodarstva: Prednosti (Strengths), Slabosti (Weaknesses), Priložnosti (Opportunities), Grožnje (Threats). **(5)** To je pripomoček za ocenjevanje primernosti ukrepov.

Evropska komisija, ki izdaja vrsto podnebnih direktiv, ni izdelala še nobenega poročila o učinkih večletnega razogljičenja na podnebne spremembe. Nepoznavanje učinkov pa odpira razpravo o smiselnosti ukrepov, še posebej o na pamet določenih odstotkih obnovljivih virov energije ter dodajanje biogoriv v bencin in dizel.

A1. Količinska razmerja plinov v ozračju

V odsotnosti znanstvenih utemeljitev omenjenih ukrepov skušamo najprej obnoviti šolsko sliko naše atmosfere. Najpomembnejši podatek je količinska sestava ozračja.

Sestava suhega zraka v volumskih odstotkih je: dušik N_2 78 %, kisik O_2 21 %, argon Ar 0,9 %, plini v sledovih: ogljikov dioksid CO_2 0,042 %, metan CH_4 0,0002 %.

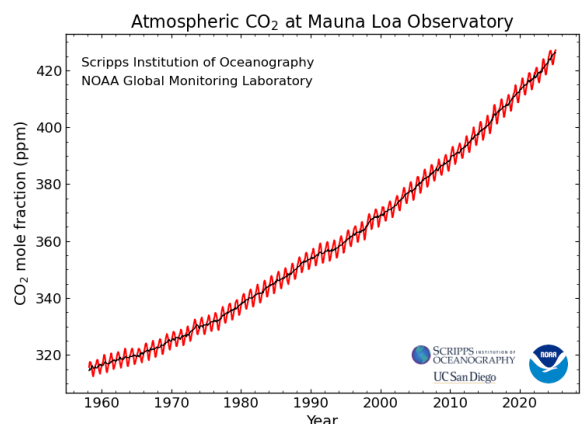
Vlažen zrak pa vsebuje še vodo (H_2O) povprečno med 1 in 4 %, kar malo zniža ostale odstotke. **(6)(7)**

Posebej nas zanima koncentracija CO_2 , domnevnega povzročitelja segrevanja ozračja. Znanost in politika uporabljata podatek za koncentracijo CO_2 v zraku iz meritev na gori Mauna Loa, na višini 3.400 m, na Havajih, v Tihem oceanu. Podatek pomeni ves CO_2 , tako naravnega kot človeškega izvora (izpusti). **(8)** Slika 1.

Podatek za mesec avgust **2025 je 425,5 ppmv** CO_2 v suhem zraku, leto prej pa je bila koncentracija CO_2 423,0 ppmv. Najdemo pa tudi podatke za koncentracije CO_2 po svetu.

V odstotkih iz enote ppmv (parts per million, v volumskih deležih), $(425,5 \text{ m}^3 \text{ } CO_2 / 1.000.000 \text{ m}^3 \text{ zraka}) \times 100 = \underline{0,04255 \% CO_2}$

Koncentracija 0,0426 % CO_2 pomeni torej celoten CO_2 v atmosferi, naravno prisoten in naši izpusti zraven, na Mauna Loi.



Slika 1: Časovni potek rasti CO_2 , Mauna Loa

Oglejmo si nekaj koncentracij in lastnosti CO_2 :

- spodnja kritična meja CO_2 v zraku je 150 ppmv, pri kateri rastline propadejo, s tem pa tudi večina drugih živih bitij, z nami vred.
- ogljikov dioksid uporabljamo tudi v rastlinjakih za boljšo rast, optimum je pri 1.200 ppmv CO_2 .
- pri vrenju mošta se tudi sprošča CO_2 . Ker je težji od zraka, se nabira na dnu zidanic in je nevaren, zaradi odsotnosti kisika. V zidanice zato vstopamo s prižgano svečo, ki na meji s CO_2 ugasne. S CO_2 gasimo požare.

Koncentracijo CO_2 v Sloveniji merijo tudi v ARSO. V tabeli so neuradne meritve celotnega CO_2 na postajah in sicer letna povprečja ter maksimum in minimum.

Neuradne zato, ker še ni predpisa, so pa natančne in točne. Za leto 2023 so polletne vrednosti. Enote: ppmv

2021	POV	MAX	MIN
LJ Bež	513	1268	453
Zagorje	408	678	354
Krvavec	326	351	305
Iskrba	424	709	360

2022	POV	MAX	MIN
LJ Bež	534	683	483
Zagorje	413	676	363
Krvavec	330	394	314
Iskrba	434	666	365
Solkan	429	510	393

2023/2	POV	MAX	MIN
LJ Bež	543	1143	496
Zagorje	409	516	360
Krvavec	333	362	313
Iskrba	426	726	373

A2. Delež CO₂ človeškega izvora v celotnem CO₂

Koncentracija CO₂ na vulkanski gori Mauna Loa obsega CO₂ naravnega izvora in izpustov človeštva.

Ker so podnebni ukrepi usmerjeni predvsem proti **izpustom CO₂ človeštva**, je logično vprašanje, kakšen pa je delež izpustov v celotnem CO₂.

Znanstvena in poljudnoznanstvena literatura obsega več ocen za delež izpustov.

Erik Margan, Inštitut Jožef Stefan, je izračunal z uporabo konvolucijskega integrala, da je **antropogeni delež CO₂ 4,3 %. (9)(10)**

Druga znanstvena literatura navaja, da je CO₂ iz izpustov **med 4 in 6 % v celotnem CO₂**. Naravnega CO₂ torej od 96 – 94 %.

A3. Delež CO₂ človeškega izvora v atmosferi

Vzemimo višjo vrednost, torej 6 % v naravnem CO₂, da izračunamo, kaj ta odstotek pomeni v **celotni atmosferi**. V celotni atmosferi je 0,0426 % **vsega CO₂** (Mauna Loa). Samo **človeških izpustov CO₂ v celotni atmosferi je torej 6 % od 0,0426 %**. Rezultat je **0,0026 % CO₂ človeškega izvora v celotni atmosferi**.

Rezultat terja znanstveni odgovor na vprašanje, s kakšnim mehanizmom naj bi **tako majhna** količina človeškega CO₂ povzročala segrevanje ozračja in podnebne spremembe.

To vprašanje sem postavil javno v časopisu Dnevnik. **(11)** Doslej brez odgovora odgovornih, prav tako tudi na poziv za nenapadanje ogljikovega dioksida. **(12)**

V primeru, da znanstveni odgovor ne obstaja oziroma ga ni možno dobiti, je **smiseln izstop Slovenije iz Pariškega sporazuma**, ki je omogočen po 28.členi Sporazuma.

Znatna finančna sredstva pa se preusmeri v razvoj kmetijstva in gozdarstva s povečano dodano vrednostjo.

A4. Vzroki za rast temperatur in vloga CO₂

Splošno je znano, da je **voda (H₂O) kot vlaga** v zraku močno prevladujoč toplogredni plin pri privzemanju toplote od tal in oceanov, kakor tudi po količini v zraku (od 1 do 4 odstotke).

