

DIGITALNI BLIZANAC: PRIMENA SAVREMENE TEHNOLOGIJE U PROIZVODNJI DIGITAL TWIN: APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGY IN PRODUCTION

Teodora Rajković¹, Danica Lečić-Cvetković², Miljan Kalem³

¹Univerzitet u Beogradu-Fakultet organizacionih nauka,
teodora.rajkovic@fon.bg.ac.rs

²Univerzitet u Beogradu-Fakultet organizacionih nauka,
danica.lecic-cvetkovic@fon.bg.ac.rs

³Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet, miljan.kalem@sfb.bg.ac.rs

Apstrakt: U eri digitalizacije i sa razvojem Industrije 4.0, nastao je koncept digitalnog blizanca, koji čini ključnu komponentu „pametnih“ fabrika. Primena digitalnog blizanca je najčešća u proizvodnji, gde se koristi za razvoj i dizajn proizvoda, merenje, praćenje, nadzor, kao i kontrolu proizvodnih procesa. U ovom radu je predstavljen digitalni bliznac, koji predstavlja skup tehnologija koje prevode fizički u digitalni svet i omogućavaju njihovu komunikaciju i razmenu podataka. Svrha rada je da se predstave karakteristike, funkcionalnosti, prednosti i nedostaci primene digitalnog blizanca u proizvodnji. Cilj rada je da se prikažu primeri primene digitalnog blizanca u proizvodnji. Namera ovog rada je da se, na osnovu primera dobre prakse, ukaže na značaj i unapređenja koja nastaju primenom digitalnog blizanca u proizvodnji. Primena digitalnog blizanca unapređuje proizvodni proces, otklanja greške, smanjuje troškove proizvodnje i optimizuje planiranje i realizaciju proizvodnje.

Ključne reči: Proizvodnja, digitalni bliznac, Industrija 4.0, digitalizacija, primeri iz prakse.

Abstract: In the digitalization era and with the development of Industry 4.0, the concept of a digital twin emerged, presenting a key part of “smart” plants. The application of the digital twin is the most common in production, where it is used for product development and design, measurement, monitoring, supervision and control of production processes. This paper presents the digital twin as a set of technologies that translates physical into the digital world, enabling their mutual communication and data exchange. The purpose of this paper is to present the characteristics, functionalities, advantages and disadvantages of the application of digital twin in production. The aim of this paper is to present the examples of the application of digital twin in production. The intention of this paper, based on examples of good practice, is to point out the importance and improvements resulting from the application of a digital twin in production. The application of digital twin improves the production process,

eliminates errors, reduces production costs and optimizes production planning and realization.

Key words: *Production, digital twin, Industry 4.0, digitalization, examples from practice.*

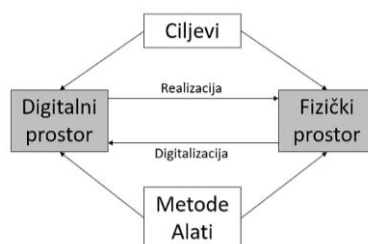
1. UVOD

Primena savremenih tehnologija u proizvodnji u savremenim uslovima poslovanja je neophodna, kako bi se proizvodni procesi odvijali nesmetano, bez grešaka i sa minimumom gubitaka. Industrija 4.0, kao moderan koncept savremene proizvodnje, predstavlja digitalizaciju proizvodnje i svih procesa u jednom preduzeću, sa ciljem da digitalno umreži proizvode i procese duž jednog lanca vrednosti. Industrija 4.0 se bazira na primeni savremenih tehnologija (Lu, 2017; Zheng i drugi, 2021): Internet inteligentnih uređaja (eng. *Internet of Things - IoT*), računarstva „u oblaku“ (eng. *Cloud Computing*), sajber-fizičkih sistema (eng. *Cyber-physical Systems*), velikih podataka (eng. *Big Data*), robota, proširene stvarnosti (eng. *Augmented Reality*), simulacije, i druge. Industrija 4.0 vodi ka potpunoj automatizaciji proizvodnog procesa. Primenom i umrežavanjem kompatibilnih tehnologija, razvija se koncept „pametnih“ fabrika. Osnovu „pametnih“ fabrika čine digitalne tehnologije, a važan element tih fabrika čini digitalni bliznac (DB) (eng. *Digital Twin*).

