

Техничко-економска анализа пренамене индустријског димњака комбината „Трепча“ у соларни узгонски димњак за производњу електричне енергије

Бојан Перовић

Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
bojan.perovic@pr.ac.rs

Милош Миловановић

Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
milos.milovanovic@pr.ac.rs

Младен Бањанин

Електротехнички факултет
Универзитет у Источном
Сарајеву
Источно Сарајево, Република
Српска, БиХ
mladen.banjanin@etf.ues.rs.ba

Јован Вукашиновић

Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
jovan.vukasinovic@pr.ac.rs

Андријана Јовановић

Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
andrijana.jovanovic@pr.ac.rs

Илија Вукашиновић

Академија струковних
студија косовско-метохијска,
одсек Звечан
Звечан, Србија
ilija.vukasinovic@akademijakm.edu.rs

Сажетак— У раду је разматрана могућност пренамене постојећег индустријског димњака у кругу комбината „Трепча“ у Звечану у соларни узгонски димњак за производњу електричне енергије. Анализирана је техничка изводљивост и економска оправданост изградње соларног колектора и уградње система турбина–генератор са пратећом регулационом опремом, полазећи од чињенице да је димњак висине 306 m већ изграђен. Резултати техничко-економске анализе показују да, у тренутним тржишним условима и без примене субвенција, овакви системи нису економски исплативи, чак ни у случају када је најскупљи део постројења већ реализован. Високи инвестициони и оперативни трошкови доводе до дугог периода повраћаја улагања и неконкурентне цене електричне енергије у односу на друге соларне технологије, пре свега фотонапонске системе.

Кључне речи: соларни димњак; техничко-економска анализа, Трепча.

I. УВОД

У кругу рударско-металуршког комбината Трепча у Звечану 1972. године изграђен је димњак висине 306 m за потребе прераде руде олова, цинка, сребра и злата. Тада, а и данас, он спада у највише димњаке у Европи [1]. Након 2000. године он није у функцији због ратних збивања на овим просторима. На слици 1 приказана је фотографија димњака снимљена са средњовековне тврђаве Звечан.

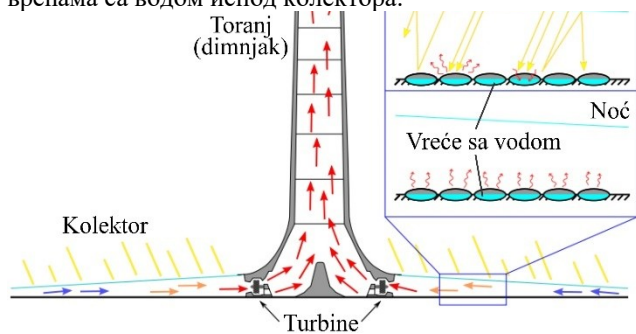


Слика 1. Фотографија димњака у кругу индустријског комплекса „Трепча“ у Звечану

Постројење за прераду руде у оквиру комбината Трепча тренутно је технолошки застарело, па би његово поновно покретање подразумевало готово потпуну реконструкцију, односно изградњу новог система, што би трајало више година. С обзиром на наведено, поставља се питање техничко-економске оправданости адаптације индустријског димњака за рад у оквиру соларне електране са узгонским димњаком за производњу електричне енергије. Соларни димњак представља постројење за производњу електричне енергије које користи сунчеву енергију за стварање природне конвекције ваздуха. Испод соларних колектора који се налазе око димњака ваздух се загрева сунчевим зрачењем и затим струји ка централном димњаку, где се његов проток усмерава кроз турбине које покрећу електрични генератор – слика 2.

Основна предност оваквог система је једноставност, поузданост и могућност рада чак и при делимичној

облачности, као и ноћу јер се топлота акумулира у врећама са водом испод колектора.



Слика 2. Принципијелна шема рада соларног димњака [2]

У прилог оправданости коришћења димњака у индустријском комплексу Трепча у Звечану као соларног димњака иде и чињеница да је простор око постојећег димњака у великој мери девастиран. Земљиште око њега представља јаловину и индустријски терен који је непогодан за пољопривреду или становање, али се може искористити за постављање соларних колектора. На тај начин, изградња колектора не би угрозила живи свет, јер он на том подручју практично и не постоји. Напротив, пројекат би могао допринети постепеном озелењавању и санацији терена испод колектора.

