

## Pametno rudarstvo

VIDOSAV D. MAJSTOROVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

VLADIMIR R. SIMEUNOVIĆ, Institut „Mihajilo Pupin“, Beograd

DRAGAN P. STOŠIĆ, Institut „Mihajilo Pupin“, Beograd

SONJA T. DIMITRIJEVIĆ, Institut „Mihajilo Pupin“, Beograd

RADIVOJE M. MITROVIĆ, Univerzitet u Beogradu

Mašinski fakultet, Beograd

ŽARKO Z. MIŠKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

Pregledni rad

UDC: 622:330.314.1

DOI: 10.5937/tehnika2403279M

*Industrija 4.0 je postala globalna strateška inicijativa naučno-tehnološkog razvoja, koju su lansirale najrazvijenije industrijske zemlje u svetu, i danas otišle najdalje u njenoj primeni. U suštini, to je novi model primene informaciono-komunikacionih tehnologija, zasnovan pre svega na njihovoj integraciji sa objektom primene (na primer u rudarstvu - proizvodnja (BTO), transport, održavanje, itd). Razvoj i primena elemenata Industrije 4.0 u ovoj oblasti ide ka uspostavljanju modela pametnog rudarstva (SM), čiji elementi će biti izloženi u ovom radu. Kao ilustracija primene ovog modela u našim uslovima, a za površinski kop „Drmno“, u okviru ovog rada će biti prikazan model planiranja i upravljanja održavanjem ERP (planiranje proizvodno-tehnoloških resursa) i MES (upravljanje radnim nalogom) modelu za Industriju 4.0, koja koristi model private cloud računarstva.*

**Cljučne reči:** Industrija 4.0, Pametno rudarstvo, Održavanje, ERP, MES

### 1. UVOD

Pametni rudnici (rudnici sa primenjenim elementima Industrije 4.0) sve više postaju stvarnost, a ne izuzetak, jer digitalizacija postaje opšti trend poslovanja u celoj privredi. Sve veća digitalizacija rudnika, znači prelazak na digitalni način poslovanja u rudarskim kompanijama, koje poboljšava produktivnost opreme, mašina i samog procesa rada, povećava bezbednost i efikasnost rudarskih operacija, a time smanjuje troškove poslovanja. U pametnom rudarstvu, imperativ je da postoji protok informacija u realnom vremenu između menadžmenta, poslovnih funkcija i sistema površinskog kopa (rudnika). Razlike koje postoje između ovih nivoa, u kašnjenju informacija otežavaju menadžerima donošenje optimalnih odluka. Rudarskoj kompaniji je potrebna trenutna vidljivost proizvodnje, kvalitet rude, tačno vremena ciklusa rada, statusa maši-

ne (BTO – bager – transporter - odlagač) i drugih važnih operativnih parametara, da bi se postigli optimalni rezultati.

Primena elemenata Industrije 4.0 u rudniku, integracija sistema poslovnih aktivnosti na kopu i na nivou preduzeća, omogućava brzu i tačnu komunikaciju u praćenju i nadgledanju tekućih operacija, a radi njihove optimizacije pomoću BDA (big data analysis – analiza velikih podataka) i AI (artificial intelligence – veštačka inteligencija)/ML (machine learning – mašinsko učenje) modela.

Ovaj rad daje okvire tehnologije Industrije 4.0, kao modela za integraciju poslovnih i proizvodnih sistema i procesa na površinskom kopu i u rudniku, koji dovodi do realizacije pametnog rudarstva u praksi. Cilj ovog rada je da definiše okvire i sadržaj modela pametnog rudarstva i pokaže neke elemente Industrije 4.0, koji se danas primenjuju na površinskom kopu „Drmno“, a kao rezultat zajedničkih istraživanja i razvoja Mašinskog fakulteta i Instituta „Mihajilo Pupin“.

### 2. PREGLED LITERATURE

Termin „pametno“ rudarstvo (SM – smart mining) je relativno nov i povezan je sa terminom „pametna“

---

Adresa autora: Vidosav Majstorović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograda, Kraljice Marije 16

e-mail: vidosav.majstorovic@sbb.rs

Rad primljen: 10.03.2024.

Rad prihvaćen: 20.03.2024.

proizvodnja u metalnoj industriji (SM – smart manufacturing), čiju osnovu za oba koncepta čini model Industrije 4.0 sa njenih 48 elemenata [1, 28]. Odmah da napomenemo, da sve elemente (48) Industrije 4.0 ne treba primeniti u rudniku, a naše analize pokazuju da je za okvir modela Industrije 4.0 u rudniku dovoljno 18. U tekstu koji sledi oni će biti eksplicitno i navedeni. Polazeći od ovih činjenica i analogija sa proizvodnjom [1] u daljem tekstu se daju glavne karakteristike pametnog rudarstva.

