

**PREGLED PRIMENA BLOKČEJN TEHNOLOGIJE  
U ENERGETSKOM SEKTORU  
AN OVERVIEW OF THE APPLICATIONS OF BLOCKCHAIN  
TECHNOLOGY IN THE ENERGY SECTOR**

Marija Borisov, Goran Sladić

**REZIME:** Razvoj pametne elektroenergetske mreže podrazumeva uključivanje obnovljivih izvora energije (OIE), sistema za skladištenje, pametnih brojila, električnih vozila, potrošača koji ujedno mogu biti i proizvođači. Blokčejn tehnologija može doprineti implementaciji takvog složenog sistema sa različitim korisnicima. Raznovrsna blokčejn rešenja mogu da se iskoriste za podršku distribuiranim energetske sistemima, povezivanje pametnih uređaja, kontrolu punjenja električnih vozila, praćenje proizvodnje ugljenika, izdavanje zelenih sertifikata i upravljanje mrežom. Pametni ugovori omogućavaju izvršavanje u blokčejnu veoma bitnih operacija energetske sistema, kao što su P2P (Peer-2-Peer) trgovanje, decentralizovano tržište i kontrola. U radu su predstavljena inventivna rešenja za energetske sisteme zasnovane na blokčejnu. Napredne tehnologije kao što su IoT, veštačka inteligencija, 5G, big data, računarstvo u oblaku počinju da se integrišu sa blokčejnom, što bi moglo da izazove transformaciju energetske sektora u mnogim aspektima.

**KLJUČNE REČI:** blokčejn, pametna mreža, pametni ugovor, energetske sektor

**ABSTRACT:** The development of the smart grid means the inclusion of Renewable Energy Sources (RES), storage systems, smart-meters, electrical vehicles, prosumers. Blockchain technology can contribute to the implementation of such a complex system with different users. Various blockchain solutions can be used to support distributed energy systems, connect smart devices, control the charging of electric vehicles, monitor carbon production, issue green certificates and manage the network. Smart contracts allow many important energy system operations to be performed in the blockchain, such as P2P (Peer-2-Peer) trading, decentralised market, and control. This work presents inventive solutions for blockchain-based systems. Emerging technologies such as IoT, AI, 5G, big data, cloud computing are started to be integrated with blockchain, which could induce a transformation of the energy sector in many aspects.

**KEY WORDS:** blockchain, smart grid, smart contract, energy sector

## 1 UVOD

Uspom upotrebe obnovljivih izvora energije je omogućio pojavu potrošača koji su aktivni učesnici u trgovanju energijom i koji mogu prodavati energiju. Zajedno sa drugim tehnološkim naprecima, zastupljenost potrošača koji su i proizvođači omogućava veoma značajnu rekonstrukciju energetske sistema. Električne mreže počinju da se transformišu u pametne mreže i pod uticajem Interneta stvari, veštačke inteligencije, 5G, big data. Blokčejn tehnologije mogu imati značajan pozitivan uticaj na mnoga polja u energetske sistemima, naročito u interakciji sa svim pomenutim informacionim i komunikacionim tehnologijama (IKT).

Današnja pametna brojila i senzori mogu slati podatke skoro u realnom vremenu, svakih 5 sekundi (2-15 sekundi), što stvara ogromnu količinu podataka koje treba obraditi, skladištiti, analizirati. Neophodno je da edge uređaji učestvuju u ovim procesima. Pored pomenutih podataka, vremenskim podacima, sertifikatima, ugovorima, finansijskim dokumentima treba pristupati i rukovati na odgovarajući način. Pri radu sa obnovljivim izvorima energije (OIE) treba obratiti posebnu pažnju na njihova svojstva, jer njihovu proizvodnju energije nije moguće u većoj meri kontrolisati. Tačnije, problem sa OIE je taj što je teže predvideti njihovu proizvodnju energije u odnosu na tradicionalne izvore energije i to što oni zavise od vremenskih uslova (Merlinda Andonia et al., 2019). Korišćenje veštačke inteligencije može biti od pomoći u rešavanju problema sa prognozom tj. predviđanjem proizvodnje.

Za buduće sisteme skladištenja energije i izgradnju zelene energetske ekonomije uopšte, najvažniji je princip "Tri D" definisan kao de-karbonizacija, decentralizacija i digitalizacija (Merlinda Andonia et al., 2019).

Tehnologija distribuirane glavne knjige (eng. distributed ledger technology) na određen način predstavlja distribuiranu bazu podataka koja je otporna na neovlašćeno menjanje podataka. U ovim sistemima nema centralizovanog administratora. Štaviše, u tradicionalnom distribuiranom sistemu za skladištenje, podaci su razdvojeni na manje delove radi čuvanja i svaki čvor nema sve podatke pohranjene u sistemu, kao što je to slučaj sa tehnologijom distribuirane glavne knjige (Qiang Wang et al., 2020).

Blokčejn ili lanac blokova je tehnologija distribuirane glavne knjige u kojoj su validne transakcije grupisane u blokove, a zatim su ti blokovi povezani u lanac korišćenjem kriptografskih heševa. U ovakvom tipu povezane liste, samo je operacija dodavanja omogućena, nema izmena već ulančanih blokova niti brisanja. Svaka promena u već registrovanim blokovima vodi do nekonzistentnosti jer će heš tog bloka biti promenjen, što će uticati na sve naredne blokove (Ahmed S. Musleh et al., 2019). Verovatnoća da napadač može izvršiti promenu neke transakcije u bloku opada sa dužinom povezanih blokova posle posmatranog bloka. Odlike heš funkcije koje je čine pogodnom za registrovanje transakcija na siguran i način bez neovlašćenog menjanja su svojstvo bez kolizije, svojstvo prikrivanja podataka i svojstvo povezivanja podataka (primenom heš funkcije na originalne podatke može se doka-

zati poreklo i vlasništvo). Svaki blok se sastoji od zaglavlja i dela sa podacima. Glavni koncepti blokčejn tehnologije uključuju i Genesis blok koji je osnova svakog lanca i svaki blok će biti povezan sa njim. Pod pojmom rudarenje (eng. mining) se podrazumeva proces kreiranja bloka transakcija koji će biti dodat lancu blokova. Termin rudarenje je preuzet iz Bitcoin blokčejna gde se koristi konsenzus PoW.

Konsenzus je proces održavanja dnevnika transakcija sinhronizovanog u mreži. Istaknuti konsenzus algoritmi su PoW, PoS, PoAu, PBFT (Qiang Wang at al., 2020). Za stanje blokčejna se kaže da je validno samo kada je postignut konsenzus, što osigurava da nema dvostrukog trošenja.

Ključni korak u procesu uključivanja bloka u lanac je postizanje konsenzusa. Distribuirani konsenzus algoritmi pružaju sredstvo postizanja saglasnosti u blokčejnu. Odabir konsenzus algoritma je od velike važnosti jer on utiče na skalabilnost, brzinu transakcija, potrošnju električne energije, postizanje finalnosti transakcija (Merlinda Andonia at al., 2019). PoW je konsenzus algoritam koji troši dosta energije da bi se validirale transakcije, jer se rešava kriptografska zagonetka koja zahteva intenzivno izračunavanje. PoS koristi nasumični proces selekcije, gde šansa da će određeni čvor biti izabran kao validator raste sa bogatstvom čvora. PBFT se zasniva na izazovu da se poruka među generalima pošalje preko neprijateljske teritorije. Takođe, broj malicioznih čvorova može biti do jedne trećine od broja svih čvorova da bi proces bio uspešan. PoAu zahteva glasanje članova koji imaju posebne permisije. Ovaj konsenzus se može videti i kao modifikovan PoS i predstavlja centralizovanije rešenje.

