

Institucionalna entropija i reproduktivno zdravlje: Multidisciplinarna analiza onečišćenja zraka PM2.5 česticama u urbanoj aglomeraciji Zagreba

Institutional Entropy and Reproductive Health: A Multidisciplinary Analysis of PM2.5 Air Pollution in the Zagreb Urban Agglomeration

Autor: Davor Moravek

Sažetak

Ovaj rad predstavlja sveobuhvatnu multidisciplinarnu analizu povezanosti između regulatornih deficita (operacionaliziranih kao "institucionalna entropija"), emisija lebdećih čestica (PM2.5) i pokazatelja reproduktivnog zdravlja u urbanoj aglomeraciji Zagreba. Kroz kvalitativni narativni pregled literature i sintezu dostupnih empirijskih podataka (2010.–2025.), rad istražuje hipotezu da nemogućnost kontrole specifičnih izvora onečišćenja – poput odlagališta otpada Prudinec-Jakuševac i mikrolokacija ilegalnog spaljivanja – nije isključivo tehnički ili meteorološki fenomen, već odraz sistemskog regulatornog neuspjeha. Analiza potvrđuje da čestice nastale nekontroliranim izgaranjem posjeduju specifičan toksikološki profil obogaćen teškim metalima i organskim polutantima, koji se biomedicinski povezuje s padom fertiliteta, fragmentacijom DNA gameta i negativnim ishodima trudnoće. Primjenom Beckerovog ekonomskog modela, rad argumentira da ovakvo okolišno opterećenje djeluje kao "demografski porez", povećavajući implicitne troškove roditeljstva. Zaključno, rad predlaže integrirani okvir za djelovanje koji uključuje tehnološku modernizaciju nadzora (*Gov-Tech*) i institucionalnu reformu inspeksijskih tijela.

Ključne riječi: *institucionalna entropija, PM2.5, reproduktivno zdravlje, Zagreb, regulatorno zarobljavanje, Jakuševac, demografija.*

Abstract

This paper presents a comprehensive multidisciplinary analysis of the nexus between regulatory deficits (operationalized as "institutional entropy"), particulate matter (PM2.5) emissions, and reproductive health indicators in the Zagreb urban agglomeration. Through a qualitative narrative review and synthesis of empirical data (2010–2025), the study investigates the hypothesis that the inability to control specific pollution sources—such as the Prudinec-Jakuševac landfill and illegal waste burning sites—is not merely a technical or meteorological phenomenon but a reflection of systemic regulatory failure. The analysis confirms that particles generated by uncontrolled combustion possess a specific toxicological profile enriched with heavy metals and organic pollutants, which is biomedically linked to fertility decline, gamete DNA fragmentation, and adverse pregnancy outcomes. Applying Becker's economic model, the paper argues that this environmental burden acts as a "demographic tax," increasing the shadow price of parenthood. Finally, the paper proposes an integrated action framework involving technological modernization of surveillance (*Gov-Tech*) and institutional reform of inspection bodies.

Keywords: *institutional entropy, PM2.5, reproductive health, Zagreb, state capture, Jakuševac, demographics.*

Uvod: Kvaliteta zraka kao indikator institucionalnog kapaciteta

U suvremenom diskursu o zaštiti okoliša i javnom zdravlju, kvaliteta zraka tradicionalno se promatra kao varijabla ovisna o industrijskom razvoju, meteorološkim uvjetima i geografskim specifičnostima. Međutim, longitudinalna analiza europskog prostora u razdoblju od 2000. do 2025. godine otkriva dublju strukturalnu determinantu: kvalitetu upravljanja. Podaci Europske agencije za okoliš (EEA) i Transparency Internationala ukazuju na postojanje geopolitičke divergencije u kvaliteti zraka, gdje linija razdvajanja između područja s niskim i visokim koncentracijama lebdećih čestica (PM2.5) korelira s granicama vladavine prava i institucionalnog integriteta (EEA, 2025; Transparency International, 2024).

