ISSN 2637-2266 (Print)
ISSN 2637-2274 (Online)

19. Naučno-stručni skup

Studenti u susret nauci – StES 2026

ZBORNIK RADOVA

Inženjerstvo i tehnologija

19th scientific conference

Students encountering science – StES 2026

PROCEEDINGS

Engineering and Technology

Banja Luka
2026.

Izdavači:
Univerzitet u Banjoj Luci,
Studentski parlament Univerziteta u Banjoj Luci

Za izdavača:
Prof. dr Aleksandar Ostojić
Milan Stupar

Urednik/ci:
Milica Babić

Lektor za srpski jezik:
Ana Čugalj Matić

Lektor za engleski jezik:
Dejan Milinović

Naučni odbor:
Prof. dr Gordana Broćeta, doc. dr Ljubica Figun, doc. dr Ljilja Šikman

Recenzenti:
Prof. dr Petar Gvero, doc. dr Ljilja Šikman, doc. dr Ljubica Figun,
prof. Dr Ljubiša Preradović, doc. dr Ljiljana Tankosić

SADRŽAJ

RADOVI:

MARIJA KAČAVENDA, STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA O SLIJEGANJU TLA 7

MARIJA MALIĆ, Sara Malinović, ZELENI VODONIK U FUNKCIJI DEKARBONIZACIJE GRAĐEVINSKOG SEKTORA – STUDIJA SLUČAJA TRANSFORMACIJE DILINGER ČELIČANE 19

ALEKSA DEJANOVIĆ, Petar Popović, Boško Vasilić, Sara Stojkov, ANALIZA UTICAJA DVOSLOJNOG KEŠIRANJA I PROREĐENIH INDEKSA NA LATENCIJU ČITANJA U LSM SKLADIŠTIMA PODATAKA 41

APSTRAKT

NINA GALIĆ, UTJECAJ RADNIH PARAMETARA DISK GRANULATORA PRI GRANULIRANJU DOLOMITNOG KAMENOG BRAŠNA..... 55

RADOVI

https://doi.org/10.63356/stes.ing.2026.001 УДК 624.131.1:631.445.12

STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA O SLIJEGANJU TLA

Autor: MARIJA KAČAVENDA
e-mail: marija.kacavenda@student.aggf.unibl.org
Mentor: prof. dr Snježana Maksimović
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

Uvod: Slijeganje tla predstavlja složen geotehnički proces koji može ugroziti stabilnost objekata i infrastrukture.

Cilj: Izvršiti statističku obradu podataka rezultata mjerenja slijeganja tla na 89 geodetskih tačaka u periodu od 2013. do 2018. godine, sa ciljem prostorne analize slijeganja i identifikacije kritičnih zona.

Materijal i metode: Primijenjene su metode deskriptivne statistike, testovi normalnosti i neparametarski testovi (Spearman-ova korelacija, Friedman-ov i Wilcoxon-ov test). Analiza je sprovedena u programu SPSS.

Rezultati: Deskriptivna analiza je pokazala da se srednja vrijednost slijeganja kreće od –0,2 mm (2014) do –18,1 mm (2018), dok maksimalno zabilježeno slijeganje dostiže –297 mm. Identifikovane su kritične tačke sa ukupnim slijeganjem preko 100 mm, među kojima se izdvajaju GT048 (–297 mm; –59,4 mm/god), PT015 (–257 mm; –51,4 mm/god) i GT007 (–242 mm; –48,4 mm/god). Korelaciona analiza je pokazala snažnu pozitivnu vezu između ranog i srednjeg intervala (dH1–dH3: $\rho = 0{,}652$; $p < 0{,}001$), kao i veoma snažnu vezu između srednjeg i najdužeg intervala (dH3–dH5: $\rho = 0{,}860$; $p < 0{,}001$). Friedman-ov test je potvrdio statistički značajne razlike između godina ($\chi^2 = 16{,}011$; $p = 0{,}001$), a post-hoc Wilcoxon test je izdvojio tri faze: fazu najvećeg slijeganja (2014), stabilnu fazu (2015–2016) i fazu smanjenog intenziteta (2018).

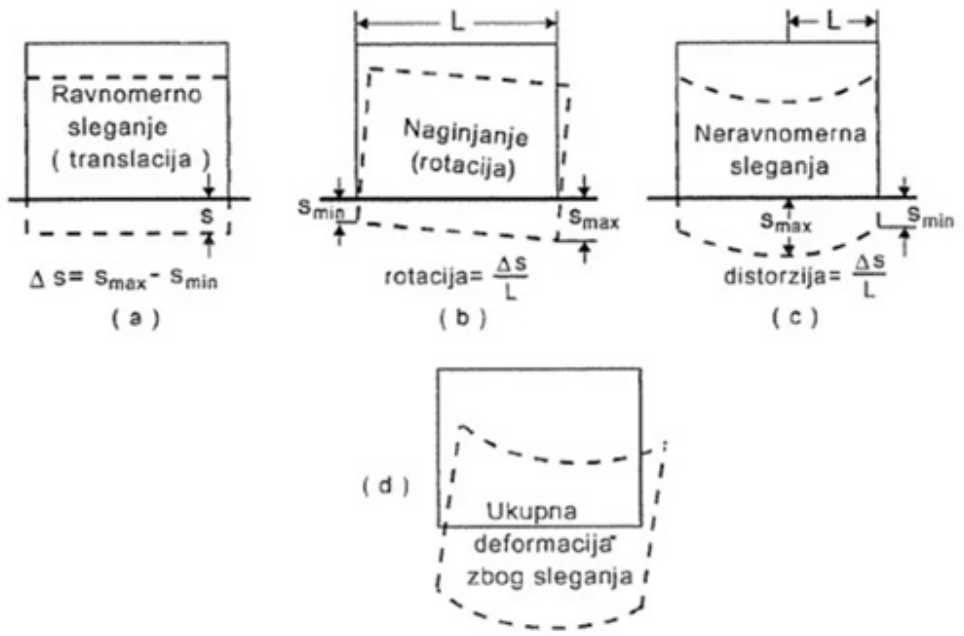
Zaključak: Rezultati ukazuju na potrebu za dodatnim geotehničkim mjerama i kontinuiranim monitoringom, posebno na kritičnim tačkama GT048, PT015 i GT007, gdje se predlažu dodatna geotehnička istraživanja i intervencije.

Ključne riječi: statistička analiza; neparametarski testovi; monitoring; slijeganje tla; geotehnika

UVOD

Usljed promjene opterećenja na određenoj površini mijenja se stanje napona u zemljištu, kao i njegova zapremina, sa odgovarajućim slijeganjem površine terena. Promijenjeno stanje napona prvo izaziva promjene u pornom pritisku, bez uticaja na efektivne napone. Promjene u efektivnim naponima, a samim tim i deformacije, mogu se desiti tek nakon promjene pornog pritiska. Kada se porni pritisak, usljed promjene stanja napona, izjednači sa stacionarnim hidrauličnim poljem podzemnih voda, proces slijeganja se završava [1]. Ukupna deformacija tla usljed slijeganja objekta je razdvojena na tri komponente. Ravnomjerno slijeganje se dešava u slučaju krutog simetričnog objekta na homogenom tlu. Čak i kada je relativno veliko, ravnomjerno slijeganje obično nema štetne posljedice po sam objekat, ali može oštetiti instalacije po konturi objekta. Naginjanje (čista rotacija) relativno krutog objekta može ostaviti štetne posljedice na konstrukciju i instalacije u njoj.

Diferencijalna (neravnomjerna) slijeganja su ograničena fleksibilnošću konstrukcije i izazivaju deformacije u obliku zakrivljenosti koje mogu izazvati lokalna oštećenja objekta [2].



Slika 1. Osnovne komponente slijeganja objekta [2]

Metode za procjenu slijeganja tla mogu se klasifikovati u tri osnovne kategorije: empirijske metode, analitička rješenja i numeričke metode. Empirijske metode se zasnivaju na mjerenjima na realnim objektima i omogućavaju brzu procjenu stanja tla na osnovu određenih parametara. Analitička rješenja pružaju matematički precizne izraze, ali su često ograničena na idealizovane uslove. Numeričke metode, kao što je metoda konačnih elemenata, omogućavaju sveobuhvatnu analizu, jer uzimaju u obzir složenu geometriju, heterogenost i nelinearno ponašanje tla [2].

Praćenje slijeganja tla je izuzetno važno kako u fazi projektovanja, tako i u toku izgradnje i eksploatacije objekta. Kontinuirano praćenje pomjeranja tla omogućava identifikaciju sporog, postupnog slijeganja, kao i otkrivanje naglih promjena koje mogu ukazivati na potencijalnu opasnost za stabilnost građevinskih konstrukcija. Statistička analiza rezultata slijeganja tla omogućava sistematsko tumačenje prikupljenih podataka i daje osnovu za predviđanje budućeg ponašanja tla u geotehničkom inženjerstvu.

MATERIJALI I METODE

1. Rezultati mjerenja

U ovom radu korišteni su rezultati mjerenja slijeganja tla na ukupno 89 posmatranih tačaka, označene identifikacionim oznakama GT, PT, referentne tačke. Za svaku posmatranu tačku date su njene prostorne koordinate (X0, Y0), UTM (skraćeno od Universal Transverse Mercator) koordinate koje omogućavaju geografsko pozicioniranje svake mjerne tačke, kao i visinske vrijednosti dobijene kroz višegodišnji period, i to u novembru 2013. godine, junu 2014. godine, novembru 2015. godine, junu 2016. godine i septembru 2018. godine. Na osnovu razlika visina u odnosu na prve rezultate mjerenja (novembar,

2013) određene su vrijednosti slijeganja tla za pojedine vremenske periode, koje predstavljaju osnovne podatke za dalju statističku analizu. Tabela br. 1 objedinjuje prostorne i vremenske podatke, što omogućava sveobuhvatno sagledavanje ponašanja tla.

Tabela br. 1. Rezultati ispitivanja slijeganja tla

tac	Y0_nov201	X0n13	dH1(H1_H0)(mm)	dH2(H2_H0)	H3_H0	H5_H0	E(UTM34)	N(UTM34)
GT048	6554687	4932916	-47	-137	-178	-297	315929,77	4934315
PT015	6554855	4933112	-36	-116	-153	-257	316105,28	4934506
GT007	6554008	4933838	-36	-101	-114	-242	315285,76	4935262
GT023	6554784	4933243	-21	-57	-78	-135	316039,38	4934639
PT019	6554633	4933049	-13	-39	-50	-81	315880,78	4934451
GT033	6554998	4933153	-22	-31	-38	-67	316249,12	4934541
GT005	6554684	4934175	8	-72	-54	-63	315973,84	4935574
GT020	6554153	4933225	-6	-27	-32	-51	315407,61	4934644
GT024	6555046	4933256	-21	-3	-2	-35	316301,17	4934642
GT021	6554248	4933182	-3	-17	-21	-33	315501,15	4934598
GT006	6553781	4933822	-11	-21	-23	-30	315058,02	4935254
GT022	6554435	4933262	-2	-16	-18	-29	315691,28	4934670
GT002	6553862	4934190	-15	-17	-13	-28	315152,19	4935619
PT003	6553450	4934067	-2	-12	-15	-27	314736,51	4935511
GT019	6554035	4933311	0	-9	-11	-25	315292,68	4934734
GT057	6554452	4932898	-5	-13	-15	-22	315695,03	4934306
PT009	6554196	4933565	1	-5	-19	-21	315462,94	4934982
GT053	6554318	4932964	-1	-20	-19	-20	315562,61	4934378
GT044	6554144	4933048	-1	-11	-11	-20	315392,76	4934468
GT009	6554141	4933768	7	-2	-4	-14	315415,85	4935187
GT027	6554045	4933182	8	0	-5	-14	315298,17	4934606
GT015	6554676	4933506	-9	-24	-12	-12	315940,32	4934906
PT006	6553243	4933817	0	-8	-6	-12	314520,11	4935269
GT012	6553749	4933441	-2	-1	-1	-11	315011,9	4934874
GT030	6554352	4933101	-2	-7	-8	-11	315601,77	4934513
GT047	6554439	4933040	-2	-6	-8	-11	315686,69	4934449
GT032	6554556	4933144	14	11	3	-10	315807,42	4934548
GT014	6554044	4933439	3	4	3	-10	315306,5	4934862
GT039	6553947	4933061	1	1	1	-10	315196,04	4934488
GT011	6553996	4933562	-1	-4	-4	-9	315263,42	4934986
GT008	6554079	4933823	4	-5	-1	-9	315356,25	4935245
PT001	6552857	4934666	-23	-14	-7	-9	314165,02	4936132
PT024	6553958	4932791	0	-3	-2	-8	315196,84	4934218
GT040	6554037	4933080	1	1	1	-7	315286,64	4934503
GT037	6553722	4933063	3	-3	-2	-7	314971,35	4934498
GT031	6554437	4933171	7	8	9	-5	315690	4934580
PT018	6553928	4933327	0	-3	-3	-5	315186,52	4934755
GT028	6554149	4933102	3	-2	-1	-5	315399,57	4934522
PT002	6553130	4934180	11	24	27	-4	314419,97	4935636
GT036	6553598	4933134	3	-1	-1	-4	314849,74	4934573
PT007	6553421	4933849	17	-4	-4	-3	314698,76	4935294
PT014	6554577	4933192	14	6	5	-3	315829,82	4934595
GT034	6553646	4933184	1	-1	0	-2	314899,95	4934622
PT008	6553769	4933585	2	-1	0	-2	315036,9	4935018
GT026	6553964	4933153	4	7	3	-1	315215,82	4934579
GT025	6553877	4933099	1	1	2	-1	315127,54	4934529

GT046	6554270	4933017	1	0	1	0	315516,73	4934432
GT010	6554769	4933911	-14	5	-7	0	316048,88	4935307
TUSANJ	6553366	4934070	1	-3		0	314652,27	4935518
PT023	6553264	4933090	0	0	0	0	314514,79	4934542
GT060	6554767	4932714	-3	-1	-2	0	316002,96	4934111
GT003	6553845	4934050	6	7	9	1	315129,94	4935480
GT041	6553867	4932944	0	-2	-1	1	315111,79	4934374
TUZLA	6555060	4932257	-1	-3	-3	1	316278,27	4933643
PT017	6553785	4933203	1	1	1	1	315038,89	4934635
PT004	6554243	4934425	4	18	2	2	315541,69	4935840
PT022	6554846	4932851	1	1	0	3	316086,74	4934245
GT049	6554106	4932858	-1	0	1	3	315347,06	4934279
GT001	6553451	4934296	2	3	4	4	314745,32	4935741
GT059	6554564	4932869	0	1	2	4	315805,5	4934273
GT018	6553688	4933283	4	3	3	4	314945,4	4934719
GT038	6553821	4933013	4	0	5	4	315068,59	4934444
GT054	6554247	4932800	-1	1	3	5	315486,22	4934216
GT042	6553994	4932945	1	1	3	5	315238,78	4934370
PT005	6554449	4934667	2	11	1	5	315756,71	4936074
GT013	6553938	4933468	2	3	4	5	315202,06	4934895
GT017	6553580	4933332	18	5	15	7	314838,63	4934772
GT058	6554554	4932820	1	3	5	7	315793,69	4934225
GT004	6554099	4934028	13	3	3	8	315383,24	4935449
PT020	6555126	4932952	-3	7	6	8	316370,54	4934335
GT043	6554038	4933001	2	5	7	9	315284,59	4934424
GT035	6553542	4933110	10	11	10	11	314792,56	4934552
PT010	6555040	4933654	9	14	10	11	316310	4935040
GT051	6554183	4932971	1	5	7	11	315428,44	4934389
PT026	6555504	4932576	26	12	12	12	316734,19	4933946
GT045	6554237	4933020	10	4	8	12	315484,13	4934436
PT011	6555730	4933278	4	16	1	13	316985,29	4934639
GT055	6554307	4932861	1	5	8	13	315547,84	4934275
GT052	6554278	4932938	3	7	9	15	315521,7	4934353
PT025	6554396	4932823	1	6	9	16	315636,3	4934234
GT056	6554441	4932879	4	9	12	16	315683,36	4934287
GT016	6553508	4933314	5	6	7		314766,33	4934757
GT029	6554192	4933108	-26				315442,66	4934525
GT050	6554197	4932884	1	5			315439,01	4934302
PT012	6554233	4933363	-4				315492,6	4934779
PT013	6554358	4933329	-2				315616,16	4934740
PT016	6553213	4933427	1	0	1		314476,16	4934880
PT021	6555145	4932865	29				316386,2	4934247
PANONICA	6554670	4933066	34	-14	-31		315919,1	4934467

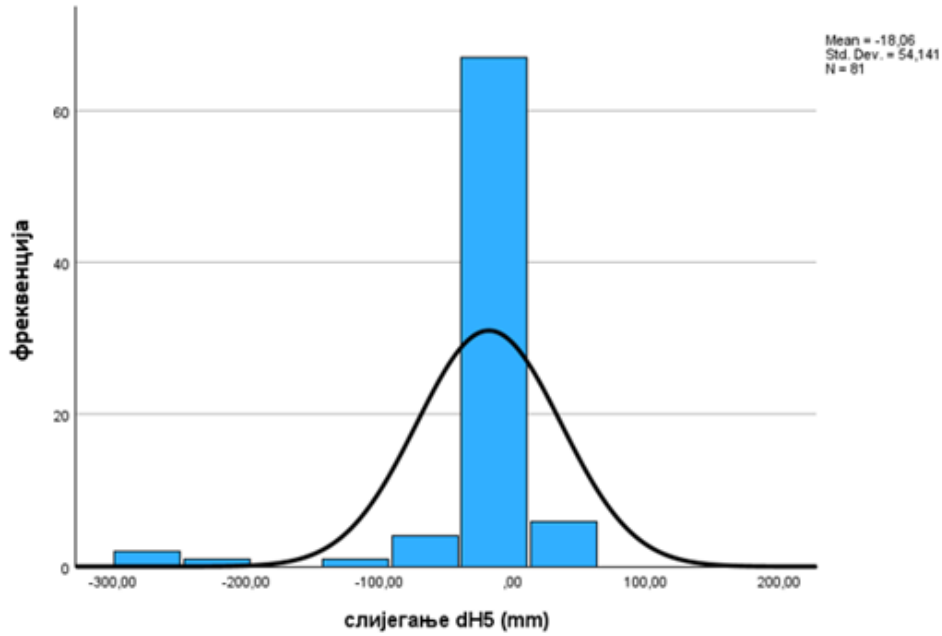
2. Statistička analiza podataka

Na osnovu podataka o vrijednostima slijeganja tla izvršena je statistička analiza podataka pomoću programa SPSS u rasponu od pet godina, od 2013. do 2018. godine. Dobijene vrijednosti slijeganja za svaku godinu mjerene su na osnovu referentne vrijednosti koja je izmjerena prve godine od početka istraživanja (2013. godine). U Tabeli br. 2 prikazane su vrijednosti deskriptivne statistike kao što su medijana, standardna devijacija, minimum i maksimum za različite vremenske epohe.

Tabela br. 2. Deskriptivna statistika

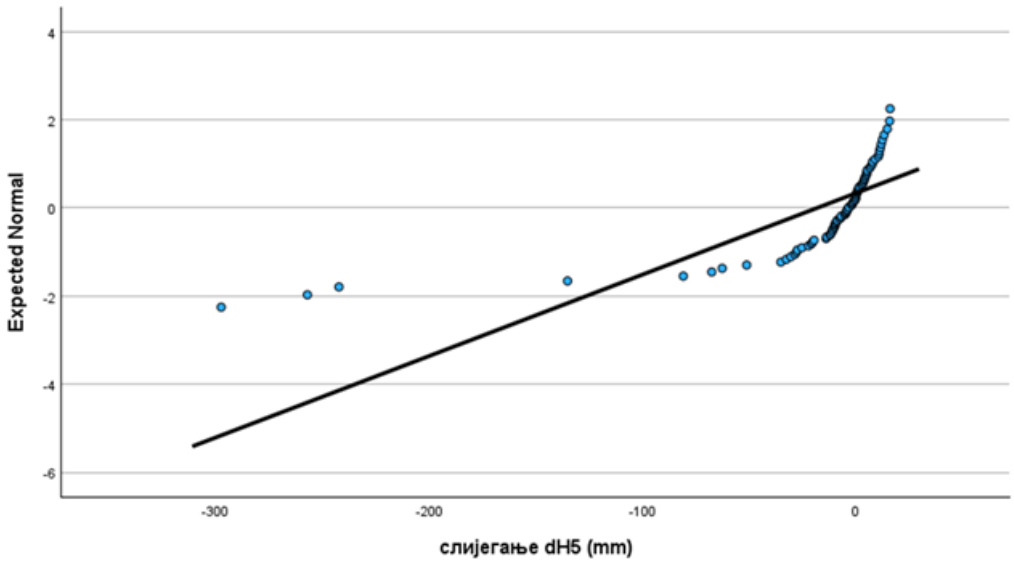
		dH1(H1_H0) (mm)	dH2(H2_H0)	H3_H0	H5_H0
Total	N	89	85	83	81
	Minimum	-46,89	-137,10	-178,30	-297,40
	Maximum	34,40	23,53	27,03	16,10
	Range	81,29	160,63	205,33	313,50
	Mean	-,2157	-7,0000	-9,1051	-18,0594
	Median	,8000	-,4000	-,1000	-3,2000
	Std. Deviation	12,17196	25,77173	31,60494	54,14088

Prije poređenja podataka, provjereno je da li podaci o slijeganju tla prate normalnu raspodjelu pomoću „Shapiro-Wilk" testa. Rezultati testa pokazuju da je $p < 0,001$, što ukazuje na statistički značajno odstupanje od normalne raspodjele. Grafički prikazi, kao što su histogram frekvencije i „Q-Q plot", potvrđuju ovaj zaključak. Iz histograma frekvencija jasno se vidi da su podaci asimetrično raspoređeni, sa izraženim negativnim repom. Većina mjernih tačaka ima vrijednosti bliske nuli, dok je prisutan manji broj ekstremnih vrijednosti.



