

Марко Алексић¹
Радмила Бјекић¹
Маја Стругар Јелача¹
Слободан Марић¹

DOI 10.7251/ZJF2514078A

ИНТЕГРАЦИЈА ИНДУСТРИЈЕ 4.0 У МОДЕЛУ ЦИРКУЛАРНЕ ЕКОНОМИЈЕ ЗА ОДРЖИВУ ПРОИЗВОДЊУ

Апстракт: Индустрија 4.0 и циркуларна економија представљају кључне концепте савремене индустријске трансформације, усмерене ка одрживој производњи и ефикасном коришћењу ресурса. Овај рад истражује интеграцију напредних дигиталних технологија, као што су Интернет ствари (IoT), вештачка интелигенција (AI), big data аналитика, у моделе циркуларне економије. Примена ових технологија омогућава оптимизацију производних процеса, продужење животног циклуса производа и смањење отпада кроз затворене материјалне токове. Методолошки, рад се ослања на анализу релевантне литературе и преглед индустријских пракси. Посебна пажња посвећена је предностима Индустрије 4.0 у контексту циркуларне економије, као и изазовима који отежавају њихову имплементацију, укључујући техничке, економске и регулаторне препреке. Такође, разматрани су етички и друштвени аспекти дигиталне трансформације индустрије. Резултати истраживања указују на значајан потенцијал Индустрије 4.0 за унапређење циркуларних пословних модела кроз паметне системе управљања ресурсима и отпадом. Анализа примера добре праксе показује да је дигитализација кључна за постизање економске и еколошке одрживости. У закључку, рад истиче препоруке за даља истраживања и стратегије за ефикаснију интеграцију ових концепата у индустријску праксу.

Кључне речи: Индустрија 4.0, циркуларна економија, одржива производња.

¹ Економски факултет у Суботици, Универзитет у Новом Саду
marko.aleksic@ef.uns.ac.rs, radmila.bjekic@ef.uns.ac.rs, maja.strugar.jelaca@ef.uns.ac.rs,
slabodan.maric@ef.uns.ac.rs

INTEGRATION OF INDUSTRY 4.0 INTO THE CIRCULAR ECONOMY MODEL FOR SUSTAINABLE PRODUCTION

Abstract: Industry 4.0 and the circular economy represent key concepts of modern industrial transformation, aimed at sustainable production and efficient resource utilization. This paper explores the integration of advanced digital technologies, such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and big data analytics, into circular economy models. The application of these technologies enables the optimization of production processes, extension of product life cycles, and waste reduction through closed material loops. Methodologically, the paper relies on the analysis of relevant literature and a review of industrial practices. Special attention is given to the benefits of Industry 4.0 in the context of the circular economy, as well as the challenges hindering their implementation, including technical, economic, and regulatory barriers. Ethical and social aspects of the digital transformation of industry are also considered. The research findings indicate the significant potential of Industry 4.0 for enhancing circular business models through smart resource and waste management systems. The analysis of best practices demonstrates that digitalization is crucial for achieving economic and environmental sustainability. In conclusion, the paper highlights recommendations for further research and strategic guidelines for the more effective integration of these concepts into industrial practice.

Keywords: Industry 4.0, circular economy, sustainable production.

1. УВОД

Савремена индустрија пролази кроз дубоке трансформације услед примене концепта Индустрије 4.0, који обухвата напредне дигиталне технологије као што су Интернет ствари (IoT), вештачка интелигенција (AI), велики подаци (Big Data) и аутономни системи (Kagermann et al., 2013). Истовремено, модели циркуларне економије представљају све значајнији приступ у развоју одрживих производних система, фокусирајући се на минимизацију отпада, оптималну употребу ресурса и продужени животни циклус производа (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Интеграција концепата Индустрије 4.0 у модел циркуларне економије омогућава ефикасније управљање ресурсима и смањење негативних утицаја на животну средину, што је кључно за остваривање циљева одрживог развоја (Geissdoerfer et al., 2017).