Voda ima pri tem še eno lastnost, da je močna konkurenca ogljikovemu dioksidu pri privzemanju (absorpciji) toplote, saj mu **odvzema pomemben del absorpcijskega spektra**, v katerem bi CO₂ absorbiral, če ne bi bilo vode.

Če to vemo, se moramo **vprašati po znanstvenih podlagah za ukrep zniževanja CO₂**, ki ga je v celoti zgolj 0,043 odstotke v atmosferi, naših izpustov CO₂ pa v sledovih 0,0026 odstotka.

Svetovna in domača znanost, še posebej neodvisna, na tem področju vsebuje **dovolj dokazov iz meritev (ne modelov)**, pravzaprav **vedno več, da naši izpusti CO₂ ne uravnavajo podnebnih sprememb**.

Navajam nekatere prispevke na tem področju.

1) Prenos toplote s površin v ozračje

Obstaja še drug mehanizem, ne le toplogrednost (absorpcija).

Velika večina transporta toplote v nižjih plasteh ozračja se odvija prek **molekularnih trkov**. Sevalno ravnovesje prihaja do izraza šele na višini okoli 5,6 km, kjer je gostota ozračja pol manjša kot pri tleh, zato je

povprečna razdalja med molekulami večja, temperatura in s tem tudi hitrost molekul pa manjša, čas med trki je daljši, zato je verjetnost, da molekula spontano odda foton večja, prav tako pa je večja verjetnost, da foton zajame. S te plasti v vesolje uhaja največ sevanja, ki ga potem zaznajo sateliti v zemeljski orbiti. Erik Margan, 2025. (13)

2) Rast temperatur in CO₂

Koncentracija CO₂ raste zaradi dvigovanja temperature in ne obratno.

Torej segrevanje ozračja **ni** posledica rasti CO₂. Norveški znanstvenik dr. Humlum s sodelavci (2013) je z uporabo meritev temperatur po svetu dokazal, da **rast CO₂ zaostaja za rastjo temperatur** zaradi naravnih vzrokov več mesecev do enega leta. (14)

Dr. Humlum vsako leto izda tudi letni pregled podnebnih dogajanj na našem planetu.

Vendar IPCC v 6.poročilu (AR6_WGI, 2021), fizikalne osnove, na 2.400 straneh, ne navaja tega avtorja!

3) Koncentracija CO₂ zaostaja za rastjo temperatur.

Rast celotnega CO₂ torej ni vzrok podnebnim spremembam. Naših izpustov pa je v tem le 6 odstotkov.

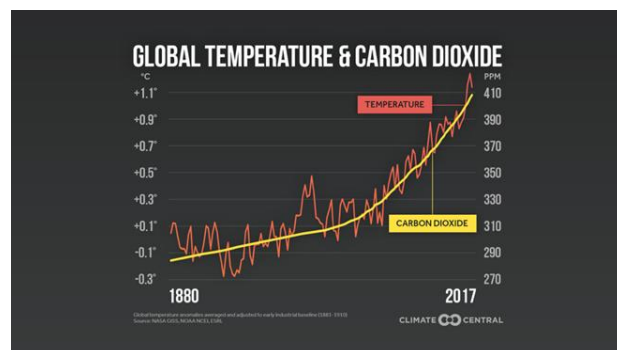
Koutsoyiannis in Kundzewicz (2020) sta z uporabo najbolj zanesljivih globalnih podatkov o temperaturah in koncentracijah CO₂, zbranih iz več virov, ki zajemajo časovni interval 1980-2019, dokazala, da rast CO₂ zaostaja za rastjo temperatur za dobo enega leta. (15)

Tudi tega avtorja ni v AR6 poročilu IPCC.

4) Zaključki Komisije Državnega sveta RS o Posvetu DS in odgovor Vlade. (16)

Sedmi zaključek navaja: »Učinek tople grede, ki ga prekomerno krepijo človeški izpusti toplogrednih plinov, ostaja predmet razprav. Hipoteza, da so antropogene emisije edini vzrok globalnega segrevanja, ni bila neposredno eksperimentalno dokazana.«

V odgovoru na 7. zaključek Vlada med drugim navaja: »*Jasno povezavo med večanjem koncentracije toplogrednih plinov v ozračju in višanjem temperature kaže tudi spodnji graf:*«



Graf kaže povezavo med temperaturo in CO₂. Ne kaže pa **vzročnosti**, ki je vlada ne omenja. Ali CO₂ raste zaradi višanja temperature, ali temperatura raste zaradi večanja CO₂?

V poglavju **A4**, točka 2) in 3) avtorji dokažejo iz meritev, da **je rast CO₂ posledica rasti temperature**.

5) Zakaj se ozračje segreva?

Sonce obseva Zemljo v glavnem z vidno svetlobo, ki je plini v atmosferi ne zadržijo. Del te svetlobe se odbije nazaj v vesolje, del pa se spremeni v toploto, ki segreva ozračje. Odbojnost (albedo) izkazujejo tako oblaki kot površina planeta. Če je odbojnost manjša, se več svetlobe spremeni v toploto.

Nikolov in Zeller (2024) dokazeta na osnovi satelitskih podatkov, da je vzrok segrevanja atmosfere zmanjšanje albeda (odbojnosti), predvsem oblakov in ne toplogredni plini oziroma CO₂ in voda (H₂O). (17)

Zmanjšanje albeda po letu 1980 in še posebej po letu 2000 je bilo s študijami ugotovljeno že pred tem.

6) Vloga oblakov in vodne pare (H₂O) pri segrevanju ozračja

Zaključek obravnave oblakov v študiji dr. W. Happerja je, da so za podnebne spremembe in segrevanje ozračja pomembni predvsem oblaki, torej stanje oblačnosti in vodna para.

Ter, da CO₂ ni "krmilna ročica" za uravnavanje Zemljinega podnebja. (18)

Tudi tega avtorja ni v poročilu IPCC, čeprav ima objave že pred več leti.

7) **Empirični dokazi, ob sodelovanju umetne inteligence, nasprotujejo trditvi IPCC, da so CO₂ izpusti človeštva krivi za podnebne spremembe. (19)(20)**

Dr. W. Soon in J. Cohler s soavtorji sta vpregla umetno inteligenco po imenu Grok 3 beta v pomoč pri pregledu obsežne literature, jo postavila za prvega avtorja v članku, kar posebej obrazložita na YT.

W. Soona ne najdemo v 6. IPCC poročilu, kljub 30 letni znanstveni aktivnosti.

8) **Podnebne spremembe poganjajo naravni procesi in ne izpusti CO₂ človeštva.**

Dr. Hermann Harde (21) iz opazovanj dokaže ujemanje svojih zaključkov z žagasto krivuljo rasti CO₂ iz observatorija na Mauna Loi. Koncentracija CO₂ namreč niha v skladu z letnimi časi. Od oktobra do maja CO₂ narašča, od junija do septembra pa upada. Vzrok je vegetacija predvsem na severni polobli.