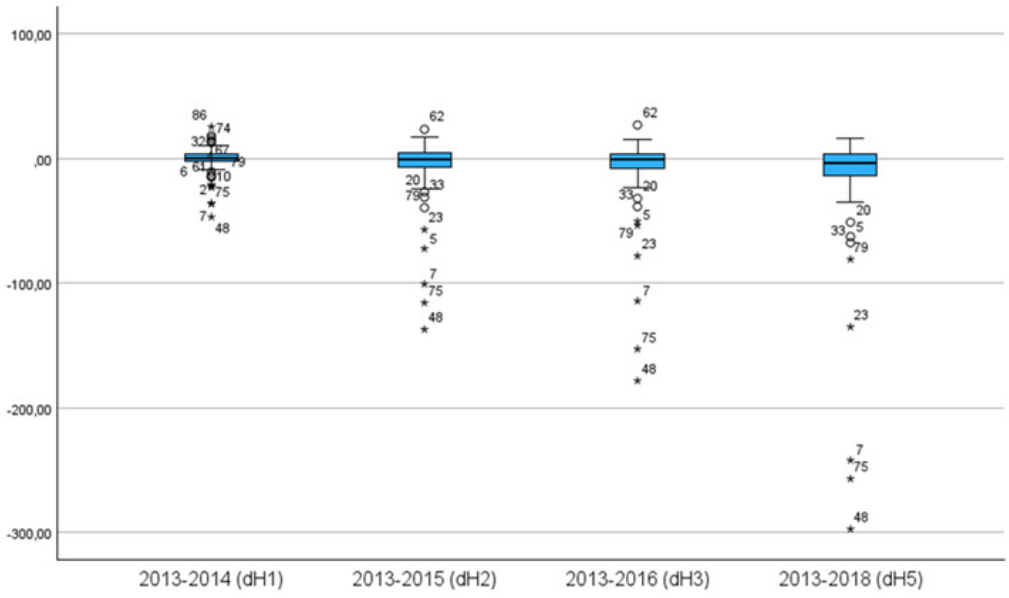
Slika 2. Histogram frekvencija slijeganja tla

„Q-Q Plot" pokazuje značajna odstupanja stvarnih vrijednosti slijeganja u odnosu na očekivane, posebno na krajevima raspodjele.



Slika br. 3. Q-Q Plot

U cilju analize trendova slijeganja tla kroz vremenske periode (2014, 2015, 2016, 2018), konstruisani su box plotovi (box-whisker dijagram) za svaku godinu mjerenja.



Slika 4. Analiza slijeganja tla po godinama

Box plotovi četiri uzastopna mjerenja (2014, 2015, 2016, 2018) pokazuju jasan trend progresivnog slijeganja. Medijana se kontinuirano spušta od +5 mm (2014) do -10 mm (2018), što ukazuje da preko polovine mjernih tačaka ima negativnu promjenu visine. Interkvartilni raspon se takođe spušta i širi, što potvrđuje sistematsko pogoršanje stanja. Broj outlier-tačaka raste kroz godine sa četiri (2014) na preko sedam (2018), pri čemu

se identifikuju konstantni problemi na tačkama 48, 7, 23 i 75. Tačka 48 pokazuje najveće pogoršanje od -45 mm (2014) do -300 mm (2018), što predstavlja prosječno slijeganje od 60 mm godišnje. Vizuelna analiza box plotova nam otkriva:

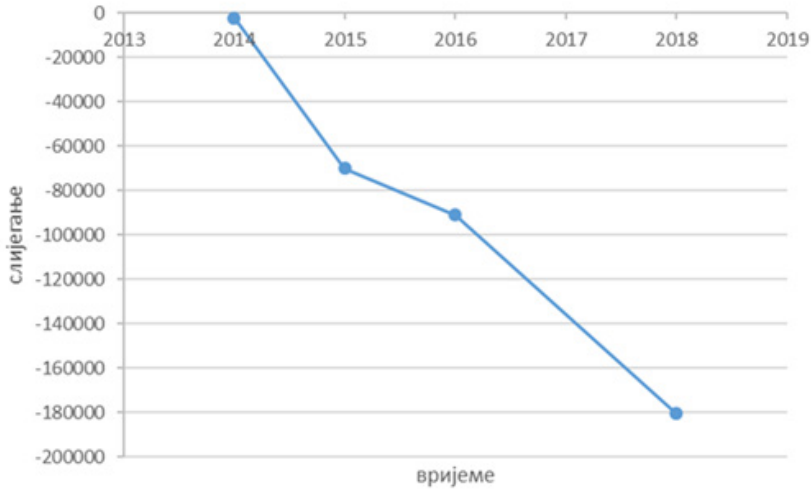
- sistematsko pogoršanje slijeganja tla kroz vrijeme,
- postojanje lokalizovane zone intenzivnog slijeganja (tačke 48, 7, 23, 79),
- da se problemi sa slijeganjem ne rješavaju s vremenom, već postaju intenzivniji.

Prethodnom grafičkom analizom raspodjele podataka, kao i na osnovu rezultata testa normalnosti, utvrđeno je da vrijednosti slijeganja ne prate normalnu raspodjelu. U cilju ispitivanja međusobne povezanosti rezultata slijeganja dobijenih u različitim epohama mjerenja, izvršena je korelaciona analiza. U nastavku ovog rada upotrijebljen je Spearman-ov test korelacije, pošto na osnovu prethodne analize podaci ne ispunjavaju uslove za primjenu Pearson-ve linearne korelacije [3]. Prvo je analizirana veza između promjene slijeganja u ranom intervalu posmatranja (dH1) i promjene slijeganja u srednjem vremenskom intervalu (dH3), u cilju ispitivanja promjene slijeganja tla s vremenom. Dobijena vrijednost testa je 0,652 ($p < 0,001$), što pokazuje da postoji snažna pozitivna korelacija između dH1 i dH3. Zatim su analizirane promjene slijeganja između srednjeg (dH3) i najdužeg intervala (dH5), gdje je dobijena vrijednost 0,860 ($p < 0,001$) koja pokazuje veoma snažnu pozitivnu korelaciju.

Tabela 3. Pregled Spearman-ovih korelacija

Poređenje intervala	Spearman ρ	Tumačenje
dH1 – dH3	0,652	snažna pozitivna korelacija
dH3 – dH5	0,860	veoma snažna pozitivna korelacija

U radu je, neparametarskim testom Man-Kendall, ispitan trend promjene izmjerenih vrijednosti slijeganja tačaka kroz vrijeme. Dobijena vrijednost Kendall-ovog koeficijenta $\tau = -1,000$ ukazuje na potpuno monotono negativan trend, odnosno na kontinuirano povećanje slijeganja tokom vremena bez promjene smjera procesa, što pokazuje i grafička analiza na Slici br. 5.



Slika br. 5. Slijeganje tla kroz mjerne epohe

Međutim, s obzirom na to da je p-vrijednost testa p = 0,083, uočeni trend nije statistički značajan na nivou značajnosti 0,05. Ovo ukazuje da, iako vizuelna analiza pokazuje opadajući trend, on ne može biti potvrđen sa dovoljnom statističkom pouzdanošću, što je vjerovatno posljedica malog broja mjernih epoha i relativno malih apsolutnih promjena visine. Sa prethodnog dijagrama primjećujemo očiglednu razliku slijeganja između godina. Da bismo odredili kolika je i da li uopšte postoji određena zavisnost u slijeganju, koristićemo Friedman-ov test zato što ispitivanje sprovodimo na zavisnim uzorcima, odnosno vršimo mjerenja istih tačaka kroz različite godine.

Tabela br. 4. Friedman–ov test

	Mean Rank
dH1(H1_H0)(mm)	2,91
dH2(H2_H0)	2,47
H3_H0	2,52
H5_H0	2,10

N	80
Chi-Square	16,011
df	3
Asymp. Sig.	,001

Primjenjujući Friedman-ov test na podatke o slijeganju za periode 2014, 2015, 2016. i 2018. godine, dobijeni su sljedeći rezultati: $\chi 2(3) = 16,011$, p = 0,001. Dobijena p-vrijednost, koja je statistički veoma značajna na nivou značajnosti 0,05, ukazuje na veliku razliku u slijeganju između ispitanih godina. Rangovi pojedinačnih godina pokazuju da 2014. godina ima najviši srednji rang (2,91), što ukazuje na najintenzivnije slijeganje tla upravo u toj godini, dok 2018. godina ima najniži rang (2,10). Friedman ne upoređuje ukupno slijeganje, već godišnje promjene slijeganja. U 2014. godini visina tla je najviše opala što nam pokazuje i njen rang, dok se u 2018. godini visina tla smanjila za najmanju vrijednost. Nakon što je Friedman-ov test pokazao značajnu razliku između godina (p = 0,001), sprovedena je post-hoc analiza koristeći Wilcoxon test prema nivou značajnosti p < 0,0083 (0,05/6).

Tabela br. 5. Wilcoxon-ov test

	dH2(H2_H0) - dH1(H1_H0) (mm)	H3_H0 - dH1 (H1_H0)(mm)	H5_H0 - dH1 (H1_H0)(mm)	H3_H0 - dH2 (H2_H0)	H5_H0 - dH2 (H2_H0)	H5_H0 - H3_H0
Z	-3,179[b]	-3,364[b]	-4,381[b]	-,620[b]	-3,666[b]	-4,108[b]
Asymp. Sig. (2-tailed)	,001	<,001	<,001	,536	<,001	<,001

Post-hoc analiza koristeći Wilcoxon test otkrila je sljedeće značajne razlike: godina 2014. se statistički značajno razlikuje od svih ostalih godina (2015, 2016, 2018; p < 0,001 za sva poređenja). Dok s druge strane, 2015. i 2016. godina nisu pokazale statistički značajnu razliku (p = 0,536), što ukazuje na skoro isti nivo slijeganja u ovim prelaznim godinama. Godina 2018. se, takođe, značajno razlikuje od svih prethodnih godina. Za bolje razumijevanje prikazaćemo dobijene podatke u Tabeli br. 6.

Tabela br. 6. Pregled Wilcoxon-ovog testa

Poređenje	p – vrijednost	Značajnost ($p < 0.0083$)	Interpretacija
2014:2015	0,001	Da	Razlikuju se
2014:2016	< 0,001	Da	Razlikuju se
2014:2018	< 0,001	Da	Razlikuju se
2015:2016	0,536	Ne	Slične godine
2015:2018	< 0,001	Da	Razlikuju se
2016:2018	< 0,001	Da	Razlikuju se

Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti slijeganje tla kroz tri faze:

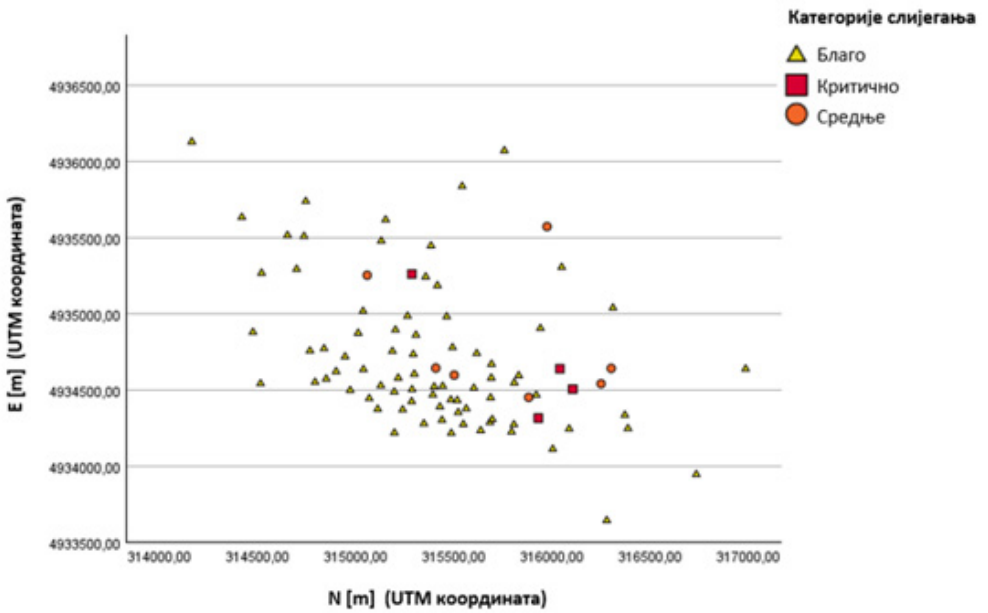
- Faza 1 (2014): najveće godišnje slijeganje, statistički značajno različita od kasnijih godina, može predstavljati početnu stabilizaciju tla nakon izgradnje;
- Faza 2 (2015–2016): sličan nivo slijeganja između godina, nema statistički značajne razlike, predstavlja relativno stabilan period u pogledu slijeganja;
- Faza 3 (2018): najmanji godišnji intenzitet slijeganja, statistički značajno različita od prethodnih godina, ukazuje na smanjenje brzine slijeganja tokom vremena.

3. Identifikacija kritičnih zona i prostorna analiza slijeganja

Slijeganje tla se rijetko manifestuje ravnomjerno na čitavoj površini terena. U praksi, deformacije su često koncentrisane u posebnim zonama gdje se kombinuju nepovoljni geološki uslovi, povišeno opterećenje ili promjene u hidrološkom režimu. Identifikacija ovih kritičnih zona predstavlja ključni korak u procjeni rizika i planiranju odgovarajućih zaštitnih mjera. U prethodnim poglavljima analizirana je vremenska dinamika slijeganja kroz statističke metode koje su ukazale na opšti trend slijeganja i međugodišnje razlike. Međutim, za potpuno razumijevanje procesa neophodno je sprovesti i prostornu analizu koja će otkriti da li postoje oblasti sa visokim intenzitetom slijeganja, kao i da li se ove tačke grupišu u određenim dijelovima terena. Primjenom prostornog pristupa, tačke su kategorisane prema intenzitetu slijeganja, uz identifikaciju najkritičnijih slučajeva koji zahtijevaju posebnu pažnju. Cilj je bio identifikovati tačke sa najvećim slijeganjem i odrediti brzinu njihove deformacije, analizirati prostornu raspodjelu kritičnih tačaka i utvrditi da li formiraju određene zone i procijeniti dobijene rezultate u svrhu monitoringa i održavanja infrastrukture. Prostorna vizuelizacija omogućena je korištenjem UTM koordinata (E, N), što je omogućilo kreiranje mape raspodjele koja jasno prikazuje geografski kontekst svake tačke. Definisane su tri kategorije tačaka na osnovu ukupnog slijeganja u periodu od 2013–2018 (dH5):

- Kritične tačke ($\Delta H \leq -100mm$);

- Tačke sa srednjim slijeganjem (-100mm < Δ ≤ -30mm);
- Tačke sa blagim slijeganjem (ΔH > -30mm).



Slika br. 6. Prostorna raspodjela mjernih podataka

Analizom dijagrama prostorne raspodjele mjernih tačaka (Slika br. 6) uočavamo sljedeće:

- Neravnomjerna raspodjela slijeganja, nije jednako raspoređeno po terenu;
- Tačke sličnog intenziteta imaju tendenciju grupisanja u određenim dijelovima terena;
- Kritične tačke koncentrisane su u srednjem i istočnom dijelu terena, grupisane su i ne pojavljuju se slučajno;
- Periferni dijelovi terena imaju blago ili srednje slijeganje.

Tabela 7. Pregled najkritičnijih tačaka

Tačka	Ukupno slijeganje (mm)	Prosječno godišnje slijeganje (mm/god)	Kategorija	UTM koordinate (E,N)
GT048	-297	-59.4	Kritično	315929,77; 4934315,16
PT015	-257	-51.4	Kritično	316105,28; 4934505,71
GT007	-242	-48.4	Kritično	315285,76; 4935261,91
GT023	-135	-27	Kritično	316039,38; 4934639,07
PT019	-81	-16.2	Srednje	315880,78; 4934450,88

Tabela br. 7 prikazuje pet tačaka sa najvećim ukupnim slijeganjem. Za svaku tačku dati su: identifikacija, ukupno slijeganje u milimetrima, prosječna godišnja brzina slijeganja, kategorizacija prema intenzitetu i UTM koordinate za geografsku orijentaciju. Tačka GT048 predstavlja najekstremniji slučaj sa ukupnim slijeganjem od –297 mm i prosječnom brzinom slijeganja od –59,4 mm/godišnje. Tačke PT015 i GT007 takođe pokazuju izuzetno visoke vrijednosti slijeganja (preko –240 mm), sa godišnjim brzinama preko –48 mm, dok tačke GT023 (–135 mm) i PT019 (–81 mm) predstavljaju sekundarne kritične tačke, ali sa znatno nižim intenzitetom od prve tri. Prostorni raspored ovih tačaka ukazuje na dva različita slučaja:

- Tačka GT048 je relativno izolovana, što može ukazivati na lokalnu, geološku nepovoljnost tla;
- Tačke PT015, GT007 i GT023 formiraju grupu u srednjoj zoni terena, što nam sugeriše na pogoršane geotehničke uslove.

ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene statističke analize rezultata mjerenja slijeganja tla u periodu od 2013. do 2018. godine može se zaključiti da na posmatranoj lokaciji postoji izražen i vremenski kontinuiran proces slijeganja tla. Deskriptivna statistička analiza i grafički prikazi (Slika br. 2. do Slika br. 5.) ukazuju na sistematsko pogoršanje stanja tla kroz vrijeme, uz pojavu lokalizovanih zona sa znatno većim intenzitetom slijeganja u odnosu na ostatak terena. Rezultati testova normalnosti pokazali su da podaci ne prate normalnu raspodjelu, što je dovelo do primjene neparametarskih statističkih metoda. Spearman-ova korelaciona analiza ukazala je na snažnu i veoma snažnu pozitivnu povezanost između slijeganja u različitim vremenskim intervalima, što pokazuje da tačke sa izraženijim slijeganjem u ranijim fazama nastavljaju da pokazuju povećane deformacije i u kasnijim periodima. Ovi rezultati su u skladu sa teorijom konsolidacije tla i ukazuju na postojanje stabilnog trenda ponašanja tla tokom vremena. Friedman-ov test potvrdio je postojanje statistički značajnih razlika u godišnjim promjenama slijeganja između posmatranih godina, pri čemu je identifikovana početna faza sa najvećim intenzitetom slijeganja, zatim prelazna stabilna faza, kao i kasnija faza sa smanjenom brzinom slijeganja. Prostorna analiza dodatno je ukazala na neravnomjernu raspodjelu slijeganja, sa jasno izdvojenim kritičnim zonama u središnjem i istočnom dijelu terena. Na osnovu dobijenih rezultata tokom istraživanja, navodimo preporuke za budući monitoring i intervencije:

- Za tačke GT048, PT015 i GT007 predlaže se sprovođenje dodatnih geotehničkih istraživanja i razmatranje tehničkih intervencija (injektiranje tla, ojačavanje temelja).
- Pojačati monitoring za sve kritične tačke i uvesti mjerenje na svakih šest mjeseci umjesto godišnjih mjerenja.
- U budućim projektima izbjegavati izgradnju u identifikovanim zonama visokog rizika ili predvidjeti dodatne mjere stabilizacije.

Na osnovu dobijenih trendova i prosječnih brzina slijeganja, moguće je izvesti procjene budućih deformacija. Kritične tačke zahtjevaju najveću pažnju:

- Tačka GT048 (-59,4 mm/god): Ukoliko se trend nastavi, u narednih pet godina očekuje se dodatnih -297 mm slijeganja, što će dovesti do ukupnog pada od -594 mm za desetogodišnji period.
- Tačka PT015 (-51,4 mm/god): Procijenjeno slijeganje za desetogodišnji period je –514 mm.
- Tačka GT007 (–48,4 mm/god): Procijenjeno slijeganje za 10 godina je –484 mm.

Na osnovu vremenske i prostorne analize podataka zaključujemo da kontinuirani monitoring i sistematska obrada podataka slijeganja tla predstavljaju neizostavan preduslov za očuvanje stabilnosti i bezbjednosti kako samog tla, tako i svih građevinskih objekata koji se na njemu nalaze.

LITERATURA

[1] Nonveiller, E. (1979). *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Zagreb, Školska knjiga.
[2] Roje-Bonacci, T. (2007). *Mehanika tla*. Treće izdanje. Split. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
[3] Jakšić, S., & Maksimović, S. 2020. *Vjerovatnoća i statistika*. Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, str. 223–233.
[4] Maksimović M. 2005. *Mehanika tla*, Beograd.
[5] Preradović Lj., & Đajić V. (2011). *Analitičke i statističke tehnike u savremenim istraživanjima*, AGGf.
[6] Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons.
[7] Benjamin, J. R. Cornell, C. Allin (2014). Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. Dover Publications.
[8] EN 1997-1:2004. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules.

STATISTICAL EVALUATION OF GROUND SUBSIDENCE DATA

Author: MARIJA KAČAVENDA
e-mail: marija.kacavenda@student.aggf.unibl.org
Mentor: Full Prof. Snježana Maksimović
Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, University of Banja Luka

Introduction: Ground subsidence represents a complex geotechnical process that may significantly compromise the stability of structures and infrastructure.

Objective: This study presents a comprehensive statistical analysis of subsidence measurements collected at 89geodetic control points over the period from 2013 to 2018, with the purpose of spatial analysis of subsidence and identification of critical zones.

Materials and Methods: Descriptive analysis showed that mean subsidence ranged from –0.2 mm (2014) to –18.1 mm (2018), while the maximum recorded subsidence reached –297 mm. Critical points with cumulative subsidence exceeding 100 mm were identified, most notably GT048 (–297 mm; –59.4 mm/year), PT015 (–257 mm; –51.4 mm/year), and GT007 (–242 mm; –48.4 mm/year). Correlation analysis revealed a strong positive relationship between the early and middle intervals (dH1–dH3: $\rho = 0.652$; $p < 0.001$), and a very strong relationship between the middle and final intervals (dH3–dH5: $\rho = 0.860$; $p < 0.001$). Friedman's test confirmed statistically significant differences between years ($\chi^2 = 16.011$; $p = 0.001$), and the post-hoc Wilcoxon test identified three phases: the phase of highest subsidence (2014), a stable phase (2015–2016), and a phase of reduced intensity (2018).