Сама чињеница да је димњак који представља један од најскупљих елемената соларне електране са узгонским димњаком већ изграђен и да треба само извршити његову адаптацију оправдава техничко-економску анализу спроведену у овом раду. Постојећа висина димњака и његова стабилна конструкција чине га изузетно погодним за пренамену у функцију соларног димњака за производњу електричне енергије.

II. МЕТОДОЛОГИЈА И МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ

Соларни димњак функционише на једноставном физичком принципу природне конвекције. Загрејани ваздух испод колектора постаје лакши од околног хладнијег ваздуха и почиње да се диже кроз висок димњак, при чему ствара вертикални потисак. На излазу из колектора или унутар димњака могу се поставити турбине које користе овај проток ваздуха за покретање генератора и производњу електричне енергије.

Електрична снага генератора у (W) соларног димњака може се израчунати на следећи начин [3]:

(1)

где је:

ρ - густина ваздуха у (kg/m^3); $\sim 1.2 \text{ kg/m}^3$.

η_g - ефикасност генератора и електронске конверзије (инвертер/трансформатор); типично 0.9–0.96.

η_t - ефикасност турбине, грубо 0.4–0.6 за добро пројектовану јединицу.

A_t - ефективна површина попречног пресека протока кроз турбину у димњаку у (m^2); за кружни пречник D :

(2)

V_{dim} - средња брзина струјања ваздуха кроз турбину у димњаку у (m/s).

Брзина V_{dim} може се израчунати на следећи начин [3]:

(3)

где је:

g - убрзање Земљине теже, $\sim 9.81 \text{ m/s}^2$,

H - ефективна висина димњака у (m),

T_{ul} - температура загрејаног ваздуха који улази у димњак (после проласка испод колектора), у (K),

T_∞ - спољна/амбијентална температура ваздуха у (K).

Температура T_{ul} може се израчунати полазећи од топлотног биланса колектора:

(4)

где је:

– масени проток ваздуха у (kg/s)

G – интензитет сунчевог зрачења у (W/m^2),

A_c – површина колектора у (m^2),

η_c – ефикасност колектора,

c_p – специфична топлота у (J/(kgK)) $\sim 1005 \text{ J/(kgK)}$,

$\Delta T = T_{ul} - T_\infty$ - разлика у температури загрејаног ваздуха испод колектора и амбијентног ваздуха у (K).

Из израза (4) је:

(5)

Ако се израз (3) за V_{dim} замени у (5) и реши по ΔT , добија се:

(6)

Тражена температура на улазу у димњак сада износи:

(7)

Када се помоћу израза (1) израчуна снага, енергија се добија као производ снаге и посматраног временског периода.

Земља испод колектора соларног димњака има значајну топлотну инерцију и током дана акумулира део сунчеве енергије, па систем често наставља са радом и након заласка Сунца, користећи ту ускладиштену топлоту [4].

Guo et al. [5] развили су теоријски модел соларног димњака са складиштењем топлоте и показали да слој тла дебљине 4 m може значајно повећати ефикасност. Њихово истраживање, засновано на пилот-постројењу *Manzanares* (Шпанија), показало је да се дневна производња електричне енергије може повећати за око 31% захваљујући топлоти акумулираној у тлу.

Слично томе, *Attig-Bahar et al.* [6] утврдили су да употреба слоја тла од шљунка и песка дебљине 5 m може повећати годишњу производњу електричне енергије за приближно 35%.

С обзиром на то да се тло око посматраног индустријског димњака састоји претежно од шљунка и песка (алувијална раван реке Ибар), може се сматрати да ће се укупна годишња произведена електрична енергија на рачун топлоте акумулиране у тлу повећати за око 35 % у односу на вредност из израза (1). Према томе, укупна потенцијална годишња производња електричне енергије димњака у индустријском комплексу Трепча у Звечану ако се он користи као соларни димњак износила би:

(8)

III. ТЕХНИЧКО-ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА ПРОИЗВОДЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ ПОМОЋУ СОЛАРНОГ ДИМЊАКА

Да би се одредила електрична снага коју даје генератор, потребно је познавати геометрију соларног димњака и колектора, метеоролошке податке за Звечан и карактеристике ваздуха. У следећим табелама дати су ови подаци.