### 2.1. Aspekti pametnog rudarstva

On line praćenje i nadgledanje proizvodnje u rudarstvu je najvažniji element poslovanja, pa je izuzetno važno da menadžment i stručni tim za praćenje rada i upravljanje rudnikom ili površinskim kopom može u bilo kom trenutku da zaustavi ili promeni bilo koju poslovno-proizvodnu aktivnost [2]. Kretanje radnih mašina i njihov rad, kretanje kamiona, traka i druge opreme se prati u realnom vremenu, koristeći IoT (Internet of Things – internet stvari) i Wi-Fi komunikaciju. Tako na primer, informacija o potrebi točenja goriva za radne mašine, se šalje u realnom vremenu, pre nego što se ove mašine planiraju za transport ili proizvodnju a MES (Mining Execution System – sistem za upravljanje radnim nalogom u rudarstvu) to registruje. Održavanje svake radne mašine može se planirati i prilagoditi na osnovu prirode i veličine oštećenja (održavanje po stanju ili prediktivno održavanje) i potrebe kapaciteta ERP (Enterprise resources planning – planiranje proizvodno-tehnoloških resursa) [3].

U konceptu online praćenja, proizvodnja na kopu se prati pomoći IoT, preko KPI (Key performance indicators – indikator ključnih performansi poslovanja) kao što su [4, 5]: ukupna otkrivena površina, iskopane tone otkrivke, iskopane tone uglja, klasa uglja, indeks potrošnje goriva, transportovane količine otkrivke (rude), ukupna količina potrošenog goriva i maziva, prosečna količina potrošenog goriva i/ili maziva po radnoj mašini. Izveštaji prikazuju rudarske aktivnosti na kopu u realnom vremenu, omogućavajući menadžmentu da ima jasan uvid u produktivnost rada na kopu, kao i odnos planirano/izvršeno (ERP modul), po različitim osnovama i za različite nivoe.

Stanje proizvodnje na površinskom kopu se prati radnim nalogom (MES – WIP (work in progress – radni nalog u toku) i njegovim statusom u realnom vremenu u odnosu na dnevne ciljeve proizvodnje [6]. Praćenjem WIP-a omogućava se poslovođama da intervenišu, ako dnevni ciljevi proizvodnje nisu ispunjeni. Ova funkcija izveštaja takođe oslobađa operatere na mašini da beleže svoja dnevna dostignuća na komadima papira a time se sprečava netačno beleženje ostvarenih rezultata (MES sistem). Status proizvodnje u realnom vremenu

omogućava donosiocima odluka, na primer da isključe mašinu ako nastanu problemi u vezi sa planiranim rezultatima proizvodnje ili održavanja zbog iznenadnog otkaza (MES/ERP), a poslovođi da pokrene novu „rezervnu“ mašinu.

Online izveštaji o stanju zaliha goriva pokazuju količinu goriva koja je dostupna za potrošnju. Takođe je moguće uporediti koje vozilo/radna mašina ili grupa vozila/radnih mašina, troši više goriva od ostalih, pa time, primenom BDA modela možemo istražiti zašto je to tako. Zato primena međufunkcionalnih KPI-a omogućava merenje i prikaz potrošnje goriva po prevezenoj toni, pređenim kilometrima, u određenom vremenu itd.

Online praćenje OEE (Overall Equipment Effectiveness – ukupna efektivnost (planirano/izvršeno) opreme u rudniku ili na površinskom kopu) [7] i KPI-ja [8], pokazuje nam u kakvom je operativnom stanju oprema, da li je ili nije dovoljno iskorišćena, što omogućava menadžmentu da preuzme potrebne korake. Tako na primer, praćenjem MTBF (mean time between failure - prosečno vreme između otkaza), i MTTR (mean time to repair - prosečno potrebno vreme za popravku), omogućava rudniku, koristeći BDA model da izbegne neočekivane i skupe zastoje kroz proaktivno održavanje prema stanju. Praćenjem troškova korektivnog, preventivnog i proaktivnog održavanja, u svakom trenutku imamo utrošak aktivnosti održavanja. Korišćenjem BDA modela imamo mogućnost optimizacije troškova po različitim osnovama. Praćenjem online (IoT) aktivnog rada opreme na kopu, imamo informaciju koliko je ona bila dostupna za rad tokom planiranog vremena proizvodnje. Ovo pomaže menadžmentu da utvrdi koja oprema obično nije dostupna i istraži osnovne razloge za to [9, 10, 11].

Praćenjem vremena ciklusa posla koji se izvodi na mašini je važno za upravljanje učinkom proizvodnje. Zato možemo, vreme potrebno za proizvodnju određene (planirane) količine uglja odrediti sabiranjem raspoloživih kapaciteta radnih mašina sa njihovim planiranim radnim vremenom. Produktivnost se određuje odnosom stvarnih i planiranih količina uglja. Poznavanje vremena ciklusa rada mašine i njenih performansi nije dovoljno ako nisu priložene informacije o kvalitetu iskopanog uglja. Dakle, informacije o kvalitetu postaju dostupne u rudniku tako što se pored količine kvalitetnog iskopanog uglja sa ukupnom količinom proizvedenog uglja. Posedovanje kvalitetnih informacija u realnom vremenu pomaže menadžmentu rudniku da upravlja realnim procesima proizvodnje, koristeći IoT i BDA modela.