Treba napomenuti da se u blokčejn tehnologijama vrlo često koristi posebna vrsta Merkle stabla radi kreiranja specijalnog heša svih transakcija u bloku. Konkretno, u Ethereumu se koriste tri Merkle Patricia stabla<sup>1</sup>.

Asimetrična kriptografija je jedna od osnova blokčejna, gde su generisani privatni i javni ključ. Javni ključ se koristi za enkripciju i validiranje potpisa, i predstavlja adresu računa. Privatni ključ se koristi za dekripciju i potpise, za pristup i autorizaciju operacija nad računima.

Pored velikih mogućnosti koje dolaze sa upotrebom blokčejna, određeni potencijalni izazovi mogu biti primećeni. Na primer, privatnost podataka uskladištenih u blokčejnu je veliki problem, kao i anonimnost korisnika i upravljanje podacima. Na problem skalabilnosti i kašnjenja takođe treba obratiti pažnju. Ova pitanja mogu se rešiti upotrebom odgovarajućih tehnika kao što su pametni ugovori, anonimizacija, dodavanje nivoa za permisije itd. (Lu Yang, 2019).

Blokčejn je primenljiv u mnogim oblastima, kao što su zdravstveni sistem, finansije, osiguranje, lanac snabdevanja, poljoprivredna industrija, energetika, Internet stvari (Shuai Wang at al., 2019). U energetskom sektoru, blokčejn je obično tesno u vezi sa drugim tehnologijama koje omogućavaju povezivanje sa centrima za skladištenje podataka i eksternim platformama (Merlinda Andonia at al., 2019). Podaci se če-

sto čuvaju van lanca (eng. off-chain), osiguravajući privatnost. Blokčejn ima za cilj otvaranje novih poslovnih mogućnosti za sve zainteresovane strane. Preporučljivo je da se anonimizacija podataka izvrši radi zaštite informacija. Blokčejn ima višestruke slučajeve upotrebe u energetskom sektoru, uključujući P2P trgovanje, decentralizovano tržište, merenje i kontrolu. Blokčejn omogućava bezbedan, otporan na neovlašćene promene, transparentan sistem sa potpunim praćenjem porekla podataka i odgovornosti. Upotrebom pametnih ugovora, na primer u Ethereum i Hyperleger Fabric blokčejnu, moguće je pružiti pouzdane načine deljenja podataka kao i ponovnu upotrebu podataka (Shuai Wang at al., 2019). Balans između transparentnosti i poverljivosti je jedno od glavnih pitanja na koje treba dati odgovor.

Postoji veliki broj blokčejn tehnologija koje se međusobno razlikuju. Ethereum je Turing kompletan, što čini veliku razliku u odnosu na Bitcoin (Qiang Wang at al., 2020). Takođe, Bitcoin je glavna knjiga posebne namene, dok je Ethereum opšte namene jer se ne koristi samo za transakcije kriptovaluta.

Crowdsourcing kao način pokretanja posla ili sticanja dobara je upotrebljavan u mnogim industrijama i organizacijama radi postizanja ciljeva upotrebom grupe aktera (eng. crowd) spremnih da učestvuju u kreiranju novih vrednosti. Crowdsourcing je tehnika koja je zastupljena i u blokčejn sistemima (Merlinda Andonia at al., 2019). Učesnici koji su deo crowdsourcing projekta mogu biti izvor finansiranja ili oblik intelektualnog kapitala.

U (Merlinda Andonia at al., 2019) je definisan javni blokčejn kao blokčejn na koji se svaki Internet korisnik može konektovati. U privatnom blokčejnu, samo se autorizovani korisnici mogu pridružiti mreži. Blokčejn bez potrebne dozvole (eng. permissionless blockchain) je onaj u kome bilo koji član mreže može biti validator tj. učestvovati u postizanju konsenzusa. S druge strane, u blokčejnu sa potrebnom dozvolom (eng. permissioned blockchain), samo određeni čvorovi mogu biti validatori. Može se dodati da postoji i konzorcijum blokčejn, platforma koja obično uključuje više organizacija koje imaju međusobnu komunikaciju.

Četvrta industrijska revolucija je predvođena napretkom u veštačkoj inteligenciji, big data oblasti, blokčejnu, računarstvu u oblaku, fintechu (finansijskim tehnologijama).<sup>2</sup> Kvantni blokčejn je obećavajuća nova tehnologija koja može postati dominantna u narednom periodu usled razvoja kvantnog računarstva. S druge strane, kvantne kompjuterske napade treba smatrati stvarnom pretnjom (Bernd Teufel at al., 2019).

## 2 PRIMENA BLOKČEJN TEHNOLOGIJA U ENERGETSKOM SEKTORU

### 2.1 Pametni ugovori

Termin pametni ugovor je prvi put upotrebio Nick Szabo 1996. godine. Pametni ugovor postaje jedan od glavnih koncepta u blokčejn tehnologiji. Pametan ugovor je kreiran da

<sup>1</sup> Kamil Jezek, *Ethereum Data Structures* (2020), on-line: <https://arxiv.org/pdf/2108.05513.pdf>.

<sup>2</sup> Danson Kimani at al., *Blockchain, business and the fourth industrial revolution: Whence, whither, wherefore and how?* (2020).

automatizuje mnoge operacije u decentralizovanim sistemima pomoću omogućavanja, verifikovanja i sprovođenja uslova od kojih se sastoji. Oni se mogu posmatrati kao ugovori ili sporazumi između dvoje ili više ljudi. U (Shuai Wang at al., 2019) se navodi slučaj "The DAO" u junu 2016. godine kada je 50 miliona dolara u Ether-u bilo preneto na zlonameran nalog, što predstavlja primer kakve posledice može imati loše napisan pametan ugovor. Pametni ugovori se mogu koristiti u mnogim oblastima, kao što su finansije (hartije od vrednosti, osiguranja, trgovina), menadžment (upravljanje digitalnom imovinom i pravima, organizacioni menadžment, E-uprava), Internet stvari, energija. Primena pametnih ugovora u energetskim sistemima zasnovanim na blokčeju je značajna i u osnovi mnogih operacija u pametnoj mreži.

Pametni ugovor može imati sopstvene kriptovalute ili tokene, koji se mogu transferovati kada su ispunjeni uslovi. Oba načina trgovanja, uz pomoć kriptovaluta ili tokena, su zastupljena i u energetskom blokčeju. Zbog ograničenja Bitcoin skript jezika, Ethereum je prvi blokčejn koji podržava složene pametne ugovore. Pokreću se na Ethereum virtuelnoj mašini (EVM). Pametni ugovori se mogu razvijati u programskim jezicima kao što su Solidity ili Serpent. Pametni ugovori imaju vrednost i stanje. Oracles (pouzdana izvori podataka) koji garantuju da su podaci originalni i da nisu neovlašćeno menjani u skladištu van lanca se često koriste za davanje podataka o stanjima i događajima u stvarnom svetu (Shuai Wang at al., 2019). Upotreba oracles sa pametnim ugovorima je u razvoju. Hyperledger Fabric je blokčejn sa potrebnim permisijama čiji se radni tok transakcija sastoji od predloga, pakovanja i validacije. Hyperledger nema ugrađenu kriptovalutu, već ima chaincode, program koji implementira dati interfejs. Životni ciklus pametnog ugovora se sastoji od pregovora, razvoja, raspoređivanja (eng. deployment), održavanja, i učenja i samouništenja (Shuai Wang at al., 2019).