Conclusion: The results indicate the need for additional geotechnical measures and continuous monitoring, particularly at critical points GT048, PT015 and GT007, where further investigations and interventions are recommended.

Keywords: statistical analysis; non-parametric tests; monitoring; ground subsidence; geotechnical engineering

https://doi.org/10.63356/stes.ing.2026.002 УДК 502.131.1:621.383.51

ZELENI VODONIK U FUNKCIJI DEKARBONIZACIJE GRAĐEVINSKOG SEKTORA – STUDIJA SLUČAJA TRANSFORMACIJE DILINGER ČELIČANE

Autor: MARIJA MALIĆ, Sara Malinović
e-mail: marija.malic@student.aggf.unibl.org
Mentor: prof. dr Igor Jokanović
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

Uvod: Rad analizira dekarbonizaciju proizvodnje čelika primjenom zelenog vodonika na primjeru Dillinger željezare i njenog Power4Steel projekta, sa osvrtom na implikacije za građevinski sektor.

Cilj: Analizirati tehničku izvodljivost i ekonomsku opravdanost Power4Steel projekta, kvantifikovati smanjenje emisija i povećanje potrošnje energije, te ocijeniti doprinos dekarbonizaciji građevinskog sektora.

Materijal i metode: Korišćena je studija slučaja Dillinger željezare. Podaci su prikupljeni iz primarnih i sekundarnih izvora, a analiza je sprovedena kroz komparativnu analizu BF-BOF i DRI-EAF procesa, uz dodatni stehiometrijski proračun.

Rezultati: Literaturni podaci ukazuju na 90–95% smanjenje emisija CO_2 primjenom DRI-EAF procesa uz zeleni vodonik, dok proračun u ovom radu, na osnovu konkretnih vrijednosti emisija od 1.921 kg CO_2/t za BF-BOF i 339 kg CO_2/t za DRI-EAF, pokazuje smanjenje od 82,4%. DRI-EAF zahtijeva 8–10 puta veću potrošnju električne energije. Stehiometrijski proračun potvrdio je potrošnju H_2 od 54,1 kg/t Fe. Zeleni čelik je 30–54% skuplji (600–850 €/t). Dillinger planira proizvodnju od 2028. i klimatsku neutralnost do 2045. uz investiciju od 4,6 milijardi €. CBAM analiza pokazuje da tradicionalni čelik ima trošak od 46.82 €/t, a zeleni nema.

Zaključak: Power4Steel je tehnički izvodljiv i omogućava značajno smanjenje emisija, ali donosi izazove (endotermnost, 8–10 puta veća potrošnja struje, veća potrošnja vode). Iako je zeleni čelik trenutno skuplji, CBAM i EU ETS ga očekivano čine konkurentnim do 2030. Projekat je ključan za održivu transformaciju građevinskog sektora u Evropi.

Ključne riječi: zeleni vodonik; dekarbonizacija; čelik; DRI-EAF; Power4Steel; građevinski sektor; Dillinger

UVOD

Klimatske promjene, uzrokovane prvenstveno emisijom ugljen-dioksida već se ispoljavaju kroz globalni porast temperatura, podizanje nivoa mora i sve češće ekstremne vremenske događaje. Koncentracija CO_2 u atmosferi je dostigla 420 ppm u 2023. godini, što je najviši nivo u posljednjih 800 000 godina (1). Povećanje koncentracije CO_2 u atmosferi pojačava efekat staklene bašte, izazivajući globalno zagrijavanje i posljedično dovodi i do otapanja ledenih masa i širenja okeana, uzrokujući podizanje nivoa mora.

Prema podacima *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2), globalna prosječna temperatura porasla je za 1,1°C u periodu od 2011. do 2020. u odnosu na devetnaesti vijek. Podizanje nivoa mora ugrožava čitave gradove poput Venecije, dok su toplotni talasi u Evropi samo krajem juna 2026. godine, prema podacima WHO-a (3), odnijeli više od 10 000 života. Ove promjene predstavljaju jednu od najvećih prijetnji savremenom društvu,

zbog čega je smanjenje emisija CO_2 postalo ključni cilj globalnih klimatskih politika, a ostvarenje tih ciljeva nužno u svim sektorima ljudske djelatnosti. Građevinski sektor tu igra veliku ulogu jer troši ogromne količine energije i sirovina, pa tako učestvuje sa oko 37% u ukupnoj svjetskoj emisiji CO_2, prema podacima Međunarodne agencije za energiju (4).

Najveći dio te emisije potiče od proizvodnje osnovnih materijala, naročito čelika i cementa i stakla, ali i od ogromne količine fosilnih goriva koja se koriste u njihovoj proizvodnji. Današnja glavna tehnologija proizvodnje čelika zasniva se na visokim pećima i metalurškom koksu, što je izuzetno štetno za klimu, jer se za svaku tonu proizvedenog čelika na ovaj način u atmosferu se ispušta između 1,8 i 2,0 tona CO_2 (5). Čelik je odgovoran za otprilike 7 do 9% globalne emisije, a s obzirom na to da se godišnje proizvede više od 1,8 milijardi tona čelika, jasno je da bez promjene tehnologije nećemo moći ispuniti ciljeve Pariskog sporazuma (6). Ovim sporazumom potpisnice se obavezuju da ograniče globalno zagrijavanje na 2°C u odnosu na devetnaesti vijek. Da bi se to postiglo, neophodno je drastično smanjiti emisiju u svim sektorima, a posebno u onima koji su najveći zagađivači, poput građevinarstva i industrije čelika. Oslanjanje na uvoz fosilnih goriva, posebno iz politički nestabilnih regiona, pokazalo se kao ozbiljna ranjivost Evropske unije, te je pitanje energetske nezavisnosti od sve većeg značaja. Iako se tranzicija ka obnovljivim izvorima nameće kao logično rješenje, oni donose novi problem, nestalnost. Sunčevo zračenje i brzina vjetra su vremenski i prostorno promjenjivi, a skladištenje energije još uvijek nije dovoljno razvijeno da bi se ovi izvori mogli koristiti kao pouzdana osnova energetskog sistema. Zato se zeleni vodonik sve više spominje, ne samo kao rješenje za dekarbonizaciju industrije, već i kao dopuna energetskom sistemu u trenucima kada obnovljivi izvori zakažu, čime se istovremeno smanjuje zavisnost od uvoza fosilnih goriva i povećava energetska nezavisnost Evrope. Zeleni vodonik se dobija elektrolizom vode pomoću energije iz obnovljivih izvora i može u potpunosti zamijeniti koks kao redukcijsko sredstvo. U procesu direktne redukcije željeza on preuzima ulogu ugljen-monoksida, ali umjesto CO_2 kao nusproizvod nastaje samo voda u obliku vodene pare. Na taj način moguće je smanjiti emisiju u proizvodnji čelika za više od 90%, što je ogroman iskorak za cijelu metaluršku industriju.

Dillinger čeličana je postavila ambiciozne ciljeve dekarbonizacije kroz projekat Power-4Steel. Do 2028. godine planiraju početak proizvodnje niskougljeničnog čelika pod brendom PURE STEEL+ u novim postrojenjima za direktnu redukciju željeza (DRI) i dodatnu obradu željeza u lučnim elektičnim pećima (EAF), dok bi do 2030. godine emisija trebalo da bude smanjena za 55% u odnosu na referentnu godinu. Konačni cilj je potpuna klimatska neutralnost do 2045. godine, uz postepeno gašenje svih visokih peći i prelazak na proizvodnju zasnovanu na zelenom vodoniku, čija se puna upotreba očekuje do 2029. godine. Važno je naglasiti da ovaj prelazak neće biti trenutan, Dillinger je predvidio prelaznu fazu u kojoj će se u DRI procesu koristiti mješavina plina i zelenog vodonika, sa postepenim povećanjem udjela vodonika od početnih 20% do 100% do 2029. godine. Ovaj pristup omogućava stabilnu proizvodnju i smanjuje operativni rizik dok se ne izgradi potpuna infrastruktura za snabdijevanje zelenim vodonikom, a istovremeno već u prvoj fazi donosi značajno smanjenje emisija u odnosu na tradicionalni proces. Cilj ovog rada je da na osnovu trenutno dostupnih naučnih i tehničkih podataka analizira kako se ovi ciljevi mogu ostvariti, sagledavajući tehničke, ekonomske i logističke izazove koje takva transformacija donosi. U radu će biti sagledane šire implikacije ove tranzicije za održivo građevinarstvo, naročito kada je riječ o dostupnosti zelenog čelika kao ključnog materijala za buduću infrastrukturu. Osnovna hipoteza ovog rada je da je Dillingerov Power4Steel projekat, uprkos značajnim tehničkim i ekonomskim izazovima, izvodljiv model za dekarbonizaciju teške industrije, te da predstavlja ključni preduslov za održivu transformaciju građevinskog sektora u Evropi uz istovremeno jačanje njene energetske nezavisnosti.

MATERIJAL I METODE

U ovom radu je korištena studija slučaja kao primarna metodološka strategija, jer omogućava analizu jednog reprezentativnog primjera industrijske transformacije koja je još uvijek u toku. Za predmet istraživanja odabrana je Dillinger željezara i njen projekt „Power4Steel". Odabir je zasnovan na aktuelnosti projekta, s obzirom na to da je jedan od prvih i revolucionarnih projekata u Evropi koji integriše zeleni vodonik u industrijsku proizvodnju čelika u punom obimu. Ovo ga čini pogodnim za analizu tehničkih i logističkih izazova s kojima će se suočavati slični projekti u budućnosti, jer Dillinger proizvodi debele čelične limove koji se koriste u mostogradnji, vjetroturbinama i drugim infrastrukturnim projektima.

Podaci korišteni u radu su prikupljeni iz primarnih i sekundarnih izvora. Primarni izvori uključuju zvanične web stranice Dillinger čeličane, godišnji izvještaj kompanije za 2024. godinu, saopštenje za javnost od 15. marta 2026. godine o potpisivanju ugovora s kompanijom Verso Energy, te tehničku specifikaciju DRI postrojenja objavljenu na zvaničnoj web stranici. Sekundarni izvori obuhvataju dokumente Evropske unije, poput European Green Deal-a (EGD), REPowerEU plana i Uredbe o mehanizmu za ugljenično prilagođavanje na granici (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM izvještaje Međunarodne agencije za obnovljivu energiju (International Renewable Energy Agency – IRENA), posebno studiju „Water for Green Hydrogen-global water stress analysis" iz 2023. godine, publikacije Hydrogen Europe-a, te relevantne naučne radove. Poseban doprinos pružili su materijali sa Ljetne škole o zelenom vodoniku održane u Saarbrückenu jula 2026. godine, među kojima su predavanja o termodinamičkim aspektima proizvodnje željeza. Korišteni su i novinski članci koji prate razvoj Dillingerovog projekta, kao i naučni radovi o DRI tehnologiji i zelenom čeliku.

Analiza podataka je sprovedena kroz nekoliko metoda. Pregled literature je omogućio postavljanje teorijskog okvira za razumijevanje tradicionalne proizvodnje čelika u visokim pećima, tehnologija elektrolize i karakteristika DRI+EAF procesa. Analiza javno dostupnih podataka je podrazumijevala prikupljanje i sistematizaciju kvantitativnih i kvalitativnih informacija o Dillingerovom projektu, uključujući tehničke specifikacije, vremenske okvire i ekološke ciljeve. Komparativna analiza korištena je za poređenje tradicionalnog procesa proizvodnje čelika s novim DRI+EAF procesom koji koristi zeleni vodonik. Poređenje je izvršeno na osnovu nekoliko parametara: hemijskih reakcija i stehiometrijskih odnosa, energetskih zahtjeva, vrste i količine ulaznih sirovina i emisija CO_2. Poređenje je izvršeno tabelarno, što omogućava brzi uvid u ključne razlike između dva procesa.

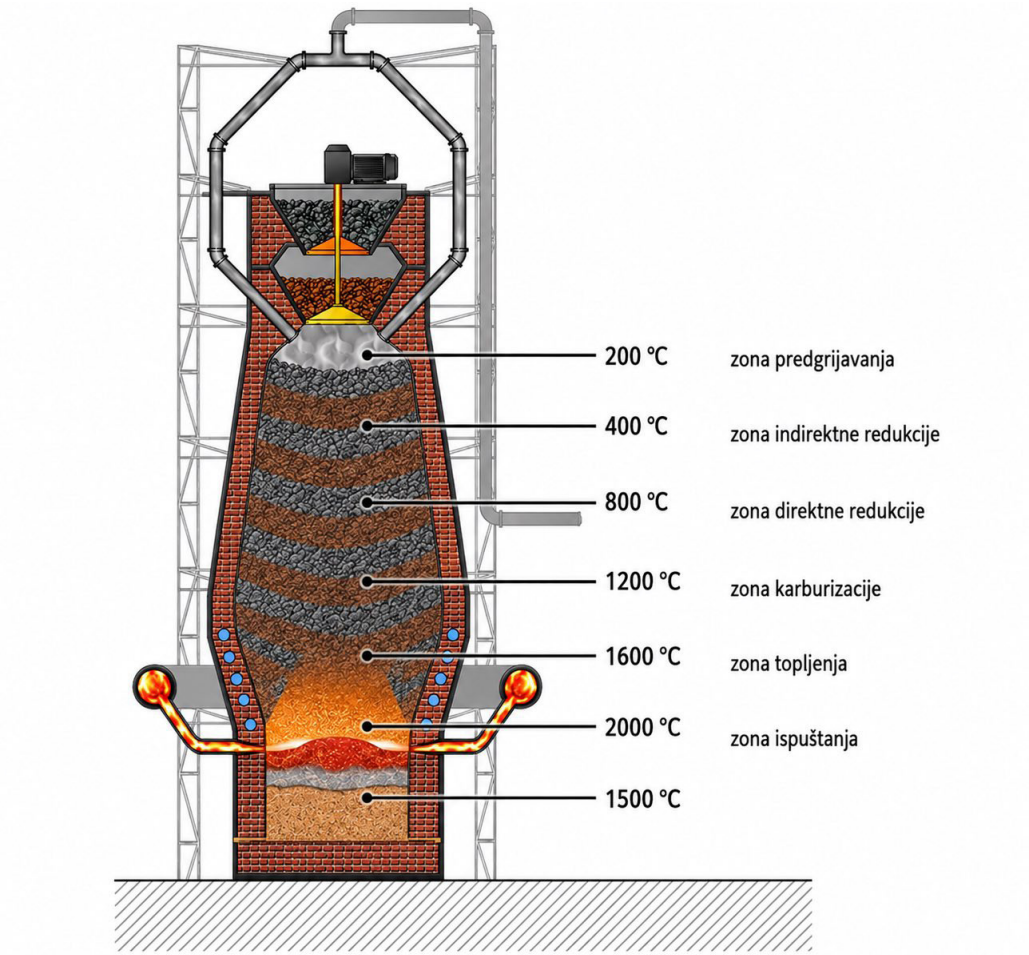
Prilikom interpretacije rezultata, potrebno je uzeti u obzir određena ograničenja. Rad se zasniva isključivo na javno dostupnim sekundarnim izvorima podataka. S obzirom na to da je projekt „Power4Steel" još uvijek u fazi izgradnje, s predviđenim puštanjem u rad 2029. godine, određeni podaci nisu konačni; stvarni operativni troškovi, pouzdanost opreme i tačne emisije mogu se razlikovati od planiranih vrijednosti. Analiza se oslanja na trenutni regulatorni okvir Evropske unije, uključujući EU ETS, CBAM i REPowerEU, a promjene u politici i regulativi tokom implementacije projekta mogle bi značajno uticati na ekonomsku opravdanost projekta. Dillinger se nalazi u regionu Saarland, koji ima specifične geografske i industrijske karakteristike, blizinu francuske granice, postojeću industrijsku infrastrukturu, dostupnost radne snage i podršku lokalnih vlasti, što možda nije primjenjivo na druge regije ili zemlje koje planiraju slične projekte. Rad se fokusira isključivo na zamjenu ugljenika vodonikom u procesu redukcije željeza, dok drugi važni aspekti dekarbonizacije čelične industrije, poput korištenja obnovljive energije za elektrolizu, reciklaže otpada ili upotrebe biomase, nisu detaljno analizirani. Podaci korišteni u radu su prikupljeni do jula 2026. godine, a s obzirom na dinamičnost industrije zelenog vodonika i čelika, noviji podaci mogli bi ponuditi dodatne analize i produbiti uvide izne-

sene u ovom radu. Studija pruža relevantan uvid u izazove i prilike dekarbonizacije teške industrije primjenom zelenog vodonika, te predstavlja vrijedan doprinos razumijevanju ove teme u kontekstu održivog građevinarstva.

TEORIJSKA OSNOVA

Tradicionalna proizvodnja čelika (BF-BOF)

Većina današnjeg čelika se proizvodi u visokim pećima koje su prikazane na slici 1 koristeći koks kao redukciono sredstvo. Koks sagorijeva u prisustvu kiseonika, pri čemu nastaje ugljen-monoksid, koji zatim redukuje željeznu rudu (7).



Slika 1. Visoka peć

Promjena entalpije, mjera ukupne energije sistema, ukazuje na sposobnost reakcije da se sama zagrije ili da bude zagrijana dovođenjem dodatne toplote. Endotermnu reakciju koja zahtijeva dovođenje toplote iz okoline karakteriše pozitivna promjena entalpije dok negativna promjena entalpije, označava egzotermnu reakciju pri kojoj se toplota oslobađa u okolinu. Entalpija reakcije određuje su na osnovu podataka iz NIST-JANAF Thermochemical Tables (8). Za pojedinačna jedinjenja korištene su vrijednosti standardne entalpije

stvaranja, $\Delta f H^{\circ}$, pri standardnoj temperaturi od 298,15 K i standardnom pritisku od 0,1 MPa, kako je navedeno u JANAF tabelama. Na osnovu ovih tabličnih vrijednosti i primjenom Hessovog zakona, entalpije ispitivanih reakcija izračunate su kao razlika zbira entalpija stvaranja produkata i zbira entalpija stvaranja reaktanata, prema izrazu:

$$\Delta_r H^0 = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ}(\text{produkti}) - \sum_j \nu_j \Delta_f H_j^{\circ}(\text{reaktanti}) \quad [1]$$

Osnovne hemijske reakcije i njihove entalpije su iz jednačine [1]:

$$\Delta_r H^0 = 2(-110{,}5) - (2 \cdot 0 + 0) = -221 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$2C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)} \quad \Delta H^0_{298K} = -221 \text{ kJ/mol} \quad [2]$$

$$\Delta_r H^0 = [2(0) + 3(-393{,}5)] - [(-824{,}2) + 3(-110{,}5)] = -24{,}8 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$Fe_2O_{3(s)} + 3CO_{(g)} \rightarrow 2Fe_{(s)} + 3CO_{2(g)} \quad \Delta H^0_{298K} = -24{,}8 \text{ kJ/mol} \quad [3]$$

Prva reakcija (jednačina [2]) je egzotermna i obezbjeđuje toplotu neophodnu za odvijanje procesa, dok druga (jednačina [3]) predstavlja ključni korak redukcije željezne rude do elementarnog željeza. Međutim, upravo iz ove druge reakcije proizilazi osnovni ekološki problem tradicionalne metalurgije, za svaki mol proizvedenog željeza nastaje 1,5 mol CO_2. Ova činjenica čini tradicionalnu čeličanu jednim od najvećih industrijskih zagađivača i glavnim akterom u emisiji gasova staklene bašte.

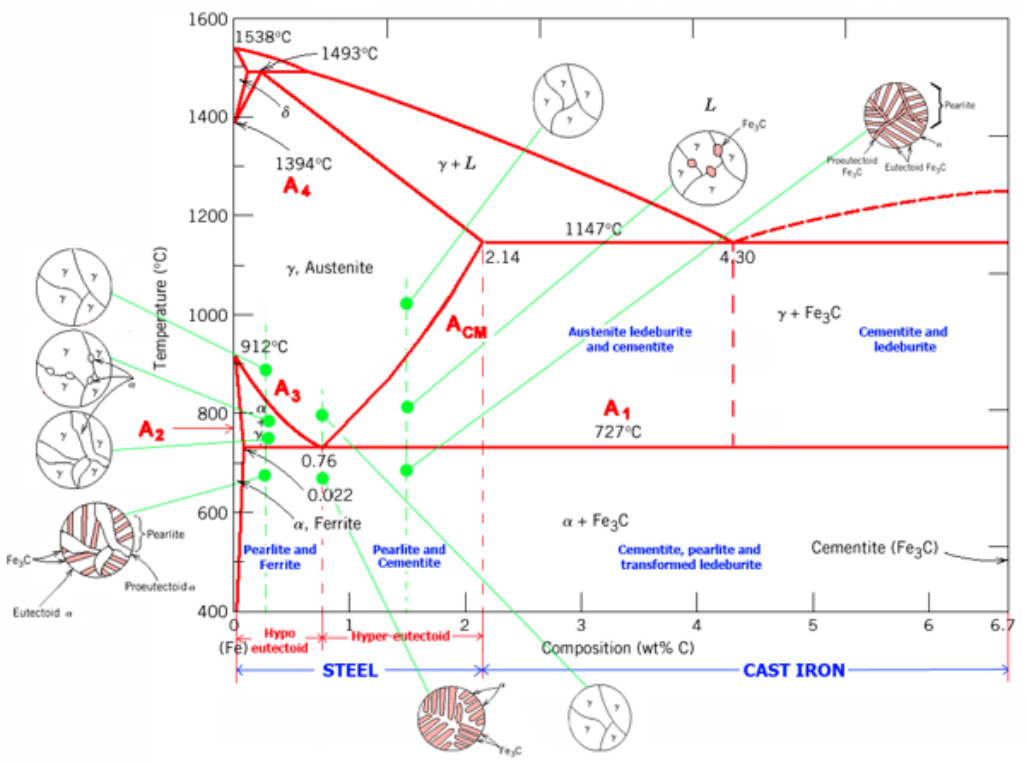
Pored osnovnih reakcija, u visokoj peći odvija se i veoma važna sporedna reakcija, karburizacija željeza (7). Željezo reaguje sa ugljen-monoksidom pri čemu nastaje cementit Fe_3C, što je prikazano sljedećom jednačinom [4] :

$$\Delta_r H^{\circ} = [23{,}8 + (-393{,}5)] - [3(0) + 2(-110{,}5)] = -148{,}7 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$3Fe_{(s)} + 2CO_{(g)} \rightarrow Fe_3C_{(s)} + CO_{2(g)} \quad \Delta H^0_{298K} = -148{,}7 \text{ kJ/mol} \quad [4]$$

Ova reakcija dovodi do stvaranja sirovog gvožđa (livenog gvožđa) koje sadrži previše ugljenika, znatno više nego što je dozvoljeno za čelik. Zbog toga se sirovo gvožđe mora naknadno prerađivati u kiseoničnim konverterima ili električnim pećima, kako bi se sadržaj ugljenika snizio na ispod 2% i dobio materijal sa odgovarajućim mehaničkim svojstvima.

