

Мср Милица Маринковић, асистент
Правног факултета Универзитета у Крагујевцу
ORCID: 0000-0002-1275-3419

Изворни научни рад
УДК: 502.131.1:512.624.95]:34(4-672EU)
349.6:336.74]:34(4-672EU)
DOI: 10.46793/XXIMajsko.805M

ЕКОЛОШКИ ИЗАЗОВИ РУДАРЕЊА КРИПТОВАЛУТА: ЕНЕРГЕТСКА ПОТРОШЊА, ЕЛЕКТРОНСКИ ОТПАД И ОДГОВОР РЕГУЛАТОРНИХ ОКВИРА*

Резиме

Рударење криптовалута представља значајан еколошки изазов због прекомерне потрошње електричне енергије, високог нивоа електронског отпада и значајног угљеничког отиска. Највећи проблеми везани за ову активност укључују енергетску неодрживост, посебно код криптовалута заснованих на Proof-of-Work (PoW) механизму, који захтевају рачунарску снагу великих размера, што доводи до потрошње енергије упоредиве са целим државама. Осим тога, брза застарелост рударске опреме генерише огромне количине електронског отпада, док емисије CO₂ из фосилних извора енергије доприносе климатским променама и штети по здравље људи кроз повећање загађења ваздуха.

У циљу ублажавања ових проблема, Европска унија кроз Зелени договор тежи климатској неутралности, што укључује и регулисање енергетски интензивних индустрија попут крипто рударења. Француска је, на пример, усвојила Loi REEN (Régulation Énergie Électronique et Numérique), који ограничава енергетски отисак дигиталних технологија, укључујући и криптовалуте. Иако ови прописи нису директно забранили PoW рударење, они постављају оквире за енергетску ефикасност и одрживост, што може довести до строжих мера у будућности. Ова истраживања указују на потребу за прелазак на еколошки одрживије алтернативе, као што су Proof-of-Stake (PoS) блокчејн, како би се смањио утицај криптовалута на животну средину.

* Рад је резултат научноистраживачког рада аутора у оквиру Програма истраживања Правног факултета Универзитета у Крагујевцу за 2025. годину, који се финансира из средстава Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије.

Кључне речи: *криптовалуте, блокчејн, proof-of-work, proof-of-stake, одрживост.*

1. Увод

Историја криптовалута, према устаљеном консензусу, почиње 2009. године, када је креатор или група креатора под псеудонимом Сатоши Накамото (*Satoshi Nakamoto*) представио прву криптовалуту под именом биткоин (*Bitcoin*). Свет криптовалута брзо се усложњавао, па се ускоро појавио велики број других криптовалута, међу којима је најпознатији етеријум (*Ethereum*). Број криптовалута данас прелази 10.000.¹ Биткоин је и даље најзначајнији и трансакције биткоина чине 68% трансакција криптовалутама у свету. Следећи по значају је етеријум са 19% удела, а осталих 13% отпада на све друге постојеће криптовалуте.²

Стварање нових криптовалута означава се термином „рударење“ (*mining*). Према дефиницији коју износи Синан Куфеолу (*Sinan Küfeoğlu*) и Махмут Озкуран (*Mahmut Özkuran*), „рударење биткоина (као и других криптовалута, прим. аут) је децентрализован рачунарски процес у којем се трансакције верификују и додају у јавни евиденциони регистар, познат као блокчејн“.³ При томе, нове количине криптовалута не издаје један централни орган или монетарна институција, него их стварају анонимни појединци широм света. Као и за рударење племенитих метала за ковање традиционалног новца, за рударење криптовалута се користе сложене машине. Разлика је у томе што се криптовалуте копају тако што машине, међусобно умрежене преко интернета, решавају компликоване математичке задатке. „Рудар“, односно власник машине која прва реши конкретан задатак има право да дода нову карику, односно блок у континуирани дигитални ланац блокова звани блокчејн (*blockchain*). На самом почетку постојања криптовалута, један „ископан“ блок је рудару доносио 50 биткоина. Временом је та награда смањивана, па је, према подацима из априла 2024, она износила 3,125 биткоина.⁴ Иако је стимулација за

¹ How Many Cryptocurrencies Are There in June 2025?, <https://tangem.com/en/blog/post/how-many-cryptocurrencies-exist/> датум приступа 23. јун 2025. Насупрот томе, Уједињене Нације признају 180 валута различитих држава. Top 20 strongest currencies in the world in 2025, <https://www.currencytransfer.com/blog/expert-analysis/top-20-strongest-currencies-in-the-world> датум приступа 23. јун 2025.

² Bačević, J. et al., *The Impact of Blockchain Technology on the Environment*, Facta Universitatis, vol. 37, no. 1/2024, стр. 202.

³ Küfeoğlu, S., Özkuran, M., *Bitcoin Mining: A Global Review of Energy And Power Demand*, Energy Research & Social Science, no. 58/2019, стр. 1.

⁴ How Does Bitcoin Mining Work? A Beginner's Guide, <https://www.investopedia.com/tech/how-does-bitcoin-mining-work/> датум приступа 22. јун 2025.