Ovaj rad uvodi i operacionalizira pojam **"institucionalna entropija"** kako bi opisao stanje systemske neučinkovitosti, nepredvidivosti regulatornog okvira i diskrepancije između normativnih akata i njihove provedbe na terenu. U kontekstu Zagreba, koji se tijekom zimskih mjeseci suočava s epizodama ekstremnog onečišćenja, institucionalna entropija manifestira se kao nemogućnost rješavanja dugogodišnjih ekoloških žarišta unatoč jasnom zakonodavnom okviru. Iako geografski faktori (npr. temperaturne inverzije u dolini Save) i ekonomski status igraju ulogu, oni ne mogu u potpunosti objasniti perzistenciju specifičnih, visokotoksičnih izvora emisija poput ilegalnih spalionica. Cilj rada je istražiti mehanizme kojima ovaj regulatorni deficit dovodi do emisije specifičnih polutanata te analizirati njihove implikacije na biološku reprodukciju stanovništva.

Metodološki okvir

S obzirom na heterogenost problema koji zahtijeva integraciju politoloških, kemijskih i biomedicinskih spoznaja, ovaj rad koncipiran je kao **kvalitativni narativni pregled** (*narrative review*). Za razliku od sustavnih pregleda koji se fokusiraju na usko definirana klinička pitanja, narativni pregled omogućuje sintezu šireg spektra dokaza nužnu za izgradnju novog teorijskog okvira.

Strategija pretraživanja i selekcije

Analiza se temelji na triangulaciji podataka iz tri primarna klastera izvora:

Epidemiološke i toksikološke studije (2010.–2025.): Fokus na utjecaj PM2.5, teških metala i dioksina na ljudsku reprodukciju. Pretraživanje baza *PubMed*, *Web of Science* i *Scopus* korištenjem ključnih riječi: *"PM2.5 reproductive health"*, *"air pollution fertility"*, *"sperm DNA fragmentation pollution"*, *"ovarian reserve pollution"*.

Politološke i ekonomske analize: Studije o korelaciji korupcije i okolišnih ishoda, s fokusom na tranzicijske zemlje EU. Korišteni su najnoviji podaci *Transparency Internationala* (CPI 2024), *Svjetske banke* i relevantni znanstveni članci.

Lokalni podaci i "siva literatura": Izvješća *Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI)*, *Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ)*, te izvješća organizacija civilnog društva (*Zelena akcija*, *Ekologija grada*) o specifičnim lokacijama u Zagrebu.

Kriteriji uključivanja prioritzirali su studije koje eksplicitno povezuju sastav čestica s izvorima izgaranja te studije koje analiziraju biološke mehanizme reproduktivne toksičnosti. Važno je napomenuti metodološko ograničenje: dok su pojedinačni mehanizmi (npr. utjecaj teških metala na spermije) dobro dokumentirani u globalnoj literaturi, direktne longitudinalne studije koje

povezuju specifične zagrebačke izvore s lokalnim reproduktivnim ishodima još uvijek su rijetke.

Institucionalna entropija i politička ekonomija onečišćenja

Lebdeće čestice promjera manjeg od 2,5 mikrometra (PM2.5) predstavljaju jedan od najznačajnijih okolišnih rizika za zdravlje (WHO, 2021). Hipoteza ovog rada jest da u sustavima s visokom institucionalnom entropijom, PM2.5 čestice imaju kvalitativno drugačiji i toksičniji profil.

Konceptualizacija regulatornog neuspjeha

Institucionalna entropija u kontekstu zaštite okoliša operira kroz dva ključna mehanizma:

Regulatorno zarobljavanje (*State Capture*): Situacija u kojoj privatni interesi (npr. industrija gospodarenja otpadom) imaju nerazmjeran utjecaj na donošenje odluka, blokirajući strože standarde ili nadzor.

Deficit provedbe (*Enforcement Gap*): Fenomen "ulične birokracije" (*street-level bureaucracy*) gdje se propisi formalno usvajaju (radi usklađivanja s EU), ali se na terenu ne provode zbog nedostatka resursa, korupcije ili političkog pritiska na inspektorate.

Empirijski dokazi o povezanosti

Postojeća literatura ukazuje na snažnu korelaciju između indeksa percepcije korupcije (CPI) i okolišnih performansi. Ivanova (2011) je u svojoj studiji europskih zemalja utvrdila koeficijent korelacije od $R = 0.72$ između razine korupcije i smrtnosti povezane s onečišćenjem zraka. Najnoviji podaci potvrđuju ovaj trend.