Izveštaj o efikasnosti operativnog mašinskog parka prikazuje informacije o radnim mašinama (one se u modelu Industrije 4.0 posmatraju kao CPS (cyber-

physical system – sajber fizički sistem) sistem, kao što su prosečna nosivost (kamiona)/iskopavanje (bagera), prosečne tone koje se transportuju/iskopavaju na sat i vreme koje je potrebno kamionu da putuje od utovara rude do odlagališta iste (vreme ciklusa). Ove informacije su važne za planiranje proizvodnje i praćenje ostvarivanja plana proizvodnje uglja.

Upravljanje rezervnim delovima u rudniku je izuzetno važno. Primena modela Industrije 4.0 (ERP/MES), omogućava rudniku da vidi važne informacije o svim rezervnim delovima, uključujući na primer pneumatike (na kamionima) i valjke (na transportnim trakama), koji se najviše troše, kao što su [12]: cena, vek ugradnje, prosečni kvar prema tipu i drugi važni atributi. Ove informacije pomažu da se rasvetli koliko dugo ugrađena guma ili valjak, na primer traju na vozilu/traci. Poznavanje ove vrste informacija pomaže u optimizaciji procesa upravljanja zalihama rezervnih delova. Menadžment je dobro informisan o tome koje marke pneumatika i valjaka traju duže od drugih i koliko novca se troši na ova sredstva. Izveštaj o pneumaticima i valjcima uključuje sledeće dodatne KPI: cenu pneumatika po toni, cenu kvara po radnim satima, izgubljenu gazeću (noseću) površinu, stopu habanja, iskorišćenost gazećeg (nosećeg) sloja, kvar u odnosu na istrošenost i trošak habanja po toni transportovane rude.

Informacije kao što su vreme rada, kvalitet otkopanog uglja i troškovi koje generišu radne mašine i sistemi u rudniku se online prikupljaju i čuvaju na cloudu [13, 14]. Ove informacije omogućavaju MES-u (upravljanje radnim nalogom na površinskom kopu) da automatski zaustavi radnu mašinu, ako se pojavi otkaz ili parametar održavanja, koji se online prati, iznenada dostigne kritičnu vrednost.

Tokom procesa planiranja i raspoređivanja kapaciteta radnih mašina (ERP), planovi se proveravaju kada se planirani nalog konvertuje u proizvodni nalog u MES-u. Preopterećenja i ograničenja kapaciteta radnih mašina su posebno istaknuta, što omogućava operateru da ponovo replanira operacije. Kreirani proizvodni nalozi se prenose u MES, što omogućava operateru da dobije detaljan prikaz planirane proizvodnje, operacija proizvodnih naloga, planiranog kretanja otkopanog uglja sa količinama i datumima (terminima), i izvrši detaljno terminiranje (ERP) [15,16].

Osnovni i planirani rokovi proizvodnje određuju se na osnovu raspoloživosti radnih mašina, planiranog operativnog vremena rada, kao i vremena proizvodnje uglja i njegovog odlaganja. Plan vremena iskopa i zakazani datum završetka proizvodnog naloga zavisi od tačnosti glavnih podataka u ERP-u, kao i od standardnih vrednosti rada koje se primenjuju na površinskom kopu. Kada su proizvodni nalozi vidljivi

u MES-u, operater ima mogućnost da ponovo rasporedi operacije (reterminira) proizvodnog naloga u slučajevima neplaniranog zastoja radne mašine. Svako ponovno planiranje operacija proizvodnog naloga urađeno u MES-u, ažurira datume proizvodnih naloga u ERP-u automatski [17,18].

U modelu Industrije 4.0 primenjuje se i MMS (Multimedia Messaging Service – sistem za slanje multimedijalnih poruka) sistem za praćenje radnih mašina, koji se spaja sa GPS (Global Positioning System – globalni pozicioni sistem) sistemom za njihovo praćenje, koji obezbeđuje automatsko praćenje voznog parka na osnovu trenutne lokacije na kopu. Trenutnu lokaciju i pomeranje svake radne mašine obezbeđuje GPS sistem za praćenje u realnom vremenu. Ove informacije pomažu u proceni vremena rada/putovanja i automatskom ponovnom rasporedu ako na primer kamion putuje sporije ili brže nego što je planirano. Trenutne lokacije radnih mašina se automatski ažuriraju i prikazuju na mapama u realnom vremenu. Mašine su opremljene IoT uređajima koji prenose koordinate položaja mašine u realnom vremenu [19]. Sistem za planiranje i praćenje radnih mašina je povezan se cloud bazom podataka, čime su podaci o praćenju voznog parka online dostupni širom rudnika.

Informacije o planiranju polja rudnika iz GIS (geographic information system - geografski informacioni sistem) sistema se dostavljaju poslovođama površinskog kopa putem IoT uređaja. Oni uz pomoć geologa, na primer izvode projekat planiranja bušenja jama i nakon toga izvode samo bušenje i miniranje. Ishod bušenja i miniranja se snima dronovima i potom se šalje nazad u cloud bazu podataka, za potrebe ERP-a i drugih sistemima. Povratne informacije za rudnike sa, na primer, jamskom eksploatacijom u realnom vremenu omogućavaju planerima rudnika da kreiraju i šire i više planova bušenja pre nego što počne sledeća smena [20]. Geolozi i planeri rudnika koriste stvarne podatke o rudarskoj proizvodnji da uporede i fino podese planiranje rudarskih lokacija unutar same jame.