рударе смањена, рударење криптовалута је и даље уносно,⁵ с обзиром на то да цена биткоина константно расте. Почетком 2017. године, цена једног биткоина износила је око 1000 долара, а током те године је нарасла на чак 20.000 долара.⁶ Крајем јуна 2025. године цена биткоина износила је 101.300 америчких долара.⁷ Треба напоменути да криптовалуте, с обзиром на то да немају централног издаваоца, немају ни инхерентну вредност. Суштински су безвредне, а вредност добијају тако што се њима тргује.⁸

Последњих година криптовалуте, на челу са биткоином, стичу све већу популарност. Ел Салвадор је 2021. године постао прва држава на свету која је биткоин прихватила као званичну валуту, поред америчког долара, који је 2001. године заменио традиционалну валуту колон (*colón*). Кriptoентузијастички истичу да су предности криптовалута бројне. На првом месту, криптовалуте су, како тврде Вендл (*Wendl*) и сарадници, отпорне на инфлаторне притиске.⁹ Поред тога, криптовалуте, како немају централну банку као емитера, омогућавају децентрализацију финансијских токова стварањем дистрибуционе мреже „од корисника до корисника“ (*peer-to-peer*),¹⁰ али и анонимност трансакција.¹¹ Даље, криптовалуте могу бити од користи популацијама које живе у подручјима где не постоји приступ традиционалним банкама или је тај приступ знатно отежан (*underbanked*).¹²

Традиционалне финансијске институције попут компанија „Виза“ и „Мастеркард“ почеле су да издају биткоин картице, а у Румунији, Кипру и Канади постоје биткоин банкомати који омогућавају конверзију стварног новца у жељену криптовалюту.¹³ Поред раста интересовања за рударење

⁵ Тачан број рудара криптовалута је непознат, а према проценама које износе Ј. Бачевић и сарадници, 2023. године их је на целом свету било око осам милиона. Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 201.

⁶ De Vries, A., *Bitcoin's Energy Consumption Is Underestimated: A Market Dynamics Approach*, Energy Research & Social Science, no. 70/2020, стр. 1.

⁷ Bitcoin Futures, Jun-2025 (BTC=F), <https://finance.yahoo.com/quote/BTC%3DF/history/> датум приступа 23. јун 2025.

⁸ O'Dwyer, K., Malone, D., *Bitcoin Mining and its Energy Footprint*, ISSC 2014 / СИСТ 2014, стр. 1.

⁹ Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., *The environmental impact of cryptocurrencies using proof of work and proof of stake consensus algorithms: A systematic review*, Journal of Environmental Management, no. 326/2023, стр. 1.

¹⁰ De Vries, A., *нав. чланак*, стр. 1.

¹¹ Hong, H., Zhang, C., *Bitcoin Trading, Economic Growth, Energy Use, and CO2 Emissions: An Advanced Panel Study of Emerging Market Economies*, International Review of Economics and Finance, no. 87/2023, стр. 521.

¹² Laimon, M., Almadadha, R., Goh, S., *Energy Consumption of Crypto Mining: Consequences and Sustainable Solutions Using Systems Thinking and System Dynamics Analysis*, Sustainability, no. 17/2025, стр. 1.

¹³ Badea, L., Mungiu-Pupăzan, M. C., *The Economic and Environmental Impact of Bitcoin*, IEEE Access, vol. 9, 2021, стр. 48095.

криптовалута, као и интересовања држава за регулисање рударења и трговине криптовалутама, расте и интересовање научне јавности за ову прилично нову област истраживања. Кина, Сједињене Америчке Државе и Индија предњаче у броју научних радова објављених на тему различитих аспеката криптовалута.¹⁴

2. Еколошки аспекти криптовалута

Рударење и трговина криптовалутама је веома уносан посао, стога не чуди што је тема криптовалута веома актуелна и у пословним и у научним круговима. Док се крипто-гуруи фокусирају на максимирање профита, научници разних струка указују на потенцијално велике еколошке проблеме ове делатности.

2.1. Криптовалуте и потрошња електричне енергије

Рударење криптовалута се обавља тако што компјутери велике снаге континуирано обављају сложене математичке операције. Последиčno, рударење криптовалута је енергетски веома захтевно и троши велике количине електричне енергије. Према подацима Универзитета у Кембриџу, једна трансакција биткоина троши 707 kWh електричне енергије, а укупна потрошња електричне енергије на криптовалуте 2022. године износила је 143,6 TWh. То је, наводе ови истраживачи, знатно више од годишње потрошње целе Норвешке (124,3 TWh)¹⁵ или Шведске (170 TWh)¹⁶ Према најновијим подацима које износи Кембриџ, крајем јуна 2025. године потрошња електричне енергије на криптовалуте на светском нивоу је порасла на 166,48 TWh.¹⁷

Традиционално, криптовалуте су се копале помоћу механизма „доказа о раду“ (*proof of work*, у даљем тексту *PoW*). Овај механизам, први пут уведен са настанком биткоина 2009. године, подразумева да рудар, односно његов рачунар, мора да реши одређену компликовану математичку операцију како би имао право да дода нови блок у блокчејн. Решен задатак представља доказ о

¹⁴ Anandhabalaji, V., Babu, M., Brintha, R., *Energy Consumption by Cryptocurrency: A Bibliometric Analysis Revealing Research Trends and Insights*, Energy Nexus, no. 13, 2024, стр. 6.

¹⁵ Yuan, X, Su, C-W., Dumitrescu Peculea, A., *Dynamic Linkage of the Bitcoin Market and Energy Consumption: An Analysis Across Time*, Energy Strategy Reviews, no. 44/2022, стр. 1.

¹⁶ Electricity consumption in Sweden from 2008 to 2023, <https://www.statista.com/statistics/1027078/electricity-consumption-in-sweden/#:~:text=Electricity%20consumption%20in%20Sweden%20amounted,less%20than%20150%20terawatt%2Dhours.&text=Log%20in%20or%20register%20to%20access%20precise%20data>, датум приступа 29. јун 2025.