Fazni dijagram željezo-ugljenik, prikazan na Slici br. 2, od suštinskog je značaja za razumijevanje strukture i svojstava dobijenog materijala. Fazni dijagram povezuje temperaturu, udio ugljenika i mikrostrukturu tako što za svaku tačku, definisanu sa %C i temperaturom, prikazuje koje su faze stabilne. To znači da inženjer na osnovu udjela ugljenika i odabrane temperature može predvidjeti hoće li konačna mikrostruktura biti duktilna, balansirana ili tvrda, čime direktno kontroliše mehanička svojstva čelika. Ovaj dijagram omogućava metalurzima da kontrolišu proces hlađenja i tako postignu željene mikrostrukture, koje direktno određuju čvrstoću, žilavost i tvrdoću čelika. Iako je tradicionalni proces u visokoj peći tehnološki dobro razvijen i decenijama dokazano efikasan, količina ugljen-dioksida koja se oslobađa danas predstavlja ozbiljan izazov i osnovni motiv za razvoj alternativnih, ekološki prihvatljivijih metoda proizvodnje čelika, poput direktne redukcije vodonikom.



Slika 2. Fazni dijagram željezo-ugljenik (9)

Ključni problem dekarbonizacije visokih peći leži u činjenici da ugalj obavlja dvije funkcije istovremeno. Osnovna funkcija je da sagorijevanjem koksa proizvodi toplotu potrebnu za održavanje temperature u peći. Druga je da služi i kao redukciono sredstvo koje veže kiseonik iz željezne rude. Ove dvije uloge su u tradicionalnom procesu nerazdvojivo povezane, što znači da se jednostavnom zamjenom jednog dijela koksa ne može postići značajnije smanjenje emisija bez promjene tehnologije. Ovo termodinamičko ograničenje predstavlja glavni razlog zašto je potrebno razviti potpuno nove metode.

Zeleni vodonik kao alternativno redukciono sredstvo

Zeleni vodonik, proizveden elektrolizom vode pomoću energije iz obnovljivih izvora, nudi rješenje za ova ograničenja. U procesu direktne redukcije željeza, vodonik preuzima ulogu redukcijskog sredstva umjesto ugljen-monoksida. Hemijska reakcija glasi (7) :

$$\Delta_r H^\circ = [2(0) + 3(-241{,}8)] - [(-824{,}2) + 3(0)] = +98{,}8\ \text{kJ mol}^{-1}$$

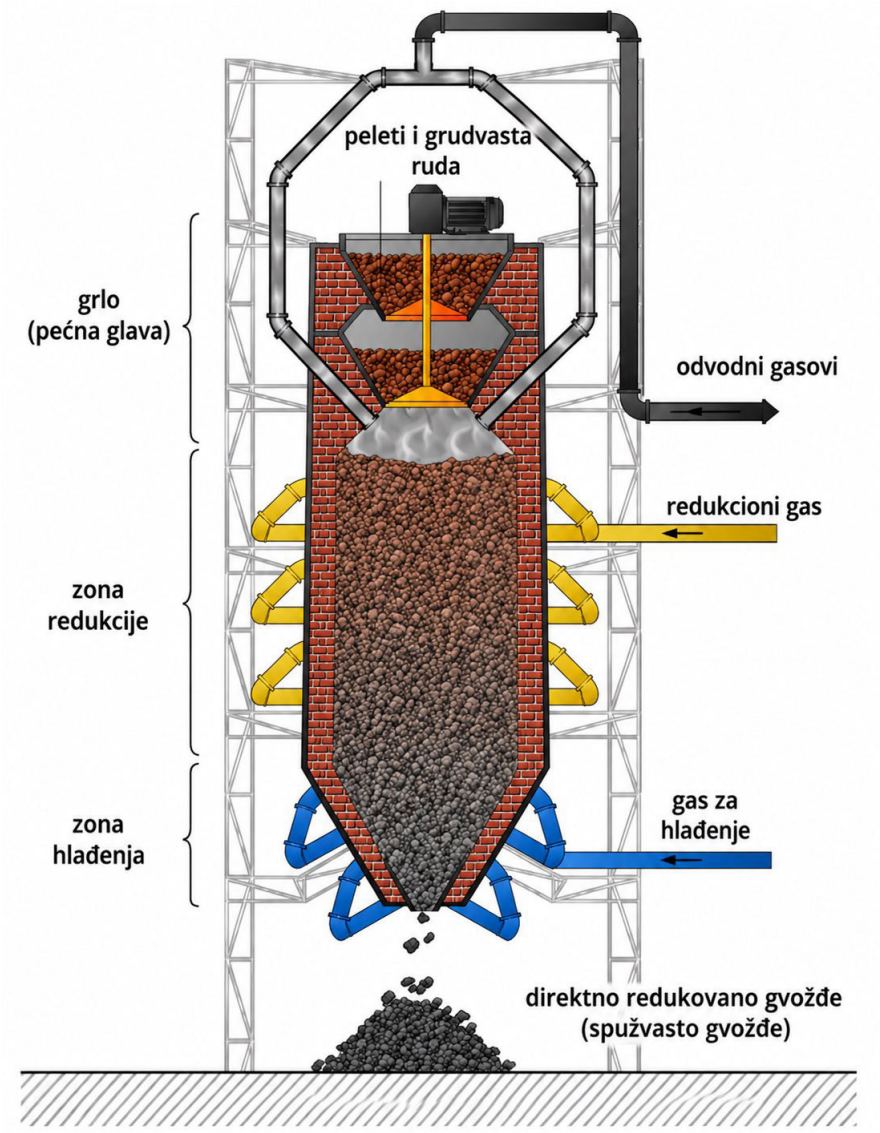
$$Fe_2O_{3(s)} + 3H_{2(g)} \rightarrow 2Fe_{(s)} + 3H_2O_{(g)} \qquad [5]$$

Za razliku od tradicionalnog procesa, ovdje nema emisije CO_2, nusproizvod je vodena para. Zeleni vodonik tako omogućava gotovo potpunu dekarbonizaciju procesa redukcije željeza, ali zahtijeva potpuno drugačiju tehnološku infrastrukturu. Trenutno stanje tehnike je na nivou od 10 MW (10), dok su za industrijske potrebe potrebna postrojenja na nivou GW. Snaga jedne velike vjetroturbine je 10 MW i dovoljna je za pogon probnog elektrolizera koji dnevno može da proizvodi oko dvije tone zelenog vodonika, dok je 1 GW snaga cijele termoelektrane i predstavlja industrijski nivo potreban za napajanje

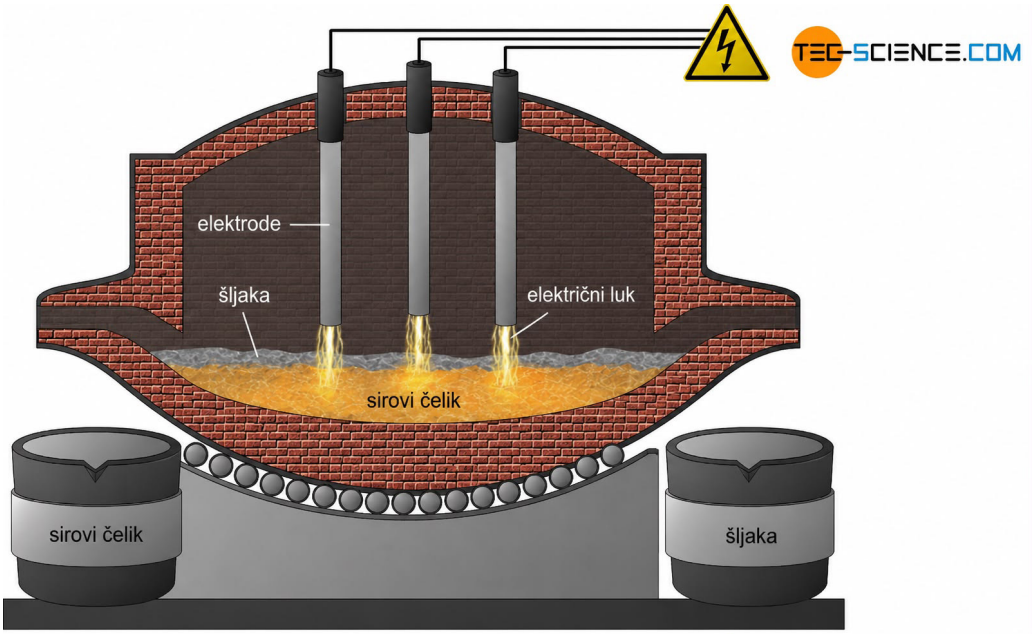
velike čeličane, što je otprilike 100 puta više od trenutnih demonstracionih postrojenja. Osim toga, elektroliza vode, kao osnovni proces proizvodnje zelenog vodonika, odvija se kroz dvije polureakcije: na anodi se odvija oksidacija hidroksidnih jona pri čemu nastaje kiseonik, dok se na katodi vodonikovi joni redukuju do molekularnog vodonika.

Direktna redukcija željeza (DRI)

Direktna redukcija željeza, prikazana na Slici br. 3, u kombinaciji s električnom lučnom pećи, prikazanoj na Slici br. 4, predstavlja ključnu tehnologiju za korištenje zelenog vodonika u proizvodnji čelika, a upravo ovaj tehnološki koncept čini osnovu za transformaciju čeličane Dillinger.



Slika 3. Peć za direktnu redukciju (7)



Slika 4. Peć za direktnu redukciju (7)

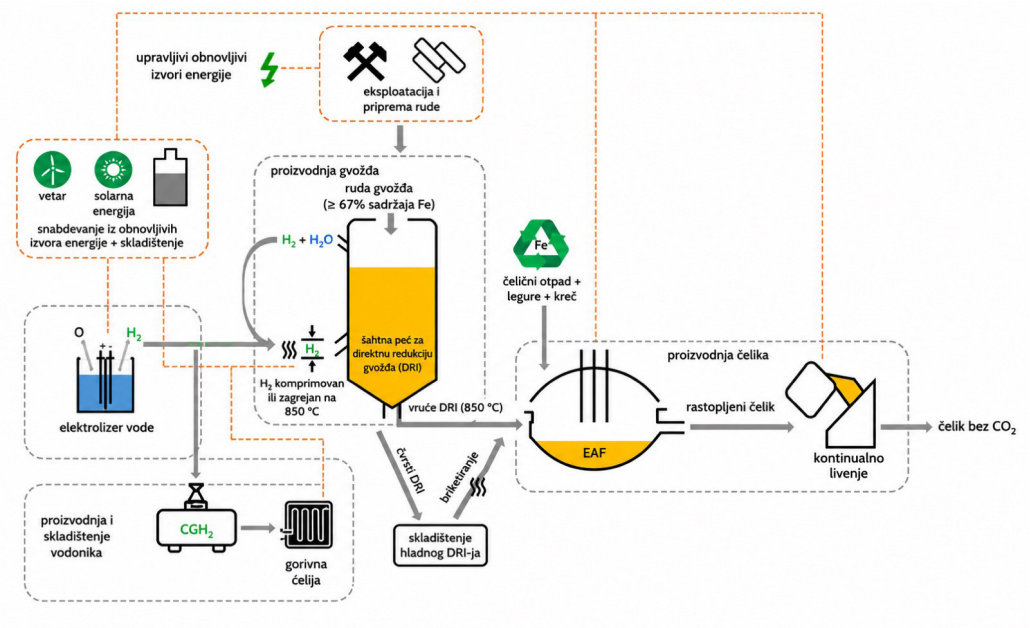
Za razliku od tradicionalnih visokih peći koje koriste koks kao redukcijsko sredstvo, DRI proces omogućava korištenje vodonika za redukciju željezne rude, pri čemu se odvija hemijska reakcija [5]. Osnovna prednost ove reakcije je u tome što umjesto ugljen-dioksida, nusproizvod redukcije postaje vodena para, čime se direktne emisije CO_2 praktično eliminišu. Međutim, sa termodinamičke tačke gledišta, ovaj proces donosi i određene izazove. Naime, standardna entalpija reakcije redukcije hematita vodonikom iznosi približno +98,8 kJ/mol što znači da je reakcija endotermna, za razliku od egzotermne redukcije ugljen-monoksidom koja se odvija uz oslobađanje toplote od, 24,8 kJ/mol prema sljedećoj reakciji:

$$Fe_2O_{3(s)} + 3CO_{(g)} \rightarrow 2Fe_{(s)} + 3CO_{2(g)} \quad [3]$$

Ova endotermnost zahtijeva dodatni unos toplote u proces, što se nadoknađuje korištenjem električne energije u električnoj lučnoj peći za topljenje dobijenog, direktno redukovanog željeza.

Istraživanja pokazuju da je ukupni energetski unos u procesu direktne redukcije složen balans faktora koji uključuju brzine hemijskih reakcija, difuzionu dinamiku i generisanje entropije. Više temperature ubrzavaju reakcije redukcije, ali istovremeno dovode do značajnih promjena zapremine i razvoja defekata u kristalnoj rešetki. Važno je napomenuti da čelik proizveden čistim vodonikom ne sadrži ugljenik, što povećava njegovu tačku topljenja, pa je naknadno dodavanje ugljenika neophodno za optimizaciju procesa topljenja u EAF. Nakon topljenja u EAF, sirovi čelik se podvrgava sekundarnim metalurškim postupcima radi dodatnog prečišćavanja i podešavanja konačnog hemijskog sastava. Uprkos ovim termodinamičkim i tehnološkim izazovima, DRI + EAF putanja prikazana na Slici br. 5, omogućava smanjenje emisija CO_2 za više od 90% u odnosu na tradicionalni put

visoke peći i kiseoničkog konvertera, što je u skladu sa planovima Dillingera da zamijeni postojeće visoke peći.



Slika 5. DRI + EAF putanja (11)

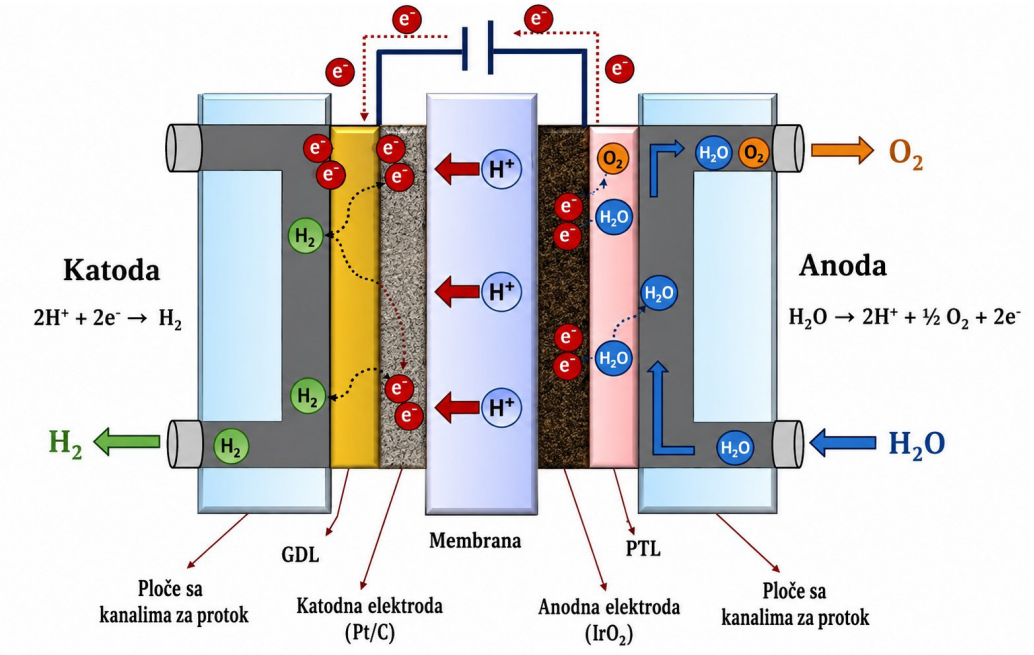
Tehnologije dobijanja i elektrolize vodonika

Za proizvodnju zelenog vodonika, koji je neophodan za dekarbonizaciju čelične industrije, koriste se različite tehnologije elektrolize vode. Svaka od njih ima specifične karakteristike, prednosti i nedostatke koji određuju njenu primjenu u različitim industrijskim kontekstima. Osnovne tehnologije elektrolize su PEM elektroliza, alkalna elektroliza i AEM elektroliza.

PEM elektroliza (Proton Exchange Membrane)

PEM elektroliza, prikazana na Slici br. 6, predstavlja naprednu tehnologiju za proizvodnju zelenog vodonika koja se zasniva na korištenju čvrste polimerne membrane kao elektrolita. Princip rada se zasniva na dvije polureakcije: na anodi se voda oksidacijom pretvara u kiseonik, protone i elektrone, dok na katodi protoni prolaze kroz membranu i spajaju se s elektronima gradeći molekularni vodonik (12). PEM elektroliza nudi niz značajnih prednosti, kompaktan dizajn, brz odgovor na promjene opterećenja (što je čini idealnom za rad sa obnovljivim izvorima poput solarne i vjetroenergije) i visoku gustinu struje koja omogućava veću produktivnost po jedinici površine. Međutim, prednosti su praćene i značajnim izazovima. Zahtijeva se izuzetno čista voda (provodljivosti manje od 0,0556 μS/cm), što podrazumijeva skupe sisteme za prečišćavanje. Dodatni izazov predstavlja oslanjanje na plemenite metale kao katalizatore, iridijum na anodi i platina na katodi su neophodni, ali su izuzetno rijetki, skupi i njihova proizvodnja je geografski ograničena. Istraživanja se stoga intenzivno bave smanjenjem udjela plemenitih metala ili pronalaženjem alternativnih materijala. Uprkos ovim izazovima, PEM elektroliza se zbog

svoje fleksibilnosti, visoke efikasnosti i čistoće proizvedenog vodonika smatra najperspektivnijom tehnologijom za proizvodnju zelenog vodonika u energetskoj tranziciji.



Slika 6. PEM elektroliza (13)

Alkalna elektroliza (AWE)

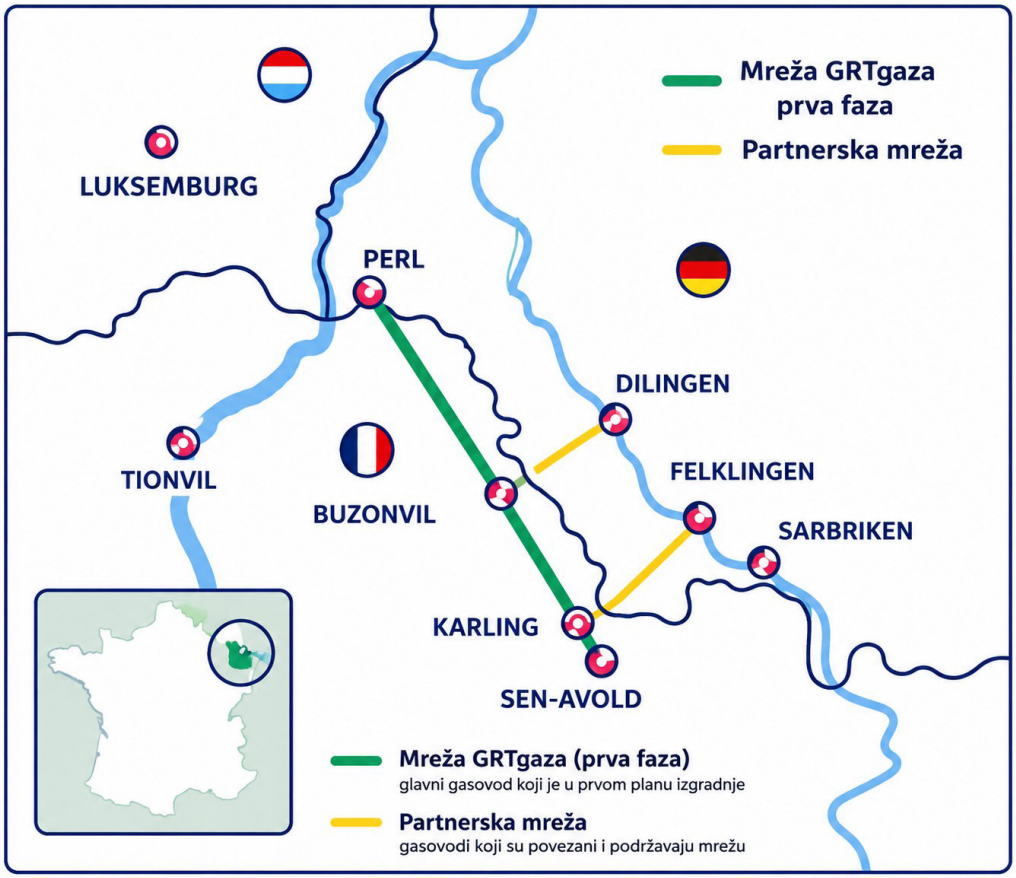
Alkalna elektroliza predstavlja najstariju tehnologiju, koja se u industrijskim razmjerama koristi već decenijama. Ona koristi tečni alkalni elektrolit, najčešće rastvor kalijum-hidroksida, i nije osjetljiva na manje nečistoće u vodi kao PEM elektroliza, što je čini praktičnijom za primjenu u uslovima koji nisu idealni (14). Njena izdržljivost i dug vijek trajanja čine je pouzdanim rješenjem za industrijsku primjenu. Alkalna elektroliza ima manju gustinu struje i sporiji odziv na promjene opterećenja, što je čini manje pogodnom za rad sa povremenim i promjenljivim izvorima energije, poput vjetra i sunca. Radi na nižim gustinama struje, što zahtijeva veće površine elektroda i veće dimenzije postrojenja za isti kapacitet proizvodnje.