Obenem ugotavlja, da je rast CO₂ na lokaciji Havajev, kjer je Mauna Loa, v **zamiku za rastjo lokalne temperature** za 6 do 7 mesecev, kar se tudi na globalnem nivoju ujema z ugotovitvami drugih raziskovalcev. IPCC tudi njega ne omenja v svojem poročilu.

9) **"Podnebje uravnava narava in ne človek", je že leta 2008 dokazoval dr. Singer, ki je deloval (1924-2020) v skupini znanstvenikov iz celega sveta, na predavanju na Inštitutu Jožef Stefan. Pri tem je uporabil tudi IPCC podatke, vendar z drugačno interpretacijo. Njegovi zaključki so, da »dokazi jasno kažejo, da ogljikov dioksid neznatno prispeva h globalnemu segrevanju in zato ni „onesnaževalo“. To dejstvo še ni splošno priznано, zato nerazumni strahovi pred globalnim segrevanjem še vedno izkrivljajo energetska in gospodarska politika. Vsa prizadevanja za zmanjšanje**

emisij CO₂ na svetovni ali državni ravni so nesmiselna, v vsakem primeru pa neučinkovita in zelo draga. Na splošno je toplejše podnebje koristno.« (22)

10) **Znanost in politika o podnebnih spremembah**

Prav vpletanje politike v znanost je prispevalo k temu, da informacije znanstvenikov, ki dokazujejo, da izpusti CO₂ in metana (CH₄) ne morejo uravnavati zemljine atmosfere, ne prispejo do javnosti. Stanje je, vse podprto z viri, odlično predstavil mag. Alkalaj s knjigo: Podnebna prevara (2010). (23)

11) **23. julija 2025 pa je v ZDA izšlo poročilo za ministrstvo za energijo:**

Kritični pregled vplivov emisij toplogrednih plinov na podnebje v ZDA (A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate), znanstvenikov dr. John Christy, dr. Judith Curry, dr. Steven Koonin, dr. Ross McKittrick in dr. Roy Spencer. Javna razprava je bila do 2. septembra.

Zaključne misli poročila:

»To poročilo podpira bolj natančen in na dokazih temelječ pristop k oblikovanju podnebne politike, ki izrecno priznava negotovosti.

Tveganja in koristi podnebnih sprememb pod vplivom naravnih in človeških dejavnikov je treba pretehtati glede na stroške, učinkovitost in stranske učinke vseh „podnebnih ukrepov“, ob upoštevanju potrebe države po zanesljivi in cenovno dostopni energiji z minimalnim lokalnim onesnaževanjem.

Poleg nadaljnjega natančnega in neprekinjenega opazovanja globalnega podnebne sistema bo pomembno, da se oblikujejo realistične predpostavke o prihodnjih emisijah, ponovno ovrednotijo podnebni modeli za obravnavo pristranskosti in negotovosti ter jasno priznajo omejitve študij o pripisovanju ekstremnih dogodkov.

Za informirano in učinkovito odločanje je bistven pristop, ki priznava tako potencialna

tveganja kot koristi CO₂, namesto da se zanaša na pomanjkljive modele in ekstremne scenarije.«(24)

B. PRILAGAJANJE NA PODNEBNE SPREMEMBE

Kmetijstvo je, z ozirom na druge panoge gospodarstva, **bistveno bolj izpostavljeno vremenskim dogajanjem**. Ekonomijo kmetijstva poslabšajo vremenske ujme oziroma izredni dogodki kot so daljša suša (uporaba brezpilotnikov z vodo), poplave, toča, zemeljski plazovi, izjemni vetrovi in nenadne temperaturne spremembe (pozeba, ipd.), požari – domnevna večja pogostost teh vremenskih pojavov.

Zaščita proti ujmam je bila že doslej potrebna in ni novost. Ni pa dobra (poplave, suše, toča).

Podnebne spremembe pa nam lahko prinesejo **večjo pogostnost ekstremnih pojavov** in s tem škode.

V kmetijstvu je politika razogljčenja nesprejemljiva. Usmeritev proti CO₂ je dokazano napačna, **kar je pokazano v poglavju A.**

Kar je nujno je:

1. **Preprečiti pozidave kmetijskih zemljišč**, imamo jih močno pod evro povprečjem na prebivalca. Zagotovimo jih še za prihodnje generacije!
2. **Rešitev je v strateškem prostorskem planiranju**, za več občin skupaj, imamo 212 občin, predvsem industrijsko-poslovno-obrtnih con in stanovanjskih naselij.
3. **Pozidave in gradnje na vodovarstvenih območij prepovedati** (Magna, kanal C0 Ljubljana, novi načrti...). Voda je ob podnebnih spremembah ključnega pomena, tudi za prihodnje generacije.
4. **Prepoved gradnje vetrnih elektrarn v slovenskem hribovju**, tudi tam so prebivalci

in kmetovanje pod težjimi pogoji kot v ravninah (Pohorje, Kras, Loški Potok, Ojstrica, Paški Kozjak, Rogatec, itd.). Jih želimo pregnati, kot se to dogaja v tujini?

5. **Ustava ščiti hribovsko prebivalstvo: 71.člen (varstvo zemljišč):** »Država skrbi za gospodarski, kulturni in socialni napredek prebivalstva **na gorskih in hribovitih območjih**.
6. **Ni predpisov za hrup vetrnic in oddaljenost**, na kar opozarjamo mnogi že več kot 15 let. Imamo domače negativne izkušnje na Krasu z vetrnico pri Dolenji vasi, KS Senožeče, občina Divača. Ljudje so v **brezpravnem položaju**, inšpekcija ne ukrepa z izjavo, da ni predpisov, ne za hrup ne za oddaljenost od VE do bivališč, šol, vrtcev in delovnih mest.. Pri določenih razmerah zaradi hrupa vetrnice ni spanja. Gre za kršenje **Ustave RS** v 2. členu: Slovenija je **pravna** in socialna država.
7. **Vetrne elektrarne** nimajo delovnih mest, subvencije gredo v tujino, plačujemo tuja delovna mesta, uničujejo turizem s hrupom in prisotnostjo. Vse zaradi dogme, da so izpusti CO₂ krivi, da je topleje. Primer iz Hrvaške: Vetrne elektrarne nad Senjem **onemogočajo turizem zaradi posebnega pulznega hrupa** v nizkofrekvenčnem področju (pod 200 Hz) in kot infrazvok (pod 20 Hz), ki nastaja, ko gre krilo vetrnice mimo stebra. Ta hrup gre **tudi skozi zaprta okna** (dolga valovna dolžina). (25)
Infrazvok in nizkofrekvenčni hrup sta skozi 20 let življenjske dobe vetrnic škodljiva za zdravje in dobro počutje (definicija zdravja po SZO/WHO): preprečujeta spanje med drugim, zato so gosti pobegnili.
8. **Prepoved gradnje sončnih elektrarn na kmetijskih zemljiščih**. Zemljišča morajo biti prosta tudi za **menjave kultur**, ne pa, da bi investitor povsod izigraval s pridelavo jagod pod paneli (primera: Krvavi Potok, Hrpelje Kozina; Zgornje Počakovo, Radeče).