ТАБЕЛА I. ГЕОМЕТРИЈА СОЛАРНОГ ДИМЊАКА, ПАРАМЕТРИ КОЛЕКТОРА И ТУРБИНЕ И ФИЗИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ВАЗДУХА

Група	Ознак	Опис	Вредност / опсег
Геометрија	H	Висина димњака	306 m
Колектор	A_c	Површина колектора	5 ha = 50.000 m ²
	η_c	Ефективна ефикасност колектора	0.55 (типично 0.5–0.6)
Турбина/ген.	η_t	Ефикасност турбине	0.50 (типично 0.40–0.55)
	η_g	Ефикасност генератора	0.94 (типично 0.92–0.96)
	D	Пречник ротора турбине	3 m
Физичке карактеристике ваздуха	c_p	Топлотни капацитет ваздуха	1005 J/(kg·K)
	g	Убрзање земљине теже	9.81 m/s ²
	ρ	Густина ваздуха (прорачун/приближно)	1.2 kg/m ³

Вредности интензитета соларне радијације G и температуре амбијента T_∞ за 2024. годину преузете су са званичног NASA POWER сервиса за локацију Звечан (координате $\approx 42.891^\circ\text{N}$, 20.866°E), дана 13.10.2025. године путем линка [7]:

NASA POWER (*Prediction Of Worldwide Energy Resources*) обезбеђује сатне метеоролошке и соларне параметре засноване на сателитским опажањима и анализама, агрегиране за изабрану локацију и временски период. За потребе овог рада преузете су серије за све сате у 2024. години.

За сваки сат 2024. године, на основу преузетих вредности за G и T_∞ , као и параметара из табеле I израчуната је снага генератора помоћу израза (1). Пошто су у питању сатне вредности снаге, сатне вредности енергије су нумерички једнаке. Сумирањем свих сатних вредности енергије добијена је годишња производња електричне енергије помоћу разматраног соларног

димњака, када систем ради само током трајања инсолације.

Укупна производња електричне енергије која укључује енергију произведену након заласка Сунца на рачун топлоте акумулиране у тлу испод колектора израчуната је помоћу израза (8) и износи 270 MWh.

Ако се узме просечна цена електричне енергије од 101.8 €/MWh за 2024. годину [8], то значи да би се продајом електричне енергије произведене у разматраном соларном димњаку за годину дана остварила наплата од 27486 €.

Да би се могла сагледати економска оправданост реализације разматраног пројекта соларног димњака, односно профит, неопходно је проценити инвестиционе трошкове изградње кључних подсистема, пре свега соларног колектора који окружује димњак, као и склопа турбина–генератор са пратећом опремом за регулацију и прикључење на мрежу. Осим тога, треба узети у обзир и трошкове рада и одржавања система. Трошкови појединих компоненти соларног димњака анализирани су у [9] и ти подаци су коришћени и у овом раду. Како се наведене процене односе на подручје Хрватске, због географске близине и сличних тржишних услова могу се сматрати релевантним и за овде разматрани случај. Према тим подацима, цена стакленог соларног колектора са једним слојем стакла креће се у распону од 6 до 9 €/m², док цена склопа турбина–генератор са пратећом регулационом опремом, за турбине мањих снага, износи приближно 1600 €/kW_{ел}. Како би се покрила максимална могућа снага која се може остварити у летњем периоду при највећем интензитету Сунчевог зрачења, предвиђена је уградња генератора номиналне снаге 150 kW. Имајући у виду потребну површину соларног колектора од 5 ha, укупни инвестициони трошак изградње разматраног постројења, без трошкова самог димњака који се сматра већ изграђеним, износи приближно 690000 €, при чему је узета горња граница цене стакленог колектора. На основу тога процењује се да би било потребно нешто више од 25 година рада постројења како би се покрили искључиво трошкови изградње. При томе нису укључени трошкови рада и одржавања, који према [9] износе око 4–5 % укупне инвестиције годишње. Ако се узме у обзир да се приближно 40% укупне инвестиције односи на изградњу димњака, око 30% на соларни колектор, док преостали део отпада на склоп турбина–генератор, испитивање и пуштање у рад [9], то значи да годишњи трошкови рада и одржавања разматраног система износе приближно 48000 €.