AEM elektroliza (Anion Exchange Membrane)

AEM elektroliza predstavlja hibridni pristup koji nastoji da kombinuje prednosti PEM i AWE tehnologija. Koristi membranski elektrolit poput PEM tehnologije, ali sa anjonskom izmjenom, što omogućava korištenje jeftinijih katalizatora koji ne sadrže plemenite metale (15). Ova tehnologija još uvijek je u fazi razvoja i istraživanja, ali obećava značajno niže troškove proizvodnje i veću efikasnost u odnosu na postojeća rješenja. Ako se očekivani napredak ostvari, AEM elektroliza bi mogla predstavljati tehnološki preokret koji će omogućiti širu primjenu zelenog vodonika, ne samo u čeličnoj industriji već i u drugim sektorima. Međutim, potrebna su dalja istraživanja i pilot projekti kako bi se potvrdila njena dugoročna stabilnost i komercijalna održivost prije masovne industrijske primjene.

Izbor Dillingera

Dillinger je zajedno sa matičnom Stahl-Holding-Saar grupom, sklopio dugoročni ugovor sa francuskom kompanijom Verso Energy za snabdijevanje zelenim vodonikom. Ugovor je potpisan u julu 2025. godine i predviđa godišnju isporuku od najmanje 6 000 tona vodonika u periodu od deset godina, s početkom isporuke 2029. godine. Proizvedeni vodonik će se iz postrojenja CarlHYng u francuskom Carlingu transportovati do Dillingerove željezare putem prekogranične cjevovodne mreže mosaHYc, kao što je prikazano na Slici br. 7. Za proizvodnju tog vodonika, kompanija Verso Energy će koristiti PEM elektrolizu, pri čemu će prva faza projekta CarlHYng imati instalirani kapacitet od 70 MW, sa planom postepenog proširenja na ukupno 300 MW. PEM tehnologija odabrana je zbog svoje fleksibilnosti i sposobnosti brzog prilagođavanja promjenjivim opterećenjima, što je ključno za rad sa obnovljivim izvorima energije.



Slika 7. MosaHYc Ruta za transport zelenog vodonika do Dillingera (16)

REZULTATI

U ovom poglavlju su prikazani rezultati komparativne analize tradicionalnog procesa proizvodnje čelika u visokoj peći sa kiseoničnim konverterom, BF-BOF i naprednog procesa direktne redukcije željeza u kombinaciji sa električnom lučnom peći, DRI+EAF, koji koristi zeleni vodonik kao redukciono sredstvo.

Uporedni pregled tehnoloških parametara

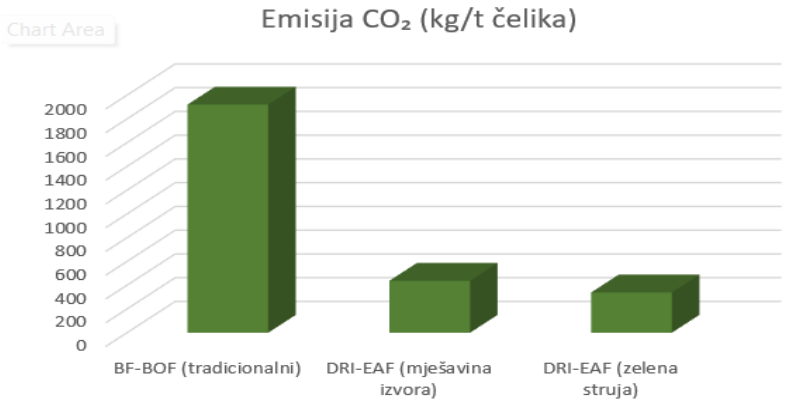
U Tabeli br. 1. je prikazan uporedni pregled ključnih parametara za dva analizirana procesa proizvodnje čelika.

Parametar	Visoka peć (BF-BOF)	DRI + EAF	Razlika
Emisija CO_2 (t CO_2/t čelika)	1,8 - 2,3	0,1 - 0,4	90-95% manje
Potrošnja električne energije (MWh/t)	0,35 - 0,60	3,5 - 4,8	8-10 puta veća
Toplotni zahtjevi DRI reaktora	egzotermna	endotermna	
Potrošnja uglja/koksa (kg/t)	400-500	0	Eliminisano
Potrošnja vode (m^3/t)	Referentna	Veća (zbog elektrolize)	
Cijena proizvodnje (€/t)	400-550	600-850	30-54% skuplje

Tabela 1. Uporedni pregled ključnih parametara za dva analizirana procesa proizvodnje čelika

Emisije ugljen-dioksida

Rezultati analize emisija CO_2 pokazuju da tradicionalni BF-BOF proces emituje između 1,8 i 2,3 tone CO_2 po toni proizvedenog sirovog čelika (17). Konkretno, podaci navode emisiju od 1 921 kg CO_2/t za BF-BOF putanju (18). Ove emisije direktno su povezane sa potrošnjom uglja i koksa, koja iznosi 400–500 kg po toni čelika.
Nasuprot tome, proces DRI-EAF uz korištenje zelenog vodonika može omogućiti smanjenje emisija CO_2 i do 90–95% (19), zavisno od tehnoloških uslova i razmatranog scenarija proizvodnje, uz eliminisanje upotrebe uglja i koksa kao redukcionih sredstava. Emisije variraju u zavisnosti od izvora električne energije , uz korištenje zelene struje, emisije iznose 339 kg CO_2/t, dok uz korištenje mješavine izvora mogu iznositi i do 437 kg CO_2/t (20).



Grafik 1. Emisija CO_2 (kg/t čelika)

Energetski zahtjevi

Analiza energetskih zahtjeva pokazuje značajne razlike između dva procesa. Prema istraživanjima, DRI-EAF proces troši 3,72 do 4,80 MWh električne energije po toni tekućeg čelika, pri čemu najveći dio otpada na elektrolizu vode za proizvodnju vodonika (21). Tabela br. 2. prikazuje detaljniji pregled energetskih parametara. Na osnovu stehiometrije reakcije [5] direktne redukcije hematita vodonikom izvršen je proračun teorijske potrošnje vodonika za proizvodnju 1 tone željeza. Koristeći molarne mase:

$$M(\mathrm{Fe}) = 55{,}85\ \mathrm{g/mol}, \quad M(\mathrm{H_2}) = 2{,}016\ \mathrm{g/mol}$$

iz stehiometrijskog odnosa 2 mola Fe (111,7 g) zahtijeva 3 mola H_2 (6,048 g), slijedi:

$$m(\mathrm{H_2}) = \frac{1000 \times 6{,}048}{111{,}7} = 54{,}1\ \mathrm{kg\ H_2/t\ Fe} \qquad [6]$$

Upoređivanjem sa podatkom iz literature od 53,7 kg H_2/t Fe, dobijeno je odstupanje od svega 0,7%, što potvrđuje konzistentnost proračuna i opravdava korištenje literaturnih vrijednosti u daljoj analizi.

Parametar	BF-BOF	DRI+EAF
Električna energija (MWh/t)	0,35-0,60	3,72-4,80 (21)
Toplota za redukciju Fe_2O_3 (MJ/t)	-24,8 (egzotermna)	+878,4 (endotermna) (37)
Potrošnja H_2 (kg/t Fe)	0	53,7 (21)
Energetska efikasnost sistema (%)	62,2	34,3 (22)

Tabela 2. Energetski parametri po toni čelika

Potrošnja vode

Potrošnja vode predstavlja dodatni izazov za proces proizvodnje zelenog čelika. Elektrolizeri zahtijevaju približno devet litara čiste dejonizovane vode po kilogramu proizvedenog vodonika. Takođe, u DRI procesu nastaje značajna količina vodene pare, oko 540 kg po toni DRI (19).

Ekonomski parametri

Analiza ekonomskih parametara pokazuje da je proizvodnja zelenog čelika trenutno skuplja od tradicionalne. Prema podacima iz literature, cijena proizvodnje DRI-EAF čelika veća je za 30–54% u odnosu na BF-BOF proces (20) (22). Ovo je prvenstveno posljedica visokih troškova proizvodnje zelenog vodonika i većih investicionih troškova za DRI i EAF postrojenja. Međutim, regulatorni okviri EU, značajno će uticati na ove ekonomske odnose. EU ETS (Sistem trgovine emisijama) uvodi cijenu na emisije CO_2. Kompanije koje emituju CO_2 moraju posjedovati odgovarajući broj emisijskih dozvola, pri čemu jedna dozvola uglavnom odgovara emisiji jedne tone CO_2. Dio dozvola proizvođači čelika trenutno dobijaju besplatno, ali se njihov broj postepeno smanjuje. Zbog toga će proizvođači tradicionalnog čelika morati kupovati sve veći broj dozvola za svoje emisije, što povećava troškove proizvodnje. CBAM mehanizam (Mehanizam za ugljenično prilagođavanje na granici) uvozni ekvivalent EU ETS, od 2026. godine naplaćuje uvoz čelika na osnovu ugrađenih emisija CO_2, čime se uvozu nameće isti trošak ugljenika kao i domaćoj proizvodnji i sprečava preseljenje proizvodnje u zemlje sa slabijim klimatskim propisima. Ovi mehanizmi će povećati cijenu tradicionalnog čelika, smanjujući konkurentsku prednost

BF-BOF procesa (20). Proračun CBAMa se vrši prema sljedećoj formuli [7] (23):

$$CBAMtrošak(€/t) = [SEE\,(tCO_2/t) - (Benchmark(tCO_2/t) \times Phase - InRate)] \times EUAcije \quad [7]$$

SEE (Specifične ugrađene emisije) predstavlja stvarne direktne emisije CO_2 po toni proizvoda i preuzete su iz Tabele br. 1, za BF-BOF čelik iznose 1 921 tCO_2/t, a za Dillingerov DRI-EAF zeleni čelik 0,339 tCO_2/t. Benchmark je referentna vrijednost emisija koju je odredila EU na osnovu 10% najefikasnijih postrojenja, koja za BF-BOF iznosi 1 370 tCO_2/t, a za DRI-EAF 0,481 tCO_2/t (24). Phase-In Rate je faktor uvođenja od 97,5% za 2026. godinu, koji se primjenjuje na benchmark kako bi se ublažio početni finansijski teret i koji se postepeno povećava do 100% do 2034. godine. EUA cijena je tržišna cijena dozvole za emisiju jedne tone CO_2, koja za prvi kvartal 2026. godine iznosi 80 €/tCO_2.

CBAM za tradicionalni čelik :

$$C_{CBAM,\,BF\text{-}BOF} = [1{,}921 - (1{,}370 \times 0{,}975)] \times 80 = 46{,}82\ €/t \quad [8]$$

CBAM za zeleni čelik:

$$C_{CBAM,\,DRI\text{-}EAF} = [0{,}339 - (0{,}481 \times 0{,}975)] \times 80 = -1048\ €/t \quad [9]$$

Građevinski sektor

Da bi se kvantifikovao uticaj prelaska na zeleni čelik na građevinski sektor, izvršena je analiza tri tipična građevinska projekta: čelični lučni most raspona 100 metara (1500 tona čelika), vjetroturbina snage 5 MW (250 tona čelika) i poslovna zgrada od 10 spratova (2000 tona čelika). Proračun se zasniva na razlici u emisijama između tradicionalnog BF-BOF čelika (1,921 tCO_2/t) i zelenog DRI-EAF čelika (0,339 tCO_2/t), što daje uštedu od 1,921–0,339=1,582 tone CO_2 po toni čelika. Rezultati pokazuju da bi most od 100 metara ostvario uštedu od $1500 \times 1{,}582 = 2373$ tone CO_2, što čini

$$\frac{0{,}339 * 1500}{1{,}921 * 1500} * 100 = 17{,}6\ \%.$$

Na osnovu upoređenih vrijednosti emisija od 1.921 kg CO_2/t za BF-BOF i 339 kg CO_2/t za DRI-EAF proces, izračunato relativno smanjenje emisija iznosi 82,4%, odnosno, zeleni čelik zadržava samo 17,6% emisija tradicionalnog čelika. Ovaj rezultat se odnosi na konkretne vrijednosti korištene u proračunu i ne predstavlja opštu vrijednost smanjenja emisija za sve tehnološke varijante DRI-EAF procesa. Vjetroturbina od 5 MW uštedjela bi 395 tona CO_2, dok bi poslovna zgrada od 10 spratova ostvarila uštedu od 3164 tone CO_2. Ove uštede se ostvaruju isključivo zamjenom tradicionalnog čelika zelenim čelikom, bez ikakvih promjena u projektnim rješenjima ili tehnologiji izgradnje. Prikazane uštede se odnose na emisije povezane sa proizvodnjom potrebnih količina čelika, a ne na ukupan ugljenični otisak analiziranih građevinskih projekata. Iako primjena zelenog čelika omogućava izračunato smanjenje emisija od 82,4% po toni čelika, smanjenje ukupnih emisija pojedinačnog projekta zavisi od udjela čelika u njegovom ukupnom ugljeničnom otisku (npr. kod mostova čini oko 45% otiska, kod zgrada 15–20%, a kod vjetroturbina 50–60%). Zbog toga se na osnovu sprovedenog proračuna ne može apsolutno pouzdano utvrditi jedinstveni procenat smanjenja ukupnih emisija građevinskih projekata. Na osnovu analize ušteda u emisijama samog materijala, može se zaključiti da Dillingerov PURE STEEL + čelik, čija se proizvodnja očekuje od 2028. godine, ima potencijal da značajno doprinese dekarbonizaciji građevinskog sektora. Budući da je završni čelični proizvod po svojim mehaničkim svojstvima, dimenzijama i standardima kvaliteta potpuno identičan tradicio-

nalnom čeliku, njegova ugradnja, zavarivanje, montaža i svi drugi građevinski postupci na gradilištu ostaju nepromijenjeni, pa se ne očekuju nikakvi dodatni izazovi, prekvalifikacije radnika niti prilagođavanja opreme.

Dillinger Power4Steel projekat

Dillinger je kroz Power4Steel projekat postavio ambiciozne ciljeve dekarbonizacije. U Tabeli br. 3. prikazani su ključni ciljevi i planirani rokovi.

Cilj	Rok	Opis
Početak proizvodnje niskougljeničnog čelika	2028.	Puštanje u rad novih DRI i EAF postrojenja (17)
Smanjenje emisija za 55%	2030.	U odnosu na referentnu godinu (25)
Potpuna upotreba zelenog vodonika	2029	Zamjena koksa u DRI procesu
Klimatska neutralnost	2045	Potpuno gašenje visokih peći (38)

Table 3. Ciljevi dekarbonizacije Dillinger kroz Power4Steel

Projekat uključuje izgradnju postrojenja za direktnu redukciju kapaciteta 2 miliona tona i dvije električne lučne peći ukupnog kapaciteta 3,5 miliona tona na lokacijama u Dillingenu i Völklingenu (25). Ukupna investicija iznosi 4,6 milijardi evra, od čega je 1,7 milijardi evra obezbijeđeno kroz finansijski paket uz podršku njemačke savezne vlade i vlade Saarlanda.

DISKUSIJA

Analiza smanjenja emisija CO_2

Literaturni podaci (19) ukazuju na mogućnost smanjenja emisija CO_2 do 90–95% primjenom DRI-EAF tehnologije uz korištenje zelenog vodonika, zavisno od tehnoloških uslova i izvora energije. Međutim, proračun sproveden u ovom radu, na osnovu konkretnih vrijednosti emisija za dva upoređena procesa, pokazuje smanjenje od 82,4%. Razlika između ovog rezultata i navedenih literaturnih procjena je posljedica različitih polaznih pretpostavki i vrijednosti emisija korištenih u poređenju. Osnovni razlog smanjenja leži u hemijskoj reakciji pri kojoj umjesto CO_2 nastaje vodena para. Preostale emisije od 339 do 437 kg CO_2/t (20) (18) potiču od električne energije koja se koristi za elektrolizu, ako ona nije u potpunosti iz obnovljivih izvora, te od topljenja u električnoj lučnoj peći. Za Dillinger, ovo bi značilo smanjenje od približno 2,5 do 3 miliona tona CO_2 godišnje, što predstavlja značajan doprinos klimatskim ciljevima EU (20).

Energetski aspekti – toplotni zahtjevi kao ključni izazov

Rezultati pokazuju značajno veću potrošnju električne energije u DRI + EAF procesu (3,72–4,80 MWh/t) u poređenju sa BF-BOF procesom (0,35-0,60 MWh/t) (21) (22). Ovo povećanje je očekivano i prvenstveno je posljedica energije potrebne za elektrolizu vode. Međutim, važno je istaknuti toplotne zahtjeve procesa direktne redukcije vodonikom. Za razliku od tradicionalne redukcije ugljen-monoksidom koja je egzotermna (ΔH = -24,8 kJ/mol), redukcija vodonikom je endotermna i zahtijeva dovođenje toplote. Prema termodinamičkim proračunima, za proizvodnju jedne tone željeza vodonikom potrebno je 878,4 MJ toplote .

Dillinger će morati da optimizuje iskorištenje otpadne toplote iz EAF-a kako bi smanjio potrebu za dodatnim grijanjem DRI reaktora. Energetska efikasnost DRI-EAF sistema (34,3%) značajno je niža od BF-BOF sistema (62,2%) (22), što ukazuje na prostor za optimizaciju. Na temperaturama od 900 do 1100°C, vodonik pokazuje 30–50% veću efikasnost od CO kao redukciono sredstvo, pri čemu se prednost redukcije vodonikom povećava sa porastom temperature (26).

Treba istaknuti da dodatna električna energija ne dolazi iz fosilnih izvora, već isključivo iz obnovljivih izvora, što je zagarantovano RFNBO sertifikacijom koja zahtijeva da se vodonik proizvodi isključivo korištenjem obnovljive energije (27), što znači da se za potrebe elektrolize grade novi kapaciteti iz sunca, vjetra i vode, a ne da se energija preusmjerava iz postojeće mreže. Upravo je to razlog zašto je projekt CarlHYng lociran u Francuskoj, koja raspolaže sa značajnim kapacitetima nuklearne i obnovljive energije, a sam projekat je prepoznat kao od strateškog značaja za Evropsku uniju (28). Drugim riječima, dodatna energija koja se troši za proizvodnju vodonika ne povećava emisije CO_2, već ih zamjenjuje, umjesto uglja kao redukcionog sredstva, koristi se vodonik čija se energija dobija iz čistih izvora, čime se postiže upravo onaj cilj zbog kojeg se cijela transformacija i pokreće: smanjenje ugljeničnog otiska čelične industrije.

Pored toga, sa energetske tačke gledišta, analiza je pokazala da DRI + EAF proces zahtijeva osam do deset puta veću količinu električne energije po toni proizvedenog čelika u odnosu na tradicionalni proces. Ovo povećanje je prvenstveno posljedica ogromnih energetskih potreba elektrolize vode za proizvodnju vodonika. Iako ovo na prvi pogled djeluje kao značajan nedostatak, važno je sagledati širi kontekst. Električna energija koja se koristi u Dillingerovom procesu dolazi iz obnovljivih izvora, što znači da se emisije pomjeraju sa tačke proizvodnje čelika na tačku proizvodnje električne energije, ali uz mogućnost potpune dekarbonizacije čitavog lanca ako se osigura zelena struja. Dillinger je upravo zbog toga sklopio dugoročni ugovor sa kompanijom Verso Energy, koja će proizvoditi zeleni vodonik koristeći PEM elektrolizu pogonjenu obnovljivom energijom. Odabir PEM tehnologije se pokazao opravdanim zbog njene fleksibilnosti i sposobnosti brzog prilagođavanja promjenjivim opterećenjima, što je ključno za rad sa povremenim izvorima poput solarne i vjetroenergije.

Izazov vode

Povećana potrošnja vode predstavlja dodatni izazov. PEM elektroliza zahtijeva izuzetno čistu vodu (provodljivosti manje od 0,0556 μS/cm), što podrazumijeva skupe sisteme za prečišćavanje poput reverzne osmoze i dejonizacije. Elektrolizeri troše devet litara čiste vode po kilogramu vodonika, a u DRI procesu nastaje 540 kg vodene pare po toni DRI (19). Iako ukupna potrošnja raste, studije pokazuju da povećanje udjela obnovljive energije djelimično kompenzuje dodatne potrebe zbog ušteda od eliminacije rudarenja i prerade fosilnih goriva (29). Za Dillinger, ovo podrazumijeva razvoj strategija za efikasno upravljanje vodnim resursima, potencijalno korištenje tretiranih otpadnih voda i implementaciju sistema za reciklažu vode.

Ključni problem je što se regija Saarland suočava sa sve većim izazovima u pogledu vodnih resursa. Prema podacima njemačkih vlasti, Saarland spada u regione s najizraženijim promjenama usljed klimatskih promjena. Vlada Saarlanda je prepoznala ozbiljnost situacije i pokrenula izradu „Master plana za sigurno vodosnabdijevanje do 2040. godine" (Masterplan „Zukunftssichere Wasserversorgung im Saarland 2040") (30). Stoga, Dillinger će morati razviti strategije za efikasno upravljanje vodenim resursima, potencijalno korištenje tretiranih otpadnih voda i reciklažu vode. Međutim, ovaj lokalni problem s vodom ne mora predstavljati ograničavajući faktor za Dillingerovu tranziciju. Prema njemačkoj

nacionalnoj strategiji za zeleni vodonik planira se izgradnja trasnacionalnog cjevovodnog sistema za transport zelenog vodonika širom Njemačke, H2-Startnetz, što znači da bi se sam vodonik za DRI-EAF proces mogao proizvoditi u regijama bogatijim vodom i povoljnijim uslovima za elektrolizu, a zatim cjevovodom dopremati u Saarland. Ovim se potpuno zaobilazi pitanje lokalne oskudice vode i ne dovodi u pitanje proizvodnja zelenog čelika.