Politika je dolžna sporočiti evropski komisiji, da Slovenije ne bomo uničevali z obnovljivimi viri, treba je zmanjšati odstotek OVE. VE in SE so nezanesljivi viri, dražijo infrastrukturo, ne dajejo toplote. Problem je onesnaževanje zraka. Problem je premalo varčna raba energije.

9. **Ukiniti je treba dodajanje biogoriv v motorna goriva**, kar jim dviga ceno. Pridelava rastlin za biogoriva je nesmotna, še posebej ob pomanjkanju kmetijskih površin.

10. **Prečistiti je treba program Skupne kmetijske politike 2023-2027**, zato imamo odprte roke, kot piše:

„Pri novi skupni kmetijski politiki EU je namesto dosedanjih pravil in skladnosti poudarek na rezultatih in **smiselnosti (smotrnosti) ukrepov**. Države članice v večji meri same odločajo, kako najbolje izpolniti skupne cilje evropske kmetijske politike in se hkrati odzvati na specifične potrebe svojih kmetov, podeželskih skupnosti in širše družbe.“

Nam ni treba izgubljati kmetijskih zemljišč in gozdov zaradi OVE. (26)(27)

11. **Prepoved dodatkov za hrano govedi zato, da ima manj izpustov metana.**

Evropska komisija je predstavila strategijo EU za zmanjšanje emisij metana.

Izjavljajo: „Metan je za ogljikovim dioksidom drugi največji povzročitelj podnebnih sprememb.“ Trditev nima znanstvene osnove.

Količine CH₄ so v zraku minimalne.

Vpliv izpustov iz govedoreje na podnebne spremembe **ni znanstveno dokazan!**

12. **Sončne elektrarne na kmetijskih zemljiščih.**

Program predvideva sončne elektrarne na kmetijskih zemljiščih z obrazložitvijo, da bodo ščitile posevke pred točo. Imamo že nekaj poškodb sončnih panelov zaradi toče, zato je ideja slaba.

ZAKLJUČEK

Namesto škodljive in drage vojne proti CO₂ in arbitrarnih odstotkov OVE, brez ocen o učinkih na podnebne spremembe, podprimo kmetijstvo.

V prispevku so dokazi, da izpusti CO₂ človeštva niso problem in ne spreminjajo podnebja.

Od Evropske komisije je nujno zahtevati poročilo o dosedanjih učinkih ukrepov na podnebne spremembe.

LITERATURA

1. https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/podnebne_razmere_v_sloveniji_71_00.pdf
2. Chi Chen et al., Nature Sustainability | Vol 2 | February 2019 | 122–129
<https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7>
3. <https://co2coalition.org/wp-content/uploads/2021/11/2015-Cohen-Happer-Fundamentals-of-Ocean-pH.pdf>
4. <https://www.consilium.europa.eu/sl/policies/paris-agreement-climate/>
5. <https://sodobnipodjetnik.si/swot-analiza-definicija-in-primeri/>
6. <https://www.thoughtco.com/chemical-composition-of-air-604288>
7. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Zrak>
8. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
9. Margan E. (ŽiT 2019), <https://radlek.si/wp-content/uploads/2019/12/Antropogeni-dele%C5%BE-CO2-v-ozra%C4%8Dju-1.-del-1.pdf>
10. Margan, E. (ŽiT 2019), <https://radlek.si/wp-content/uploads/2019/12/Antropogeni-dele%C5%BE-CO2-v-ozra%C4%8Dju-2.-del-1.pdf>
11. Ogrin, T. (2024). Dnevnik, 22.11.2024
<https://www.dnevnik.si/mnenja/odprta-stran/zeleni-prehod-ceno-bomo-spoznali-ko-bomo-na-cilju-2-2703417/>
12. Ogrin, T. (2023). Delo, 8.7.2023
<https://www.delo.si/mnenja/pisnabralcev/nehajmo-napadati-ogljikov-dioksid>
13. Margan, E. (2025). Zbornik posveta v DS

14. Humlum, O. et al. (2013)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818112001658?via%3Dihub>
15. Koutsoyiannis, D., Kundzewicz, Z. W., (2020),
https://www.researchgate.net/publication/344316410_Atmospheric_Temperature_and_CO2_Hen-or-Egg_Causality_Version_1
16. Vlada RS, dopis št. 00202-5/2025/5 z dne 25.2.2025
17. Nikolov, N., Zeller, K.F. (2024)
<https://www.mdpi.com/2673-7418/4/3/17>
18. Happer, W. (2024) https://eike-klima-energie.eu/wp-content/uploads/2024/07/Happer_Talk-IKEK-16-Wien.pdf
19. Grok 3 beta, Soon, W et al., (2025)
<https://scienceofclimatechange.org/wp-content/uploads/SCC-Grok-3-Review-V5-1.pdf>
20. Soon, W., Cohler, J. (Nelson, T. Podcast) (2025)
<https://www.youtube.com/watch?v=L4dLIDpiXnA>
21. Harde, H. (2019)
22. Singer, S.F. (2008)
https://videlectures.net/kolokviji_singer_naha/
23. Alkalaj, M. (2010) , Podnebna prevara, Orbis, Ljubljana
<https://marjankogelnik.files.wordpress.com/2015/03/podnebna-prevara.pdf> dopolnjeno 2011
24. https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-07/DOE_Critical_Review_of_Impacts_of_GHG_Emissions_on_the_US_Climate_July_2025.pdf
25. Vetrna Elektrarna Senj (HR)
<https://n1info.hr/vijesti/kineska-vjetroelektrana-u-senju-ne-moze-dobiti-uporabnu-dozvolu-zbog-buke-gosti-nam-otkazuju/>
26. <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/skupna-kmetijska-politika-poletu-2020/>
27. <https://skp.si/>

Pumping Scheduling Optimization for Water Distribution Systems with Day-Ahead Electricity Pricing

Daniel Kozelj[†]

Faculty of Civil and Geodetic
Engineering
University of Ljubljana
Ljubljana, Slovenia
daniel.kozelj@fgg.uni-lj.si

Abstract

Water distribution networks are energy-intensive; hourly day-ahead electricity prices in Europe (SDAC) put utilities on the hook for volatility but also allow cost-saving shifting of loads by means of storage. We describe DAPPSO, a day-ahead price-aware mixed-integer linear programming pump operation scheduler that tunes the MILFNet price real-power- nonlinear-OFF/ON event penalized formulation to nodal mass balance, link energy relationships and device logic (pump sets, storage tanks, PRVs) by means of piecewise-linear constraints and indicator rules; DAPPSO codes up in Python with WNTR/EPANET parsing and Gurobi solving complete with a rolling-horizon controller. In a 72-h simulation on the EPANET Net3 benchmark system (two pumps, three storage tanks), employing BSP SouthPool day-ahead prices and a 3-day demand smoothing extension, DAPPSO shifted activity to off-peak low-price hours by keeping storage within bounds with feasible hydraulics on a dynamic basis, yielding the lowest system cost (1,357.48EUR) together with 16–18% saving compared with two rule-base baselines involving consolidated runs with reduced starts. Runtimes conformed with an operations-managable target with a 1,200 s limit and a stopping criterion of 2% MIPgap across rolling solves.