Svi sistemi vertikalne integracije (SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – sistem za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka), ERP, MES, IMS (Integrated management system - integrisani menadžment sistem) (QMS (ISO 9001), EMS (ISO 14001), OH&S (ISO 45001), BDA, MMS, GPS i GIS) u rudniku su u modelu Industrija 4.0 integrisani i shodno tome imaju jedinstvenu bazu podataka na cloud-u (najčešće privatnom). Osim što omogućava rudarskim sistemima da komuniciraju jedni sa drugima u realnom vremenu, ovo takođe daje ogromne količine podataka koje generišu ovi sistemi i mašine. Dobijeni podaci se koriste za produbljenu analizu (BDA), definisanje, kreiranje i praćenje KPI-a i izveštavanje.

Podaci u realnom vremenu prikupljeni sa površinskog kopa, proizvodnje i svih drugih vrsta opreme mogu biti dostupni za upotrebu i od strane dobavljača rezervnih delova za praćenje performansi i poboljšanje efikasnosti i jačanje njihove veze sa funkcijom održavanja na površinskom koku. Preko velikih podataka (BDA) i AI/ML, površinski kop istovremeno može da ostvaruje jeftinije proizvodne operacije, visoke performanse rada i kvalitetniju proizvodnju uglja [21].

Izveštaji i kontrolne table su u stanju da prikažu, između ostalog, podatke prikupljene iz sistema za donošenje odluka, uz podatke koji se dele sa nivoa preduzeća nazad u sistem rada/proizvodnje u realnom vremenu. Izveštaji takođe mogu da prikažu ukupan status površinskog kopa u realnom vremenu. Ovi izveštaji su kompatibilni sa svim fiksnim ili mobilnim uređajima na kojima je omogućen web pristup, što ih čini dostupnim u bilo koje vreme i sa bilo kog mesta. Menadžment koristi online izveštaje da prati rudarske operacije iz svojih kancelarija, umesto da fizički izađe na lice mesta. Nedeljnim i mesečnim izveštajima uglavnom pristupa i koristi ih za optimizaciju generalni direktor, na nedeljnim i mesečnim sastancima [22]. Stoga, menadžment i rukovodioci imaju uvid u rad rudnika u realnom vremenu iz udaljenih kancelarija, svojih domova ili bilo gde u svetu.

Radni nalozi iz ERP-a se elektronski generišu i preuzimaju u MES. On prati i upravlja izvršavanjem ovih proizvodnih naloga i šalje informacije u realnom vremenu kao što su WIP (radni nalozi u radu), o kvalitetu iskopane rude, potrošnji materijala i statusa proizvodnog naloga, nazad u ERP. Korisnici koriste automatizovane i standardizovane izveštaje koji im daju značajne informacije u formatima koji su laki za razumevanje, o svim aspektima trenutne proizvodnje i održavanja. Rezervoari za gorivo su opremljeni sensorima za merenje i evidentiranje nivoa goriva. Ovo omogućava dobavljaču da ima vidljivost u realnom vremenu o nivoima rezervoara za gorivo, da bude upozoren kada ovi rezervoari dostignu svoje minimalne nivoe i stoga dopunjuju gorivo na vreme. Senzori instalirani na radnim mašinama prikupljaju i čuvaju podatke o potrošnji goriva na cloud-u. Nakon toga, ova potrošnja se automatski šalje u ERP sa odgovarajućim ID-om vozila, kilometrima i radnim vremenom (satima rada), radi vršenja BDA.

Vozila i rudarska oprema imaju senzore za prikupljanje informacija (IoT) o performansama kao što su sati rada motora, kilometraža i efektivan rad (transport ili iskopavanje). Zahvaljujući ovim informacijama, vozila i mašine sada imaju „pametne“ osobine da znaju kada im je termin planiranog održavanja, zahvaljujući primeni modela AI/ML. Dakle, proaktivni nalozi za održavanje se automatski kreiraju u modulu Preventivno održavanje, kao dela MES-a [23]. Tada se delovi

naručuju, a radovi se planiraju, zakazuju i izvode kada mašina ne radi. Ovo dovodi do značajnog smanjenja vremena zastoja i skupog reaktivnog održavanja – otklanjanje iznenadnih otkaza.

Sada je moguće, zahvaljujući BDA modelu, da dobavljači rezervnih delova imaju uvid u životni vek svojih proizvoda (delova). Informacije o performansama, na primer za gume, kao što su cena kvara po radnim satima, pohabani gazeći sloj, stopa habanja, iskorišćenost gazećeg sloja, kvar u odnosu na istrošenost i trošak habanja po prevučenoj toni tereta, pomažu menadžmentu da odredi koji je brend guma prikladniji i isplativiji. Sa druge strane, dobavljači mogu koristiti ove informacije da poboljšaju kvalitet svojih proizvoda.