Pored toga, projekat Power4Steel donosi i značajne logističke izazove, naročito kada je riječ o transportu vodonika. Transport vodonika od proizvodnog postrojenja CarlHYng u francuskom Carlingu do Dillingerove željezare biće omogućen prekograničnom cjevovodnom mrežom mosaHYc, što predstavlja primjer uspješne evropske saradnje u izgradnji infrastrukture za vodonik.

Ekonomska opravdanost i finansiranje

Rezultati pokazuju da je zeleni čelik trenutno skuplji od tradicionalnog, cijena mu je veća za 30 do 54% (22). Tradicionalni čelik košta 400 do 550 evra po toni, dok zeleni čelik košta 600 do 850 evra po toni. Postoji nekoliko razloga zbog kojih je proizvodnja zelenog čelika skuplja. Elektroliza zahtijeva ogromne količine električne energije, a cijena zelene struje, od sunca i vjetra, još uvijek nije dovoljno niska. PEM elektrolizeri su skupi jer koriste plemenite metale poput iridijuma i platine. Takođe, izgradnja potpuno novih DRI i EAF postrojenja zahtijeva ogromna ulaganja. Dillinger ulaže 4,6 milijardi eura u Power4Steel projekat (25) (17). Iako je zeleni čelik danas skuplji, zbog primjene ekonomskih mjera (EU ETS i CBAM) očekuje se da će se razlika u cijeni smanjivati do 2030. godine. Pored tehnoloških i energetskih izazova, na tržišni položaj proizvođača čelika u Evropskoj uniji utiče i CBAM, mehanizam kojim se od 2026. godine postepeno uvode troškovi povezani sa emisijama CO_2 pri uvozu određenih proizvoda, uključujući čelik. U pojednostavljenom proračunu prikazanom u ovom radu, za primjer uvoza tradicionalnog BF-BOF čelika je dobijen dodatni trošak od približno 46,82 €/t, dok za čelik sa emisijama od 0,339 t CO_2/t, koje odgovaraju razmatranom DRI-EAF procesu, proračun ne pokazuje pozitivnu CBAM obavezu. Negativna vrijednost dobijena proračunom ne predstavlja mogućnost ostvarivanja finansijskog prihoda, već se tumači kao odsustvo dodatne CBAM obaveze. Budući da se CBAM primjenjuje na uvoz u EU, a ne na proizvođače unutar EU, ova razlika može posredno poboljšati konkurentski položaj Dillingera u odnosu na uvezeni čelik sa većim emisijama, ali ne predstavlja njegov direktan finansijski prihod. Prikazani proračun ukazuje na značaj troškova povezanih sa emisijama CO_2 za konkurentnost različitih tehnologija proizvodnje čelika. CBAM može smanjiti cjenovnu prednost uvezenog čelika sa većim intenzitetom emisija, ali sam po sebi ne dokazuje ukupnu ekonomsku konkurentnost zelenog čelika. Ona zavisi i od troškova proizvodnje vodonika, cijene električne energije, investicionih troškova i budućeg razvoja tržišta emisijskih jedinica. Zbog toga se smanjenje razlike u troškovima proizvodnje do 2030. godine može posmatrati kao mogući razvojni scenario, ali ne i kao izvjestan ishod.

Istovremeno, proizvođači koji nastave da koriste tradicionalni BF-BOF čelik suočiće se sa sve većim CBAM i EU ETS troškovima, koji će njihov proizvod činiti sve skupljim i manje konkurentnim na evropskom tržištu. Za razliku od Dillingera koji ulaže u tranziciju, ove kompanije rizikuju gubitak tržišnog udjela i propuštanje prilike da se pozicioniraju kao lideri u održivoj proizvodnji, što će ih dugoročno koštati više nego sam proces dekarbonizacije.

Zbog napretka tehnologije, očekuje se da će cijena elektrolizera padati, da će elektroliza postati efikasnija i da će cijena zelene struje nastaviti da opada. Ovo će direktno smanjiti cijenu zelenog vodonika, a time i zelenog čelika.Dillinger je već osigurao 1,7 milijardi evra finansiranja za Power4Steel projekat (17). Ovo pokazuje da investitori vjeruju u isplati-

vost projekta, uprkos tome što je zeleni čelik trenutno skuplji. Ukoliko se ostvare očekivana smanjenja troškova proizvodnje zelenog vodonika i električne energije, Dillinger bi zahvaljujući ranijim ulaganjima u novu tehnologiju mogao steći povoljniji položaj na tržištu. Transformacija Dillingerove proizvodnje na zeleni čelik ima dalekosežne implikacije za građevinski sektor, koji učestvuje sa oko 37% u ukupnim svjetskim emisijama CO_2. Dillinger proizvodi debele čelične limove koji su ključni materijal u mostogradnji, izgradnji vjetroturbina, visokim zgradama i drugoj infrastrukturi, te će početak proizvodnje niskougljeničnog čelika pod brendom PURE STEEL + od 2028. godine omogućiti građevinskim kompanijama da značajno smanje ugljenični otisak svojih projekata. Korištenje zelenog čelika u konstrukcijama može smanjiti emisije u građevinskom sektoru za 10–15% po projektu, što je posebno značajno s obzirom na to da građevinski materijali čine najveći dio emisija u ovoj industriji. Evropska unija kroz Direktivu o energetskim svojstvima zgrada sve više zahtijeva smanjenje ugljeničnog otiska u građevinarstvu, što dodatno podstiče potražnju za zelenim čelikom. Na taj način, Dillingerov Power4Steel projekat ne predstavlja samo industrijsku tranziciju, već i ključni preduslov za održivu transformaciju cjelokupnog građevinskog sektora u Evropi, omogućavajući gradnju sa znatno manjim uticajem na klimu.

Situacija na Zapadnom Balkanu

Dok se u Evropi vode diskusije o tranziciji ka zelenom čeliku, na Balkanu postoje dva potpuno različita puta. U Srbiji, željezara u Smederevu (HBIS Group) i dalje radi na tradicionalnu tehnologiju visoke peći (BF-BOF) sa kapacitetom od oko 2 miliona tona godišnje, pri čemu najveći dio proizvodnje plasira na tržište EU (31). Međutim, nove zaštitne mjere EU i CBAM ozbiljno ugrožavaju njen izvoz, a procjenjuje se da bi godišnji CBAM trošak mogao iznositi između 150 i 220 miliona evra (32), što je čini izuzetno ranjivom na rastuće cijene ugljenika. S druge strane, u regionu se sve više ulaže u zelene tehnologije, Albanija gradi prvu MIDA (EAF) fabriku u Evropi u Elbasanu sa investicijom od 150 miliona evra, kapacitetom od 700.000 do 750.000 tona godišnje i emisijama blizu nule (33). U Crnoj Gori slovenački SIJ Group iskazuje interesovanje za preuzimanje Željezare Nikšić što bi omogućilo održivu proizvodnju (34), dok Hrvatska (ABS Sisak) već koristi EAF tehnologiju fokusiranu na reciklažu i energetsku efikasnost (35). Najoštriji primjer posljedica neprilagođavanja jeste Bosna i Hercegovina, odnosno željezara Zenica, čija je proizvodnja čelika obustavljena u aprilu 2026. godine, ne kao rezultat ekološke vizije, već ekonomske neodrživosti, jer se nije uspjela prilagoditi novim tržišnim i regulatornim uslovima (36). Ove investicije i kontrastni primjeri jasno pokazuju da transformacija nije utopija, već ekonomska nužnost, čelik iz regiona dolazi iz ovih željezara, a njegovo porijeklo i proces proizvodnje direktno određuju njegovu cijenu i konkurentnost na tržištu EU. Zato je ključno da se zemlje regiona, pa i BiH, uključe u ovu tranziciju, kroz podršku investicijama, razvoj zelene energije i prilagođavanje novim regulatornim okvirima, kako ne bismo samo posmatrali kako naše željezare postaju istorija.

Na kraju, primjer Dillingera jasno ukazuje da je tranzicija ka zelenom čeliku ne samo ekološka, već i ekonomska nužnost. Zemlje Zapadnog Balkana, uključujući Bosnu i Hercegovinu, moraju hitno prilagoditi svoje industrijske politike kako bi izbjegle gubitak konkurentnosti na tržištu EU. To podrazumijeva podršku investicijama u DRI-EAF tehnologije, razvoj obnovljivih izvora energije i prilagođavanje CBAM mehanizmu, kako bi se izbjegao scenarij gašenja poput Željezare Zenica.

ZAKLJUČAK

Na osnovu studije slučaja Dillingerovog projekta Power4Steel, može se zaključiti da prelazak sa tradicionalnog BF-BOF procesa na DRI-EAF tehnologiju uz korištenje zelenog vodonika predstavlja tehnički ostvariv pristup značajnom smanjenju emisija CO_2, koje prema literaturnim podacima u povoljnim uslovima može dostići 90–95%, dok je za konkretne vrijednosti analizirane u ovom radu izračunato smanjenje od 82,4%. Iako endotermna priroda redukcije vodonikom zahtijeva dodatno dovođenje toplote, taj se izazov prevazilazi korištenjem zelene električne energije u električnoj lučnoj peći za topljenje direktno redukovanog željeza. Iako DRI+EAF proces zahtijeva osam do deset puta veću potrošnju električne energije, korištenjem obnovljivih izvora, kroz ugovor sa kompanijom Verso Energy i PEM elektrolizu, omogućava se potpuna dekarbonizacija lanca.

Ekonomski, zeleni čelik je trenutno skuplji za 30 do 54%, 600–850 €/t u odnosu na 400–550 €/t, prvenstveno zbog visokih troškova elektrolize i investicije od 4,6 milijardi evra. Mehanizmi EU ETS i CBAM postepeno povećavaju troškove emisija za tradicionalni čelik, čime se očekuje da će se razlika u cijeni između zelenog i tradicionalnog čelika smanjivati do 2030. godine. Zahvaljujući ranoj transformaciji, Dillinger bi do tada mogao steći značajnu tržišnu prednost.

Primjena niskougljeničnog čelika može značajno doprinijeti dekarbonizaciji građevinskog sektora, naročito kod objekata sa velikom potrošnjom čelika. Izvršeni proračun je pokazao da, za upoređene vrijednosti emisija, smanjenje jeste povezano sa proizvodnjom čelika i iznosi oko 82,4%, dok smanjenje ukupnog ugljeničnog otiska građevinskog projekta zavisi od udjela čelika i drugih izvora emisija. Projekat Power4Steel stoga predstavlja značajan primjer potencijala industrijske dekarbonizacije, čiji će se stvarni tehnički, ekološki i ekonomski rezultati moći pouzdanije ocijeniti nakon početka eksploatacije novih postrojenja.

Literatura

1. India TPTo. The Print. [Online].; 2025. Available from: https://theprint.in/india/atmospheric-co2-levels-reach-800000-year-high-in-2023-world-meteorological-organization-report/2553854/.
2. Paulina A., Gabriel B., Katherine C., & Wiliam C. Climate Change 2023: Synthesis Report. World Meteorological Organization, The Intergovernmental Panel on Climate Change; 2023.
3. Reuters, The Weather Network. [Online].; 2026 [cited 2026 7 17. Available from: https://www.theweathernetwork.com/en/news/weather/severe/europe-recorded-10-000-excess-deaths-during-late-june-heatwave-data-show.
4. UNEP. UNEP. [Online].; 2026. Available from: https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/facts-about-climate-emergency.
5. Association WS. World Steel Association. [Online].; 2025. Available from: https://worldsteel.org/climate-action/climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel/.
6. United Nations Climate Change. [Online].; 2015 [cited 2026 8 19. Available from: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf.
7. TEC-SCIENCE. TEC-SCIENCE. [Online].; 2018 [cited 2026 7 26. Available from: https://www.tec-science.com/material-science/steel-making/blast-furnace-process/.
8. NIST-JANAF Thermochemical Tables. [Online].; 2026 [cited 2026 7 16. Available from: https://janaf.nist.gov/.
9. Velling A. Factory. [Online].; 2020 [cited 2026 7 23. Available from: https://fractory.com/iron-carbon-phase-diagram/.
10. South Australian Green Hydrogen Study. Melbourn; 2017.
11. A D. Nature COmmunications. 2023 May.
12. Bin S. High-pressure proton exchange membrane water electrolysis: Current status and challenges in

hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 2024 May; 67: 390–405.
13. Bekaert. [Online]. [cited 2026 7 22. Available from: https://www.bekaert.com/en/hydrogen-generation/hydrogen-electrolysis-technology/pem.
14. Kumar SS. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy Reports. 2022 Nov; 8: 13793–13813.
15. Bekaert. [Online]. [cited 2026 7 22. Available from: https://www.bekaert.com/en/hydrogen-generation/hydrogen-electrolysis-technology/aem.
16. [Online]. [cited 2026 8 7. Available from: https://www.natrangroupe.com/en/medias/press-releases/mosahyc-first-cross-border-hydrogen-transport-network-france-germany.
17. Team SE. Eurometal. [Online].; 2026.
18. Bethlehem-Seidel S. [ESTEP Spring Dissemination Event].; 2025. Available from: https://www.estep.eu/assets/Events/2025/Spring-Diss-event-2025/Session-3/1_Power4Steel-with-MemKoWI-ESTEP-spring-Dissemination-2025-6-5-Krakow-sess3-1st-for-pdf.pdf.
19. Finn M. OXMAINT. [Online].; 2026 [cited 2026 Avgust 5. Available from: https://oxmaint.com/industries/steel-plant/green-steel-hydrogen-dri-eaf-production-guide.
20. Communications N. Nature Communications. [Online].; 2025. Available from: https://www.nature.com/articles/s41467-025-64440-9/figures/3.
21. Immonen J., Weingaertner D., Ketkaew J., & Prasher R. Process intensification and comparison of electrolytic hydrogen green steel plants for industrial decarbonization. Journal of Cleaner Production. 2025 Jaanuar; 490.
22. Jiuju C, Wenqiang S, Qiang Y, Jianjun W, Yuhang Z. Chinamet. [Online].; 2025. Available from: https://www.chinamet.cn/gt/en/article/doi/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20250257.
23. Carbon Chain. [Online].; 2026 [cited 2026 8 29. Available from: https://learn.carbonchain.io/en/articles/13132740-how-to-calculate-cbam-costs.
24. Steelorbis. [Online].; 2025 [cited 29 8 2026. Available from: https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/eu-cbam-committee-votes-to-accept-benchmark-and-default-emission-values-1424207.htm.
25. Saarstahl. Saarstahl. [Online].; 2025. Available from: https://en.saarstahl.com/news/press-releases/next-milestone-on-the-path-to-climate-neutral-steel-production-eur-1-7-billion-financing-package-for-power4steel-successfully-secured/?id=19950.
26. Zhou M., Ai L., Hong L., Sun C., Yuan Y., & Tong S. Comparison of Microstructures of Magnetite Reduced by H2 and CO under Microwave Field. Hydrogen—The New Energy Vector for the Transition of Industries "Hard to Abate"). 2023 Jul.
27. Netherlands Entreprise Agency. [Online].; 2025. Available from: https://english.rvo.nl/topics/waterstof/certificate-green-hydrogen.
28. LEFEBVRE S. VERSO ENERGY awarded funding under the Connecting Europe Facility (CEF) Energy. Paris; 2026. Available from: https://verso.energy/wp-content/uploads/2026/02/PR-CEF-CarlHYng-EN.pdf.
29. Conte M. Investigating the economic and environmental. In ; 2022; Milan: IOP Conference Series:Earth and Environmental Science.
30. | Ministerium für Umwelt KMAuV. Saarland. [Online].; 2025. Available from: https://www.saarland.de/mukmav/DE/aktuelles/aktuelle-meldungen/2025/wasser/q1/pm_2025-01-15_masterplan-wasser.
31. RTS. RTS. [Online].; 2026. Available from: https://rts.rs/lat/vesti/ekonomija/5988529/zelezara-smederevo-celik.html.
32. BalancingEnergy. BalancingEnergy. [Online].; 2026. Available from: https://balancing.energy/cbam-cost-exposure-and-compliance-execution-in-eu-serbia-industrial-supply-chains/.
33. Panorama. Panorama. [Online].; 2025. Available from: https://www.panorama.com.al/kurum-internation-investon-150-milione-euro-per-prodhim-celiku-te-gjelber/.
34. Gore VC. Vlada Crne Gore. [Online].; 2025. Available from: https://www.gov.me/clanak/zeljezara-ponovo-u-fokusu-investitora-sij-group-u-crnoj-gori.
35. Danieli Automation. [Online].; 2024. Available from: https://www.dca.it/en/news/danieli-innovaction-meeting-two-more-and-last-plant-visits_12_898.htm.
36. Maksimović D. Deutsche Welle. [Online].; 2026. Available from: https://www.dw.com/bs/kraj-%C4%8Delika-u-bih-zeni%C4%8Dki-gigant-na-koljenima/a-76920138.
37. Bhaskar A., & Assadi M, Somehsarei HN. Supplementary material.; 2020. Available from: https://zenodo.org/records/3951012/files/Supplementary_material.pdf.
38. Dilinger. Geschäftsbericht 2024. Dillingen/Saar:, AG der Dillinger Hüttenwerke; 2024.

GREEN HYDROGEN IN THE FUNCTION OF DECARBONIZATION OF THE CONSTRUCTION SECTOR - A CASE STUDY OF THE TRANSFORMATION OF THE DILLINGER STEEL PLANT

Author: MARIJA MALIĆ, SARA MALINOVIĆ
e-mail: marija.malic@student.aggf.unibl.org
Mentor: Full Prof. Igor Jokanović
Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, University of Banja Luka

Introduction: The paper analyzes steel production decarbonization using green hydrogen through a case study of Dillinger's Power4Steel project, with implications for the construction sector.

The Aim: To analyze the technical feasibility and economic viability of Power4Steel, quantify emission reductions and energy increases, and assess the project's contribution to construction sector decarbonization.

Material and Methods: A case study of Dillinger was used. Data were collected from primary and secondary sources. Analysis included a comparative analysis of BF-BOF and DRI-EAF processes, with an additional stoichiometric calculation.

Results: Literature data indicate 90-95% CO_2 emission reduction using DRI-EAF with green hydrogen, while the calculation in this paper, based on specific emission values of 1,921 kg CO_2/t for BF-BOF and 339 kg CO_2/t for DRI-EAF, shows a reduction of 82.4%. DRI-EAF requires 8-10 times higher electricity consumption. Stoichiometric calculation confirmed H_2 consumption of 54.1 kg/t Fe. Green steel is 30-54% more expensive (600-850 €/t). Dillinger plans production from 2028 and climate neutrality by 2045 with an investment of €4.6 billion. CBAM analysis shows traditional steel has a cost of 46,82 €/t, while green steel has none.

Conclusion: Power4Steel is technically feasible with significant emission reduction, but presents challenges (endothermicity, 8-10 times higher electricity, higher water consumption). Although green steel is currently more expensive, CBAM and EU ETS are expected to make it competitive by 2030. The project is crucial for the sustainable transformation of Europe's construction sector.

Keywords: green hydrogen; decarbonization; steel; DRI-EAF; Power4Steel; construction sector; Dillinger

https://doi.org/10.63356/stes.ing.2026.003 УДК 004.891:004.451.3

ANALIZA UTICAJA DVOSLOJNOG KEŠIRANJA I PROREĐENIH INDEKSA NA LATENCIJU ČITANJA U LSM SKLADIŠTIMA PODATAKA

Autor: ALEKSA DEJANOVIĆ, Petar Popović, Boško Vasilić, Sara Stojkov
e-mail: aleksa@dejanovic.online
Mentor: doc. Miloš Simić
Departman za računarstvo i automatiku, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

Uvod: Skladišta podataka zasnovana na LSM stablu (Log-Structured Merge-Tree) omogućavaju visoku propusnost upisa, ali pretraga više nivoa i pojačano čitanje sa diska mogu povećati latenciju čitanja.

Cilj: Eksperimentalno ispitati uticaj dvoslojnog keširanja (aplikativni LRU Cache i diskovni Block Cache), te različitih nivoa proređenosti Summary/Index struktura na performanse tačkastih GET upita u prilagođenom LSM Key-Value sistemu.

Materijal i metode: Implementiran je Key-Value sistem sa dvoslojnim keširanjem i podesivim Summary/Index strukturama. Evaluacija je obuhvatila 10^6 operacija čitanja sa Zipfovom i uniformnom distribucijom, nad postojećim i nepostojećim ključevima. Varirane su veličine blokova od 4, 8 i 16 KB i odnosi uzorkovanja Summary/Index struktura od 1 : 4 do 1 : 64.

Rezultati: Najbolje ukupne performanse postignute su blokovima od 4 KB, odnosom uzorkovanja Summary strukture 1 : 16 i aktivnim L1 i L2 kešom. L2 keš je, u odnosu na konfiguraciju bez keširanja, smanjio prosečnu latenciju sa 1.048,2 na 214,7 μs (79,5%), a kombinacija L1 i L2 keša na 178,4 μs (83,0%). U mešovitom opterećenju od 10^6 zahteva dvoslojno keširanje je, u odnosu na samo L2 keš, smanjilo prosečnu GET latenciju sa 220,30 na 182,36 μs (17,2%) i povećalo propusnost sa 4.539 na 5.484 GET/s (20,8%). L1 keš ostvario je stopu pogodaka od 37,5%, uz 16,5% manje pristupa L2 kešu.

Zaključak: Dvoslojno keširanje značajno unapređuje performanse čitanja, a veličina blokova i proređenost indeksa omogućavaju balansiranje latencije, propusnosti i memorijskih zahteva. U evaluiranom sistemu najpovoljnija je kombinacija blokova od 4 KB, odnosa uzorkovanja 1 : 16 i aktivnih L1 i L2 keševa.