Keywords

Pump scheduling optimization, Water distribution systems, Day-ahead electricity market, Mixed-integer linear programming, Energy efficiency

1 Introduction

Water distribution systems (WDS) are vast, engineered networks where supply sources, pressurized conveyance, storage, and control devices collectively need to meet spatiotemporal demands under hydraulic as well as operating constraints. Their behavior is described by mass conservation across nodes as well as energy balance across links such that

friction losses as well as pump head–flow relationships cause significant nonlinearities. In reality, discrete operating modes—the on/off action of some pumps as well as multi-state valve settings—coupled with storage constraints, no-backflow constraints, as well as electricity tariff cues lead to mixed continuous–discrete decision areas that make simulation as well as control more difficult [1], [2]. These features give a reason why day-to-day working will be a natural candidate for formal optimization in particular for pump scheduling, pressure management as well as real-time control tasks.

Two broad families of methods have been investigated. Simulation-embedded metaheuristics search across control policies by iteratively calling a solver for hydraulics; they are adaptable but often computationally expensive and offer local optimality only at best [3]. In contrast, mathematical programming encapsulates (approximations to) WDS physics as constraints directly and optimizes an explicit objective explicitly, exchanging modeling effort for algorithmic guarantee and scalability with solvers as they stand now [3], [4]. Under this second family, researchers either (i) linearize or relax nonlinear hydraulics so as to obtain LP/MILP formulations that can be solved with off-the-shelf software tools, or (ii) keep nonconvexity(ies) intact and develop custom algorithms (outer approximations, branch-and-bound extensions, convex hull relaxations) with strong specialized strength on highly specific problem classes. Still, an enduring tension exists between accessibility as against fidelity: coarse linear approximations hazard hydraulic dubiousness, while customized solvers for MINLP can prove difficult to reproduce or scale across networks and operating policies.

Recent additions to the operations literature refine the application context and computation agenda. Demand-response programs by renewables variability and cheap bulk electricity storage shortage give rise to new value streams for utilities that can curtail or shift pumping by dynamic tariffs; illustrating such services prescribes optimization models co-managing cost service style certification solution quality [5], [6]. Decomposition over time has helped mitigate multi-period pump scheduling dimensionality by providing bounds as well as parallelizable subproblems without losing global structure [7], [8]. In addition to energy cost numerous investigations feature coupled objectives constraints—say chlorine residuals or water age—particularly where variable-speed pumps vary efficiency with operating point arguing against simplistic surrogates arguing for physical approximations informed by

*Article Title Footnote needs to be captured as Title Note

[†]Author Footnote to be captured as Author Note

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

© 2025 Copyright held by the owner/author(s).

<http://doi.org/10.70314/is.2025.miti.13>

physics [9]. Robust operation also depends on pump switching behavior: reducing the number clustering of starts hardening equipment as well as mitigating transients necessitates level-trigger designs that concur with tariff periods lest they incur expensive end-of-period inefficiencies.

Extending this groundwork, our research develops a general mixed-integer LP framework for WDS operation that retains significant physics and device reasoning but stays solver-amicable. The model imposes nodal mass balance and link energy relationships by piecewise-linear approximations; models tanks, pumps, and PRVs by status-dependent constraints; and captures event- and time-dependent controls by indicator or big-M relationships that include backflow and storage limit violation alarms. It accommodates variably styled objectives—energy expense under time-of-use or real-time rates, switching losses, and reliability surrogates—on a single-horizon as well as rolling-horizon grounds. In fact, it finds a practical middle ground: the portability and reproducibility of MILP by explicit, verifiable assumptions on approximations, and sufficient hydraulically expressive power that can inform policy as much as operation.

2 Methods

2.1 WDS model and data

For development and testing of DAPPSO we use EPANET's standard network Net3 (Figure 1), a popular hypothetical/representative distribution system derived originally from North Marin Water District studies and often used in research as well as tutorials. It serves as a realistic yet tractable backdrop against which scheduling and control experiments can be played out without losing EPANET's standard device behaviors and pattern mechanisms [10]. We read the following essentials from provided WDS model file: the hydraulic solver employs Hazen–Williams head loss, and time is hourly discretized ($\theta\Delta t = 1h$). The model operates over a period of 72 h (3 days) with a 1 h pattern step; the network defines 92 junctions (59 positive base demand), 116 pipes, 2 reservoirs, 3 storage tanks with fixed minimum/maximum levels as well as fixed diameters, and 2 pumps.

Demand modulation supports mainly a 24 value diurnal pattern (peak multiplier ≈ 1.94 , minimum ≈ 0.64) repeated over the 3 day horizon. The EPANET's diurnal demand multipliers $\theta(24) = \{\theta_0, \dots, \theta_{23}\}$ are factors applied to each junction's base demand, build for 72-hour profile. The demand multipliers are replicating the 24-hour pattern three times and optionally scale each day by a day-level factor $s = \{s_1, s_2, s_3, \}$; with the default being $s_1 = s_2 = s_3 = 1$.

Since this happens on a development build and not on a live deploy we emulate telemetry. In an operating environment we would import SCADA/SQL series for flows (Q), pressures (H), tank levels, pump status and electricity energy; the internal idea and operating decision is reflected for maintaining consistency. In order to extrapolate Net3's one day diurnal demand as a three day without forecast, we used a simple "demand pattern extension". The method builds a 72 hour vector by extrapolation

from the bottom up 24 h diurnal profile by use of scalars as well as a smoothing pass to prevent discontinuity. At optimization we project hourly demands as, in the correct timestep for running the simulation. No other modifications on the .inp file by EPANET are prevented in order that the hydro conditions will be reproduceable within the simulation window.

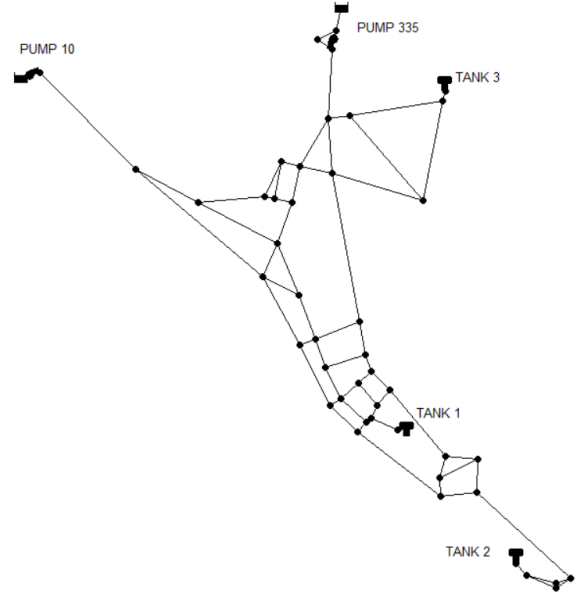


Figure 1: Net3 WDS model [10]

Prices for electricity are off-line testing data taken from BSP SouthPool's Slovenian day ahead market (hourly MCPs); we used for this research CSV extracts (01.–03.09.2025), checked for monotonic hourly stamps as well as missing values, and adjusted to CET/CEST prior to being used as the price vector [11], [12].