MES na površinskom koku, preko pametnih čitača RFID (Radio frequency identification – identifikacija putem radio frekvencije) i IoT, podatke o potrošnji energije za proizvodne linije i mašine u realnom vremenu. Poznavanje koje radne mašine troše više energije omogućava rudniku da upravlja potrošnjom energije na rentabilan način. Rudnik takođe može integrisati podatke o energiji u sistem planiranja proizvodnje na koku.

Održavanje po stanju, kao i otklanjanje iznenadnih otkaza se u ovom modelu efikasno se izvode korišćenjem DT (Digital twin - digitalni bliznaci) koncepta. On ekspertima na brz i jednostavan način pruža, na vizuelni način strukturu održavane mašine, čime se operacije održavanja izvode na brz, pouzdan i efikasan način. Kada se izvrši automatizacija na površinskom koku, na način kako je to već opisano, onda primena DT koncepta dođe kao posledica toga, a ne novi, naknadni Projekat za rudnik.

Digitalizacija rudnika je otvorila nove mogućnosti optimizacije, procesa i operacija u njemu. Za te namene se koriste i modeli i tehnike veštačke inteligencije (AI) i mašinskog učenja (ML), kao jedan od važnih elemenata Industrije 4.0. U kolaboraciji sa analizom velikih podataka (BDA), korisnicima se pruža mogućnost za dalju optimizaciju (čitaj smanjenje troškova) na površinskom koku [24]. Ovo je svakako izazov za svaki digitalizovani rudnik i treba da bude deo svakog Projekta – Pametni rudnik.

### 3. PRIMER PRIMENE ELEMENATA PAMETNOG RUDARSTVA

Kao primer prakse iz naše sredine, navodi se model za planiranje i upravljanje resursima održavanja na površinskom koku Rudnika uglja „Drmno“. Ovo se realizuje korišćenjem ERP modela u oblaku (privatni) [25, 26, 27], slika 1.

Model sa slike 1 je nastao reinženjeringom postojećeg informaciono-komunikacionog sistema

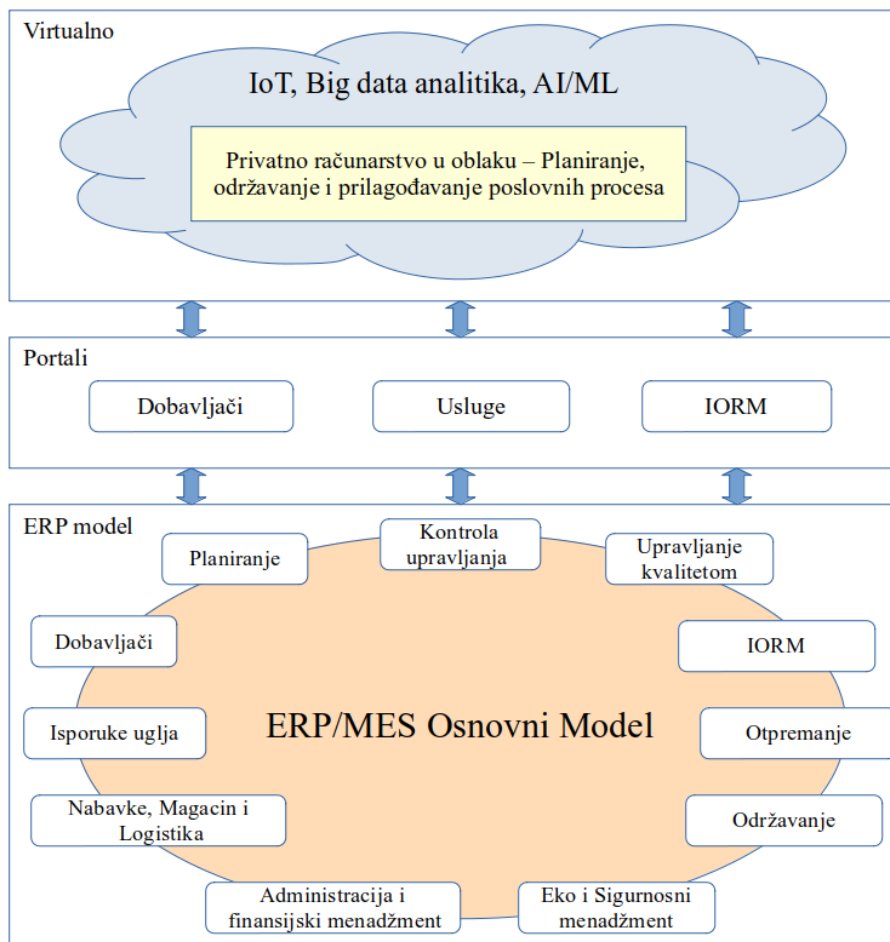
(ICS) koji se primenjuje u ovom rudniku više godina. Radi se o sistemu za upravljanje poslovnim procesima na kopu – MES. Ovaj model je razvijen i projektovan da poboljša efikasnost planiranja i upravljanja resursima održavanja na kopu.

Privatni ERP model u oblaku pruža centralizirani sistem za upravljanje resursima održavanja i planiranje aktivnosti održavanja. Omogućava praćenje performansi i stanja opreme u realnom vremenu, omogućavajući prediktivno (planirano) održavanje, čime se značajno smanjuju iznenadni zastoji.