Ključne reči: LSM stablo ; Key-Value skladište ; Block Cache ; LRU Cache ; latencija čitanja

UVOD

Log-Structured Merge-Tree (LSM) predstavlja pristup organizaciji podataka koji optimizuje obradu velikog broja upisa tako što se izmene najpre akumuliraju u memoriji, a zatim sekvencijalno zapisuju u sortirane strukture na disku. Osnovni princip LSM arhitekture omogućava efikasno izvršavanje operacija pisanja, ali istovremeno uvodi potrebu za pretragom više diskovnih struktura tokom čitanja, naročito kada se podaci nalaze na različitim nivoima stabla [1]. Zbog toga performanse LSM sistema predstavljaju kompromis između efikasnosti upisa, troška kompakcije i troška čitanja. Savremene LSM implementacije, poput LevelDB-a, koriste memorijske bafere i nepromenljive SSTable strukture organizovane po nivoima, pri čemu SSTable obično sadrži blokove podataka, indeksne i filterske strukture koje usmeravaju *point lookup* prema relevantnom delu podataka i mogu smanjiti broj nepotrebnih pristupa disku [2–4].

Kod tačkastih upita, pronalaženje vrednosti može obuhvatiti više komponenata *read path*-a, uključujući memorijske strukture, *Bloom* filtere, indeksne strukture i blokove podataka *SSTable* datoteka. Broj potencijalnih diskovnih pristupa zavisi od organizacije *LSM* nivoa, raspodele podataka i uspešnosti mehanizama koji omogućavaju rano isključivanje *SSTable* datoteka. Posledično, *read amplification* predstavlja jedan od važnih faktora koji ograničavaju performanse *LSM Key-Value* sistema [5].

Jedan od ključnih mehanizama za smanjenje broja nepotrebnih pristupa *SSTable* datotekama jesu probabilistički filteri. *Bloom* filter omogućava da se sa određenom verovatnoćom utvrdi da ključ nije prisutan u skupu, čime se može izbeći nepotrebno čitanje podataka, uz mogućnost lažno pozitivnog odgovora [5]. Dayan i saradnici analiziraju raspodelu memorije između *Bloom* filtera i drugih komponenti *LSM* sistema i pokazuju da izbor memorijskog budžeta može značajno uticati na trošak tačkastih upita [6]. Njihovi rezultati ukazuju da optimizacija memorijskih struktura predstavlja važan deo smanjenja *read amplification*-a, ali se razmatrani mehanizam razlikuje od konfiguracije ispitane u ovom radu.

Pored probabilističkih filtera, značajnu ulogu u *read path*-u imaju indeksne strukture i mehanizmi keširanja. Keširanje omogućava da se često korišćeni podaci ili delovi *SSTable* datoteka ponovo koriste bez ponovnog pristupa sporijem nivou memorijske hijerarhije. Wu i saradnici analiziraju adaptivno keširanje u *Key-Value* sistemima baziranim na *LSM* stablu i razlikuju keširanje parova ključ–vrednost, pokazivača i blokova [7]. Njihovi rezultati pokazuju da različite vrste keširanih objekata imaju različite troškove i koristi, što ukazuje na značaj zajedničkog posmatranja više nivoa keširanja.

Dodatni aspekt predstavlja organizacija indeksnih i filter struktura unutar blokovskog keša. RocksDB analiza particionisanih indeksa i filtera pokazuje da indeksni i filter blokovi mogu zauzimati značajan deo raspoloživog prostora i konkurisati blokovima podataka za mesto u *Block Cache*-u [8]. Time izbor veličine i organizacije indeksnih struktura postaje povezan sa efikasnošću keširanja. Ovaj odnos je posebno značajan kada se indeksne strukture proređuju: smanjenje njihovog memorijskog otiska može smanjiti potrošnju memorije, ali istovremeno povećati količinu podataka koju je potrebno pretražiti između dva susedna indeksna zapisa.

Na performanse *LSM* sistema utiče i način kompaktovanja podataka. Sarkar i saradnici analiziraju prostor dizajna *LSM* kompaktovanja i pokazuju da različite strategije predstavljaju različite kompromise između *read amplification*-a, *write amplification*-a i zauzeća prostora [2]. Dostoevsky dodatno pokazuje da izbor politike kompaktovanja može promeniti odnos između troška upisa, troška upita i prostorne efikasnosti [9]. Ovi rezultati potvrđuju da performanse LSM sistema zavise od međusobno povezanih arhitektonskih odluka, a ne od jednog izolovanog parametra.

Postojeća istraživanja, međutim, uglavnom posmatraju pojedinačne aspekte ovog problema: optimizaciju *Bloom* filtera i memorije [6], adaptivno upravljanje različitim vrstama keša [7], organizaciju indeksnih i filter struktura [8] ili strategije kompakcije [2,9]. U ovom radu fokus je na eksperimentalnom ispitivanju međusobnog uticaja aplikativnog *Least Recently Used* (*LRU*) keša, blokovskog *LRU* keša, veličine bloka i proređenosti *Summary/Index* struktura u okviru jedne implementacije *LSM Key-Value* sistema. Cilj nije direktno poređenje sa rezultatima prethodnih radova, već izolovanje efekata navedenih parametara i određivanje konfiguracije koja u posmatranom eksperimentalnom okruženju ostvaruje najpovoljnije performanse tačkastih *GET* upita.

U ovom radu pokušaćemo da odgovorimo na sledeća pitanja: koliko L1 i L2 keš pojedinačno i zajedno menjaju izmerenu latenciju? Kako veličina bloka i gustina Summary utiču na jednako ponderisani prosek četiri dijagnostička opterećenja? Koliki je dodatni efekat L1 u milionskom jednonitnom mešovitom nizu u odnosu na samo L2?

MATERIJAL I METODE

Materijal i eksperimentalno okruženje

Eksperimentalna evaluacija je sprovedena nad implementacijom sistema za skladištenje parova ključ–vrednost zasnovanom na *LSM* stablu. Sistem je implementiran u programskom jeziku Go. Eksperiment je izveden na računaru sa procesorom AMD Ryzen 9 7900, koji ima 12 fizičkih jezgara i 24 logičke niti, baznu frekvenciju od 3,7 GHz i maksimalnu fabričku boost frekvenciju od 5,4 GHz uz 32GB DDR5-4800 RAM memorije. Računar je koristio Kingston NVMe SSD (SNV2S2000G) nominalnog kapaciteta 2 TB i operativni sistem EndeavourOS sa Linux jezgrom 7.2.11-arch1-1.

Predmet merenja bila je tačkasta operacija *GET* nad stablom sa tri popunjena nivoa i ukupno 14 *SSTable* datoteka. Nivo L0 sadržao je dve preklapajuće tabele, pri čemu je novija tabela obuhvatala 10% prostora ključeva, a starija se preklapala sa polovinom njenog sadržaja. Nivo L1 sadržao je četiri nepreklapajuće tabele sa narednih 30% ključeva, a L2 osam nepreklapajućih tabela sa preostalih 60%. Takav raspored omogućio je da se uspešna čitanja završavaju na različitim nivoima, uz proveru novijih verzija zapisa pre starijih na nivou L0. Pri neuspešnom čitanju ispitivani su *Bloom* filteri svih 14 tabela i pripadajuće putanje pristupa metapodacima.

Skup podataka obuhvatao je 10.000 jedinstvenih ključeva sa vrednostima veličine 256 bajtova. Testne *SSTable* datoteke generisane su neposredno u formatu koji koristi čitač; njihova izrada nije bila uključena u mereno vreme. Merenja su obuhvatila postojeću putanju čitanja kroz *LSM* stablo, bez konkurentnih upisa i pozadinske kompakcije. Latencija operacije *GET* merena je pomoću monotonog sata. U testovima nisu bili zastupljeni zapisi brisanja (*tombstones*). Eksperiment je izvođen u jednoj niti.

Putanja čitanja i keširanje

Zahtev *GET* najpre prolazi kroz proveru memorijskih struktura, a zatim kroz aplikativni *LRU* keš (L1). Ako tražena vrednost nije dostupna u L1 kešu, pretraga se nastavlja kroz *SSTable* datoteke. Za svaku tabelu *Bloom* filter može da isključi dalje pretraživanje; kada ga ne isključi, strukture *Summary* i *Index* usmeravaju pretragu ka odgovarajućem podatkovnom bloku. Pristup blokovima obavlja *Block Manager*, uz zaseban *LRU* keš blokova (L2). Promašaj u L2 dovodi do čitanja datoteke. L1 čuva rezultate uspešnih čitanja, ali ne kešira odsustvo ključa, pa neuspešni *GET* zahtevi prolaze kroz putanju pretrage *SSTable* datoteka. Pomoćne strukture *SSTable* datoteka čuvaju se na disku, odnosno pristupa im se kroz L2 keš.

Kapacitet L1 keša iznosio je 1.000 zapisa. Memorijski budžet L2 keša bio je približno 2 MiB i ostao je fiksan pri promeni veličine bloka; za blokove od 4 KB odgovarao je kapacitetu od 512 blokova. U eksperimentu su razmatrana četiri režima: bez oba keša, samo L1, samo L2 i istovremeno L1 i L2. Time je omogućeno da se uticaj keša rezultata razlikuje od uticaja keša blokova.

Nezavisne promenljive i protokol merenja

Veličine blokova bile su 4, 8 i 16 KB, a odnosi uzorkovanja strukture *Summary* 1 : 4, 1 : 16 i 1 : 64. Ovi odnosi određuju gustinu zapisa u strukturi *Summary*. *Bloom* filter i gustina strukture *Index* nisu menjani kao nezavisne promenljive.

Evaluacija je imala dve faze. Prvu je činila dijagnostička matrica svih 144 kombinacija tri veličine bloka, tri odnosa uzorkovanja *Summary*, četiri režima keširanja i četiri vrste

opterećenja: čitanja iz često korišćenog skupa ključeva, uniformna uspešna čitanja, uspešna čitanja sa Zipfovom raspodelom i čitanja nepostojećih ključeva. Pre izvršavanja svake kombinacije keš je pražnjen kako bi merenja počinjala bez zapisa iz prethodne kombinacije. Za svaku kombinaciju izvršeno je 100 zahteva za zagrevanje, a zatim 300 merenih GET zahteva. Broj od 100 zahteva izabran je kao kratko zagrevanje za dijagnostičko poređenje svih 144 kombinacija, tako da merenje u svakoj kombinaciji počne nakon istog broja početnih zahteva. Stepen popunjenosti keša nakon zagrevanja mogao je da se razlikuje među vrstama opterećenja. Ova faza služila je za poređenje konfiguracija i izbor parametara za duži test. Ova faza služila je za poređenje konfiguracija i izbor parametara za duži test. Pri poređenju srednjih latencija četiri pojedinačna opterećenja imala su jednaku težinu; tako dobijeni prosek nije srednja latencija mešovitog testa.

U prvoj fazi eksperimenta svaka kombinacija veličine bloka i odnosa uzorkovanja strukture Summary merena je u deset nezavisnih ponavljanja. Za odnos 1 : 16 srednja latencija iznosila je 178,4 μs (95% interval poverenja od 172,0 do 184,8 μs), a za odnos 1 : 64 iznosila je 187,3 μs (95% interval poverenja od 180,9 do 193,7 μs). Standardna devijacija srednjih latencija između ponavljanja iznosila je približno 9 μs za obe konfiguracije.

Drugu fazu činio je deterministički mešoviti niz od 1.000.000 merenih *GET* zahteva, kojem je prethodilo 10.000 zahteva za zagrevanje. Niz je sadržao 50% uniformnih uspešnih čitanja, 30% uspešnih čitanja prema Zipfovoj raspodeli sa parametrom s=1,2, 10% čitanja usmerenih na često korišćeni skup koji obuhvata 1% ključeva i 10% čitanja nepostojećih ključeva. Isti niz korišćen je za poređenje režima samo L2 i L1+L2, uz blokove od 4 KB i odnos *Summary* 1 : 16.

Pokazatelji i obrada rezultata

Osnovni pokazatelj bila je srednja latencija *GET* zahteva, izražena u mikrosekundama (μs). Za mešoviti test praćeni su i propusnost u zahtevima u sekundi (*GET/s*), medijana (p50), p95 i p99 latencija, stopa pogodaka L1 i L2 keša, broj pristupa L2 kešu, broj čitanja datoteka ispod L2, kao i alocirana memorija i broj alokacija po zahtevu. Stopa pogodaka keša odnosi se na udeo pogodaka među odgovarajućim proverama keša. Stopa pogodaka L2 izračunata je kao odnos broja pogodaka i ukupnog broja pojedinačnih provera blokovskog keša. Jedan GET zahtev može da obuhvati više provera L2 tokom pretrage SSTable datoteka. Prosečan obim alokacija po GET zahtevu dobijen je deljenjem ukupnog broja bajtova alociranih tokom merenog dela testa brojem merenih zahteva. Pokazatelj obuhvata i privremene alokacije čija se memorija može osloboditi tokom testa. Pokazatelj p99 predstavlja prag ispod kojeg se nalazi približno 99% izmerenih latencija. Vrednosti p99 iz dijagnostičke matrice, sa 300 merenih zahteva po kombinaciji, treba tumačiti kao orijentacione; poređenje repa raspodele prvenstveno se zasniva na dužem testu.

Relativno smanjenje latencije u odnosu na referentnu konfiguraciju računato je kao

$$R_L = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100\%$$

gde su L_0 i L_1 srednje latencije referentne i poređene konfiguracije. Relativna promena propusnosti računata je kao

$$R_T = \frac{T_1 - T_0}{T_0} \cdot 100\%$$

gde su T_0 i T_1 odgovarajuće propusnosti.

Datoteke su tokom testa ostale u kešu stranica operativnog sistema. Stoga, broj čitanja datoteka ispod aplikativnog L2 keša označava pozive putanji čitanja datoteka, a ne broj fizičkih čitanja skladišnog uređaja.

REZULTATI

Rezultati su prikazani odvojeno za dijagnostičku matricu, u kojoj je za svaku kombinaciju izmereno po 300 *GET* zahteva nakon 100 zahteva za zagrevanje i za mešovito opterećenje sa po 1.000.000 merenih zahteva u dva režima keširanja. Tabela br. 1 prikazuje srednju latenciju četiri vrste opterećenja pri veličini bloka od 4 KB i odnosu uzorkovanja *Summary* strukture 1 : 16. Bez aplikativnih keševa aritmetička sredina četiri prikazane latencije iznosila je 1.048,2 μs. Sa uključenim samo blokovskim kešom L2 iznosila je 214,7 μs, što je za 79,5% manje. Kada su oba keša bila aktivna, iznosila je 178,4 μs, odnosno 83,0% manje nego bez keša i 16,9% manje nego sa samo L2 kešom. Ove vrednosti predstavljaju jednako ponderisane proseke četiri dijagnostička opterećenja, a ne merenja jednog niza *GET* zahteva (Tabela br. 1).

Opterećenje	Bez keša	Samo L1	Samo L2	L1 + L2
Često korišćeni ključevi	439,9	0,1	74,9	0,2
Uniformna uspešna čitanja	1.849,6	1.761,5	347,8	308,4
Uspešna čitanja sa Zipfovom raspodelom	501,5	301,7	92,3	58,5
Nepostojeći ključevi	1.401,9	1.412,9	343,9	346,6
Aritmetička sredina četiri opterećenja[1]	1.048,2	869,1	214,7	178,4

Tabela br. 1 Srednja latencija *GET* zahteva po vrsti opterećenja i režimu keširanja (μs; blok 4 KB, *Summary* 1 : 16)

Razlike među vrstama opterećenja bile su izrazite. Pri čitanju često korišćenih ključeva L1 je, nakon zagrevanja, omogućio latenciju od 0,1 μs u režimu samo L1, odnosno 0,2 μs kada su oba keša bila uključena. Kod uniformnih uspešnih čitanja najveće smanjenje u odnosu na režim bez keša ostvareno je uključivanjem L2, sa 1.849,6 na 347,8 μs; dodavanje L1 smanjilo je latenciju na 308,4 μs. Kod čitanja sa Zipfovom raspodelom dodavanje L1 uz aktivni L2 smanjilo je latenciju sa 92,3 na 58,5 μs. Za nepostojeće ključeve latencije režima samo L2 i L1+L2 bile su bliske, 343,9 i 346,6 μs, što je u skladu sa činjenicom da L1 ne kešira neuspešna čitanja. Male razlike u okviru ovog kratkog testa ne predstavljaju dokaz prednosti jednog od ta dva režima za neuspešna čitanja.

Mešovito opterećenje od milion GET zahteva

U dužem testu poređeni su režimi samo L2 i L1+L2 pri bloku od 4 KB i odnosu *Summary* 1 : 16. Oba režima izmerena su na istom determinističkom nizu od 1.000.000 zahteva nakon 10.000 zahteva za zagrevanje. Uključivanje L1 smanjilo je srednju latenciju sa 220,30 na 182,36 μs, odnosno za 37,94 μs (17,2%), dok je propusnost porasla sa 4.539 na 5.484 *GET/s* (20,8%).

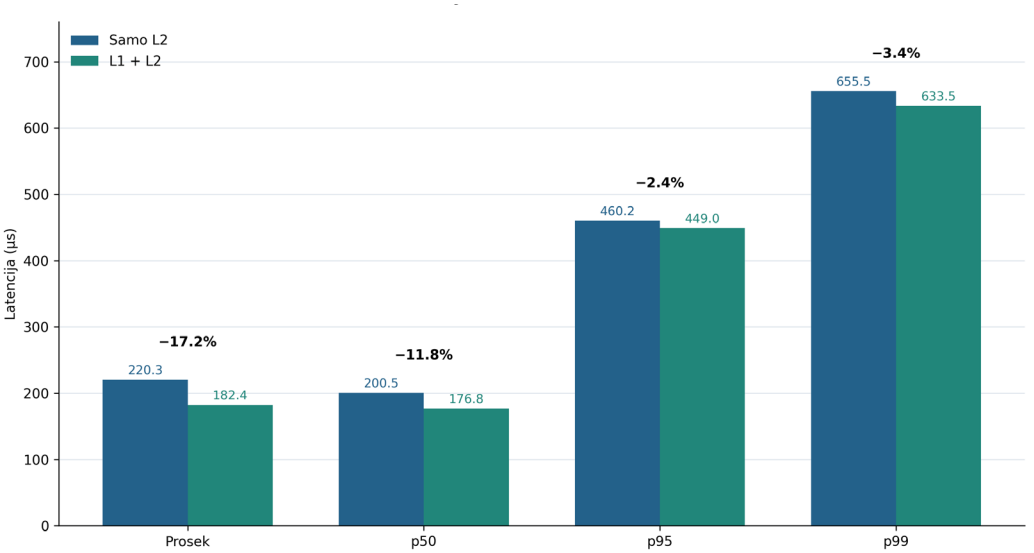
Stopa pogodaka L1 u režimu L1+L2 iznosila je 37,5%. Istovremeno je broj provera L2 opao za približno 30,6 miliona, dok se broj čitanja datoteka ispod L2 smanjio za 7.099. Stopa pogodaka L2 ostala je približno ista u oba režima. Ovi podaci ukazuju na to da je dobitak od L1 u ovom testu pre svega povezan sa izbegavanjem dela pristupa keširanim blokovima i obrade struktura *Summary* i *Index*, a u znatno manjoj meri sa smanjenjem broja čitanja datoteka.

Tabela br. 2 prikazuje r**ezultate mešovitog opterećenja od 1.000.000 GET zahteva po režimu keširanja. Broj čitanja datoteka u Tabeli br. 2 označava pozive ispod aplikativnog L2 keša: datoteke su ostale u kešu stranica operativnog sistema, pa se te vrednosti ne mogu tumačiti kao broj fizičkih čitanja skladišnog uređaja (Tabela**

br. 2). Smanjenje p99 latencije iznosilo je 21,96 µs, odnosno 3,4%, i bilo je manje od relativnog smanjenja srednje latencije. Slično tome, p95 latencija smanjena je za 2,4%. Prema tome, dobitak u prosečnom vremenu odziva nije bio praćen jednako velikim dobitkom u repu raspodele latencija (Grafikon br. 1).

Pokazatelj	Samo L2	L1 + L2	Promena pri dodavanju L1
Srednja latencija (µs)	220,30	182,36	−17,2%
p50 latencija (µs)	200,48	176,82	−11,8%
p95 latencija (µs)	460,18	449,02	−2,4%
p99 latencija (µs)	655,46	633,50	−3,4%
Propusnost (*GET/s*)	4.539	5.484	+20,8%
Stopa pogodaka L1 (%)	0	37,5	+37,5 procentnih poena
Stopa pogodaka L2 (%)	99,876	99,856	−0,020 procentnih poena
Broj provera L2 (miliona)	185,03	154,43	−16,5%
Broj čitanja datoteka ispod L2	228.792	221.693	−3,1%
Alocirana memorija po *GET* zahtevu (KiB)	758,4	633,0	−16,5%
Broj alokacija po *GET* zahtevu	412,9	344,7	−16,5%

Tabela br. 2 Rezultati mešovitog opterećenja od 1.000.000 *GET* zahteva po režimu keširanja.