Rad se sastoji iz četiri poglavlja. Prvo poglavlje predstavlja uvod u rad. U drugom poglavlju je predstavljen pojam i značenje DB, tehnologije neophodne za implementaciju DB, kao i prednosti i nedostaci. U trećem poglavlju predstavljeni su primeri primene DB u proizvodnji. Četvrto poglavlje predstavlja zaključak rada.

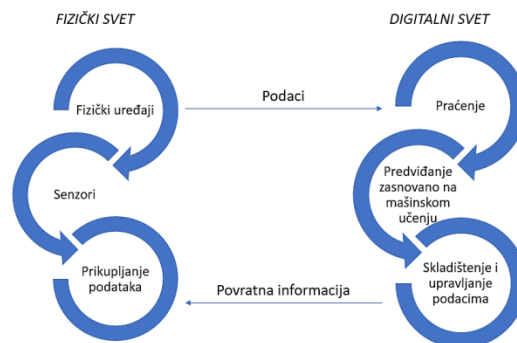
2. POJAM I ZNAČENJE DIGITALNOG BLIZANCA

Tradicionalni način proizvodnje predstavlja proces koji transformiše sirovine u gotov proizvod. Primenom DB fizički svet postaje digitalni svet, čineći digitalnu repliku fizičkih procesa, podataka i sistema koja omogućava digitalnu simulaciju stvarnosti i sajber-fizičku integraciju proizvodnje (Babić, Višić & Đermanović, 2020). Na Slici 1. prikazan je koncept DB.



Slika 1: Koncept digitalnog blizanca
Izvor: (Hedberg, Helu & Sprock, 2018)

DB je integrisani sistem koji može da nadgleda, reguliše, kontroliše, računa i simulira status sistema i procesa (Zheng, Yang & Cheng, 2019), čineći digitalnu inženjersku perspektivu, povezujući dizajn i razvoj proizvoda, planiranje proizvodnje, inženjering proizvodnje, proces operativne proizvodnje i integrisanje usluga (Semeraro i drugi, 2021). Sa razvojem savremenih tehnologija i Industrije 4.0, DB se razvijao, sve više dobijajući na značaju. Za uspešan rad i implementaciju DB u fabrici, potrebno je sinhronizovati rad više tehnologija, poput (Liu i drugi, 2021): *RFID* (eng. *Radio Frequency Identification*) tagova i čitača, senzora, kamera, 3D skenera, mašinskog učenja (eng. *Machine Learning*), Interneta inteligentnih uređaja, veštačke inteligencije, proširene stvarnosti i drugih. Primena DB u proizvodnji je dosta kompleksna, jer podrazumeva korišćenje velike količine podataka, prevođenje stvarnog, fizičkog, često i složenog modela u digitalni model na kojem je moguće vršiti različite simulacije. Na Slici 2. je prikazan okvir DB, kao i veza između fizičkog i digitalnog sveta.