ERP model je integrisan s postojećim informacionim i komunikacijskim sistemom rudnika (poslovni deo), kao što je prikazano na slici 1 [25, 26, 27], tako da imamo ERP/MES integraciju u praksi. Ovo omogućava besprekornu komunikaciju između različitih subjekata (proizvodni/poslovni deo), koji su uključeni u planiranje i upravljanje održavanjem.

Razvijeni model se sastoji od tri modula [25, 26, 27]: (i) virtuelnog dela, postavljenog na privatnom modelu računarstva u oblaku. Sadrži virtuelni model ERP sistema, koji povezuje poslovne procese (nabavka, prodaja, menadžment, finansije, skladište, zastoji), proizvodnju (na površinskom kopu) i tehnološke procese (nadgledanje i održavanje mašina), korišćenjem IoT-a.

ERP generiše veliku bazu podataka, koja kroz analizu i sintezu (BDA), zajedno sa mašinskim učenjem i AI alatima, optimizuje odluke o održavanju na osnovu stanja, planira prediktivno (preventivno) održavanje i upravlja zalihama rezervnih delova, (ii) interfejsom (dobavljači, usluge i upravljanje održavanjem). Njihova funkcija je omogućila menadžerima održavanja da nadgledaju celi sistem na mreži, i (iii) osnovni ERP/MES model, pored gore navedene funkcije, uključuje i druge poslovno-tehničke i upravljačke funkcije površinskog kopa, u online režimu.



Slika 1 - Cloud (privatni) ERP/MES model za pametno rudarstvo (usvojen prema [25, 26, 27]); \* IORM (eng. Intra-Organizational Relationships Management) - Upravljanje odnosima unutar organizacije

S obzirom na složenost i specifičnost osnovnih i pomoćnih rudarskih operacija, kao i sveobuhvatnih poslovnih procesa, razvoj i implementacija ERP modela privatnog oblaka kao digitalne platforme

odvija se u fazama [25, 26, 27]. Pregled elemenata Industrije 4.0 koji se razvijaju i primenjuju na površinskom kopu uglja „Drmno“, prikazan je u tabeli 1.

Tabela 1. Koncept Industrije 4.0 za površinski kop „Drmno“

| Aktivnost (primenjeno – P, u razvoju – R)  | Rad u realnom vremenu | Funkcija / oblast primene  | Karakteristika   | Softverska podrška              |
|--|-----------------------|--|--|---------------------------------|
| Automatsko upravljanje svim porudžbinama (R)   | Da                    | Svi rezervni delovi, gorivo, mazivo, procesne sirovine, ostali materijal   | Propisani nivo minimalnih zaliha                                 | ERP, MES – WIP, Kretanje zaliha |
| Automatsko praćenje radnih mašina (BTO) na površinskom kopu (P)  | Da                    | Omogućeno je samo praćenje   | Virtuelni GPS  | Sva vozila imaju GPS (MMS)      |
| Kontrolna tabla pregleda stanja na površinskom kopu u realnom vremenu (P)                                  | Da                    | Praćenje proizvodnje u realnom vremenu   | Vizuelizacija polja  | GPS, GIS                        |
| Održavanje u realnom vremenu (R)   | Da                    | Radne mašine (BTO), rudarska oprema i postrojenja  | Integracija senzora za praćenje stanja                           | SCADA, ERP – MT, MES – WIP      |
| Prediktivna analitika velikih podataka (BDA) (R)   | Da                    | Na nivou površinskog kopa, potrošnja goriva, maziva i rezervnih delova, optimizacija održavanja radnih mašina (BTO) i ostalih postrojenja. Ceo lanac vrednosti na površinskom kopu | Analiza velikih podataka   | ERP, BDA                        |
| On line upravljanje kvalitetom (proizvodnje uglja, rezervnih delova – guma i transportnih traka / BTO) (R) | Da                    | Postrojenje za preradu, rudarska proizvodnja, sistem guma i transportnih traka (BTO)   | Veliki podaci, vertikalna integracija                            | ERP, MES, QMS (IMS)             |
| Veća bezbednost (ergonomski uslovi) na radu kroz proširenu automatizaciju na bazi Industriju 4.0 (R)       | Da                    | Svi pogonski i proizvodni sistemi na kopu (prerada, geologija i planiranje rudnika)  | Svi sistemi i oprema na površinskom su integrisani (BTO)         | ERP, MES, OH&S (IMS)            |
| Poboljšan timski rad u proizvodnom okruženju kroz transparentnost i dostupnost podataka (P)                | Da                    | Rudarska proizvodnja (BTO), postrojenje za preradu, geologija i planiranje rudnika. Svi pogonski i proizvodni sistemi  | Vertikalna integracija   | ERP, MES, GPS, IMS              |
| Poboljšano okruženje kroz optimizovano korišćenje resursa, posebno energije (P)                            | Da                    | Rudarska proizvodnja (BTO), postrojenje za preradu, geologija i planiranje rudnika   | Integracija senzora za praćenje stanja. Pametni čitači.          | MES, EMS                        |
| Proširene inovativne mogućnosti kroz nove tehnološke mogućnosti u proizvodnji (R)                          | Da                    | Rudarska proizvodnja (BTO), postrojenje za preradu, geologija i planiranje rudnika   | Vertikalni, horizontalni i slojevi integracije od kraja do kraja | ERP, MES, IMS, MMS, GPS, GIS    |
| Izveštavanje o zalihama (P)  | Da                    | Svi rezervni delovi, gorivo, mazivo, procesne sirovine, ostali materijal   | Izveštavanje u realnom vremenu, BDA, vertikalna integracija      | ERP, MES                        |