¹⁷ Bitcoin network power demand, <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci> датум приступа 24. јун 2025.г. Према подацима сајта Дигиконист (*Digiconomist*), рударење криптовалута троши више електричне енергије од рударења злата. Bitcoin versus Gold, <https://digiconomist.net/bitcoin-versus-gold> датум приступа 25. јун 2025

раду тог рудара, односно даје му могућност да дода нови блок у блокчејн.¹⁸ Како се више стотина хиљада рудара истовремено такмичи да реши ове операције, а само један успева, јасно је да у овом процесу сви учесници троше велике количине електричне енергије, а само један бива награђен криптовалutom.¹⁹ Управо је ово расипање енергије препознато као велики еколошки проблем PoW механизма.

Као алтернатива енергетски захтевном и неефикасном механизму PoW, крипто-рудар под псеудонимом Сани Кинг (*Sunny King*) 2011. године осмислио је механизам рударења под називом „доказ о улогу“ (*proof of stake*, у даљем тексту PoS). Код PoS механизма, сваки рудар који жели да учествује у настанку новог блока у блокчејну мора да уложи одређена средства као улог (*stake*), а рудар којем ће бити омогућено да реши математичку загонетку, односно ископа нови блок и угради га у блокчејн, бира се полу-насумично у зависности од висине уложених средстава.²⁰ У механизму PoS нема симултаног решавања истог математичког проблема као што постоји код механизма PoW, тако да је количина електричне енергије која се троши далеко мања него код PoW.²¹ Прва криптовалута која је користила искључиво PoS механизам била је некст (*Nxt*), настала 2013. године. Ипак, PoS механизам није постао широко прихваћен све док друга највећа криптовалута, етеријум, није 2022. године прешла на употребу овог механизма.²²

Како је потрошња електричне енергије за потребе рударења криптовалута велика, већина рударских рачунара је груписана у „фарме“, конгломерате који се по правилу налазе у земљама где је електрична енергија јефтинија. Најпопуларнија земља за рударење криптовалута дуго година је била Кина.²³ Према подацима из 2021. године, око 70% крипто-рударских активности у свету одвијале су се управо у Кини.²⁴ Ово је било проблематично из разлога

¹⁸ За подробније објашњење начина рада PoW механизма, в. Sapra, N., Shaikh. I., *Impact of Bitcoin mining and crypto market determinants on Bitcoin-based energy consumption*, *Managerial Finance*, vol 49, no. 11/2023, стр. 5.

¹⁹ Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 199.

²⁰ За више детаља о начину функционисања PoS механизма, в. Okikijesu Bada, A. et al., *Towards a Green Blockchain: A Review of Consensus Mechanisms and their Energy Consumption*, 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Pafos, Cyprus, 2021, стр. 2.

²¹ Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 199, 200.

²² Данас постоје многе „зелене“ криптовалуте које користе PoS механизам, са тежњом да буду одрживије и енергетски ефикасније од биткоина. Поред етеријума, треба поменути кардано (*cardano*), лајткоин (*litecoin*), полкадот (*polkadot*). Alzoubi, Y. I., Mishra, A., *Green Blockchain – A Move Towards Sustainability*, *Journal of Cleaner Production*, no. 430, 2023, стр. 4.

²³ De Vries, A., *Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin's Sustainability Problem*, *Joule*, vol 3, issue 4, 2019, стр. 896.

²⁴ Yuan, X., Su, X-W., Dumitrescu Peculea, A., *нав. чланак*, стр. 2.

што Кина преко 60% своје електричне енергије добија сагоревањем фосилних горива, на првом месту угља.²⁵ Услед забринутости за енергетску потрошњу криптовалута, кинеске власти су 2021. године забраниле све активности везане за рударење и „шпекулативне трансакције“, односно трговину криптовалутама, па су рудари морали да се преселе у друге земље, првенствено Иран и Казахстан, али и Сједињене Америчке Државе.²⁶ Трансакције криптовалутама су толико енергетски захтевне да се, према подацима из 2022. године, количином електричне енергије за обављање једне биткоин трансакције може напајати 951.246 трансакција извршених Виза картицама²⁷ или просечно америчко домаћинство током 21 дана.²⁸

Ова „незасита употреба енергије“²⁹ довела је до повећане медијске пажње уперене ка криптовалутама. Илон Маск (*Elon Musk*) је 2021. године најавио да ће његова компанија „Тесла“ престати да прихвата плаћања биткоинима, управо због забринутости за животну средину.³⁰

Будући математички и рачунарски захтевно, рударење криптовалута се обавља на сложеним и јаким рачунарима. Један од нуспроизвода оваквих операција „индустријских размера“³¹ је велика количина отпадне топлоте која се ослобађа. За хлађење малих рударских фарми може бити довољно да буду смештене у земље са хладнијом климом. Велике фарме, међутим, захтевају континуирано хлађење специјализованим уређајима, што додатно повећава количину електричне енергије која се троши за рударење.³² Да би машине за рударење криптовалута радиле на оптималној температури од 70 до 80 степени Целзијуса, температура у просторијама где се те машине налазе не сме прелазити 35 степени Целзијуса.³³ Према томе, поред потребе за константним и постојаним снабдевањем електричном енергијом за потребе рударења, постоји потреба и неометаним приступом електричној енергији ради хлађења

²⁵ Исто.