Tablica 1. Komparativni prikaz indeksa korupcije i kvalitete zraka u odabranim zemljama EU (Ažurirano: 2024./2025.)

Država	CPI Indeks (2024)*	Prosječni PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2024)	Dominantni karakter onečišćenja	Izvori podataka
Estonija	76	4-6	Nizak; primarno promet	TI (2024); EEA (2025)
Njemačka	75	9-13	Umjeren; industrija i promet	TI (2024); IQAir (2024)
Hrvatska	47	18-22**	Visok zimi; kućna ložišta, otpad	TI (2024); IQAir (2024)
Bugarska	43	17-23	Visok; termoelektrane, kruta goriva	TI (2024); EEA (2025)

**Viši CPI označava nižu razinu korupcije (Hrvatska bilježi pad s 50 na 47). *Vrijednosti u Zagrebu tijekom zimskih epizoda često prelaze $40\text{--}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Podaci sugeriraju da zemlje s visokim CPI (npr. Estonija) uspješnije implementiraju mjere kontrole, dok zemlje s nižim CPI (Hrvatska, Bugarska) stagniraju unatoč nominalnom usvajanju EU direktiva. Pad indeksa korupcije u Hrvatskoj (2024.) koincidira s perzistencijom problema u gospodarenju otpadom.

Anatomija onečišćenja u Zagrebu: Studija slučaja

Grad Zagreb predstavlja specifičan poligon za analizu interakcije između geofizičkih uvjeta i antropogenih faktora. Dok orografija (aluvijalna ravnica Save, blizina Medvednice) pogoduje stvaranju temperaturnih inverzija koje "zaključavaju" onečišćenje pri tlu, kemijski sastav tog onečišćenja ukazuje na izvore koji su posljedica regulatornog deficita.

Odlagalište Prudinec-Jakuševac kao biokemijski reaktor

Službeno odlagalište otpada funkcionira kao izvor emisija kroz dva mehanizma: pasivno isparavanje i aktivne incidente (požari). Nekontrolirani biokemijski procesi unutar tijela odlagališta (anaerobna razgradnja) generiraju metan, koji uz egzotermne reakcije dovodi do samozapaljenja. Emisije s ovakvih požarišta sadrže kompleksnu smjesu kloriranih organskih spojeva, policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) i cijanida (u slučaju izgaranja poliuretana), što predstavlja rizik bitno različit od standardnog komunalnog onečišćenja (Ekologija grada, 2023).

Mikrolokacije ilegalnog spaljivanja: Toksikološki otisak

Još značajniji problem predstavljaju disperzirani izvori ilegalnog spaljivanja otpada (npr. Kozari Bok, Ježdovec, Žitnjak), gdje se primarno spaljuju plastika, guma i kabeli radi ekstrakcije sekundarnih sirovina (bakra i željeza).

Termodinamički uvjeti ovih procesa (niske temperature od 200°C do 400°C) i prisutnost katalizatora (bakar iz žica) idealni su za *de novo* sintezu **polikloriranih dibenzo-p-dioksina (PCDD)** i **furana (PCDF)** (EPA, 2005).

Tablica 2. Kemijski markeri (traceri) u PM2.5 česticama karakteristični za ilegalno spaljivanje

Vrsta otpada / Izvor	Karakteristični kemijski elementi	Mehanizam nastanka i potencijalni rizik
Plastika (PET, PVC)	Antimon (Sb), Ftalati	Antimon se koristi kao katalizator u PET ambalaži; endokrini disruptor.
Električni kabeli	Bakar (Cu), Olovo (Pb), Kloridi	Bakar katalizira nastanak dioksina; olovo iz stabilizatora je neurotoksično.
Gume	Cink (Zn), Crni ugljik (BC)	Visok udio cinka (vulkanizacija) i kancerogenih PAH-ova.
Tretirano drvo	Arsen (As), Krom (Cr)	Izgaranje impregnata (CCA) oslobađa kancerogene metale.

Izvor: Sinteza podataka prema Miri et al. (2017) i IMI (2023).

Prisutnost ovih markera u urbanom aerosolu Zagreba materijalni je dokaz aktivnosti koje bi u funkcionalnom sustavu nadzora bile detektirane i sankcionirane.