Slika 2: Okvir digitalnog blizanca – povezanost fizičkog i digitalnog sveta
Izvor: (Roy i drugi, 2020)

U fizičkom sistemu se podaci prikupljaju putem senzora i fizičkih uređaja, a zatim se prenose u virtuelni prostor. Primenom algoritama mašinskog učenja, podaci se obrađuju i koriste za praćenje proizvodnog procesa i rada mašina. Pomoću tih algoritama i simulacije, moguće je unaprediti procese i vršiti predviđanja, nakon čega se informacije prenose povratnom vezom u fizički sistem, čineći zatvorenu petlju. Na taj način se podaci iz fizičkog sistema prikupljaju, obrađuju i koriste za predviđanje i unapređenje postojećih procesa. U radu (Boschert, Heinrich & Rosen, 2018) se navodi da su simulacioni modeli DB specifičnost ove tehnologije i da su jedinstveni za preduzeća kod kojih se primenjuje. Takođe, isti autori navode da se DB razvija uporedo sa fizičkim sistemima, integrišući sve dostupne informacije, kao i da se koristi ne samo za opisivanje ponašanja jednog sistema, već i za kreiranje rešenja relevantnih za fizički sistem. DB je integracijom sajber i fizičkog sistema omogućio implementaciju Industrije 4.0 u proizvodnju, kao i razvoj „pametnih“ fabrika (Qi i drugi, 2018).

Cilj primene DB u proizvodnji je unapređenje planiranja i realizacije proizvodnje, kao i unapređenje upravljanja životnim ciklusom proizvoda. DB vrši praćenje, održavanje, upravljanje, optimizaciju i bezbednost proizvodnog procesa (Cimino, Negri & Fumagalli,

2019), omogućavajući pravovremeno nadgledanje izvršenja aktivnosti, unapređenje planiranja proizvodnje i proizvodnih procesa, kontrolu procesa proizvodnje, evaluaciju i optimizaciju procesa (Liu i drugi, 2021).

Prednosti primene DB su (Park i drugi, 2019; Polini & Corrado, 2020; Shao & Helu, 2020): unapređena i pravovremena kontrola proizvodnog procesa; simulacija proizvodnog procesa, sa ciljem unapređenja i smanjenja dužine proizvodnog ciklusa, kao i potrošnje električne energije; smanjeno vreme odgovora na tražnju; optimizacija i kontinuirano poboljšanje proizvodnog procesa; unapređenje upravljanja zalihama sirovina i gotovih proizvoda; praćenje performansi proizvodnje; identifikacija problema i izmena u procesu montaže i proizvodnje; smanjenje neefikasnosti proizvodnje. U radu (Shao & Helu, 2020) su istaknute dve važne prednosti primene DB u proizvodnji, a to su: minimizacija zastoja rada mašina i alata i optimizacija plana i rasporeda poslova proizvodnog procesa. DB koristi podatke o proizvodnom procesu, mašinama i alatima za praćenje, dijagnostikovanje, rešavanje problema, grešaka i kvarova nastalih u toku procesa proizvodnje. Na taj način smanjuje troškove servisiranja i održavanja mašina i alata, i sprečava nastanak zastoja u proizvodnji. Takođe, prikupljajući podatke koje preuzima od mašina na proizvodnim linijama, iz sistema za izvršenje proizvodnje (eng. *Manufacturing Execution Systems - MES*) i softvera za upravljanje resursima preduzeća (eng. *Enterprise Resource Planning - ERP*), DB ima uvid u realnom vremenu u status proizvodnje, promene u količinama sirovina i gotovih proizvoda na zalihama, kao i promene u narudžbinama.

Međutim, pored brojnih prednosti, nedostaci primene DB u proizvodnji su (Admenko i drugi, 2020; Opoku i drugi, 2021; Zacher, 2020): posedovanje savremenih tehnologija čije cene nabavke i implementacije su visoke; veći broj obučenih ljudi za kreiranje DB, koji umeju da odrede deo procesa ili procese proizvodnje za koji je potrebno kreirati DB, kao i metode i tehnologije pomoću koji je moguće kreirati DB, odnosno da poseduju odgovarajuća znanja i nivo obučenosti; prevođenje fizičkog sistema u digitalni nekad može vremenski dugo da traje, u zavisnosti od kompleksnosti sistema koji se prevodi; nije uvek moguće precizno predvideti cenu implementacije DB, zbog loše procenjenog obima podataka; ne može da zameni praktičan rad.