²⁶ Исто. Градски савет града Платсбурга у држави Њујорк забранио је отпочињање нових операција рударења криптовалута, мада то није погодило већ постојеће операције. Истим путем су пошли и неки дистрикти у држави Вашингтон, где је јефтина електрична енергија добијена из хидроелектрана привукла рударе. Truby, J. et al., *Blockchain, Climate Damage, And Death: Policy Interventions to Reduce the Carbon Emissions, Mortality, And Net-Zero Implications of Non-Fungible Tokens and Bitcoin*, Energy Research & Social Science, no. 88, 2022, стр. 9.

²⁷ Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., нав. чланак, стр. 5.

²⁸ Hong, H., Zhang, C., нав. чланак, стр. 520.

²⁹ Malfuzi, A., *Economic Viability of Bitcoin Mining Using a Renewable-Based SOFC Power System to Supply the Electrical Power Demand*, Energy, no. 203, 2020, стр. 1.

³⁰ Tesla will no longer accept Bitcoin over climate concerns, says Musk, <https://www.bbc.com/news/business-57096305> датум приступа 25. јун 2025.г.

³¹ Yuan, X., Su, X-W., Dumitrescu Peculea, A., нав. чланак, стр. 2.

³² Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., нав. чланак, стр. 3.

³³ Bačević, J. et al., нав. чланак, стр. 203.

рударских уређаја. За потребе хлађења великих индустријских потројења за рударење криптовалута често се користе тзв. системи хлађења урањањем (*immersion cooling*),³⁴ који захтевају употребу великих количина воде. М. Лемон (M. Laimon) и сарадници наводе да је количина воде потрошена у ове сврхе на годишњем нивоу довољна да задовољи годишње потребе за пијаћом водом светске популације која нема приступ чистој води за пиће.³⁵

Растућа потрошња електричне енергије за потребе обављања различитих крипто-активности представља узрок за забринутост на светском нивоу. Упркос растућој употреби обновљивих извора енергије, попут ветра и сунца, ради стабилног снабдевања електро-мреже потребна је употреба фосилних горива. На глобалном нивоу отприлике 45% електричне енергије настаје сагоревањем фосилних горива, на првом месту угља.³⁶ Чињеница да криптовалите троше велике количине енергије и, последично, повећавају емисије штетних материја у атмосферу, доводи у питање остварење циљева Париског споразума из 2016. године, који је предвидео обавезу држава потписница да чине напоре како би се глобални пораст температуре одржао на нивоу мањем од два степена целзијуса у односу на преиндустријски ниво.³⁷

Интензитет рударске активности криптовалута зависи од њихове тренутне цене. Уколико вредност валуте опадне, опашће и потражња за том валутом, па ће се смањити и количина електричне енергије коју та валута троши. Илустративан је пример биткоина који је 2018. године изгубио преко 80% своје вредности.³⁸ Тада је уочено смањење употребе електричне енергије за рударење нових биткоина. Ипак, тржиште се брзо опоравило и данас потражња електричне енергије повезана са биткоином континуирано расте.³⁹ С обзиром на то да је биткон заснован на PoW механизму, што је цена једног биткоина већа, више се рудара укључује и више се енергије троши.⁴⁰ Међутим, Куфеолу и Озкуран сматрају да ће потражња за електричном енергијом када је биткоин у

³⁴ Çelik, A., Özırmak, M., *Understanding the Association Between Bitcoin Mining and Environmental Sustainability in Light of the Sustainable Development Goals Through the DARDL and KRLS Methods*, Sustainable Development, no. 1/2025, стр. 2.

³⁵ Laimon, M., Almadadha, R., Goh, S., *нав. чланак*, стр. 3.

³⁶ Chamanara, S., Arman Ghaffarizadeh, S., Madan, K., *The Environmental Footprint of Bitcoin Mining Across the Globe: Call for Urgent Action*, Earth's Future, no. 11/2023, стр. 3.

³⁷ Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., *нав. чланак*, стр. 5.

³⁸ Исто, стр. 6.

³⁹ Влада Ирана оптужила је растући интерес за рударење криптовалута у тој држави за несташице струје до којих долази последњих година, откако је Кина забранила рударење на својој територији. How Iran's Bitcoin Strategy Backfires, <https://bitcoinblog.de/2025/05/21/how-irans-bitcoin-strategy-backfires/> датум приступа 25. јун 2025.

⁴⁰ Jones, B., Goodkind, A., Berrens, R., *Economic Estimation of Bitcoin Mining's Climate Damages Demonstrates Closer Resemblance to Digital Crude Than Digital Gold*, Scientific Reports, no. 12/2022, стр. 2.