## **2.2 Značajni koncepti blokčejn tehnologija za primenu na polju energetike**

Pregled tehnologija distribuirane glavne knjige u energetskom sektoru je dat u (Merlinda Andonia at al., 2019). Ovaj članak daje prikaz fundamentalnih konceptata blokčejn tehnologija, onda opisuje nekoliko slučajeva upotrebe, među kojima se izdvaja Brooklyn MicroGrid, kao i veći broj blokčejn projekata – PROSUME, LO3 Energy, Power Ledger, Energy Web Foundation (EWF), M-PAYG, Bankymoon itd. Mnogi od prikazanih projekata su još u fazi razvoja, ali mogu biti odličan alat u menjanju postojećih energetskih mreža i načina trgovanja, uprkos važećim regulatornim ograničenjima.

Operacije energetskih kompanija koje su pod uticajem razvoja blokčejn tehnologija uključuju fakturisanje, prodaju i marketing, trgovinu i razvoj tržišta, automatizaciju, primene pametnih mreža i transfer podataka, upravljanje mrežom, bezbednost i menadžment identiteta, deljenje resursa, transparentnost. Mogući slučajevi upotrebe uključuju veleprodajna energetska tržišta, poravnanje disbalansa, digitalizaciju Interneta stvari, P2P trgovinu i decentralizovanu energiju (Merlinda Andonia at al., 2019).

Energetski Internet je koncept koji uključuje podršku prodora OIE, distribuiranih energetskih sistema, oprema za skladištenje energije, električnih vozila, uz pomoć Internet tehnologije (Qiang Wang at al., 2020). Povezivanje i integracija Interneta sa pametnom mrežom naziva se i Pametna Mreža 2.0 ili Internet energije. Direktna komunikacija između različitih strana energetskog sistema je omogućena korišćenjem blokčejna. Upotrebom pametnih ugovora se može omogućiti kontrola energetskih mreža, posebno balansiranje ponude i potražnje. U radu (Qiang Wang at al., 2020) je takođe dat detaljan opis primena blokčejna koje uključuju finansijske usluge, medicinu i zdravstvo, autorska prava na intelektualnu svojinu, obrazovanje, Internet stvari, ekonomiju, komunikacije, društveni menadžment, dobrotvorne svrhe i javnu dobit, kulturu i zabavu. Istraživanja napretka blokčejn tehnologija u oblasti energetike su u porastu od 2017. godine. Deset zemalja je objavilo 75% od ukupnog broja publikacija vezanih za energetski sektor tokom 2014-2020. Kina ima najviše publikacija, slede SAD, Velika Britanija, Italija, Indija. Štaviše, kineske institucije su odigrale značajnu ulogu u istraživanju energetskog blokčejna. U (Qiang Wang at al., 2020) se dalje navodi da zemlje u razvoju mogu postepeno da preuzmu vođstvo u ovim istraživanjima.

Slučajevi upotrebe blokčejna u energetskom sektoru pored distribuiranih energetskih sistema (naročito P2P transakcija), energetskog trgovanja, povezivanja i kontrole pametnih uređaja, uključuju i pametno punjenje električnih vozila, praćenje proizvodnje ugljenika (podrška klimatskim akcijama), sertifikate o izvorima proizvodnje energije. Iako postoji ekspanzija razvoja energetskog blokčejna u zemljama u razvoju, razvijene zemlje i dalje vode zbog relativno kompletne energetske infrastrukture. Istraživanje tvrdi da blokčejn može postati tehnologija koja omogućava OIE i energetsku održivost, čineći ga delom zelenih tehnologija (Qiang Wang at al., 2020).

Pregled najsavremenijih blokčejn tehnologija, studije o blokčeju i njegovim osnovama je dat u (Lu Yang, 2019). Razmatra se integracija blokčejna sa drugim novim tehnologijama kao što su Internet stvari, računarstvo u oblaku, 5G. Navodi se da je blokčejn i dalje nova tehnologija u razvoju. Prva faza, Blokčejn 1.0, uključuje kriptovalute, pre svega Bitcoin. Druga faza, Blokčejn 2.0 uključuje pametne ugovore koji su ugrađeni u lanac blokova. Projekat Hyperledger je izdvojen kao popularan predstavnik blokčejn frejmworka sa pametnim ugovorima i ovlašćenim autoritetom, i čest primer konzorcijum (hibridnog) blokčejna. Sledeća generacija blokčejna, Blokčejn 3.0, će uključivati programabilno društvo i blokčejn stvari i na taj način povezati ljude i uređaje na globalnu mrežu. Decentralizovane aplikacije (DApp), decentralizovane autonomne organizacije (DAO), decentralizovane autonomne korporacije su već u razvoju i postaju sve popularnije i širem krugu korisnika na polju energetike.

Blokčejn se sastoji od sledećih slojeva: podataka, mreže, konsenzusa, ugovora, servisa i aplikacije (Lu Yang, 2019). Dodatni sloj bi mogao biti mehanizam podsticaja. U ovom radu nije napravljena razlika između javnog i blokčejna bez potrebnih permisija, kao i između privatnog i blokčejna sa potrebnim permisijama, što je u kontradikciji sa klasifikacijom

u prethodno navedenim radovima. Karakteristike blokčejna su decentralizacija, uspostavljanje poverenja, transparentnost, mogućnost praćenja, nezaboravljivost, anonimnost, kredibilitet. Ove karakteristike omogućuju primenu blokčejna u energetske sektoru. Pametni ugovori uključuju uslove izvršenja i logiku izvršenja, što omogućava obradu podataka, upravljanje i obezbeđivanje transakcija i pametnih uređaja i u pametnoj mreži. Ethereum, predložen od strane Vitalik Buterina 2013. godine, i Hyperledger, koji je pokrenula Linux Fondacija, su primeri popularnih projekata otvorenog koda. Tendermint je blokčejn tehnologija koja ima Vizantijsku Toleranciju Greške, a nastao je iz projekata kao što su Bitcoin i Ethereum.

Internet stvari zasnovan na blokčejnu može proizvesti sigurnije i dinamičnije okruženje u odnosu na centralizovanu arhitekturu. Blokčejn-kao-Servis (eng. Blockchain-as-a-Service, BaaS) je predložen u (Lu Yang, 2019). Zajedno sa infrastrukturom u oblaku, Blokčejn-kao-Servis može doprineti uštedi energije, sprečavanju napada, uskraćivanja usluga i doneti sve prednosti blokčejna Internetu stvari, kao i Energetskom Internetu. Posebna pažnja treba biti posvećena bezbednosnim pitanjima.