ЗАКЉУЧАК

Постојање индустријског димњака висине 306 m у оквиру комбината „Трепча“ у Звечану, који је ван функције, као и расположив индустријски и девастирани простор у његовој непосредној околини, представљају јединствену техничку и просторну основу за разматрање његове пренамене у соларни димњак за производњу електричне енергије. Међутим, спроведена техничко-економска анализа показује да производња електричне енергије у електранама са соларним димњаком, без примене субвенција и других подстицајних механизма, у тренутним тржишним условима није економски исплатива, чак и када је један од скупљих делова система (димњак) већ изграђен. Високи инвестициони трошкови,

првенствено условљени великом потребном површином соларног колектора, доводе до дужег периода повраћања улагања, који додатно оптерећују значајни годишњи трошкови рада и одржавања. Из тог разлога, са строго економског становишта и при тржишним ценама електричне енергије, друге технологије коришћења соларне енергије, као што су фотонапонске технологије, тренутно представљају повољније решење.

Bojan Perović, Miloš Milovanović, Mladen Banjanin, Jovan Vukašinić, Andrijana Jovanović, Ilija Vukašinić

ЗАХВАЛНИЦА

Аутори се захваљују Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на пруженој финансијској подршци за спровођење научноистраживачког рада, у оквиру Уговора бр. 451-03-18/2025-03/200155.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *List of tallest chimneys* — Википедија — https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_chimneys [Wikipedia](#), **Пристаљено:** 8. октобра 2025.
- [2] Ž. Adamović, B. Perović, M. Vulović, S. Vulović, *Solarne tehnologije*, Друштво за техничку дијагностику Србије, Београд, 2014.
- [3] E. Abdelsalam, F. Kafiah, F. Almomani, M. Tawalbeh, S. Kiswani, A. Khasawneh, D. Ibrahim, and M. Alkasrawi, “An innovative design of a solar double-chimney power plant for electricity generation,” *Energies*, vol. 14, no. 19, Art. no. 6235, 2021.
- [4] E. Cuce, P. M. Cuce, S. Carlucci, H. Sen, K. Sudhakar, M. Hasanuzzaman, and R. Daneshazarian, “Solar chimney power plants: A review of the concepts, designs and performances,” *Sustainability*, vol. 14, no. 3, Art. no. 1450, 2022
- [5] P. Guo, Y. Wang, J. Li, and Y. Wang, “Thermodynamic analysis of a solar chimney power plant system with soil heat storage,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 1076–1084, 2016.
- [6] F. Attig-Bahar, M. Sahraoui, M. S. Guellouz, and S. Kaddeche, “Effect of the ground heat storage on solar chimney power plant performance in the south of Tunisia: Case of Tozeur,” *Solar Energy*, vol. 193, pp. 545–555, 2019.
- [7] https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/hourly/point?parameters=ALLSKY_SFC_SW_DWN,T2M&community=RE&longitude=20.866&latitude=42.891&start=20240101&end=20241231&format=CSV&time-standard=LST
- [8] SEEPEX, *Annual Report 2024*. [Online]. Available: <https://seepex-spot.rs/wp-content/uploads/2025/10/Seepex-Annual-Report-2024.pdf>. Accessed: Oct. 2025.
- [9] S. Nižetić, N. Ninić, and B. Klarin, “Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region,” *Energy*, vol. 33, no. 11, pp. 1680–1690, 2008.,

ABSTRACT

This paper investigates the possibility of repurposing an existing industrial chimney located within the Trepča industrial complex in Zvečan into a solar updraft chimney for electricity generation. The technical feasibility and economic viability of constructing a solar collector and installing a turbine-generator system with associated control equipment are analyzed, taking into account that the 306 m high chimney has already been constructed. The results of the techno-economic analysis indicate that, under current market conditions and in the absence of subsidies, such systems are not economically viable, even when the most expensive component of the plant has already been built. High investment and operating costs lead to long payback periods and an electricity generation cost that is not competitive with other solar technologies, particularly photovoltaic systems.

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF REPURPOSING THE TREPČA INDUSTRIAL CHIMNEY INTO A SOLAR UPDRAFT CHIMNEY FOR ELECTRICITY GENERATION