питању расти до 2028. године, када ће бити ископано 98,44% укупне количине биткоина,⁴¹ а да ће потом стагнирати и опадати.⁴² Поједини научници тврде да би до 2050. године биткоин требало да достигне карбонску неутралност.⁴³ Све је више доказа и да неке цене криптовалута могу бити вештачки надуване тржишним манипулацијама и шпекулацијом (тзв. *крипто-прање*), што може имати и еколошке последице.⁴⁴

2.2. Проблем електронског отпада

У првим годинама постојања криптовалута, било је могуће рударити их помоћу обичног кућног рачунара. Временом, како је вредност различитих криптовалута расла и како се све више рудара укључивало у трку за овим дигиталним златом, математички задаци које су рудари морали решити како би ископали нове количине криптовалута усложњавали су се. Због тога се јавила потреба за јачим и јачим рачунарима. Рудари су дошли до закључка да се рударење криптовалута може обављати уз помоћ јаких графичких картица, па је у периоду 2017-2021. на светском тржишту владала несташица јаких графичких картица. Почетком 2011. године, наводе М. Вендл (M. Wendl) и сарадници, савремена графичка картица од 2 GHz могла је да ископа више од два блока дневно. Новембра 2018. године, рудар који је користио такву картицу могао је очекивати да пронађе нови блок сваких 472. 339 година.⁴⁵ Ипак, како се процес рударења додатно усложњавао, јавила се потреба за коришћењем специјализованих рударских машина познатих под акронимом ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*). Прва оваква машина настала је 2013. године.⁴⁶ Реџу К. О Двајера (K. O'Dwyer) и Д. Малонеа (D. Malone), дошло је до „хардверске трке у наоружању“.⁴⁷

Брзо усложњавање процеса рударења и чињеница да рачунари и рударске машине раде даноноћно доводи до брзог трошења и застаревања рударске опреме. Док су се за рударење користили првенствено рачунари, то је био мањи проблем, с обзиром на то да се рачунар који више није погодан за рударење може користити за друге намене. Међутим, ASIC машине су прављене

⁴¹ Творац биткоина, Сатоши Накамото, ограничио је укупан број биткоина на 21 милион. С обзиром на то да се награда за сваки нови блок уграђен у блокчејн прогресивно смањује, процењује се да ће последњи биткоин бити ископан за око 120 година. Stoll, C., Klaaßen, L., Gallersdörfer, U., *The Carbon Footprint of Bitcoin*, Joule, vol. 3, issue 7, 2019, стр. 616.

⁴² Küfeoglu, S., Özkuran, M., *Bitcoin Mining: A Global Review of Energy and Power Demand*, Energy Research & Social Science, no. 58/2019, стр. 7.

⁴³ Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., *нав. чланак*, стр. 5.

⁴⁴ Jones, B., Goodkind, A., Berrens, R., *нав. чланак*, стр. 6.

⁴⁵ Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., *нав. чланак*, стр. 3.

⁴⁶ De Vries, A., *нав. чланак*, стр. 893.

⁴⁷ O'Dwyer, K., Malone, D., *нав. чланак*, стр. 3.

наменски за рударење криптовалута и немају другу намену, па када се истроше постају електронски отпад.⁴⁸

Машине за рударење криптовалута имају веома кратак животни век, свега годину и три месеца у просеку.⁴⁹ То доводи до потребе да се опрема за рударење често мења и, према проценама из маја 2021. године, од настанка криптовалута до тог тренутка, само биткоин је произвео преко 30 килотона електронског отпада.⁵⁰ Према подацима из 2024. године, годишња количина електронског отпада која настаје рударењем свих криптовалута је преко 50 kt.⁵¹ Само 17% електронског отпада се рециклира на глобалном нивоу, док остатак завршава најчешће на депонијама.⁵² То је нарочито проблематично због цурења тешких метала и других отровних супстанци из електронског отпада у земљу и водотокове.⁵³

2.3. Емисије CO₂ и друге штетне последице рударења криптовалута

Рударење криптовалута троши велике количине електричне енергије. Како и даље није могуће обезбедити стабилно снабдевање електричном енергијом из обновљивих извора, електро-мрежа у великој мери зависи од сагоревања фосилних горива ради добијања струје.

Због великих потреба за електричном енергијом за хлађење индустријских постројења за рударење криптовалута, научници сматрају да ће само широка примена биткоина произвести довољно угљен-диоксида да погигне глобалну температуру за 2°C у наредних 30 година.⁵⁴

Уколико пођемо од претпоставке да 4434 t CO₂ могу изазвати једну непотребну смрт, постоје наводи да је еколошки отисак биткоина до 2021. године довео до 19.000 будућих смрти.⁵⁵ Такође, Вендл и сарадници наводе да је до 2018. године сваки долар вредности биткоина изазвао штету по здравље људи, али и глобалну климу у вредности од 49 центи,⁵⁶ односно сваки ископани биткоин проузроковао је комбиновану климатску штету у вредности

⁴⁸ Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 205.

⁴⁹ De Vries, A., Stoll, C., *Bitcoin's Growing E-Waste Problem*, Resources, Conservation & Recycling, no. 175, 2021, стр. 6.

⁵⁰ Yuan, X., Su, X-W., Dumitrescu Peculea, A., *нав. чланак*, стр. 3.

⁵¹ Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 205.

⁵² Yuan, X., Su, X-W., Dumitrescu Peculea, A., *нав. чланак*, стр. 3. Ј. Бачевић и сарадници тврде да је разлог овако ниске стопе рециклирања електронског отпада то што су фабрике за рециклажу оваквог отпада углавном далеко од места где се он генерише. Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 205.

⁵³ Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 204.

⁵⁴ Yuan, X., Su, X-W., Dumitrescu Peculea, A., *нав. чланак*, стр. 2.

⁵⁵ Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., *нав. чланак*, стр. 5.

⁵⁶ Исто, стр. 3.