2.2 Pumping scheduling optimization module

This subsection presents DAPPSO, our mixed-integer linear programming (MILP) model for pump scheduling that directly expands upon the open-source MILPNet package by Thomas and Sela [2]. The system hydraulics, device logic, modeling approach, but designed to value real electrical power by day-ahead tariffs and exact behavior by indicator constraints. Analogous to MILPNet, we run with Gurobi [13] via the Python API and read in EPANET .inp files with WNTR as a parameter populate [14]. These modeling decisions follow the seminal paper and code for MILPNet that we recognize and cite accordingly.

In DAPPSO, the objective prices true pump power against an hourly day-ahead tariff and penalizes OFF→ON starts. Adapting MILPNet, we abandon on/off proxies and minimize energy spend plus a switching penalty. Prices p_t (EUR/MWh) are converted to per-step coefficients by $c_t = p_t \Delta t 1000$. This follows Thomas and Sela's formulation but replaces their activation surrogate with a power variable tied to device status.

Problem:

$$\min J = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} c_t P_{p,t} + \lambda \sum_{t=2}^T \sum_{p \in P} s_{p,t}, \quad (1)$$

with

$$s_{p,t} \geq y_{p,t-1} - y_{p,t}, \quad s_{p,t} \in \{0,1\}, y_{p,t} \in \{0,1\}; \quad (2)$$

(with $y_{p,t} = 1$ meaning pump p is OFF.)

subject to nodal mass balance:

$$\sum_{\ell \in \delta(i)} q_{t,\ell} = d_{t,i}; \quad (3)$$

pipe energy:

$$h_{t,i} - h_{t,j} - \Delta h_{t,\ell} = 0, \text{ with } \Delta h_{t,\ell} \approx PWL(q_{t,\ell}); \quad (4)$$

storage tank:

$$H_{t,tk} = H_{t-1,tk} + (q_{t-1,tl}/A_{tk})\Delta t \text{ with} \quad (5)$$

$$H^{min} \leq H_{t,tk} \leq H^{max};$$

pump gain:

$$\Delta h_{t,p} \approx PWL(q_{t,p}), q_{t,p} \geq 0; \quad (6)$$

pump power:

$$P_{t,p} = PWL_p(q_{t,p}), q_{t,p} \geq 0; \quad (7)$$

In the code, tariff alignment, coefficient construction (c_t), indicator logic, and the OFF→ON counter are explicit; after solving, an audit recomputes realized energy cost from $P_{t,p}$, prices, and Δt and asserts equality to the MILP objective within tight tolerances, preventing time/units misalignment.

Decision variables for the problem encompass link flows, node heads, tank heads, pump status where 0=ON; 1=OFF, and pump power in kW as well. Main constraints involved mimicking by MILPNet's linearized hydraulics with piece-line segments from EPANET-range bases: (1) nodal mass balance; (2) energy across pipes with piecewise linearization (PWL); (3) tank storage with Hmin as well as Hmax; (4) pump head gain PWL; (5) pump power utilization in the expense; (6) device logics by means of pumps/valves with tight big-M; as well as (7) objective function that min the cost of pumping as well as pump switching in terms of EUR.

Workflow execution advances thus: read the EPANET model; execute an EPS by running an EPANET EPS through WNTR to deregister feasible ranges; fit Pump curves with PWL segments; construct a Gurobi model with continuous head/flow/power decision variables and binary device binaries; insert indicator constraints such that power will be rigorously zero when a pump operates OFF; define the objective by means of an external day-ahead day-ahead price vector in EUR/kWh converted to linear coefficients per step ([EUR/kWh per step]); optimize; export pump flows, heads, powers, binaries; and then

reconciliation of the realized energy bill against the objective from the model with strict tolerances.

Our new contributions compared to MILPNet [2] are: (i) a day-ahead tariff interface that inputs an hourly price vector and ensures tariff/timebase alignment; (ii) a power-accurate objective employing PWL power variables instead of Q×H heuristics; (iii) starts-only penalty employing the OFF→ON counter s defined above; and (iv) post-solve cost reconciliation to catch stretching/misalignment errors. We employ Gurobi [13] as we can use it because it's state-of-the-art for MILP, it's fast on big PWL models, and it's free for students; MILPNet also uses Gurobi for indicator and PWL constraints, where we use it unaltered [2].

2.3 DAPPSO implementation

DAPPSO was embodied in Python as a thin operating layer on top of the MILPNet codebase, a rolling-horizon controller that optimizes a 12-hour window and re-optimizes every 3 hours. Each re-run takes in the previous 3 hours of realized operation (the tank levels and pump states as new initial conditions), resupplies the 12-hour demand pattern and the hourly day-ahead price vector, and then calculates the subsequent schedule; this insures all prices in the optimization horizon are known because BSP SouthPool releases the next day's hourly prices at 13:00 CET/CEST. The orchestration was deliberately simple (file/CSV hand-off and scheduled job) in order to make the developmental pipeline reproducible and auditable.

At every solve, the builder traverses the .inp model by EPANET parsed by WNTR (EPANET 2.2 parser), executes a small extended period simulation (EPS) to get bounds and incidence structure, then constructs the MILP blocks over time. In this example code this ordering is explicit: get pipe geometry/Hazen-Williams coefficients, compute $A21/A12$ incidence matrices by pipe elements/ejectors/taps that drive an $A21 * A12$ matrix product, get time-expanded mass-bulk, tank-storage blocks by pipe, tank levels that drive blocks over network elements by tank ID, and get piece-wise linear (PWL) brackets by pipe that drive brackets over network elements by pipe ID. Gurobi's GenConstrPWL applies both for pipe head-loss and pump head-gain curves, with device logic (pump/tank link open/closed, PRV modes) enforced by indicator constraints with big-M values chosen tight [2], [13]. Scripts execute this workflow over 12 time-steps by three stylized tariffs ("BSP SouthPool") for testing, and reveal all main arrays (flows, heads, status) after optimization

DAPPSO substitutes the stylized tariffs with an external day-ahead price vector (EUR/MWh) synchronized on CET/CEST. Prices come preloaded from CSV, checked (monotone timestamps without missing hours), and scaled by Δt to create linear coefficients on the pump-power term; the switching term penalizes OFF→ON transitions. In the sample code the same structure exists—a structure in terms of cost coefficients per hour and a binary flier for pump "ON" being particularized by—they provide explicit variables that keep track of starts. Following the lead of the MILPNet formulation,

hydraulics, storage, device logic, and control if-then rules replicate the authors' equations exactly, and they are coded up with PWL segments and indicator constraints ready for off-the-shelf solving as a MILP.

Solver and pre-solver options prefer quick, viable plans: Gurobi with PWL and indicators; standard segments are $np = 3$ for pipes as well as $npu = 5$ for pumps (the examples occasionally utilize $np = 1$ for speed). A balanced set of parameters is used (TimeLimit 1200 s, MIPFocus = 1, Presolve as well as Cuts automatic, Heuristics ≈ 0.3 , MIPGap = 2% as well as MIPGapAbs = 0.5).