### *2.3 Pregled primena blokčejn tehnologija u energetske sektoru*

Potencijal upotrebe blokčejna na polju pametne energije je veliki. Pametna mreža je električna mreža sa OIE i skladištima energije koja uključuje mrežu računara, kontrolera, automata, pametnih brojlara, pametnih uređaja koji su međusobno povezani standardnim komunikacionim protokolima i povezani na Internet. Različite analogne i digitalne tehnologije se koriste radi merenja proizvodnje i njene dinamičke kontrole, distribucije električne energije, prikupljanja informacija o proizvodnji i potrošnji električne energije. U radu (Naveed Ul Hassan at al., 2019) je razmatrana integracija blokčejna sa pametnom mrežom, prepoznati su javni, konzorcijum i privatni blokčejni, kao i čuvanje podataka van lanca, menadžment konsenzus protokola, menadžment identiteta i automatizovani menadžment. Noviji projekti i istraživanja pokazuju da je blokčejn sa pametnim ugovorima primenljiv za P2P energetske trgovanje, verifikaciju zelene energije, i generalno, može omogućiti digitalizaciju sistema pametne energije. Nekoliko reprezentativnih projekata postoji na polju pametne infrastrukture, OIE i električnih vozila (EV), energetske i trgovanja ugljenikom, energetske menadžmenta. Na osnovu istraživačkih radova, sajber sloj namenjen blokčejn aplikacijama može rešiti bezbednosna pitanja u pametnoj mreži. Ethereum, HyperLedger, Tendermint, i EWF su blokčejn platforme koje se najčešće koriste u pametnim energetske sistemima.

Analiza koja je predstavljena u (Naveed Ul Hassan at al., 2019) omogućuje pronalaženje odgovarajućeg blokčejn rešenja za primenu u pametnoj energiji. Zahtevi pametnog energetske sistema su decentralizacija, mehanizam za rešavanje konflikta, posrednici, nepoverljivost, čuvanje evidencije zaštićene od neovlašćenog pristupa, ispravljanje i brisanje podataka, rezervna kopija podataka, zaštita privatnosti, autentifikacija, autorizacija, integritet podataka, mogućnost revizije, protokol,

kašnjenje, automatizacija procesa, cena. Na osnovu analiza ovih svojstava, konzorcijum i privatni blokčejni se javljaju kao odgovarajuće rešenje za pametne energetske sisteme. Konsenzus zasnovan na autoritetu je dobro rešenje za pametnu mrežu. Drugi pozitivni rezultati uključuju upravljanje suverenim identitetom i postojanje determinističkih pametnih ugovora pravilno kreiranih, skladištenje podataka van lanca koji su zaštićeni od neovlašćenog pristupa, zajedno sa skladištenjem neophodnih podataka u samom lancu blokova, što predstavlja poželjno hibridno rešenje.

Na osnovu istraživanja (Ahmed S. Musleh at al., 2019), može se tvrditi da će blokčejn tehnologije nastaviti da se razvijaju, kao i da će broj implementacija biti značajno uvećan u narednih nekoliko godina. Bitcoin i Ethereum su identifikovani kao lideri među kriptovalutama. Predložena je upotreba blokčejna kao sajber-fizičkog nivoa u pametnim mrežama. Kao što je već zaključeno, heš identifikuje svaki blok i koristi se za vođenje glavne knjige otporne na neovlašćene izmene. Nastanak potrošača koji su i proizvođači i nestalna priroda OIE su izazovi za sadašnje distribuirane sisteme. Gubici u prenosu mogu se smanjiti podsticanjem lokalne proizvodnje i potrošnje energije. U (Ahmed S. Musleh at al., 2019) se navodi da je decentralizovani sistem rešenje za pametnu mrežu. Veruje se da je distribuirano računarstvo iz 1990-ih osnova za blokčejn tehnologije. Blokčejn može pomoći u kreiranju tržišta u realnom vremenu, smanjenju troškova transakcija i više privatnosti za aktere.

Primene blokčejna u pametnoj mreži su u generisanju električne energije, prenosu i distribuciji energije, potrošnji energije, kako je već navedeno. Blokčejn se naročito koristi u trgovanju energijom (P2P trgovanju energije, kreiranju modela za optimalan protok snage, pregovaranju proizvođača o ceni), kod električnih vozila (prilagodljiva EV šema, izbor najbolje lokacije i cena za korisnike EV), operacije mikro mreže (kontrola zasnovana na potražnji, optimizovane operacije, otpor mreže prema sajber napadima). Blokčejn daje veću sajber-fizičku sigurnost, otpornost elektroenergetskog sistema i privatnost učesnika. S druge strane rudari, čvorovi koji validiraju blokove žele veće nagrade, manje glavne knjige su nesigurnije, transakcije su sporije nego kada je treća strana uključena, troškovi i brzina mreže su upitni, deluje rasipnički jer svaki čvor skladišti celo lanac blokova tj. glavnu knjigu. Pozitivna rešenja uočenih problema bi vodila ka širem prihvatanju blokčejn tehnologija u energetske sektoru.

Mnogobrojni projekti Evropske komisije i organizacija širom sveta koji istražuju različite mogućnosti i potencijalne uloge blokčejn tehnologija u energetske sektoru imaju za cilj da pospeše i omoguće ispravnu i efikasnu integraciju blokčejna i pametnih mreža.

## **3 BLOKČEJN INTEGRACIJA SA PAMETNIM MREŽAMA**

### *3.1 Pristupi implementaciji blokčejna u oblasti pametne energije*

Kretanje ka modularnom blokčejnu u kome se mogu menjati opcije ugrađene tehnologije na zahtev se smatra sredstvom za bolju integraciju blokčejna u mnoge oblasti pametne

energije. Rad (Muhammad Baqer Mollah at al., 2020) ima za cilj da pruži detaljan prikaz o korišćenju blokčejna u pametnoj mreži. Blokčejn za naprednu infrastrukturu merača ima za cilj razvoj decentralizovanog sistema koji čuva privatnost i poverenje. Pametni ugovori se koriste za sigurnost i otpornost mreže, kao i za decentralizovani mehanizam kontrole i komunikacije, i za sprovođenje pravila, ugovora i raspoređivanja energije.

Primećeno je da u javnom blokčejnu postoje određeni problemi u vezi sa privatnošću, kao i problemi skalabilnosti u nekim slučajevima. Jedna od korišćenih arhitektura je blokčejn sa potrebnim permisijama o kome se govori u (Muhammad Baqer Mollah at al., 2020). Pametni ugovori imaju primenu i u decentralizovanoj trgovini energijom i na tržištu. Opisano je nekoliko slučajeva, kao što su sistem plaćanja zasnovan na kreditu, decentralizovan sistem zasnovan na tokenima, tehnike za osiguranje efikasnosti, prilagodljivost, a pre svega privatnost, crowdsourced frejmwork energetskog sistema s algoritmima. Štaviše, blokčejn se koristi za praćenje, merenje i kontrolu, kako na električnim vozilima i jedinicama za punjenje, tako i u mikro mrežama. Predstavljeno je nekoliko slučajeva upotrebe, kao što su projekti koji se fokusiraju na regulaciju napona, rad koji predstavlja decentralizovani pristup energetskim transakcijama, i rad koji uvodi mehanizam za trgovinu električnom energijom za potrošače koji su i proizvođači. Izazovi i pravci razvoja u pametnoj mreži su bezbednost i privatnost, podsticajni i kazneni mehanizmi, standardizacija.