од 11314 долара.⁵⁷ Само рударење биткоина је, у периоду 2020-2021, емитовало 85,89 Mt CO₂ еквивалента, што одговара емисијама сагоревања 38 милиона тона угља или 25 милиона тона депонијског отпада.⁵⁸ Б. Џонс (B. Jones) и сарадници стога наводе да су у периоду од 2020. г. на овамо климатске штете од рударења биткоина дошле на ниво од 58% вредности ископаних биткоина. Тиме се рударење и трговина биткоинима сврстава у високо загађујуће делатности, више загађујуће од рударења племенитих метала.⁵⁹

Према проценама Међувладиног панела за климатске промене (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) из 2018. године, да би се глобални раст температуре ограничио на 1,5° C, емисије гасова стаклене баште морају се до 2030. г. смањити за 45% у односу на ниво из 2010. године, уз постизање нулте емисије до 2050. године.⁶⁰

С обзиром на то да је мало вероватно да човечанство престане са употребом криптовалута и блокчејн технологије генерално, научници предлажу да се интересовање усмери ка криптовалутама базираним на PoS механизму. Илустративан је пример то да једна трансакција етеријума производи 0,01 kg CO₂, што је количина 3900 пута мања него код трансакције биткоина, базираног на PoW механизму.⁶¹

3. Европски „Зелени договор“ и француски Закон о смањењу еколошког утицаја дигиталних технологија

Ради смањења негативног утицаја индустрије на животну средину и трансформисања Европске уније у климатски неутралну и одрживу економију до 2050. године, у Бриселу је 2019. године настао тзв. „Зелени договор“ (*The European Green Deal*). Кључна одредба „Зеленог договора“ предвиђа обавезу Европске комисије да направи план смањења емисија гасова стаклене баште до 2030. године за 55% у односу на ниво из 1990. године, на одговоран начин.⁶² Иако овај документ не помиње експлицитно криптовалуте, обавеза смањења емисија гасова стаклене баште се односи и на крипто-рударе. Остаје да се види како ће појединачне земље и сама Европска унија подробније регулисати ову област.

Значајан законодавни корак ка регулисању емисија гасова стаклене баште у дигиталном окружењу направила је Француска доношењем Закона о

⁵⁷ Jones, B, Goodkind, A., Berrens, R., *нав. чланак*, стр. 3.

⁵⁸ Chamanara, S., Arman Ghaffarizadeh, S., Madan, K., *нав. чланак*, стр. 3.

⁵⁹ Примера ради, штета од копања и прераде бакра је мања од 10% од вредности ископане руде, док је код злата она још мања и износи око 4%. Jones, B, Goodkind, A., Berrens, R., *нав. чланак*, стр. 5.

⁶⁰ Langea, S., Pohlc, J., Santarius, T., *Digitalization and Energy Consumption. Does ICT Reduce Energy Demand?*, Ecological Economics, no. 176/2020, стр. 2.

⁶¹ Bačević, J. et al., *нав. чланак*, стр. 204.

⁶² The European Green Deal, Brussels, 2019, стр. 4.

смањењу еколошког утицаја дигиталних технологија (*Loi du réduction de l'empreinte environnementale du numérique – Loi REEN*) из 2021. године. У погледу управљања електронским отпадом, овај закон предвиђа обавезу да француска држава најкасније до 1. јануара 2028. године дефинише циљеве рециклаже, поновне употребе и поправке електронске опреме.⁶³ Члан 13 овог закона садржи обавезу проактивног деловања произвођача електронске опреме у циљу повећања стопе рециклаже електронског отпада. Наиме, произвођачи електронских уређаја имају обавезу да једном годишње организују акцију сакупљања истрошених рачунара и другог електронског отпада. Како би доносиоци отпада били додатно мотивисани, овај закон предвиђа и новчану надокнаду за сваки предати уређај.⁶⁴ Наредни, 14. члан Закона о смањењу еколошког утицаја дигиталних технологија, наређује Влади да у року од шест месеци од ступања Закона на снагу поднесе Парламенту извештај о мерама које се могу предузети како би се унапредила поновна употреба, поправка и рециклажа електронске опреме, као и о изводљивости оваквих мера.⁶⁵ Расходована, а и даље функционална електронска опрема коју су претходно користили субјекти из јавног сектора одваја се за поновну употребу за друге намене.⁶⁶ Ради смањења количине електронског отпада, Закон такође предвиђа обавезу да дистрибутери електронске опреме бесплатно деле потрошачима обавештења о томе како да одржавају, сервисирају и чисте рачунаре, како би им продужили животни век.⁶⁷ Наведене одредбе су општег карактера и односе се на сву електронску опрему, па самим тим и на опрему за рударење криптовалута. Ипак, овај Закон у члану 27 садржи и одредбу која се посебно тиче криптовалута. Наиме, у року од годину дана од ступања на снагу Закона о смањењу еколошког утицаја дигиталних технологија, Влада ће доставити Парламенту извештај о развоју криптовалута у Француској, о изазовима, проблемима и о тренутним и будућим утицајима криптовалута на животну средину. Приликом писања извештаја, нарочит фокус треба да буде на еколошком утицају хардвера за рударење криптовалута, а циљ је омогућавање рентабилног рударења у иностранству, како би се у Француској смањила потрошња електричне енергије добијене из фосилних горива, као и емисије гасова стаклене баште.⁶⁸

⁶³ Loi no 2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France, Journal officiel de la république française, no. 266, 2021 (у даљем тексту: Loi REEN), чл. 12.

⁶⁴ Loi REEN, чл. 13.

⁶⁵ Loi REEN, чл. 14.

⁶⁶ Loi REEN, чл. 16.

⁶⁷ Loi REEN, чл. 22.

⁶⁸ Loi REEN, чл. 27.