Outputs are written as a schedule table (timestamp, price, Pump_ON, Pump_Power_kW, Flow_m³/h, Head_m). For reproducibility we fix a lightweight environment (Python 3.9; wntr==0.4.2, numpy==1.21.6, scipy==1.9.1, pandas==1.3.1, gurobipy==9.5.1). The modeling choices (PWL, indicators, big-M, rolling horizon) follow MILPNet's recommended practice and are consistent with EPANET 2.2 semantics and WNTR parsing [2], [10], [14].

3 Results

3.1 Case Study results Day-Ahead Operation

Over a 3 day rolling horizon in the EPANET Net3 benchmark, DAPPSO created pump schedules that utilize storage in churning work into off-peak price hours while maintaining tank levels within the operator's dead band reserves. DAPPSO, a variant on the MILPNet project, is bounding the operation of the forecasted tank water levels by the minimum and maximum thresholds over the entire horizon; violating these constraints defines the solution a priori as infeasible.

Pump operation KPIs of the 3-day optimization window (Table 1) reports for every single pump in the Net3 WDS model the pump switches-on under the optimized regime. In the two listed pumps (IDs 10 and 335), pump starts and aggregate duty vary by an order magnitude; pump switches on: 1 vs 10; and Operation: 71 h vs 37 h. The respective energy and cost columns depict the price shifting policy where we find for pump ID 10 an energy use of 4,215.48 kWh and total cost of 429.11 EUR compared to 11,475.20 kWh and 928.37 EUR for pump ID 335, respectively. These results conform with DAPPSO's target, that directly prices electrical power and penalizes OFF→ON transitions not to induce chattering.

Table 1: Pump operation KPI for the 3-day rolling horizon optimization

ID	Switch-ON	Operation [h]	Energy [kWh]	Total cost [€]
10	1	71	4,215.48	429.11
335	10	37	11,475.20	928.37

Day-ahead price vector (Figure 2) and respective 3-day ON/OFF pattern for both pumps indicate that DAPPSO module was focusing on the blocks of pumping by pump ID 335 during

off-peak hours without violating the off-hydraulic constraints of the water levels in the tanks. This action mimics the rolling horizon approach demonstrated by the former MILPNet developers [2] as well as utilizes similar piece wise linear (PWL) device models and indicator constraints to interleave status as well as hydraulics.



Figure 2: Day-ahead electricity prices and their distribution (BSP, 2025)

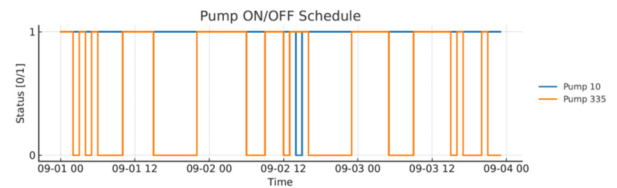


Figure 3: Pump operation for the 3-day rolling horizon optimization

At last, the case study storyline inscribes operational slackness (Figure 3): headroom over lower reserves by the hour provides error absorbancy without oversteering without a direct result coming off the explicit tank level constraints in the MILP; this leaves room for operators where they can shift or cut pumping by safe margins if actual demand diverges from a multi-day prediction model for a multi-day consumption by a consumer entity.

3.2 Comparison analysis of pumping strategies and cost models

In three electricity price models, four pumping strategies were compared: no control (Case 1), two tariff time and Tank 1 level keyed rule-based logics (Cases 2–3), and the MILP based DAPPSO scheduler (Case 4).

The three-day summary (Table 3) reveals that under day ahead pricing (e.g., ET=flat single tariff; VT-MT=dual peak/off-peak tariff), DAPPSO had the smallest total cost at

1,357.48 EUR for basically the same delivered energy as the two strongest rule cases (16,106.71 kWh vs. 16,306–16,938 kWh for cases 2 and 3, respectively), beating the stronger rule baselines by -17.7% compared with Case 2 (1,649.32 EUR) and -16.0% compared with Case 3 (1,622.15 EUR).

Table 2: Operator Logic for Pump 335 (Cases 2–3): Tank 1 Level Thresholds and Time Windows

Case 2	Case 3
RULE 1 IF TANK 1 LEVEL ABOVE 19.1 THEN PUMP 335 STATUS IS CLOSED	RULE 1 IF TANK 1 LEVEL ABOVE 19.1 THEN PUMP 335 STATUS IS CLOSED
RULE 2 IF TANK 1 LEVEL BELOW 12 THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN	RULE 2 IF SYSTEM CLOCKTIME >= 6 AM AND SYSTEM CLOCKTIME < 10 PM AND TANK 1 LEVEL BELOW 12 THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN
	RULE 3 IF SYSTEM CLOCKTIME >= 10 PM OR SYSTEM CLOCKTIME < 6 AM AND TANK 1 LEVEL BELOW 14 THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN

Table 3: Comparison of pump operation cases for the 3-day simulation window under different pricing models

Case	Price model	Energy [kWh]	Total cost [€]
Case 1	Day-ahead	26,330.73	2,531.63
Case 2	Day-ahead	16,306.15	1,649.32
Case 3	Day-ahead	16,937.53	1,622.15
Case 4	Day-ahead	16,106.71	1,357.48
Case 1	ET	26,330.73	2,953.24
Case 2	ET	16,306.15	1,864.77
Case 3	ET	16,937.53	1,966.68
Case 4	ET	16,106.71	1,882.23
Case 1	VT-MT	26,330.73	3,041.40
Case 2	VT-MT	16,306.15	1,932.18
Case 3	VT-MT	16,937.53	2,013.78
Case 4	VT-MT	16,106.71	1,915.18

Figure 4 gives the cumulative cost chart for the Day ahead electricity pricing model total cost. It can then be observed from Figure 4 that over the entire horizon the difference becomes significant for Case 1 (the “always on” case: 2,531.63 EUR), where DAPPSO almost halves costs by moving load out of dear hours. It will be observed that when we compare the other two models the other way around then costs of dual tariff VT–MT (high-low) still has DAPPSO (1,915.18 EUR) as slightly better result than Case 2 (1,932.18 EUR) and considerably better than Case 3 (2,013.78 EUR). In the static ET model, not a very common one Case 2 outperformed DAPPSO by 0.9% (1,864.77 EUR vs. 1,882.23 EUR), but both significantly better than Case 3 (1,966.68 EUR) as well as the unregulated Case 1

(2,953.24 EUR). These cross tariff wise comparisons are listed in Table 3.

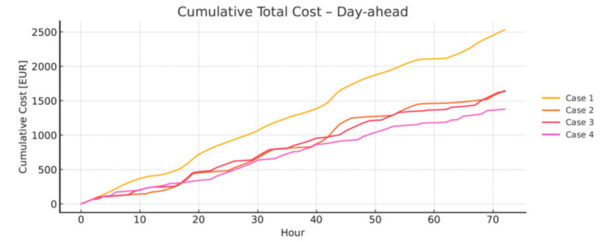


Figure 4: Cumulative total cost of pumping for the 3-day simulation window

Operating-wise, the aggregate total electric power profile per case in Figure 5 reflects that each of the case adopts a divergent pump operating strategy. DAPPSO (Case 4) aggregates pumping into longer pump running periods corresponding to day-ahead price windows with the intention of reducing too frequent pump on/off switches yet receives direct penalty on pump startups (10 EUR per startup) for the 3-day planning horizon.