3. PRIMERI PRIMENE DIGITALNOG BLIZANCA U PROIZVODNJI

U ovom poglavlju prikazani su primeri primene DB u proizvodnji. Najčešće primene DB u proizvodnji su za (Babić, Višić & Đermanović, 2020): razvoj novih proizvoda (praćenje performansi proizvoda u fizičkom okruženju koji utiče na razvoj novog proizvoda), proizvodnju (simulacija realizacije proizvodnje u DB povećava efikasnost proizvodnog procesa, minimizira i sprečava nastanka grešaka i otkaza u proizvodnji) i eksploataciju proizvoda (praćenje eksploatacije proizvoda i poređenje sa projektovanim, na osnovu čega se donose odluke i izmene na proizvodima i načinu eksploatacije, sa krajnjim ciljem povećavanja zadovoljstva kupaca).

Primena DB u dizajnu i razvoju proizvoda je jedna od najčešćih primena ove tehnologije, jer predstavlja virtuelnu prezentaciju i simulaciju postojećeg ili budućeg proizvoda. Sastoji se iz tri dela (Tao i drugi, 2019): fizičkih entiteta u fizičkom prostoru (sirovine, delova, mašinske obrade, montaže i drugih procesa), virtuelnog modela u virtuelnom prostoru (geometrijski modeli, karakteristike sirovina, proizvoda, mašina, i drugo, preslikani iz fizičkog sistema u virtuelni) i podataka koji povezuju fizički i virtuelni sistem (parametri virtuelnih modela se u procesu planiranja i realizacije proizvodnje primenjuju na stvarne fizičke proizvode, a onda se ponovnim merenjem dobijene informacije prenose ponovo u virtuelni sistem, praveći zatvorenu petlju toka informacija). Ovaj tip DB omogućava unapređeni način razvoja proizvoda, koji se sastoji iz tri faze (Roy i drugi, 2020): konceptualna faza (preuzimanje zahteva od kupaca, kao i istorijskih podataka o prodaji proizvoda), faza projektovanja (virtuelna simulacija proizvoda, kako bi se obezbedila izvodljivost proizvodnje i fleksibilnost izmena po zahtevu) i faza virtuelne verifikacije (virtuelno testiranje za proveru performansi proizvoda, predviđanje roka trajanja i kvaliteta proizvoda). Takođe, moguće je vizuelno i digitalno uporediti fizički proizvod sa digitalnim proizvodom, u cilju provere da li proizvod ispunjava zahteve kupaca (Grieves, 2014). Primenom ovog tipa DB smanjuju se greške i gubici u proizvodnji, efikasnije upravlja zalihama sirovina i gotovih proizvoda, unapređuje se planiranje proizvodnje, omogućava se unapređenje dizajna i funkcionalnosti proizvoda, i slično. Česti primeri primene DB u dizajnu i razvoju proizvoda su u automobilskoj industriji. Kompanija *Aurus* u Rusiji je koristila DB za kreiranje i verifikaciju virtuelnog prototipa automobila, kako bi simulirala analizu i testiranje fizičkog modela. Rezultat ove primene je bio smanjenje dužine ciklusa proizvodnje luksuznih modela automobila sa od pet do sedam godina, na dve godine i četiri meseca (Gromova, 2019). Kompanija *Tesla* planira da razvije DB za svaki proizvedeni model automobila, kako bi se podaci sinhrono prenosili iz automobila u fabriku, i obrnuto (Tharma, Winter & Eigner, 2018).