4. Закључак

Када су се појавиле 2009. године, криптовалуте су обећавале алтернативу традиционалним валутама и банкарским системима. Рударење криптовалута било је релативно једноставно, а трговање уносно. Поред тога, трансакције криптовалутама биле су једноставне, брзе и анонимне. Након биткоина, прве криптовалуте, врло брзо је настало више хиљада више или мање успешних криптовалута.

Криптовалуте немају инхерентну вредност, већ вредност добијају тако што се њима тргује. Популарност криптовалута и њихова тржишна вредност расле су упоредо једна са другом, па се много нових рудара прикључивало трци. Умножавање конкуренције у редовима крипто-рудара је довело до усложњавања процеса рударења, што је условило својеврсну технолошку „трку у наоружању“. Док су у почетку за рударење криптовалута били довољни мало јачи кућни рачунари, у данашње време су неопходне специјализоване *ASIC* машине.

Овакво хардверско усложњавање процеса рударења доспело је под лупу јавности из више разлога. На првом месту, захтевна процедура рударења и сложене, јаке машине захтевају велике количине електричне енергије, од које се незанемарљив део добија спаљивањем фосилних горива. Ове количине могу се мерити са годишњом потрошњом развијене земље средње величине. Поред тога, знатна количина струје (али и воде) се користи за хлађење рударске опреме. Према неким проценама, количина воде потребне за хлађење рударске опреме може да задовољи годишње потребе за водом становништва земаља подсахарске Африке. Друго, с обзиром на сложеност процеса настанка нове јединице криптовалуте и чињеницу да је конкуренција велика, рударске машине морају даноноћно обављати компликоване математичке операције. То доводи до брзог замора опреме, па просечна *ASIC* машина може да траје једва преко годину дана. Да проблем буде већи, док рачунари који више нису адекватни за крипто-рударење могу да се користе у друге сврхе (образовање, разоноду и сл), *ASIC* машине су наменски прављене за рударење криптовалута и немају другу намену. Стога, када овакве машине одслуже своје, постају електронски отпад. Количина електронског отпада која настаје рударењем криптовалута из године у годину се повећава и почела је да представља предмет интересовања законодавстава појединих земаља, попут Француске. Мање од 20% електронског отпада од рударења криптовалута се рециклира. Последња у низу ставки које се криптовалутама стављају на терет је то што производе знатан карбонски отисак и штету за животну средину и здравље људи. Док „право“ рударење бакра и злата производи 10, односно 4 цента штете за сваки ископан долар поменутих руда, штета од рударења биткоина је скоро половина вредности једног биткоина. То сврстава криптовалуте у веома „прљаву“ индустрију, па се пре може рећи да су криптовалуте „дигитална нафта“, него „дигитално злато“.

С обзиром на велику уносност рударења и трговања криптовалутама, није вероватно да ће интересовање појединаца за ову област у скорије време нестати. Ипак, требало би озеленити блокчејн технологију и криптовалуте. То се на првом месту може учинити преласком са *Proof of Work* на *Proof of Stake* механизам рударења. Поред тога, развој енергетски ефикасније рударске опреме смањио би количину употребљене електричне енергије. На крају, земље у којима се обавља крипто-рударење треба да уложи напоре да се што већи проценат истошене електронске опреме рециклира, како не би завршавала на депонијама, одакле тешки метали доспевају у земљу и водотокове.

Ради остварења поменутих циљева, Европска Унија донела је тзв. „Зелени договор“, којим предвиђа да Европа до 2050. године постане карбонски неутрална. Поједине европске државе, попут Француске, чине конкретне законодавне кораке како би питање загађења изазваног криптовалутама подробније регулисала.

*Milica Marinković, L.L.M., Assistant
Faculty of Law, University of Kragujevac*

ENVIRONMENTAL CHALLENGES OF CRYPTOCURRENCY MINING: REGULATORY RESPONSES AND SUSTAINABILITY PERSPECTIVES

Summary

Cryptocurrency mining, particularly for Proof-of-Work (PoW) based currencies, poses significant environmental challenges due to excessive energy consumption, high levels of electronic waste, and substantial carbon footprint. This activity requires computing power with an energy demand comparable to that of entire nations, contributing to climate change through CO₂ emissions from fossil fuel-based energy sources. Additionally, the rapid obsolescence of mining equipment generates enormous amounts of e-waste, while air pollution from energy production harms human health.

To mitigate these issues, the European Union's Green Deal aims for climate neutrality, including regulation of energy-intensive industries like crypto mining. For instance, France has adopted the Loi REEN (Régulation Énergie Électronique et Numérique), which limits the energy impact of digital technologies, including

cryptocurrencies. While these regulations do not outright ban PoW mining, they establish frameworks for energy efficiency and sustainability, potentially leading to stricter measures in the future. This research highlights the need to transition toward more environmentally sustainable alternatives, such as Proof-of-Stake (PoS) blockchains, to reduce the ecological impact of cryptocurrencies.