Integrirani model transakcija energetskog servisa zasnovan na energetskom blokčejnu je razmatran u radu (Qinzhe Liu at al., 2020). Implementiran je režim sa više lanaca, koji poboljšava sigurnost, usluge u realnom vremenu, tačnost i transparentnost sistema, kao i efikasnost pregovaračkog mehanizma. Multi-lanac (eng. multi-chain) podrazumeva višestruke privatne lance povezane sa konzorcijum blokčejnom. Gospodar-rob model privatnog lanca je predstavljen. Postoje glavni (master) lanac na kraju za izvor, glavni lanac na mrežnom kraju, glavni lanac na prodajnom kraju, master lanac na kraju za potražnju (eng. load-end), i oni zajedno povezani kreiraju konzorcijum blokčejn. Svaki od glavnih (master) lanaca sastoji se od nekoliko lanaca robova. Takođe je predložen poboljšani algoritam za PoW konsenzus. Čvorovi obe strane moraju da potvrde informacije na lancu. Ovi procesi validacije su zapravo dokaz radnog opterećenja čvorova. Prioritet transakcija je izabran kao podsticaj za odgovarajuće čvorove. Konsenzus nadzorni čvor ima posebnu usmeravajuću ulogu. Pametni ugovori se koriste za realizaciju transfera vrednosti i skladištenja podataka, tako da nema potrebe za intervencijom treće strane.

Put evolucije integriranih energetskih usluga ima tri faze: tradicionalne energetske usluge, distribuirane energetske usluge i integrirane energetske usluge. Mogu se identifikovati brojni problemi sa integriranim energetskim servisima kojima se treba baviti. Mreža integriranog energetskog servisa obuhvata energiju, elektroenergetske mreže, elektroprivredu, korisnike itd. Rad integriranog energetskog servisa se sastoji od ekspanzije tržišta i kontrole rizika (tok vrednosti), integrirane energije i integriranih servisa (tok energije), pametne energije i "Internet+" tehnologije (informacioni tok) (Qinzhe Liu at al., 2020).

Kreirana je integrisana mreža energetskog servisa koja koristi sistem sa više privatnih i konzorcijum lanaca. Poboljšani algoritam PoW je opisan, gde se koriste podsticaji za obavljen posao i gde je uključen čvor za nadgledanje konsenzusa, kao i pametni ugovori. Kroz primere analiza, može se zaključiti da rešenje predloženo u razmatranom radu rešava problem poverenja, poboljšava sigurnost u sistemu, i čini transakcije otpornim na neovlašćeno menjanje.

Decentralizovani kooperativni frejmwork potražnje i ponude koji na dnevnom nivou kontroliše razmenu energije u zajednici pametnih zgrada je opisan u radu (Olivier Van Cutsem at al., 2020). OIE se razmatraju u predloženom modelu. Decentralizovana proizvodnja OIE je nestabilna i nekontrolisana, što negativno utiče na stabilnost električne mreže. Dati algoritam kreira energetski profil zajednice za dan unapred na osnovu fleksibilnosti korisnika i prati prognozu za naredni dan. Potrošači poseduju pametna brojlja i sistem za upravljanje zgradom. Agregatori su zamenjeni distribuiranim okruženjem blokčejna, gde se konsenzus koristi za donošenje odluka. Agregirani profil potrošnje energije je rezultat decentralizovanog algoritma za planiranje koji se emituje putem pametnog ugovora, što omogućava zajedničko planiranje. Pametni ugovori se koriste i za monitoring i naplatu. Praćenje prognoze se vrši rešavanjem decentralizovanog modela prediktivne kontrole da bi se redukovala greška između profila zajednice i planirane prognoze. Profil zajednice je značajno izravnjen dodavanjem kvadratne komponente linearnom davanju cena električne energije.

Pokazano je da švajcarski modeli zgrada zajedno sa predloženim algoritmom mogu osnažiti lokalnu potrošnju gotovo sve proizvedene energije iz obnovljivih izvora. Eksperimentalni rezultati su otkrili da zajednica od 100 pametnih zgrada može funkcionisati sa predloženim frejmworkom koristeći Ethereum blokčejn. Pametni ugovori moraju biti robusniji da bi sprečili čvorove koji ne daju odgovor da ugroze korektnost cele operacije planiranja. Presentovano rešenje bazirano na blokčejnu je smanjilo pojavu špiceva u mreži koristeći specijalnu tarifnu strukturu i omogućavajući kooperativan rad svih učesnika, što je rezultovalo u de-karbonizaciji električne mreže.

Kreiranje matematičkog modela zasnovanog na teoriji igara koji se koristi da se minimizira cena potrošnje energije za svakog korisnika i za zajednicu u celini je predstavljeno u (Muhammad Afzal at al., 2020). Kao rešenje za ne-kooperativne igre, Nešov ekvilibrijum je predložen. Potrošači učestvuju u predloženoj igri optimizirajući svoju dnevnu potrošnju. Matematički model je dizajniran za pravljenje rasporeda za pametne uređaje uzimajući u obzir cenu električne energije, tačnije, koristeći šeme za dinamičke cene. Pametni IoT uređaji mogu biti promenljivi (rad po rasporedu i kontrolisani od strane menadžment sistema) i nepromenljivi. Potrošači koji su i proizvođači su prisuti u mikro mreži, i kontroler zajednice i planer lokalne potrošnje energije u kući su korišćeni. Učesnici imaju opciju da budu uključeni u mikro mrežu zajednice ili u opcionu komunalnu mrežu. U mikro mreži je potrošnja lokalno proizvedene energije promovisana. Kao i u prethodnim slučajevima, i u ovom pristupu se koristi blokčejn da se omogući privatnost učesnika, praćenje porekla, distribuirane

energetske transakcije, upotreba pametnih ugovora za autonomno praćenje pametnih uređaja, naplate i razmene informacija. Implementiran je Ethereum blokčejn sa pametnim ugovorima napisanim u Solidity programskom jeziku (Muhammad Afzal et al., 2020).

### 3.2 Integracija veštačke inteligencije i blokčejn tehnologija

Postoji veliki broj preglednih radova gde su razmatrane tehnologije veštačke inteligencije korišćene zajedno sa blokčejnom i njihove primene na menadžment energije. Mogu se prepoznati benefiti i loše strane, kao i otvorena pitanja spajanja blokčejn tehnologija sa veštačkom inteligencijom. Veštačka inteligencija može analizirati podatke prikupljene iz pametne mreže i upravljati potražnjom energije i snabdevanjem (Aparna Kumari et al., 2020). Ovaj pristup se može koristiti za kategorizaciju životnih stilova potrošača kreirajući profil opterećenja (direktno klasterisanje i indirektno klasterisanje), dati procenu potrošnje energije, predvideti promenu dinamičke cene, pružiti optimizaciju energije. Štaviše, veštačka inteligencija može omogućiti predviđanje potražnje (SVM, auto-regresija, ANN, rekurentna neuronska mreža, model dugotrajne kratkotrajne memorije), upravljanje resursima, otkrivanje pretnji (nadgledano i ne-nadgledano), otkrivanje anomalija (ANN, K-means pristup klasterizaciji) i druge korisne alate. S druge strane, kao što je poznato, odgovarajuća blokčejn tehnologija može u određenoj meri rešiti pitanja privatnosti i bezbednosti P2P trgovine energijom, omogućiti očuvanje donekle prihvatljivog nivoa privatnosti i smanjenje mogućnosti nekoliko vrsta sajber napada (ali ne svih). Takođe, blokčejn može biti uspešno korišćen za distribuirano upravljanje energijom, dok spojen sa veštačkom inteligencijom može pružiti pouzdanija rešenja, prepoznati napade na sistem, lažne transakcije, nepoštene čvorove.