Unapređenje procesa proizvodnje moguće je i uporednom primenom tehnologije proširene stvarnosti i DB. Vizuelizacija podataka u DB sastoji se od pet komponenti (Zhu, Liu & Xu, 2019): fizički deo, virtuelni deo, proces kalibracije, prošireni proces i proces kontrole. Fizički deo predstavlja osnovu, i sastoji se od objekata u stvarnom fizičkom sistemu (mašina, alata, sirovina, proizvoda), dok virtuelni deo predstavlja digitalizovan fizički deo sa informacijama prikupljenim od senzora i ljudi, iz softvera i sa mašina. Kako bi model DB bio adekvatan, virtuelni deo u potpunosti mora da bude usklađen sa fizičkim delom, odnosno model DB u potpunosti mora da bude usaglašen sa odgovarajućim fizičkim modelom, što se postiže procesom kalibracije. Tako svi 3D modeli iz virtuelnog sistema imaju svoje blizance u fizičkom sistemu. U proširenom procesu, primenom tehnologije i uređaja proširene stvarnost, moguće je prikazati dodatne virtuelne objekte i informacije na već postojećem fizičkom objektu, i na taj način unaprediti operacije u proizvodnom pogonu. Ovim se omogućava da proizvodne operacije korisnicima budu jasnije, a informacije i smernice za rad pristupačnije i pravovremene. U procesu kontrole, pomoću vizualizovanih informacija iz proširenog procesa, moguće je kontrolisati postojeći fizički deo preko uređaja za proširenu

stvarnost, i donositi odluke za unapređenje postojećeg procesa ili pojedinačnih operacija.

U Daejeon-u, Južna Koreja, kreiran je DB mikro „pametne“ fabrike (eng. *Micro Smart Factory - MSF*), u cilju rešavanja problema sa pojedinačnom i personalizovanom proizvodnjom različitih tipova proizvoda (Park i drugi, 2019). Na Slici 3. je prikazan fizički oblik i DB mikro „pametne“ fabrike.



Slika 3: Mikro „pametna“ fabrika – fizički oblik (levo) i digitalni bliznac (desno)
Izvor: (Park i drugi, 2019)

DB u ovoj fabrici je sinhronizovan sa industrijskim Internetom inteligentnih uređaja (eng. *Industrial Internet of Things - IIoT*), odnosno informacije koje se dobijaju od uređaja povezanih u *IIoT* omogućavaju praćenje podataka iz fabrike u realnom vremenu, kao i korišćenje istorijskih podataka. Ti podaci se dalje koriste za predviđanje, kako bi se donosile odgovarajuće odluke, kao i za unapređenje upravljanja narudžbinama i proizvodnje po narudžbini (eng. *Make-to-Order - MTO*). Primena DB mikro „pametne“ fabrike je znatno smanjila troškove, povećala efikasnost proizvodnje, povećavajući efikasnost rada cele fabrike.

Jedan od primera primene DB je proizvodna linija dizajnirana u okviru Laboratorije Industrije 4.0 na Politehničkom fakultetu u Milanu. U pitanju je DB linije za sklapanje poklopca za mobilne telefone, na kome je vršena simulacija, kako bi se unapredio proces sklapanja. Konačni rezultat je da se proces sklapanja poklopca izvršava na sedam stanica (ručna stanica, stanica prednjeg poklopca, stanica za bušenje, robot ćelija, stanica sa kamerom, stanica zadnjeg poklopca i stanica za spajanje) i time se smanjuje broj grešaka koje nastaju u toku procesa sklapanja i ostvaruje se veća ušteda u potrošnji električne energije (Cimino, Negri & Fumagalli, 2019).

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazane osnovne karakteristike DB i primeri primene u proizvodnji. DB predstavlja jedno od savremenih tehnoloških rešenja, čijom primenom proizvodna preduzeća mogu da: unaprede i poboljšaju kontrolu proizvodnog procesa, omoguće brži odgovor na nove zahteve kupaca, unaprede razvoj i dizajn proizvoda, smanje ili spreče greške koje nastaju u toku procesa proizvodnje, smanje utrošak sirovina, kao i troškove proizvodnje, sa ciljem unapređenja poslovnih rezultata. Primena DB u proizvodnji sve