Key words: *cryptocurrencies, blockchain, proof-of-work, proof-of-stake, sustainability.*

Литература

- Loi no 2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l’empreinte environnementale du numérique en France, Journal officiel de la république française, no. 266/2021
- The European Green Deal, Brussels, 2019.
- Alzoubi, Y. I., Mishra, A., *Green Blockchain – A Move Towards Sustainability*, Journal of Cleaner Production, no. 430/2023.
- Anandhabalaji, V., Babu, M., Brintha, R., *Energy Consumption by Cryptocurrency: A Bibliometric Analysis Revealing Research Trends and Insights*, Energy Nexus, no. 13/2024.
- Bačević, J. et al., *The Impact of Blockchain Technology on the Environment*, Facta Universitatis, vol. 37, no. 1/2024.
- Badea, L., Mungiu-Pupăzan, M. C., *The Economic and Environmental Impact of Bitcoin*, IEEE Access, vol. 9, 2021.
- Chamanara, S., Arman Ghaffarizadeh, S., Madan, K., *The Environmental Footprint of Bitcoin Mining Across the Globe: Call for Urgent Action*, Earth's Future, no. 11/2023.
- Çelik, A., Özırmak, M., *Understanding the Association Between Bitcoin Mining and Environmental Sustainability in Light of the Sustainable Development Goals Through the DARDL and KRLS Methods*, Sustainable Development, no. 1/2025.
- De Vries, A., *Bitcoin’s Energy Consumption Is Underestimated: A Market Dynamics Approach*, Energy Research & Social Science, no. 70/2020.
- De Vries, A., *Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin’s Sustainability Problem*, Joule, vol 3, issue 4, 2019.
- De Vries, A., Stoll, C., *Bitcoin’s Growing E-Waste Problem*, Resources, Conservation & Recycling, no. 175/2021.
- Hong, H., Zhang, C., *Bitcoin Trading, Economic Growth, Energy Use, and CO2 Emissions: An Advanced Panel Study of Emerging Market Economies*, International Review of Economics and Finance, no. 87/2023.
- Jones, B., Goodkind, A., Berrens, R., *Economic Estimation of Bitcoin Mining’s Climate Damages Demonstrates Closer Resemblance to Digital Crude Than Digital Gold*, Scientific Reports, no. 12/2022.
- Küfeoğlu, S., Özkuran, M., *Bitcoin Mining: A Global Review of Energy And Power Demand*, Energy Research & Social Science, no. 58/2019.

- Laimon, M., Almadadha, R., Goh, S., *Energy Consumption of Crypto Mining: Consequences and Sustainable Solutions Using Systems Thinking and System Dynamics Analysis*, Sustainability, no. 17/2025.
- Langea, S., Pohl, J., Santarius, T., *Digitalization and Energy Consumption. Does ICT Reduce Energy Demand?*, Ecological Economics, no. 176/2020.
- Malfuzi, A., *Economic Viability of Bitcoin Mining Using a Renewable-Based SOFC Power System to Supply the Electrical Power Demand*, Energy, no. 203/2020.
- O'Dwyer, K., Malone, D., *Bitcoin Mining and its Energy Footprint*, ISSC 2014 / CICT 2014, 2014.
- Okijesu Bada, A. et al., *Towards a Green Blockchain: A Review of Consensus Mechanisms and their Energy Consumption*, 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Pafos, Cyprus, 2021.
- Sapra, N., Shaikh, I., *Impact of Bitcoin mining and crypto market determinants on Bitcoin-based energy consumption*, Managerial Finance, vol 49, no. 11/2023.
- Stoll, C., Klaaßen, L., Gallersdörfer, U., *The Carbon Footprint of Bitcoin*, Joule, vol. 3, issue 7, 2019.
- Truby, J. et al., *Blockchain, Climate Damage, And Death: Policy Interventions to Reduce the Carbon Emissions, Mortality, And Net-Zero Implications of Non-Fungible Tokens and Bitcoin*, Energy Research & Social Science, no. 88/2022.
- Wendl, M., Hanh Doan, M., Sassen, R., *The environmental impact of cryptocurrencies using proof of work and proof of stake consensus algorithms: A systematic review*, Journal of Environmental Management, no. 326/2023.
- Yuan, X., Su, C-W., Dumitrescu Peculea, A., *Dynamic Linkage of the Bitcoin Market and Energy Consumption: An Analysis Across Time*, Energy Strategy Reviews, no. 44/2022.
- Bitcoin Futures, Jun-2025 (BTC=F), <https://finance.yahoo.com/quote/BTC%3DF/history/> датум приступа 23. јун 2025.
- Bitcoin network power demand, <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci> датум приступа 24. јун 2025.
- Bitcoin versus Gold, <https://digiconomist.net/bitcoin-versus-gold> датум приступа 25. јун 2025.
- Electricity consumption in Sweden from 2008 to 2023, <https://www.statista.com/statistics/1027078/electricity-consumption-in-sweden/#:~:text=Electricity%20consumption%20in%20Sweden%20amounted,less%20than%20150%20terawatt%2Dhours.&text=Log%20in%200or%20register%20to%20access%20precise%20data>. датум приступа 29. јун 2025.
- How Does Bitcoin Mining Work? A Beginner's Guide, <https://www.investopedia.com/tech/how-does-bitcoin-mining-work/> датум приступа 22. јун 2025.
- How Iran's Bitcoin Strategy Backfires, <https://bitcoinblog.de/2025/05/21/how-irans-bitcoin-strategy-backfires/> датум приступа 25. јун 2025.
- How Many Cryptocurrencies Are There in June 2025?, <https://tangem.com/en/blog/post/how-many-cryptocurrencies-exist/> датум приступа 23. јун 2025.
- Tesla will no longer accept Bitcoin over climate concerns, says Musk, <https://www.bbc.com/news/business-57096305> датум приступа 25. јун 2025.
- Top 20 strongest currencies in the world in 2025, <https://www.currencytransfer.com/blog/expert-analysis/top-20-strongest-currencies-in-the-world> датум приступа 23. јун 2025.