Применом дигиталних технологија у оквиру циркуларне економије могуће је побољшати процесе у производњи, дистрибуцији и рециклажи производа. На пример, паметне фабрике омогућавају оптимизацију потрошње енергије и материјала путем аутоматизованих система за надзор и анализу података у реалном времену (Stock & Seliger, 2016). Поред тога, блокчејн технологија може осигурати транспарентност и праћење животног циклуса производа, чиме се подстиче коришћење обновљивих материјала и циркуларних пословних модела (Antikainen et al., 2018).

Овај рад има за циљ да истражи потенцијале и изазове интеграције Индустрије 4.0 у модел циркуларне економије, анализирајући технолошке, економске и еколошке аспекте одрживе производње. У првом делу рада разматрају се теоријски основи оба концепта, након чега следи анализа примера из праксе и идентификација кључних фактора који утичу на успешну имплементацију. На крају, предлажу се препоруке за унапређење овог интегрисаног модела, с циљем постизања веће одрживости у индустријском сектору.

2. ТЕОРИЈСКИ ОКВИР

2.1. Индустрија 4.0, технологије и примена

Индустрија 4.0 представља дигиталну трансформацију производних процеса кроз примену интелигентних система, аутономних машина и умрежених технологија. Кључне технологије које обликују овај концепт укључују Интернет ствари (IoT), вештачку интелигенцију (AI), анализу великих података (Big Data), сајбер-физичке системе (CPS) и аутономне роботске системе (Kagermann et al., 2013; Xu et al., 2018).

IoT омогућава повезивање уређаја и машина у производним системима, чиме се омогућава континуирана размена података и оптимизација процеса у реалном времену (Lee et al., 2015). Сајбер-физички системи (CPS) комбинују дигиталне и физичке компоненте, омогућавајући бољу контролу и предиктивно одржавање опреме (Lu, 2017). Анализа великих података помаже у предвиђању кварова, побољшању ефикасности и смањењу оперативних трошкова (Wang et al., 2016).

Примена Индустрије 4.0 у производњи доводи до развоја паметних фабрика,

у којима се процеси аутоматизују и оптимизују коришћењем напредних алгоритама и машинског учења (Tao et al., 2018). Роботизовани системи, као што су колаборативни роботи (cobots), омогућавају флексибилност у производним процесима и побољшање безбедности радника (García et al., 2020). Блокчејн технологија такође налази примену у праћењу ланца снабдевања, осигуравајући транспарентност и поузданост података (Yadav & Singh, 2020).

Успешна имплементација Индустије 4.0 захтева мултидисциплинарни приступ, интеграцију различитих технологија и адекватну обуку кадрова. Иако доноси значајне предности, као што су повећана продуктивност, смањени трошкови и боља одрживост, овај концепт такође носи изазове у погледу кибернетичке безбедности, високе почетне инвестиције и потребе за регулаторним прилагођавањем (Hermann et al., 2016).

2.2. Концепт циркуларне економије

Циркуларна економија представља алтернативу традиционалном линеарном економском моделу „узми, производи, одбаци“, а њен циљ је смањење отпада и максимално коришћење ресурса. Основна идеја циркуларне економије је продужење животног века производа, рециклажа, поновна употреба и обнова материјала, чиме се значајно смањује негативан утицај на животну средину (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Овај приступ обухвата пројектовање производа и процеса који омогућавају ефикасније коришћење природних ресурса и минимизирају отпад кроз затворене материјалне токове (Geissdoerfer et al., 2017).

Основни принципи циркуларне економије према извештајима Светског економског форума и Европске комисије, циркуларна економија се заснива на неколико кључних принципа (European Commission, 2020):

Дизајн за дуговечност и одрживост – Производи и материјали треба да буду дизајнирани тако да се могу лако поправити, рециклирати или обновити, чиме се смањује потреба за примарним ресурсима (Bocken et al., 2016).

Поновна употреба и поправка – Продужење животног века производа кроз поправке и поновну употребу смањује количину отпада и потражњу за новим ресурсима (Stahel, 2016).

Рециклирање и затварање материјалних токова – Отпад треба третирати као вредан ресурс који се може поново употребити у производним процесима (Ghisellini et al., 2016).

Обновљиви извори енергије – Коришћење обновљивих извора енергије у производњи доприноси одрживости и смањењу емисије CO₂ (Kirchherr et al., 2017).