Internet stvari postaje novi metod povezivanja ljudi i sredstava, ali postoje veliki problemi kao što su big data analitika, bezbednost, centralizacija. Veštačka inteligencija se smatra alatom za analizu big data u skoro realnom vremenu. S druge strane, blokčejn predstavlja odgovor na probleme koji se javljaju u big data analizi (tačnost, kašnjenje, bezbednost, privatnost, centralizacija). U radu (Sushil Kumar Singh et al., 2020) se predlaže arhitektura Inteligentnog Interneta stvari integrisanog sa blokčejnom i veštačkom inteligencijom. Kao tehnologije veštačke inteligencije predlažu se mašinsko učenje, duboko učenje, pojačano učenje. Spajanje blokčejna i veštačke inteligencije je prisutno u četiri nivoa: nivo oblaka, fog nivo, edge nivo, nivo uređaja. Inteligencija uređaja (fizički sloj) daje ogromnu količinu podataka, edge inteligencija (komunikacioni i kontrolni sloj) analizira i obrađuje podatke sa IoT uređaja, fog inteligencija (servis i sloj upravljanja) se koristi za prikupljanje podataka, analizu i proračune, dok inteligencija u oblaku (sloj aplikacija) pruža big data analizu. Integracija blokčejna i veštačke inteligencije ima važne karakteristike kao što su analitička inteligencija (duboko učenje, učenje od mašine do mašine, programabilno učenje), digitalni identitet (jedinствена adresa identifikacije), distribuirano skladištenje u oblaku (sa predikcijom distribuiranih podataka pomoću veštačke inteligencije), decentralizacija i distribucija, autentifika-

cija i verifikacija, struktura lanca (Sushil Kumar Singh et al., 2020). Razmatrane tehnike nalaze značajnu primenu u pametnim mrežama baziranim na blokčejnu. Podaci sa senzora, OIE, skladišta podataka mogu se analizirati, obrađivati, prikupljati na opisani način, čineći rešenja zasnovana na blokčejnu efikasnijim i delotvornim.

### 3.3 Napredne tehnike zaštite podataka u blokčejnu

Pitanja zaštite identiteta (povezanosti korisnikovog realnog identiteta i blokčejn adrese) i zaštite privatnosti podataka u transakcijama su osnova za utvrđivanje nivoa zaštite privatnosti u blokčejnu. Cilj da se pokažu pozitivne karakteristike upotrebe konzorcijum blokčejna i pametnih ugovora u sprečavanju problema privatnosti u trgovini energijom u zajednici, dok se osigurava funkcionalnost, efikasnost i kompletna tačnost, je postavljen u (Keke Gai et al., 2019). Uzeto je u obzir da se sačuvani podaci mogu analizirati data mining tehnikama da bi se pokrenuli povezani napadi da se pronađu informacije kao što su fizička lokacija, upotreba energije, itd. U osnovi napada povezivanja je pokušaj ponovne identifikacije pojedinaca čiji su podaci anonimizirani, tako što ih povezuje sa pozadinskim informacijama. Ponuđen je model da se spreče osnovnih napada povezivanja, kao i zaštita od napada baziranih na teoriji skupova, semantičkoj osnovi i napadi na povezivanje identiteta uređaja. Predloženi model trgovanja čuva privatnost i omogućava da blokčejn reši probleme koji se javljaju kada se koriste različite postojeće metode za pružanje privatnosti. Jedna od glavnih tehnika koje se koriste je mehanizam mapiranja računara.

Primećeno je da mnogi data mining algoritmi mogu biti upotrebljeni za izvlačenje informacija iz blokčejn sistema i organizovanje napada povezivanjem tih informacija u smislenu celinu. U radu (Keke Gai et al., 2019) se koristi i novi algoritam za stvaranje šuma da bi se sakrili trendovi distribucije trgovine. Takođe, pruža mehanizam mapiranja naloga koji kreira lažne račune i vrši podelu računara. Proizvođači i potrošači koriste pametne ugovore za slanje zahteva kontrolnom centru. Banka tokena konfigurira račune i obrađuje transakcije. Tokeni se koriste za trgovanje energijom. Kada proizvođač zahteva, energija se prenosi na određenu banku baterija koja takođe ima čvor u konzorcijum blokčejnu. Tokeni se dodeljuju nalogima i kreiraju se blokovi. Proizvođač može koristiti postojeće naloge ili kreirati novi nalog. Ovo se odlučuje postavljanjem dinamičkog načina određivanja granice (da li će biti kreiran novi račun) pomoću funkcija distribucije. Takođe, lažni nalozi se kreiraju da oslabe karakteristike distribucije realnih računara. Potrošač koji pošalje zahtev u banku tokena prvo treba da bude verifikovan. Token banka onda pronalazi odgovarajuću bateriju. Prenos energije je završen kada se postigne konsenzus u blokčejnu i kada je kreiran novi blok. Na ovaj način je kreirana anonimna baza podataka za čuvanje zapisa transakcija na blokčejnu. Očuvanje privatnosti i efikasnosti ispitani su u eksperimentima izvedenim na preko 200 susednih korisnika u radu (Keke Gai et al., 2019) i rezultati pokazuju da se sve brste napada mogu sprečiti. Za implementaciju je upotrebljen Hyperledger Fabric u Docker okruženju. Dati pristup se može koristiti i sa Internetom vozila.

Treba napomenuti da postoje dokazi sa nula znanja (eng. zero-knowledge proofs) koji mogu kreirati anonimne transakcije bez upotrebe treće strane (Vincenzo Croce at al., 2020). Koriste se da omoguće validaciju transakcija bez otkrivanja njihovog sadržaja. Postoji Verifikator koji potvrđuje da Dokazivač poseduje tajni podatak, i u ovom procesu verifikacije tajni podatak niti u jednom trenutku nije otkriven Verifikatoru. I ovakvi pristupi imaju svoje probleme, ali mogu biti sredstvo ka postizanju cilja funkcionalne anonimizacije podataka u blokčejn tehnologijama.

Druge ključne tehnike zaštite podataka u energetskom blokčejnu uključuju prsten potpisa, homomorfnu enkripciju, pouzdano okruženje za izvršavanje

### 3.4 Otvorena pitanja upotrebe blokčejna na polju energetike

Primenljivost blokčejna i očekivanja u oblasti energetike, kao i rizici i mogućnosti su razmatrani u (Bernd Teufel at al., 2019). Značajne promene u odnosu društva prema energiji i energetskim sistemima dogodile su se pod uticajem klimatskih promena, nuklearnih nesreća kao što je ona u Fukušimi, prepoznavanja energetskih problema, kao i dostupnosti senzora, skladišta energije, razvijene IKT i inovativni OIE. Važnu ulogu u promenama u energetskom sektoru imaju politička rešenja poput liberalizacije i deregulacije, kao i digitalizacija, razvoj pametnih mreža i distribuiranih energetskih resursa (DER). Efikasni sistemi za skladištenje mogu dati značajan doprinos da ovo pitanje bude rešeno. Ali prelazak sa konvencionalne električne mreže na pametnu mrežu je takođe pod političkim i društveno-ekonomskim uticajem, ne samo pod uticajem tehnološkog razvoja. Neke od primena blokčejna su kontrola i balansiranje mreže, trgovina energijom, sertifikacija i dokaz porekla, kontrola potrošnje, automatizacija, transparentnost, upravljanje uređajima.