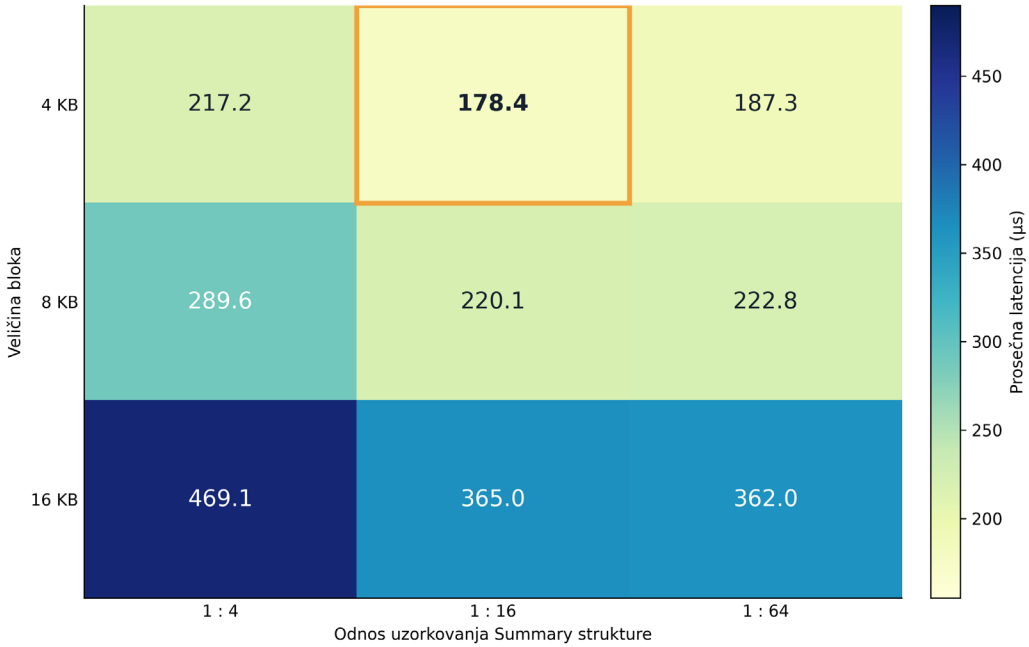


Grafikon br. 1 Latencija pri milion *GET* zahteva

Uticaj veličine bloka i uzorkovanja strukture Summary

Za svaku od devet kombinacija veličine bloka i odnosa uzorkovanja *Summary* strukture izračunata je aritmetička sredina latencija četiri dijagnostička opterećenja sa uključenim keševima L1 i L2. Najnižu vrednost u ovoj matrici, 178,4 µs, ostvarila je kombinacija bloka od 4 KB i odnosa 1 : 16. Pri istoj veličini bloka, odnos 1 : 64 dao je 187,3 µs, a odnos 1 : 4 dao je 217,2 µs. U sve tri ispitane vrednosti odnosa *Summary*, blok od 4 KB imao je

nižu srednju latenciju od blokova veličine 8 i 16 KB (Grafikon br. 2).



Grafikon br. 2 Veličina bloka i uzorkovanje *Summary* strukture (Latencija izvedena kao prosek četiri jednako ponderisana opterećenja)

Razlika između odnosa 1 : 16 i 1 : 64 pri bloku od 4 KB iznosila je 8,9 µs, odnosno latencija pri odnosu 1 : 16 bila je približno 4,8% niža u odnosu na 1 : 64. Međutim, prednost nije bila jednaka za sve vrste zahteva (Tabela br. 3): odnos 1 : 64 bio je brži za uspešna čitanja sa Zipfovom raspodelom, dok je 1 : 16 bio brži za uniformna uspešna čitanja. Zbog toga se 1 : 16 označava kao najbolja ispitana kombinacija prema jednako ponderisanoj srednjoj latenciji četiri opterećenja, a ne kao najbolji izbor za svaku pojedinačnu raspodelu zahteva.

Opterećenje	***Summary* 1 : 16**	***Summary* 1 : 64**
Često korišćeni ključevi	0,2	0,2
Uniformna uspešna čitanja	**308,4**	346,8
Uspešna čitanja sa Zipfovom raspodelom	58,5	**53,1**
Nepostojeći ključevi	346,6	349,1
Aritmetička sredina četiri opterećenja	**178,4**	187,3

Tabela br. 3 Srednja latencija po vrsti opterećenja za dva odnosa *Summary* uzorkovanja pri bloku od 4 KB i aktivnim keševima L1+L2 (µs)

DISKUSIJA

Dobijeni rezultati ukazuju da najveći doprinos smanjenju latencije u posmatranom sistemu dolazi od smanjenja troška pristupa diskovnim strukturama. Uključivanje L2 blokovskog keša dovelo je do izrazitog smanjenja prosečne latencije, dok je dodatni L1 keš ostvario još jedno, ali manje, poboljšanje. Ovakav odnos je očekivan za *LSM* arhitekturu, u kojoj point lookup može zahtevati pretragu više nivoa i više *SSTable* struktura. Prethodna

istraživanja takođe ističu read amplification kao jedan od osnovnih problema *LSM* sistema i keširanje kao važan mehanizam za njegovo ublažavanje [1,7]. Rezultati ovog rada zato ne ukazuju samo na korist samog keša, već i na činjenicu da se različiti nivoi keširanja obraćaju različitim delovima troška read path-a.

Dodatni efekat L1 keša može se objasniti činjenicom da on čuva kompletan zapis ključ–vrednost, čime se za pogođene zahteve izbegava nastavak pretrage prema *SSTable* strukturama. Njegova korist zato zavisi od lokalnosti pristupa, odnosno od toga koliko se često isti ključevi ponavljaju u kratkom vremenskom intervalu. Ovo je u skladu sa AC-Key pristupom, koji razlikuje *key-value*, *key-pointer* i *block cache* i pokazuje da trošak i korist keširanja nisu isti za sve vrste sadržaja [7]. U posmatranom sistemu L1 ostvaruje pogodak za deo zahteva, dok preostali zahtevi nastavljaju prema L2 i diskovnim strukturama. Zbog toga je razumno očekivati da bi promena raspodele popularnosti ključeva mogla promeniti relativni doprinos L1 sloja.

Režimi samo L2 i L1+L2 poređeni su pri različitim ukupnim memorijskim budžetima. Kapacitet L2 keša u oba režima iznosio je približno 2 MiB, dok je u režimu L1+L2 dodatni L1 keš mogao da čuva do 1.000 zapisa. Izmereno smanjenje latencije stoga pokazuje korist dodavanja L1 keša u ispitanoj konfiguraciji, pri čemu se doprinos dvoslojne organizacije i doprinos dodatne memorije na osnovu ovog poređenja ne mogu razdvojiti. U budućem kontrolnom eksperimentu režim L1+L2 trebalo bi uporediti sa režimom samo L2 čiji je kapacitet uvećan za memorijski ekvivalent L1 keša, tako da oba režima imaju isti ukupni memorijski budžet.

Pri tumačenju rezultata važno je razlikovati stopu pogodaka L1 keša od smanjenja broja pristupa L2 kešu. Vrednosti od 37,5% i 16,5% ne predstavljaju dve mere istog događaja, jer se zasnivaju na različitim skupovima zahteva i opisuju različite tačke u read path-u. L1 pogodak završava obradu zahteva pre pristupa L2, dok smanjenje L2 pristupa zavisi i od toga koji bi zahtevi bez L1 nastavili do blokovskog keša. Ovakvo razlikovanje je značajno i u kontekstu prethodnih istraživanja, u kojima se trošak i korist pojedinačnih keš komponenti posmatraju odvojeno upravo zbog različitih uloga koje imaju u *LSM* sistemu [7].

Broj poziva putanji čitanja datoteka ispod aplikativnog L2 keša opisuje aktivnost na aplikativnoj putanji čitanja. Tokom merenja SSTable datoteke ostale su u kešu stranica operativnog sistema (page cache), pa je operativni sistem mogao da opsluži te pozive iz memorije. Izmerene latencije zato opisuju ponašanje sistema u uslovima zagrejanog keša stranica. Fizički I/O nije meren, pa se iz ovih rezultata ne može zaključiti koliko je fizičkih čitanja sa SSD/HDD uređaja izvršeno niti koliko su trajala. Za procenu broja i trajanja fizičkih čitanja bio bi potreban poseban eksperiment sa kontrolisanim stanjem keša stranica i praćenjem I/O brojača operativnog sistema na nivou uređaja.

Rezultati za veličinu bloka i proređenost Summary strukture ukazuju na postojanje kompromisa između memorijskog otiska pomoćnih struktura i troška njihove pretrage. Gušće uzorkovanje omogućava preciznije usmeravanje prema delu *SSTable* strukture, ali zahteva više prostora za indeksne informacije, dok ređe uzorkovanje smanjuje broj pomoćnih zapisa uz potencijalno veći interval koji je potrebno pretražiti. Ovakav kompromis je u skladu sa istraživanjima koja pokazuju da se lookup trošak u *LSM* sistemima ne može posmatrati nezavisno od raspoložive memorije i organizacije navigacionih struktura [6]. Činjenica da je među ispitanim konfiguracijama odnos 1 : 16 ostvario nižu latenciju od odnosa 1 : 64 zato predstavlja empirijski rezultat konkretne postavke, a ne dokaz da je 1 : 16 optimalna vrednost za druge sisteme ili radna opterećenja.

Ovaj rezultat je posebno značajan zbog toga što proređivanje indeksa ne utiče samo na veličinu same indeksne strukture. Ako pomoćne strukture nisu u memoriji, njihov pristup može postati dodatni deo troška *point lookup*-a. Istraživanje *LSM-trie* ukazuje na značaj veličine metadata i indeksnih struktura i pokazuje da njihovo izmeštanje iz memorije može dovesti do značajnog pogoršanja performansi čitanja [10]. U tom smislu, rezultat

dobijen u ovom radu može se tumačiti kao posledica ravnoteže između manjeg memorijskog otiska proređenog *Summary*-a i dodatnog rada potrebnog za lociranje odgovarajućeg dela podataka.

Istovremeno, uticaj keširanja ne treba posmatrati potpuno odvojeno od organizacije *LSM* stabla. Kompakcija određuje raspored *SSTable* datoteka po nivoima i utiče na broj i organizaciju struktura koje mogu biti relevantne tokom *point lookup*-a. Sarkar i saradnici pokazuju da izbor politike kompakcije fundamentalno utiče, između ostalog, na *point lookup* performanse i *read amplification* [2]. U eksperimentima ovog rada kompakcija nije izolovana kao nezavisni faktor, pa se deo posmatranog ponašanja read path-a ne može pripisati isključivo kešu ili *Summary* strukturi. Ovo predstavlja važan razlog za oprez pri generalizaciji rezultata.

Razlika između prosečne i p99 latencije dodatno pokazuje da poboljšanje prosečnog vremena odgovora ne znači nužno proporcionalno smanjenje najsporijih zahteva. Uvođenje L1 keša smanjilo je p99 latenciju u manjoj meri nego prosečnu latenciju, što ukazuje da deo dugih zahteva ostaje prisutan i kada se povećava lokalnost kroz aplikativni keš. Takvi zahtevi mogu zavisiti od promašaja u više nivoa strukture ili od pristupa blokovima koji nisu prethodno keširani. Zbog toga je za potpunu procenu read performance-a korisnije posmatrati prosečnu latenciju zajedno sa repom distribucije, a ne samo jednu agregatnu metriku.

Poređenje sa prethodnim istraživanjima treba tumačiti kvalitativno. Dayan i saradnici pokazuju značaj zajedničkog razmatranja memorijskog budžeta i troška navigacije kroz *LSM* strukturu, dok AC-Key pokazuje da različite vrste keširanih objekata imaju različite troškove i koristi [6,7]. Dobijeni rezultati podržavaju isti širi zaključak: performanse *point lookup*-a zavise od međusobnog odnosa keširanja i organizacije pomoćnih struktura. Međutim, apsolutne vrednosti latencije i propusnosti nije opravdano direktno porediti sa rezultatima tih istraživanja, jer se razlikuju implementacija, hardversko okruženje, veličina podataka, konfiguracija memorije i karakteristike radnog opterećenja.

Na osnovu postojećih podataka može se identifikovati najbolja konfiguracija za konkretnu testnu implementaciju, ali ne i dokazati univerzalno optimalna vrednost pojedinačnog parametra. Za preciznije razdvajanje doprinosa keša, veličine bloka i indeksnih struktura bilo bi potrebno sprovesti ponovljena merenja uz kontrolisane veličine keša i detaljno pratiti percentile latencije, memorijski otisak pomoćnih struktura i ponašanje za različite raspodele popularnosti ključeva.

ZAKLJUČAK

Rezultati pokazuju da keširanje značajno utiče na performanse tačkastih *GET* operacija u evaluiranom *LSM Key-Value* sistemu. L2 blokovski keš smanjio je prosečnu latenciju sa 1.048,2 na 214,7 μs, dok je kombinacija L1 i L2 keša dodatno smanjila latenciju na 178,4 μs. U mešovitom opterećenju dodavanje L1 keša smanjilo je prosečnu latenciju za 17,2% i povećalo propusnost za 20,8%. Među ispitanim konfiguracijama, najbolji rezultat ostvaren je sa blokovima od 4 KB i odnosom uzorkovanja *Summary* strukture 1 : 16. Rezultati ukazuju da zajedničko podešavanje keširanja i pomoćnih indeksnih struktura može značajno uticati na performanse čitanja u *LSM* sistemima, dok su za širu generalizaciju nalaza potrebna ponovljena merenja i potpunija evaluacija različitih konfiguracija.

LITERATURA

[1] O'Neil PE, Cheng E, Gawlick D, O'Neil EJ. The log-structured merge-tree (LSM-tree). *Acta Informatica*. 1996;33(4):351-385. doi:10.1007/s002360050048.

[2] Sarkar S, Staratzis D, Zhu Z, Athanassoulis M. Constructing and analyzing the LSM compaction design space. *Proc VLDB Endow*. 2021;14(11):2216-2229. doi:10.14778/3476249.3476274.

[3] Google. LevelDB implementation notes. https://github.com/google/leveldb/blob/main/doc/impl.md (pristupljeno 25. 9. 2026.).

[4] Google. LevelDB file format. https://github.com/google/leveldb/blob/main/doc/table_format.md (pristupljeno 25. 9. 2026.).

[5] Bloom BH. Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors. *Commun ACM*. 1970;13(7):422–426. doi:10.1145/362686.362692.

[6] Dayan N, Athanassoulis M, Idreos S. Monkey: Optimal Navigable Key-Value Store. In: *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD)*. New York: ACM; 2017. p.7994. doi:10.1145/3035918.3064054.

[7] Wu F, Yang MH, Zhang B, Du DHC. AC-Key: Adaptive caching for LSM-based Key-Value Stores. In: *Proceedings of the 2020 USENIX Annual Technical Conference*. Berkeley: USENIX Association; 2020. p.603–615.

[8] Yabandeh, M. Partitioned Index/Filters. RocksDB Blog 2017 https://rocksdb.org/blog/2017/05/12/partitioned-index-filter.html (pristupljeno 25. 9. 2026.).

[9] Dayan N, Idreos S. Dostoevsky: Better space-time trade-offs for LSM-tree based key-value stores via adaptive removal of superfluous merging. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Management of Data (SIGMOD)*. New York: ACM; 2018. p.505–520. doi:10.1145/3183713.3196927.

[10] Wu X, Xu Y, Shao Z, Jiang S. LSM-trie: An LSM-tree-based ultra-large key-value store for small data items. In: *Proceedings of the 2015 USENIX Annual Technical Conference*. Berkeley: USENIX Association; 2015. p.71–82.

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF TWO-LEVEL CACHING AND SPARSE INDEXES ON READ LATENCY IN LSM DATA STORES

Author: ALEKSA DEJANOVIĆ, Petar Popović, Boško Vasilić, Sara Stojkov
e-mail: aleksa@dejanovic.online
Mentor: Assist. Prof. Miloš Simić
Department of Computing and Control Engineering
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad

Introduction: Log-Structured Merge-Tree (LSM) stores provide high write throughput, but multi-level searches and read amplification can increase read latency.

Aim: To experimentally evaluate the effects of two-level caching, an application LRU cache and a disk block cache, and Summary/Index sparsity on point GET performance in a custom LSM key-value system.

Material and Methods: A key-value system with two-level caching and configurable Summary/Index structures was implemented. We evaluated 10^6 reads with Zipfian and uniform distributions over existing and non-existing keys, using 4, 8, and 16 KB blocks and Summary/Index sampling ratios from 1:4 to 1:64.

Results: Best overall performance was achieved with 4 KB blocks, a 1:16 Summary sampling ratio, and both L1 and L2 caches. Compared with no caching, L2 reduced mean latency from 1,048.2 to 214.7 μs (79.5%), while L1+L2 reduced it to 178.4 μs (83.0%). Under 10^6 mixed requests, L1+L2 reduced mean GET latency from 220.30 to 182.36 μs (17.2%) and increased throughput from 4,539 to 5,484 GET/s (20.8%) versus L2 alone. L1 achieved a 37.5% hit rate and reduced L2 accesses by 16.5%.

Conclusion: Two-level caching substantially improves read performance, while block size and index sparsity balance latency, throughput, and memory use. The best configuration used 4 KB blocks, a 1:16 sampling ratio, and both L1 and L2 caches.

Keywords: LSM tree ; key-value store ; block cache ; LRU cache ; read latency

APSTRAKTI

УДК 624.131.1:631.445.12

UTJECAJ RADNIH PARAMETARA DISK GRANULATORA PRI GRANULIRANJU DOLOMITNOG KAMENOG BRAŠNA

Autor: NINA GALIĆ
e-mail: galic.nina2@gmail.com
Mentor: prof. dr. sc. Gordan Bedeković
Zavod za rudarstvo i geotehniku, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Uvod: Dolomitno kameno brašno predstavlja najfiniju frakciju dobivenu preradom dolomita, a obuhvaća čestice veličine ispod 0,063 mm. Zbog izrazito sitne granulacije odlikuje se povećanom sklonošću prašenju, otežanim rukovanjem i transportom, te ograničenom mogućnošću izravne primjene. Postupkom granuliranja sitne se čestice povezuju u stabilnije aglomerate – granule, čime se poboljšavaju njihova fizikalna, mehanička i uporabna svojstva. Na proces granuliranja i konačna svojstva dobivenih granula utječe velik broj čimbenika, među kojima posebnu važnost imaju radni parametri disk granulatora.

Cilj: Istražiti utjecaj kuta nagiba granulatora, brzine rotacije diska te vremena granuliranja na srednju veličinu granula (d_{50}), maseni udio frakcije 2–6 mm i čvrstoću dobivenih granula.

Materijal i metode: Ispitivanja su provedena na laboratorijskom disk granulatoru uz uporabu dolomitnog kamenog brašna i bentonita kao veziva. Primjenom eksperimentalnog dizajna prema centralno složenom planu (eng. Central Composite Design, CCD) izvedeno je 17 ispitivanja pri različitim kombinacijama nagiba granulatora, brzine rotacije diska i vremena granuliranja. Analiziran je utjecaj odabranih parametara i njihovih međudjelovanja na fizikalna i mehanička svojstva dobivenih granula.

Rezultati: Vrijeme granuliranja pokazalo se kao ključni čimbenik koji utječe na srednju veličinu granula (d_{50}), pri čemu je njegovo produljenje rezultiralo smanjenjem srednje veličine granula. Nagib granulatora najviše je utjecao na čvrstoću granula, budući da izravno utječe na način gibanja materijala po površini diska te intenzitet međusobnog sudaranja. Kod masenog udjela klase 2–6 mm nije utvrđen statistički značajan utjecaj pojedinačnih radnih parametara.

Zaključak: S obzirom na to da svojstva granula ovise o međudjelovanju radnih parametara, za postizanje optimalnih rezultata nužna je njihova pažljivo usklađena kombinacija. Dobiveni rezultati pokazuju poboljšanje fizikalnih i mehaničkih svojstava u odnosu na polazni materijal, čime se potvrđuje mogućnost učinkovite primjene granuliranja kao postupka oplemenjivanja dolomitnog kamenog brašna i povećanja iskoristivosti mineralne sirovine.

Ključne riječi: dolomitno kameno brašno; granuliranje; disk granulator; radni parametri

INFLUENCE OF DISC GRANULATOR OPERATING PARAMETERS ON THE GRANULATION OF DOLOMITE STONE POWDER

Author: NINA GALIĆ
e-mail: galic.nina2@gmail.com
Mentor: Full Prof. Gordan Bedeković,
Department of Mining and Geotechnical Engineering, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Introduction: Dolomite stone powder represents the finest fraction obtained from dolomite processing, consisting of particles smaller than 0.063 mm. Due to its very fine particle size, it is characterized by difficulties in handling, transport and limited possibilities for direct application. During granulation, fine particles are bonded into more stable agglomerates – granules, improving their physical, mechanical and functional properties. The granulation process and the final properties of the granules are influenced by numerous factors, among which the operating parameters of the disc granulator play an important role.

Objective: To investigate the influence of disc inclination angle, rotational speed and granulation time on the mean granule size (d_{50}), mass fraction of the 2–6 mm size class and compressive strength of the obtained granules.

Materials and Methods: The experiments were conducted using a laboratory–scale disc granulator with dolomite stone powder and bentonite as the binder. An experimental design based on a Central Composite Design (CCD) was applied, resulting in 17 experiments with different combinations of disc inclination angle, rotational speed and granulation time. The influence of the selected parameters and their interactions on the physical and mechanical properties of the obtained granules was analysed.

Results: Granulation time had the greatest influence on mean granule size (d_{50}), with longer granulation resulting in smaller granules. Disc inclination angle had the greatest influence on granule strength due to its effect on material movement and collision intensity. No statistically significant influence of individual operating parameters on the mass fraction of the 2–6 mm size class was observed.

Conclusion: Achieving optimal granule properties requires a balanced combination of operating parameters. Improved physical and mechanical properties compared with the initial material confirm the potential of granulation for upgrading dolomite stone powder and increasing mineral resource utilization.

Keywords: dolomite stone powder; granulation; disc granulator; operating parameters

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

6(082)

НАУЧНО-стручни скуп Студенти у сусрет науци - StES (19 ; 2026 ; Бања Лука)
Inženjerstvo i tehnologija : zbornik radova / 19. Naučno-stručni skup Studenti u susret nauci - StES 2026, Banja Luka = Engeneering and Technology : proceedings / 19th scientific conference Students encountering science - StES 2026, Banja Luka ; [urednik Milica Babić]. - [Banja Luka] : Univerzitet u Banjoj Luci : Studentski parlament Univerziteta, 2026 (Banja Luka : Mikro print). - 56 стр. : илустр. ; 25 cm. - (Inženjerstvo i tehnologija, ISSN 2637-2266, ISSN 2637-2274)

Dostupno i na:
https://stes.blupress.unibl.org/index.php/ing/issue/view/8. -
Тираж 25. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-99997-45-59-8

COBISS.RS-ID 145053697