#### 4. ZAKLJUČCI

Iako postoje mnoge prepreke, iz objektivnih i subjektivnih razloga, rudnicima koji idu u primenu novih tehnologija (elementi Industrije 4.0), one se moraju prevazići, ako rudarske kompanije žele ostati konkurentne i uspešne u digitalnoj eri. Pametni rudnici su budućnost i donose višestruke koristi: poboljšanja

bezbednosti radne snage, zaštite podataka, povećanja produktivnosti i efikasnosti u celom lancu vrednosti rudarske proizvodnje, smanjenja troškova nadzora i instalacije, održavanja, itd. Neuspešno uvođenje inovacija na bazi modela Industrija 4.0, zadržavaju rudnik „analognim“, a nastavak korišćenja skupih, ručnih procesa, stavlja takve kompaniju na začelje u ovoj

industriji, kada je u pitanju produktivnost i njena konkurentna prednost. Nove tehnologije, na bazi modela Industrije 4.0, mogu izgledati velika investicija, ali one su suštinska potreba za svaki rudnik koji želi poslovati u budućnosti.

Vreme za ulaganje je sada: bez sumnje će te videti rezultate, kako kratkoročno, tako i dugoročno. Pokazalo se da upotreba senzora i velikih podataka (BDA) samo u kopanju rude, smanjuje operativne troškove za 5 – 10%. Ovo je značajno kada uzmete u obzir perspektivu cele industrije: sa ukupnim operativnim troškovima industrije vađenja nafte, metala i minerala za koje se procenjuje da će dostići 14 biliona \$ do 2025, smanjenje čak i malog procenta ovih troškova bilo bi ogromna ušteda za rudarski sektor. U stvari, detaljne analize pokazuju da će uskoro digitalizacija rudnika biti široko rasprostanjena, što će rezultirati potencijalnim ekonomskim uticajem od 100 do 200 milijardi dolara godišnje do 2030. godine [9-12].

Površinski kop „Drmno“, odnosno njegov menadžment je odavno prihvatio napred navedene činjenice, i zato već nekoliko godina intezivno radi sa Mašinskim fakultetom u Beogradu i Institutom „Mihajilo Pupin“ na Projektu primene Industrije 4.0 modela u ovom rudniku.

Ovaj rad u tom smislu predstavlja naš prilog doprinosu razumevanja i primeni modela Industrije 4.0 u našoj sredini.

## LITERATURA

- [1] Andrew Kusiak Smart manufacturing, *International Journal of Production Research*, 56:1-2, 508-517, <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>, 2018.
- [2] Barrie, Glenn; Whyte, Andrew; Bell, Joyce, IoT Security: Challenges and Solutions for Mining, *Proceedings of the Second International Conference on Internet of things and Cloud Computing - ICC '17 - IoT security*, 1–9. <https://doi:10.1145/3018896.3018933>, 2017.
- [3] Sunchai Tongsuksai; Sanjay Mathrani; Integrating Cloud ERP Systems with New Technologies Based on Industry 4.0: A Systematic Literature Review, 2020 *IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE)*, <https://doi:10.1109/csde50874.2020.9411570>, 2020.
- [4] Molaei, Fatemeh; Rahimi, Elham; Siavoshi, Hossein; Afrouz, Setareh Ghaychi; Tenorio, Victor A Comprehensive Review on Internet of Things (IoT) and its Implications in the Mining Industry. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(3), 499–515. <https://doi:10.3844/ajeassp.2020.499.515>, 2020.
- [5] What is Smart Mining and why is it so Important? [citirano 07. marta 2024. god.]. Dostupno na: <https://www.mtga.com.au/news/what-is-smart-mining/>.
- [6] Mantravadi, Soujanya & Møller, Charles. An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0?. *Procedia Manufacturing*. 30. 588-595. <https://doi:10.1016/j.promfg.2019.02.083>, 2019.
- [7] Ng Corrales, L.d.C Lambán, M. P, Hernandez Korner M. E, Royo J. Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches. *Appl. Sci.* 10, 6469. <https://doi.org/10.3390/app10186469>, 2020.
- [8] Bhatti M. & Awan Hassan & Razaq Z. The key performance indicators (KPIs) and their impact on overall organizational performance. *Quality & Quantity*. 48. <https://doi.org/10.1007/s11135-013-9945-y>, 2014.
- [9] Smart Mines: The 6 Benefits of Making Your Mine Digital, [citirano 07. marta 2024. god.]. Dostupno na: <https://www.worldsensing.com/article/smart-mines-benefits/>.
- [10] Smart mining, [citirano 07. marta 2024. god.]. Dostupno na: <https://www.komatsu.com/en/technology/smart-mining/>.
- [11] Smart mining: How Technology Can Improve Operations, [citirano 07. marta 2024. god.]. <https://www.celona.io/5g-lan/smart-ining>.
- [12] Smart mining, [citirano 07. marta 2024. god.]. <https://www.yilmaden.com/smart-mining>.
- [13] Skenderas D, Politi C. Industry 4.0 Roadmap for the Mining Sector. *Mater. Proc.* 15, 16. <https://doi.org/10.3390/materproc2023015016>, 2023..
- [14] Bertayeva Kulyash & Panaedova Galina & Natocheeva Natalia & Kulagovskaya, Tat'yana & Belyanchikova, Tatiana. Industry 4.0 in the mining industry: global trends and innovative development. *E3S Web of Conferences*. 135. 04026. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913504026>, 2019.
- [15] Telukdarie Arnesh & Sishi Mike. Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry - a case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 11. 1. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2020.10027477>, 2020.
- [16] Zhironkina O, Zhironkin S. *Technological and Intellectual Transition to Mining 4.0: A Review*. *Energies* 16, 1427. <https://doi.org/10.3390/en16031427>, 2023.