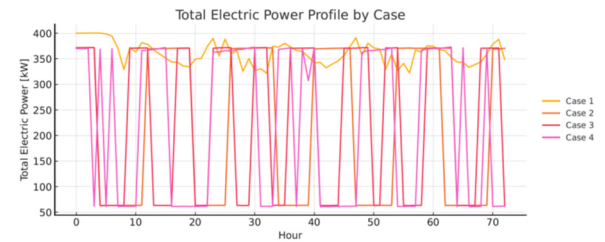


Figure 5: Pump operation for the 3-day rolling horizon optimization

Overall, DAPPSO yields the optimal or optimal schedule under all price models, with largest gains under genuine day ahead signals where the optimization can fully capitalize on tariff volatility, with energy delivery retained as conforming hydro limits dictate.

4 Discussion

DAPPSO’s three-day rolling-horizon tests on Net3 shift pumping to low-price hours while keeping storage within bounds. Pump KPIs show asymmetric duties: Pump 10 made one start over 71 h (4,215.48 kWh; 419.11 EUR) versus Pump 335 with ten starts over 37 h (11,475.20 kWh; 834.88 EUR). Under day-ahead pricing, the optimizer delivered 16,106.71 kWh at the lowest cost (1,357.48 EUR), beating rule baselines by 17.7–16.0% with comparable energy.

These patterns replicate MILPNet: piece-wise linear hydraulics and indicator logic link status with head/flow accordingly; thus, pumping shifts toward off-peak periods with single- as well as rolling-horizon scenarios. DAPPSO recycles

these blocks ($np \approx 3$ for pipes; $npu \approx 5$ for pumps), as demonstrated by Thomas and Sela to replicate EPANET accuracy with a remain solvable in MILP.

Run-time behavior is synchronized as well. Aiding a 1,200 s cap and a 2% MIP gap (MIPFocus=1; Heuristics $\approx$ 0.3), some rolling solves converge in minutes and others reach the cap with near-optimum incumbents—the typical response to shifting initial states and prices. Thomas and Sela also cite sensitivity to binary counts and PWL segmentation, suggesting coarser approximations or smaller models as a solution to speed up solves.

5 Conclusions

Slovenia's In this paper was introduced DAPPSO, a mixed-integer linear programming module that converts day-ahead electricity prices into pump scheduling schedules without losing primary hydraulics and control logic of water distribution systems. Applied over EPANET input files with piecewise-linear device models, the framework produces solver-ready formulations that can further be usable by operations personnel.

In a rolling-horizon over a three-day rolling-horizon on the Net3 benchmark, DAPPSO transferred energy to off-peak low-price hours, held tank constraints, and minimized switching. Under actual day-head tariffs, it achieved the minimum cost (1,357.48EUR) for virtually the same delivered energy, beating rule baselines by 16–18%, and runs with more consolidation of runs with less startups, demonstrating asset-pleasing control.

Future expansions reflect best practice for MILPNet: more affluent devices (variable-speed pumps, sustain/flow-control valves), more precise time steps when justified by dynamics, and efficiencies by network reduction and mathematical decomposition as well as testing on open-source solvers. These maneuvers can increase applicability without sacrificing transparency and reproducibility key to utilities adoption in operating schedules which is central to utilities adoption in operations.

Acknowledgement

Part of these research is funded by the project H2O SMARTNET (ITA-SI0800343) and the ARIS research program P2-0227.

References

- [1] P. F. Boulos, K. E. Lansey, and B. W. Karney, *Comprehensive water distribution systems analysis handbook for engineers and planners*. MWH Soft, 2006.
- [2] M. Thomas and L. Sela, "A Mixed-Integer Linear Programming Framework for Optimization of Water Network Operations Problems," *Water Resources Research*, vol. 60, no. 2, p. e2023WR034526, Feb. 2024, doi: 10.1029/2023WR034526.
- [3] C. D'Ambrosio, A. Lodi, S. Wiese, and C. Bragalli, "Mathematical programming techniques in water network optimization," *European Journal of Operational Research*, vol. 243, no. 3, pp. 774–788, June 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2014.12.039.
- [4] A.-J. Ulusoy and I. Stoianov, "Distributed solution of the day-ahead pump and valve scheduling problem for dynamically adaptive water distribution networks with storage," *European Journal of Operational Research*, vol. 323, no. 1, pp. 267–275, May 2025, doi: 10.1016/j.ejor.2024.11.035.
- [5] R. Menke, E. Abraham, P. Pappas, and I. Stoianov, "Demonstrating demand response from water distribution system through pump scheduling," *Applied Energy*, vol. 170, pp. 377–387, May 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.136.
- [6] Z. Liu, Y. Kleiner, B. Rajani, L. Wang, and W. Condit, "Condition assessment technologies for water transmission and distribution systems," U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-12/017, Apr. 2012. [Online]. Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=241510&Lab=NRMRL
- [7] B. Ghaddar, J. Naoum-Sawaya, A. Kishimoto, N. Taheri, and B. Eck, "A Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks," *European Journal of Operational Research*, vol. 241, no. 2, pp. 490–501, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2014.08.033.
- [8] M. Abdallah and Z. Kapelan, "Fast Pump Scheduling Method for Optimum Energy Cost and Water Quality in Water Distribution Networks with Fixed and Variable Speed Pumps," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 145, no. 12, p. 04019055, Dec. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001123.
- [9] M. Housh and E. Salomons, "Optimal Dynamic Pump Triggers for Cost Saving and Robust Water Distribution System Operations," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 145, no. 2, p. 04018095, Feb. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001028.
- [10] L. A. Rossman, H. Woo, M. Tryby, F. Shang, R. Janke, and T. Haxton, "EPANET 2.2 User Manual," U.S. EPA, 2020.
- [11] BSP SouthPool, "Day-ahead Market." [Online]. Available: <https://www.bsp-southpool.com/day-ahead-market.html>
- [12] ENTSO-E, "Day-ahead Prices," ENTSO-E Transparency Platform. [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/>
- [13] Gurobi Optimization, LLC, "Gurobi Optimizer Reference Manual." 2024. [Online]. Available: <https://www.gurobi.com>
- [14] K. A. Klise, M. Bynum, D. Moriarty, and R. Murray, "A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study," *Environmental Modelling & Software*, vol. 95, pp. 420–431, Sept. 2017, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.06.022.

Indeks avtorjev / Author index

Blekač Erika	13
Gams Matjaž	7
Gialelis Giannis	13
Horvat Laura	13
Jeretina Janez	30
Kozelj Daniel	17, 22, 64
Kožuh Ines	13
Lovrenčič Držanič Irena	13
Margan Erik	49
Mihalič Rafael	42
Ogrin Tomaž	54
Rudež Urban	42
Šinik Bogdan	34
Tošić Aleksander	34
Valenčič Matjaž	38
Vrbič Jože	30