Dosadašnje industrijske strukture, postojeće kompanije, vladajuće tehnologije i infrastruktura predstavljaju prepreke širem uvođenju blokčejna u energetski sektor (Bernd Teufel at al., 2019). Decentralizacija energetske oblasti u razvijenim zemljama znači održivost, transparentnost, ekološki prihvatljivo rešenje, dok je u zemljama u razvoju to sredstvo dobijanja energije u regionima van mreže. Bez obzira na uzbuđenje koje vlada oko razvoja blokčejna, on sam ne može da reši postojeće probleme, infrastrukturu, skladištenje, OIE, pametna brojlila koji su potrebni. Neke od prednosti javnog blokčejna su nepromenljivost, visoka pouzdanost, integritet podataka, identitet, nepostojanje posrednika, lak pristup energetskim tržištima, analiza, automatizacija, ubrzanje istraživanja o decentralizovanom energetskom tržištu. Nedostaci su troškovi struje - režijski troškovi zbog rudarenja, pitanja odgovornosti i prava aktera, zaštita podataka, 51% napad, distribuirani napad uskraćivanja usluge, problem skalabilnosti, nedostatak standarda, upravljanje ključevima.

Značajne prepreke treba prevazići u budućnosti da bi se u potpunosti ostvarila implementacija blokčejna u pametnoj mreži. Može se primetiti da se neki od navedenih problema mogu rešiti upotrebom privatnih blokčejna sa potrebnim permisijama.

Međutim, ovaj tip blokčejna uvodi smanjenje u nivou sigurnosti, nepromenljivosti, i otpornosti na cenzuru (Mary Jean Burer at al., 2019). S druge strane, upotreba pametnih ugovora može voditi ka decentralizaciji, demokratizaciji, i održivim energetskim sistemima. Kao što je već navedeno, blokčejn tehnologija je prikazana sa potencijalom za remećenje postojećih energetskih i poslovnih sistema. Ipak, njen uticaj je još uvek nedokazan i može voditi do neradikalnih promena u energetskom sektoru zbog nedostatka propisa, nepouzdanosti mreže, svojstava postojeće infrastrukture. Takođe, više novoosnovanih malih preduzeća nego etabliranih kompanija je uključilo blokčejn u svoje poslovne modele, što može rezultirati odsustvom podrške za blokčejn tehnologije u glavnim energetskim sektorima.

Kvantno računarstvo je takođe uzeto u obzir u (Bernd Teufel at al., 2019). Razvoj kvantnog računarstva pratiće razvoj kvantnog blokčejna. Ali problem će biti status starih podataka, koji neće biti zaštićeni, iako se, na primer, u zdravstvu i finansijama može uzeti u obzir da će današnji podaci biti privatni i za nekoliko desetina godina. Kako svaki čvor čuva celu knjigu, protivnici mogu dobiti pristup svim podacima. Data mining može analizirati podatke i dobiti privatne informacije. Dokazi bez znanja podataka obećavaju rešenje za očuvanje privatnosti. S druge strane, veštačka inteligencija je u poziciji da prevodi obrasce iz spoljnog sveta u pametne ugovore. Duboko učenje može da reši probleme privatnosti. Upotreba blokčejna će dovesti do nezavisnosti potrošača od energetskih kompanija i davanja veće kontrole potrošačima koji izvor energije izabrati. Privatni i blokčejni sa potrebnim dozvolama sa višom centralizacijom su razmatrati. Sajber-bezbednost i nejasne pravne okolnosti predstavljaju rizik za distribuirana tržišta energije. I profesionalci i akademici bi trebalo da budu uključeni u buduća istraživanja kako bi se razvila rešenja koja će biti primenljiva i korisna u stvarnom svetu, pokazujući najbolje karakteristike blokčejna u praksi.

## 4 OBLASTI PRIMENE BLOKČEJN PLATOFORMI U ENERGETICI

Mnoga istraživanja i projekti obrađuju temu blokčejn platformi u energetskom sektoru. Neke od najčešćih blokčejn tehnologija u energetskom polju su Ethereum, Hyperledger Fabric, Tendermin, Energy Web Foundation, BigchainDB, Hyperledger Sawtooth, MultiChain, SolarCoin i mnogobrojne vlasničke platforme. Ethereum koristi PoW konsenzus, dok najavljeni Ethereum 2 koristi PoS konsenzus, bolje protokole i postaje sigurniji i skalabilniji<sup>3</sup>. To će se značajno odraziti na primene u energetici jer je Ethereum jedna od najzastupljenijih platformi, videti Tabela 1.

Na osnovu odabranih istraživanja, naročito iz (Merlinda Andonia at al., 2019) i (Naveed Ul Hassan at al., 2019), kreirana je Tabela 1. Dati radovi analiziraju veliku količinu projekata i slučajeva upotrebe, predstavljajući relevantne izvore. U

<sup>3</sup> *Upgrading Ethereum to radical new heights*, on-line: <https://ethereum.org/en/eth2/>. Takozvana "Faza 0" projekta Eth2 je krenula 1. decembra 2021. i kreiran je "Beacon Chain" sa PoS konsenzusom. Planirano je spajanje sa glavnom Ethereum mrežom.

Tabela 1 navedena su najznačajnija polja u energetici u kojima se blokčejn primenjuje, najčešći blokčejni u tom polju, i konsenzus algoritmi koji su implementirani u najvećem broju slučajeva. Međutim, blokčejni kao što su Etehreum, Hyperledger i Tendermint nisu napravljeni specijalno za energetski sektor, i pretpostavlja se da će inovativna ciljana rešenja za elektroenergetski sistem zasnovan na blokčejn tehnologijama biti bolja i efikasnija. Takođe, iz česte upotrebe PoW se vidi da dosadašnja rešenja nisu u skladu sa zelenim tehnologijama, čemu se izričito teži. Stalni razvoj i tehnološke promene u oblasti energetskog blokčejna čine da dati podaci predstavljaju samo trenutno stanje na polju blokčejna u energetici.

Polje u energets-kom sektoru	Najčešće blokčejn tehnologije	Konsenzus algoritam
Decentralizovana trgovina energijom	Ethereum, Tendermint, Proprietary	PoW, PBFT
Merenje, naplata i sigurnost	Ethereum, Tendermint, Hyperledger Fabric, Proprietary, Energy Web Foundation	PoW, PBFT, PoAu
Zeleni sertifikati i trgovina ugljenikom	Ethereum	PoW
IoT, pametni uređaji, menadžment sredstava	Ethereum, Energy Web Foundation	PoW
Menadžment mreže	Ethereum, Energy Web Foundation, Hyperledger Fabric	PoW, PBFT
Električna e-mobilnost	Ethereum	PoW
Kriptovalute, tokeni i investicije	Ethereum, Tendermint, Proprietary	PoW, Delegated PoS

Tabela 1 Blokčejn tehnologije u energetskom sektoru

## 5 ZAKLJUČAK

Distribuirani sistem baziran na blokčejnu ima sposobnost integrisanja sa drugim tehnologijama radi izgradnje rešenja za različite oblasti industrije, uključujući energetski sektor. Blokčejn tehnologije nude transparentnost, transakcije bez poricanja, zaštitu od neovlašćenog pristupa. Posebno, određene blokčejn platforme na polju energetike mogu pomoći u izgradnji distribuiranih tržišta za trgovinu energijom uz smanjenje operativnih troškova i podizanja efikasnosti mreže.