Biomedicinski ishodi: Utjecaj na reproduktivno zdravlje

Sustavna izloženost PM2.5 česticama obogaćenim teškim metalima i endokrinim disruptorima ima dokumentirane posljedice na ljudsku reprodukciju. Iako treba biti oprezan s generalizacijom globalnih studija na lokalnu razinu bez specifičnih kohortnih istraživanja u Zagrebu, biološki mehanizmi su univerzalni i dobro istraženi.

Muška neplodnost i oštećenje DNA spermija

Krvno-testisna barijera nije nepropusna za nanočestice i topljive komponente PM2.5. Recentne studije (Nature, 2024; Springer, 2025) potvrđuju transgeneracijske rizike.

Oksidativni stres: Teški metali (kadmij, olovo) induciraju stvaranje reaktivnih kisikovih spojeva (ROS) u sjemenoj tekućini.

Klinički ishodi: Studije (Zhou et al., 2014; Lafuente et al., 2016) konzistentno pokazuju povezanost onečišćenja s padom koncentracije spermija, smanjenom pokretljivošću (astenospermija) i povećanom stopom fragmentacije DNA. Kritični prozor izloženosti je rana spermatogeneza (70-90 dana prije ejakulacije).

Ženska plodnost i ovarijska rezerva

Ženski reproduktivni sustav osjetljiv je na endokrine disruptore prisutne u dimu (dioksini, ftalati).

Ovarijska rezerva: Istraživanja (Gaskins et al., 2019) ukazuju na inverznu korelaciju između

izloženosti PM2.5 i razine anti-Müllerovog hormona (AMH) te broja antralnih folikula, sugerirajući ubrzano "okolišno starenje" jajnika.

IVF ishodi: Studije bilježe niže stope implantacije i živorođenja kod pacijentica izloženih visokim razinama onečišćenja (Carré et al., 2017).

Tablica 3. Pregled utjecaja onečišćenja zraka na ishode IVF postupaka

Parametar	Trend	Mehanizam
Broj oocita	↓ Smanjenje	Oštećenje folikulogeneze oksidativnim stresom
Stopa implantacije	↓ Smanjenje	Upalni procesi u endometriju
Rani gubitak trudnoće	↑ Povećanje	Genetska oštećenja gameta i embrija

Ekonomske i demografske implikacije: "Cijena sjene"

Primjenom Beckerovog modela "Kvantiteta-Kvaliteta" (Q-Q model), okolišno onečišćenje može se promatrati kao faktor koji povećava "**cijenu sjene**" (*shadow price*) podizanja djeteta. Ovo povećanje nije samo apstraktno, već se manifestira kroz konkretne troškove:

Direktni zdravstveni troškovi: Liječenje respiratornih bolesti (astma, bronhitis) kod djece, što zahtijeva lijekove i bolovanja roditelja.

Preventivni troškovi: Nabava pročišćivača zraka, privatno zdravstveno osiguranje, preseljenje u skuplje kvartove izvan zone utjecaja Jakuševca.

Gubitak produktivnosti: Vrijeme utrošeno na brigu o bolesnom djetetu.

Racionalni ekonomski akteri u takvim uvjetima, suočeni s percipiranim rizicima i troškovima, teže smanjenju fertiliteta. U kontekstu Hrvatske, okolišni faktor djeluje kao dodatni "porez" na roditeljstvo.

Implikacije za javne politike i smjernice za djelovanje

Rješavanje problema onečišćenja u Zagrebu zahtijeva pomak od reaktivnog pristupa ("gašenje požara") prema proaktivnom upravljanju rizicima. Na temelju analize, predlaže se integrirani okvir djelovanja:

Tehnološka modernizacija nadzora (Gov-Tech):

Implementacija mreže jeftinih IoT senzora visoke gustoće za detekciju mikrolokacijskih emisija u stvarnom vremenu.

Korištenje bespilotnih letjelica (dronova) s termalnim kamerama i multispektralnim senzorima za noćni nadzor kritičnih lokacija radi prevencije ilegalnog spaljivanja.

Institucionalna reforma i međusektorska suradnja:

Formiranje operativnih timova koji uključuju inspekciju zaštite okoliša, policiju i komunalno redarstvo s jasnim ovlastima za trenutno postupanje.