Циркуларна економија налази примену у различитим индустријским секторима, укључујући производњу, енергетику, грађевинарство и пољопривреду. На пример, у аутомобилској индустрији произвођачи све више користе рециклиране материјале и развијају модларне дизајне који омогућавају laku замену и поправку делова (Lacy & Rutqvist, 2015). У области електронских уређаја, многе компаније примењују стратегије продуженог животног циклуса, укључујући програме откупа старих уређаја за рециклажу (Bocken et al., 2016).

Прелазак на циркуларну економију доноси значајне економске и еколошке користи. Истраживања показују да би овај модел могао довести до уштеде сировина у

вредности од 600 милијарди евра годишње у Европи (European Commission, 2020). Поред тога, смањена потрошња природних ресурса и мање загађење доприносе борби против климатских промена (Ghisellini et al., 2016).

Циркуларна економија представља иновативан и одржив приступ економском развоју који омогућава ефикасније коришћење ресурса и минимизирање утицаја на животну средину. Њена успешна примена захтева сарадњу влада, компанија и потрошача у креирању одрживих производа и процеса.

3. ПОВЕЗИВАЊЕ ИНДУСТРИЈЕ 4.0 СА ЦИРКУЛАРНОМ ЕКОНОМИЈОМ

Индустрија 4.0 доноси револуционарне промене у производним процесима кроз примену дигиталних технологија као што су Интернет ствари (IoT), вештачка интелигенција (AI) и велики подаци (big data). Ове технологије омогућавају оптимизацију ланаца снабдевања, унапређење производне ефикасности и прецизније управљање ресурсима, што су кључни елементи циркуларне економије (Kouhizadeh & Sarkis, 2018). Аутоматизација и дигитализација омогућавају предиктивно одржавање, минимизирање отпада и побољшану рециклажу, што доприноси одрживом коришћењу ресурса (Jabbour et al., 2019).

Напредне дигиталне технологије омогућавају ефикасније управљање материјалним токовима и смањење отпада. Употреба блокчејн технологије омогућава транспарентно праћење материјала током њиховог животног циклуса, док AI алгоритми анализирају податке у реалном времену како би идентификовали могућности за рециклажу и поновну употребу (Antikainen et al., 2018). Паметне фабрике користе аутономне системе који оптимизују производњу и смањују вишкове сировина, чиме доприносе затварању материјалних токова у циркуларној економији (Lieder & Rashid, 2016).

Употреба паметних система за управљање отпадом, као што су IoT сензори у контејнерима за отпад и алгоритми машинског учења, значајно побољшава ефикасност у сакупљању, сортирању и рециклажи отпада (Zhang et al., 2021). Ови системи омогућавају аутоматизовано праћење количине и врсте отпада у реалном времену, чиме се смањују оперативни трошкови и повећава стопа рециклаже. Даљи развој дигиталних платформи за размену секундарних сировина омогућава боље коришћење рециклираних материјала у производним процесима (Singh et al., 2018).

Синергија Индустије 4.0 и циркуларне економије омогућава развој одрживих индустријских пракси кроз дигитализацију, оптимизацију ресурса и примену иновативних технологија. Овај приступ представља кључни корак ка смањењу еколошког отиска и одрживом економском развоју.

Међутим, примена Индустије 4.0 у контексту циркуларне економије суочава се са бројним изазовима и ограничењима, укључујући техничке, економске, регулаторне, етичке и друштвене аспекте.

Примена концепта Индустије 4.0 у оквиру циркуларне економије представља значајан изазов због више техничких, економских и регулаторних ограничења. Пре свега, неопходно је развити напредне дигиталне технологије, као што су Интернет ствари (IoT), вештачка интелигенција (AI) и блокчејн, које могу омогућити бољу ефикасност у коришћењу ресурса и праћењу животног циклуса производа (Kouhizadeh & Sarkis, 2018).