više dobija na značaju, jer omogućava unapređeno održavanje i pravovremeno praćenje rada proizvodnog sistema, kao i optimizaciju proizvodnih procesa, čime preduzeće postaje konkurentnije na tržištu. Tehnologije koje se koriste za kreiranje DB mogu se koristiti i za unapređenje i digitalizaciju proizvodnje, stoga je preporuka preduzećima u proizvodnom sektoru da implementiraju neke od savremenih tehnologija, kao i DB, za digitalizaciju procesa proizvodnje, što bi vodilo ka unapređenju procesa proizvodnje. S obzirom da implementacija DB na nivou celog preduzeća podrazumeva velika ulaganja, preduzeća iz proizvodnog sektora mogu, na početku, da kreiraju DB za onaj deo proizvodnje koji generiše najveće gubitke i troškove. Simulacijom pomoću DB mogu da se otkriju uzroci nastalih gubitaka i troškova, kao i da se pronađe odgovarajuće rešenje za njihovo otklanjanje i unapređenje procesa proizvodnje. Pravac budućih istraživanja autora ovog rada je istraživanje primene DB u preduzećima iz različitih grana proizvodne industrije. Drugi pravac budućih istraživanja je istraživanje stepena primene DB u proizvodnom sektoru u Republici Srbiji, čime bi se ustanovio nivo informisanosti preduzeća o DB, kao i nivo digitalizacije proizvodnih preduzeća.

LITERATURA

- Adamenko, D., Kunnen, S., Pluhnau, R., Loibl, A., & Nagarajah, A. (2020). Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin. *Procedia CIRP*, 91, 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.146>
- Babić, B., Višić, J., & Đermanović, A. (2020). Digitalni blizanci u pametnoj proizvodnji i industriji. *Zbornik radova 42. JUPITER Konferencija, 35. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala*.
- Boschert, S., Heinrich, C., & Rosen, R. (2018). Next generation digital twin. *Proc. Tmce, 2018*, 7-11.
- Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in industry*, 113, 103130.
- Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 1(2014), 1-7.
- Gromova, E. A. (2019). Digital economy development with an emphasis on automotive industry in Russia. *Revista Espacios*, 40(06).
- Hedberg Jr, T., Helu, M., & Sprock, T. (2018). A standards and technology roadmap for scalable distributed manufacturing systems. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 51371, p. V003T02A019). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6550>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>

- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>
- Park, K. T., Nam, Y. W., Lee, H. S., Im, S. J., Noh, S. D., Son, J. Y., & Kim, H. (2019). Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(6), 596-614. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599439>
- Polini, W., & Corrado, A. (2020). Digital twin of composite assembly manufacturing process. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5238-5252. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1714091>
- Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y., & Zhao, D. (2018). Digital twin service towards smart manufacturing. *Procedia Cirp*, 72, 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103>
- Roy, R. B., Mishra, D., Pal, S. K., Chakravarty, T., Panda, S., Chandra, M. G., Pal, A., Misra, P., Chakravarty, D., & Misra, S. (2020). Digital twin: current scenario and a case study on a manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 3691-3714. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05306-w>
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130, 103469. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
- Shao, G., & Helu, M. (2020). Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements. *Manufacturing Letters*, 24, 105-107. In: Shao, G., & Helu, M. (2020). *Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements*. *Manufacturing Letters*, 24, 105-107. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004>
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S.C.Y., & Nee, A. Y. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935-3953. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>
- Tharma, R., Winter, R., & Eigner, M. (2018). An approach for the implementation of the digital twin in the automotive wiring harness field. In DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference (pp. 3023-3032). <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0188>
- Zacher, S. (2020). Digital twins for education and study of engineering sciences. *International Journal on Engineering, Science and Technology*, 2(2), 61-69. <https://doi.org/10.46328/ijonest.40>
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., & Perona, M. (2021). The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1922-1954. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>
- Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10, 1141-1153. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3>