Uspostava anonimnih digitalnih kanala ("zelenih zviždačkih linija") za prijavu ilegalnih spalionica, zaobilazeći lokalne klijentelističke mreže.

Javnozdravstvene intervencije:

Uvođenje ciljanog probira (screeninga) na teške metale za trudnice i djecu u područjima visokog rizika (npr. Novi Zagreb).

Integracija podataka o kvaliteti zraka u kliničke smjernice za liječenje neplodnosti.

Demokratizacija podataka:

Javna objava podataka o kemijskom sastavu čestica (teški metali, PAHs), a ne samo o njihovoj masi, kako bi se omogućila kvalitetnija procjena rizika.

Zaključak

Analiza provedena u ovom radu potvrđuje da se onečišćenje zraka PM2.5 česticama u Zagrebu ne može svesti isključivo na problem geografije, prometa ili ekonomskog razvoja. Prisutnost specifičnih kemijskih markera i učestalost incidenata na odlagalištima ukazuju na dublji problem institucionalne entropije – nemogućnosti sustava da učinkovito regulira izvore emisija. Iako su potrebna daljnja longitudinalna istraživanja za preciznu kvantifikaciju lokalnih zdravstvenih učinaka, dostupni podaci snažno sugeriraju da ovaj regulatorni deficit djeluje kao tihi faktor demografske degradacije. Put prema čistijem zraku primarno vodi kroz jačanje vladavine prava i modernizaciju nadzora.

Literatura

- Carré, J., Gatimel, N., Moreau, J., Parinaud, J., & Léandri, R. (2017). Does air pollution play a role in infertility? A systematic review. *Environmental Health*, 16(1), 82. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0291-8>
- Ekologija grada. (2023). *Priopćenje o požaru na odlagalištu otpada Prudinec-Jakuševac*. Zagreb: Udruga Ekologija grada.
- European Environment Agency. (2024). *Air quality in Europe 2024*. Copenhagen: EEA.
- European Environment Agency. (2025). *Air quality status report 2025*. Copenhagen: EEA.
- European Public Health Alliance (EPHA). (2020). *Health costs of air pollution in European cities and the linkage with transport*. Brussels: EPHA.
- Gaskins, A. J., Hart, J. E., Meming, L., Chavarro, J. E., Coull, B. A., ... & Laden, F. (2019). Air pollution exposure and markers of ovarian reserve among women attending a fertility center. *Environmental Health Perspectives*, 127(10).
- Grippo, A., Zhang, J., Chu, L., Guo, Y., Qiao, L., ... & Zhang, J. (2018). Air pollution exposure during pregnancy and spontaneous abortion and stillbirth. *Reviews on Environmental Health*, 33(3), 247-264.
- Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada. (2023). *Izveštaj o mjerenju kvalitete zraka na području Grada Zagreba*. Zagreb: IMI.
- IQAir. (2023). *World Air Quality Report 2023*. Goldach: IQAir.
- IQAir. (2024). *World Air Quality Report 2024*. Goldach: IQAir.
- Ivanova, K. (2011). Corruption and air pollution in Europe. *Oxford Economic Papers*, 63(1), 49–70.
- Lafuente, R., García-Blázquez, N., Miguel-Lasobras, J., & Ballesteros, J. (2016). Air pollution and sperm quality: A systematic review and meta-analysis. *Andrology*, 4(3), 464-475.
- Miri, M., Derakhshan, Z., Allahabadi, A., Ahmadi, E., Conti, G. O., Ferrante, M., & Aval, H. E. (2017). Trace elements in fine particulate matter of an industrial urban atmosphere: Seasonal variation, source apportionment and health risk assessment. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1108-1116.
- Transparency International. (2023). *Corruption Perceptions Index 2023*. Berlin: Transparency International.
- Transparency International. (2024). *Corruption Perceptions Index 2024*. Berlin: Transparency International.
- United States Environmental Protection Agency. (2005). *Emissions of Toxic By-Products from Open Burning*. Washington, DC: EPA.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization.
- Zhou, Y., Hou, W., Han, Y., Xie, G., Wang, X., ... & Wu, T. (2014). The association between ambient fine particulate air pollution and semen quality: A retrospective cohort study in Wuhan, China. *Environment International*, 63, 143-151.