Један од главних техничких изазова је сложеност имплементације дигиталних технологија у постојеће индустријске процесе. Компаније често морају да модернизују своју инфраструктуру како би интегрисале паметне системе, што може бити скупо и захтевно у погледу људских ресурса (Rajput & Singh, 2019). Такође, потребна је интероперабилност различитих система, јер хетерогене платформе могу изазвати проблеме у интеграцији и размени података (Antonioli et al., 2021). Са економске стране, високи трошкови почетне имплементације технологија Индустије 4.0 представљају баријеру за мала и средња предузећа. Поред тога, потребно је развити одговарајуће финансијске механизме који би омогућили инвестиције у одрживе моделе пословања (Geissdoerfer et al., 2020). Непостојање довољно развијених пословних модела који би подстицали рециклажу и продужење животног века производа такође ограничава примену овог концепта у пракси.

Регулаторни изазови укључују недостатак стандардизованих законских оквира који би олакшали примену дигиталних технологија у циркуларној економији. Државе Европске уније и друге развијене земље постепено доносе стратегије за дигиталну трансформацију индустрије, али је и даље присутан јаз између регулаторних политика и брзог развоја технологије (Bressanelli et al., 2018). Посебан проблем представља заштита података и сигурност информационих система, јер дигитализација индустрије захтева размену великих количина осетљивих информација.

Дигитална трансформација индустрије носи бројне етичке и друштвене изазове, посебно у контексту циркуларне економије. Један од кључних проблема је аутоматизација и губитак радних места услед примене роботизације и вештачке интелигенције (Ford, 2015). Док с једне стране технологије Индустије 4.0 могу створити нове послове, с друге стране захтевају висок ниво дигиталне писмености и техничких вештина, што може довести до социјалних неједнакости (Pereira & Romero, 2017).

Питање приватности података је такође важно у контексту дигитализације циркуларне економије. Како би се постигао потпуни надзор над материјалним токовима и ресурсима, потребно је прикупљати велику количину података, што може изазвати проблеме у заштити приватности и власништва над информацијама (Brous et al., 2020).

Још један значајан аспект је транспарентност и поверење у дигиталне системе. Технологије као што је блокчејн могу помоћи у повећању транспарентности ланца снабдевања, али је потребно осигурати да се не злоупотребе за монополистичке или манипулативне сврхе (Antonioli et al., 2021). Стога је од суштинске важности да компаније и владе раде заједно на развоју етичких смерница за употребу дигиталних технологија у циркуларној економији.

4. ПРИМЕРИ ДОБРИХ ПОСЛОВНИХ ПРАКСИ

Индустријски сектори који успешно интегришу ове концепте односе се на:

Аутомобилску индустрију – Компаније попут BMW и Renault примењују принципе циркуларне економије кроз употребу рециклираних материјала и дигиталне праћење животног циклуса производа (Bressanelli et al., 2018).

Електронска индустрија – Фирме као што су Dell и HP користе моделе „производ као услуга“ и рециклажу компоненти уз помоћ IoT и блокчејн технологија (Rajput & Singh, 2019).

Прехрамбена индустрија – Компаније попут Danone и Nestlé примењују дигиталне системе за оптимизацију ланца снабдевања и смањење отпада (Geissdoerfer et al., 2020).

Хемијска индустрија – Компаније као што су BASF и Dow Chemical користе дигиталне близанце за оптимизацију производње и смањење отпада.

Табела 1: Анализа конкретних примера имплементације

Компанија	Индустрија	Технологије Индустрије 4.0	Елементи циркуларне економије
BMW	Аутомобилска	IoT, AI, Big Data	Рециклажа материјала, продужење животног века производа
Dell	Информатичка	IoT, блокчејн	Рециклирање компоненти, „производ као услуга“
Danone	Прехрамбена	AI, дигиталне платформе	Оптимизација ланца снабдевања, смањење отпада
Basf	Хемијска	Дигитални близанци, IoT	Транспарентност снабдевања, рециклажа материјала

Повезаност Индустрије 4.0 и циркуларне економије омогућава побољшану ефикасност ресурса и смањење отпада кроз примену дигиталних технологија попут IoT-а, вештачке интелигенције и блокчејна. Успешне компаније као што су BMW, BASF и Dell демонстрирају како дигитална трансформација може подстаћи рециклажу, продужење животног века производа и оптимизацију ланца снабдевања. Интеграција паметних технологија у индустријске процесе доприноси већој транспарентности и смањењу негативног утицаја на животну средину. Истовремено, дигитализација пословних модела омогућава нове приступе, попут „производ као услуга“, који подстичу одрживу потрошњу. Ови примери показују да је синергија Индустрије 4.0 и циркуларне економије кључна за будућност одрживе производње.