Puni potencijal blokčejna je daleko od realizovanog, mada se može prepoznati nekoliko nedostataka, poput skalabilnosti, brzine, sigurnosti, ograničenja u skladištenju podataka, usklađenosti sa postojećim zakonodavstvom. Zapravo, sektor blokčejn tehnologija je i dalje prilično neregulisano područje. Neki izazovi, poput niske propusnosti, mogu se rešiti upotrebom blokčejna sa potrebnim permisijama i efikasnijim algoritmima konsenzusa, između ostalih navedenih tehnika. Pametni ugovori, koji još uvek nisu jednaki konkretnom zakonskom ugovoru, imaju veliki potencijal u prevazilaženju određenih izazova i postizanju veće efikasnosti jer su daleko funkcionalniji od postojećih ugovora, ali ih treba pažljivo razvijati jer greške i ranjivosti koda mogu predstavljati veliku pretnju.

Ovaj rad pruža pravovremen i širok pregled istraživanja i rezultate u oblastima energetskog blokčejna. Pažljiva analiza je potrebna da bi se implementirao odgovarajući blokčejn i pridružene tehnologije za rešenje određenog problema u energetici, jer ne odgovaraju svi blokčejn sistemi svakom slučaju upotrebe. Rast broja blokčejn primena je očekivan, dok potpuno široko prihvatanje zavisi od mnogih faktora, ne samo tehnoloških već i društveno-ekonomskih takođe.

Budući rad treba da obuhvati studije za unapređenje postojećih rešenja i pronalaženje odgovora na prepoznata otvorena pitanja postavljena u ovom radu. Rešenja koja nudi Blokčejn 3.0 treba dalje opisati i analizirati, naročito poboljšanja na polju funkcionalnosti, skalabilnosti i interoperabilnosti.

## 6 LITERATURA

- [1] Merlinda Andonia, Valentin Robu, David Flynn, Simone Abram, Dale Geach, David Jenkins, Peter McCallum, Andrew Peacock, Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 100, Februar 2019., str. 143-174, (Online), Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184> (Pristupljeno 12.12.2021.)
- [2] Shuai Wang, Liwei Ouyang, Yong Yuan, Xiaochun Ni, Xuan Han, Fei-Yue Wang, Blockchain-Enabled Smart Contracts: Architecture, Applications, and Future Trends, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems (Volume: 49, Issue: 11, Nov. 2019), str. 2266 - 2277, DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2895123>.
- [3] Qiang Wang, Min Su, Integrating blockchain technology into the energy sector - from theory of blockchain to research and application of energy blockchain, Computer Science Review, Volume 37, Avgust 2020, 37, 100275, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.covsrev.2020.100275>.
- [4] Lu Yang, The blockchain: State-of-the-art and research challenges, Journal of Industrial Information Integration, Volume 15, Septembar 2019, str. 80-90, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.04.002>.
- [5] Naveed Ul Hassan, Chau Yuen, Dusit Niyato, Blockchain Technologies for Smart Energy Systems -Fundamentals, Challenges, and Solutions, IEEE Industrial Electronics Magazine (Volume: 13, Issue: 4, Dec. 2019), str. 106 - 118, 19278110, DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2940335>.
- [6] Ahmed S. Musleh, Gang Yao, S. M. Muyeen, Blockchain Applications in Smart Grid-Review and Frameworks, IEEE Access (Volume: 7), str. 86746 - 86757, 04 Jun 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920682>.
- [7] Muhammad Baqer Mollah, Jun Zhao, Dusit Niyato, Kwok-Yan Lam, Xin Zhang, Amer M.Y.M. Ghias, Leong Hai Koh, and Lei Yang, Blockchain for Future Smart Grid: A Comprehensive Survey, IEEE Internet of Things Journal, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2993601>.
- [8] Qinzhe Liu, Bingbing Tong, Dongliang Li, Yan Lu, Yuhong Fu, Lei Chen, Kuangyi Zhao, An Integrated Energy Service Transaction Model Based on Energy Blockchain, International Journal of Heat and Technology 38(2):293-300, Jun 2020, DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.380203>.
- [9] Olivier Van Cutsem, David Ho Dac, Pol Boudou, Maher Kayal, Cooperative energy management of a community of smart-buildings: A Blockchain approach, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 117, Maj 2020, 117, 105643, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105643>.



- [10] Muhammad Afzal, Qi Huang, Waqas Amin, Khalid Umer, Asif Raza, Muhammad Naem, Blockchain Enabled Distributed Demand Side Management in Community Energy System With Smart Homes, IEEE Access (Volume: 8), str. 37428 - 37439, Date of Publication: 20 Februar 2020, Electronic ISSN: 2169-3536, INSPEC Accession Number: 19418843, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975233>.
- [11] Aparna Kumari, Rajesh Gupta, Sudeep Tanwar, Neeraj Kumar, Blockchain and AI Amalgamation for Energy Cloud Management: Challenges, Solutions, and Future Directions, Journal of Parallel and Distributed Computing, Volume 143, Septembar 2020, str. 148-166, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2020.05.004>.
- [12] Sushil Kumar Singh, Shailendra Rathore, Jong Hyuk Park, Blockchain-Enabled Intelligent IoT Architecture with Artificial Intelligence, Future Generation Computer Systems, Volume 110, Septembar 2020, str. 721-743, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.002>.
- [13] Keke Gai, Yulu Wu, Liehuang Zhu, Meikang Qiu, Meng Shen, Privacy-preserving Energy Trading Using Consortium Blockchain in Smart Grid, IEEE Transactions on Industrial Informatics (Volume: 15, Issue: 6, Jun 2019), str. 3548 - 3558, DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2893433>.
- [14] Vincenzo Croce, Giuseppe Raveduto, Tudor Cioara, Claudia Pop, Ioan Salomie, Dream EU's Horizon 2020 project – Deliverable 5.4, Maj 2020, (Online), Dostupno na: [https://edream-h2020.eu/wp-content/uploads/2020/07/D5.4-V2\\_compressed.pdf](https://edream-h2020.eu/wp-content/uploads/2020/07/D5.4-V2_compressed.pdf) (Pristupljeno 12.12.2021.)
- [15] Bernd Teufel, Anton Sentic, Mathias Barmet, Blockchain energy: Blockchain in future energy systems, Journal of Electronic Science and Technology, Volume 17, Issue 4, Decembar 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100011>.
- [16] Mary Jean Burer, Matthieu de Lapparent, Vincenzo Pallotta, Massimiliano Capezzali, Mauro Carpita, Use cases for Blockchain in the Energy Industry Opportunities of emerging business models and related risks, Computers & Industrial Engineering, Volume 137, Novembar 2019, 106002, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106002>.



Goran Sladić je redovni profesor na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu. Objavio je preko 80 naučnih radova i učestvovao u više od 20 projekata. Njegova istraživačka interesovanja uključuju sajber bezbednost, blockchain, softverski inženjering, i distribuirane softverske arhitekture.



Marija Borisov je student završne godine doktorskih akademskih studija na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. Završila je osnovne i master akademske studije na Matematičkom fakultetu u Beogradu, smer Računarstvo i informatika. Radi već duže vreme u firmi Eneering Software Lab d.o.o. u Beogradu kao Senior Software Developer/Team Lead, na projektima Evropske komisije. Njene oblasti istraživanja uključuju blokčejn, savremene metode razvoja softvera, napredne arhitekture softvera.