- [17] A. Faz-Mendoza, N. K. Gamboa-Rosales, C. E. Medina-Rodríguez, M. A. Casas-Valadez, A. Castorena-Robles and J. R. López-Robles, Intelligent processes in the context of Mining 4.0: Trends, research challenges and opportunities, *International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*, Sakheer, Bahrain, pp. 480-484, <https://doi.org/10.1109/DASA51403.2020.9317095>, 2020.
- [18] Osman Cristina-Claudia & Ghiran Ana-Maria. When Industry 4.0 meets Process Mining. *Procedia Computer Science*. 159. 2130-2136. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.386>, 2019.
- [19] Smart mining, [citirano 07. marta 2024. god.]. <https://www.beumergroup.com/industry-4-0/smart-bulk-material-handling/smart-mining/>.
- [20] Digital transformation accelerates smart mining operations, [citirano 07. marta 2024. god.]. <https://www.ericsson.com/en/industries/mining>.
- [21] Sishi Michael N. and Arnesh Telukdarie. Implementation of industry 4.0 technologies in the mining industry: A case study. 2017 *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* 201-205, <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289880>, 2017.
- [22] Anthony Atkins, Lizong Zhang, and Hongnian Yu, Applications of RFID and mobile technology in tracking of equipment for maintenance in the mining industry, in Naj Aziz and Bob Kininmonth (eds.), *Proceedings of the 2010 Coal Operators' Conference*, Mining Engineering, University of Wollongong, 18-20 February 2019, <https://ro.uow.edu.au/coal/326>.
- [23] Navaneethakrishnan, C. A Comparative Study of Cloud based ERP systems with Traditional ERP and Analysis of Cloud ERP implementation. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2(09). <http://www.ijecs.in/index.php/ijecs/article/view/1921>, 2018.
- [24] M. Halaška and R. Šperka, Process Mining – the Enhancement of Elements Industry 4.0, *4th International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ICCOINS.2018.8510578>, 2018.
- [25] Vidosav Majstorovic, Vladimir Simeunovic, Zarko Miskovic, Radivoje Mitrovic, Dragan Stosic, Sonja Dimitrijevic, Smart Manufacturing as a framework for Smart Mining, *Procedia CIRP* 104, 188–193. [www.doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.032](http://www.doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.032), 2021.
- [26] Vidosav Majstorovic & Simeunović Vladimir & Mitrovic Radivoje & Stosic Dragan & Dimitrijevic Sonja & Miskovic Zarko. How to apply the ERP model for Smart Mining?. *MATEC Web of Conferences*. 368. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236801015>, 2022.
- [27] Majstorovic V, Simeunovic V, Mitrovic R, Stosic, D, Dimitrijevic S, Miskovic Z. Development of Cloud ERP Model and Its Application in Smart Mining. In: Burduk A, Batako A, Machado J, Wyczółkowski R, Antosz K, Gola A. (eds) *Advances in Production. ISPEM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 790. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-45021-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45021-1_3), 2023.
- [28] Majstorović V, Đuričin D, Mitrović R, *Indistrija 4.0 – Renesansa inženjerstva*, Mašinski fakultet, Beograd, 2023.

## SUMMARY

### SMART MINING

*Industry 4.0 has become a global strategic initiative of scientific and technological development, which was launched by the most developed industrial countries in the world, and today has gone the furthest in its implementation. In essence, it is a new model of application of information and communication technology, based primarily on their integration with the object of application (for example in mining - production (BTO), transport, maintenance, etc.). The development and application of the elements of Industry 4.0 in this area leads to the establishment of the smart mining (SM) model, the elements of which will be presented in this paper. As an illustration of the application of this model in our conditions, and for the „Drmno“ surface mine, this paper will present a model of planning and maintenance management of ERP (production-technological resource planning) and MES (work order management) model for Industry 4.0, which uses a private cloud computing model.*

**Key Words:** *Industry 4.0, Smart Mining, Maintenance, ERP, MES.*