5. ЗАКЉУЧАК

Примена циркуларне економије у прерађивачким индустријама омогућава смањење отпада и ефикасније коришћење ресурса кроз рециклажу, поновну употребу и продужетак животног века производа. Овим приступом се смањују негативни утицаји на животну средину, као што су загађење и прекомерна експлоатација природних сировина. Такође, индустрије постижу економску корист кроз уштеду материјала и енергије, док истовремено јачају одрживост пословања (Kumar et al., 2019). Интеграција дигиталних технологија и аутоматизације у оквиру Индустрије 4.0 додатно унапређује ефикасност циркуларних процеса и омогућава иновације у производњи.

Досадашња истраживања и праксе показала су да је интеграција Индустрије 4.0 у модел циркуларне економије кључна за унапређење одрживе производње.

Дигиталне технологије, као што су IoT, AI и блокчејн, омогућавају бољу контролу ресурса, оптимизацију производних процеса и смањење отпада. Успешне имплементације у индустријама попут аутомобилске, електронске и хемијске показале су да је ова интеграција већ у току, али и да постоје значајни технички, економски и регулаторни изазови.

Будућа истраживања треба да се фокусирају на развој иновативних пословних модела који подстичу циркуларну економију уз подршку дигиталних технологија. Потребно је унапредити регулаторни оквир како би се олакшала примена паметних технологија, посебно у секторима са високом потрошњом ресурса. Такође, индустрија треба да инвестира у обуке и развој дигиталних вештина како би се смањило јаз између технолошког напретка и расположиве радне снаге. На крају, сарадња између влада, академских институција и индустрије биће кључна за успешну имплементацију ових концепата у пракси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antikainen, M., Uusitalo, T., & Kivikytö-Reponen, P. (2018). Digitalisation as an enabler of circular economy. *Procedia CIRP*, 73, 45-49.
2. Antonioli, D., Montresor, S., & Pini, P. (2021). Digitalization and circular economy: A firm-level investigation. *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120755.
3. Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308-320.
4. Bressanelli, G., Perona, M., & Saccani, N. (2018). Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: A literature review and a multiple case study. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 608-632.
5. Brous, P., Janssen, M., & Herder, P. (2020). The dual effects of the Internet of Things (IoT): A systematic review of the benefits and risks of IoT adoption by organizations. *International Journal of Information Management*, 51, 101952.
6. Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*. Ellen MacArthur Foundation.
7. European Commission. (2020). Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. Retrieved from <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>
8. Ford, M. (2015). *Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless Future*. Basic Books.
9. García, J. M., García, J., & Ortiz, A. (2020). Collaborative robots in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 93, 265-270.
10. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.
11. Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32.
12. Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. *Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 49, 3928-3937.
13. Jabbour, C. J. C., Jabbour, A. B. L., Sarkis, J., & Govindan, K. (2019). Industry 4.0 and the circular economy: A proposed research agenda and original framework. *Business Strategy and the Environment*, 28(4), 522-540.
14. Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
15. Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.

16. Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2018). Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains. *Sustainability*, 10(10), 3652.
17. Kumar, V., Sezersan, I., Garza-Reyes, J. A., Gonzalez, E. D., & Al-Shboul, M. D. A. (2019). Circular economy in the manufacturing sector: benefits, opportunities and barriers. *Management decision*, 57(4), 1067-1086.
18. Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015). *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*. Palgrave Macmillan
19. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
20. Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36-51
21. Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.
22. Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214.
23. Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49, 98-113
24. Singh, J., Ordoñez, I., Ma, J., & Rommel, J. (2018). Waste management in the context of the circular economy: A review. *Journal of Cleaner Production*, 197, 285-299.
25. Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438.
26. Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541.
27. Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157-169.
28. Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1-10.
29. Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.
30. Yadav, V. S., & Singh, A. R. (2020). Blockchain technology in the supply chain: Applications, challenges, and future research directions. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106789.
31. Zhang, D., Ke, Y., Pan, W., & Yu, Y. (2021). Smart waste management and circular economy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110122.