

Originalni članak

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17534776>

SIMULACIONA ANALIZA UTICAJA UPRAVLJAČKIH FAKTORA NA PERFORMANSE VIŠEFAZNOG PROIZVODNOG SISTEMA POD POLCA KONTROLOM

SIMULATION ANALYSIS OF THE IMPACT OF CONTROL FACTORS ON THE PERFORMANCE OF A MULTI-STAGE PRODUCTION SYSTEM UNDER POLCA CONTROL

NEMANJA TULIMIROVIĆ¹, IVAN TOMAŠEVIĆ², MARIJA ĆIRIĆ³, DRAGOSLAV SLOVIĆ⁴

¹ Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, nemanja.tulimirovic@fon.bg.ac.rs,  0009-0008-9722-6108

² Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, ivan.tomasevic@fon.bg.ac.rs,  0000-0003-4416-9695

³ Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, marijaciric20@gmail.com,  0009-0007-6981-997X

⁴ Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, dragoslav.slovic@fon.bg.ac.rs,  0000-0001-7803-6466

Rezime: Ovaj rad analizira dvofazni proizvodni sistem koji se odlikuje proizvodnjom širokog asortimana u malim obimima (High-Mix Low-Volume, HMLV), pod kontrolom POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) sistema za upravljanje materijalnim tokom. Simulacija je korišćena u cilju analize uticaja četiri pravila prioritizacije poslova i dva tipa POLCA kartica na četiri performanse sistema pri šest različitih nivoa zaliha nedovršene proizvodnje (Work-In-Progress, WIP). Rezultati pokazuju da pravila prioritizacije imaju značajan uticaj na performanse: pravilo SPT (Shortest Processing Time) minimizuje vremena ciklusa, ali dovodi do većih kašnjenja dužih porudžbina. ERD (Earliest Release Date) i MERD (Modified Earliest Release Date) pružaju bolji balans između efikasnosti i tačnosti isporuka, dok FCFS (First-Come-First-Served) daje stabilne, ali prosečne rezultate. Tip POLCA kartice po jedinici uglavnom ostvaruje bolje rezultate u pogledu ukupnog vremena ciklusa i procenta kašnjenja. Povećanje WIP-a generalno poboljšava performanse do određene granice, nakon koje efekti i razlike kod određenih mera postaju manje izražene. Sa stanovišta praktične primene, strategija upravljanja treba biti usklađena sa operativnim ciljevima i karakteristikama proizvodnog sistema, uz odabir one kombinacije pravila, tipa POLCA kartice i nivoa WIP-a koja najviše odgovara zahtevima posmatranog sistema.

Ključne reči: POLCA, simulacija diskretnih događaja, proizvodnja, HMLV.

Abstract: This paper analyzes a two-stage production system within a High-Mix Low-Volume (HMLV) environment, controlled using the POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) system for material flow management. Simulation is used to examine the impact of four job prioritization rules and two types of POLCA cards on four system performance measures across six different WIP (Work-In-Progress) levels. Results show that prioritization rules significantly affect performance: SPT (Shortest Processing Time) minimizes cycle times but increases delays for longer jobs. ERD (Earliest Release Date) and MERD (Modified ERD) provide a better balance between efficiency and due-date adherence, while FCFS (First-Come-First-Served) yields stable but average results. Unit-based POLCA cards generally outperform load-based ones in terms of cycle time and tardiness. Increasing WIP improves performance up to a point, beyond which the gains diminish. In practice, the choice of rule, card type, and WIP level should align with the system's operational goals and characteristics.

Keywords: POLCA, Discrete-Event Simulation, manufacturing, HMLV.

1. UVOD

Savremeni proizvodni sistemi koji posluju u okviru HMLV okruženja suočavaju se sa sve većim izazovima u pogledu fleksibilnosti, efikasnosti i tačnosti isporuka. Kao odgovor, posebnu pažnju privlače *pull* pristupi koordinacije i kontrole materijalnog toka, koji kroz regulaciju zaliha nedovršene proizvodnje omogućavaju efikasnost i otpornost sistema na varijacije. POLCA predstavlja *pull* sistem kontrole materijalnog toka razvijen u okviru *Quick Response Manufacturing* pristupa, sa ciljem primarne primene u

HMLV okruženjima (Riezebos, 2010; Suri, 1998). Zbog mogućnosti lokalne kontrole WIP-a i prilagođavanja kapaciteta stvarnim uslovima u proizvodnji, POLCA se navodi kao efikasna alternativa upravljanja materijalnim tokom (Thürer et al., 2017, 2019; Vandaele et al., 2008). Pri primeni POLCA sistema, posebnu pažnju treba posvetiti izboru pravila prioritizacije poslova, jer odabir odgovarajućeg pravila može imati značajan uticaj na performanse posmatranog sistema (Carmo-Silva et al., 2020; Fernandes et al., 2017; Thürer et al., 2017, 2019). Ipak, većina postojećih istraživanja usmerena je na jednofazne konfiguracije sistema, dok primena POLCA u složenijim sistemima ostaje manje istražena. Kao rezultat, nameće se pitanje kakve rezultate POLCA ostvaruje u višefaznim sistemima, gde su tokovi materijala međuzavisni, a koordinacija između proizvodnje i montaže znatno zahtevnija (Thürer et al., 2013; Fernandes et al., 2020). Shodno tome, u ovom radu se analizira dvofazni proizvodni sistem pod POLCA kontrolom materijalnog toka. Postavljena su sledeća istraživačka pitanja:

- Kako bi se sistem ponašao pri primeni naprednijih pravila odlučivanja o dodeli POLCA kartica i izboru poslova za obradu (pravila prioritizacije poslova) u fazi montaže?
- Kakav je uticaj tipa POLCA kartice i tih pravila, pri različitim nivoima WIP-a, na performanse sistema?

U cilju dobijanja odgovora na ova pitanja, sproveden je simulacioni eksperiment kojim se kvantitativno ispituje kombinovani uticaj navedenih upravljačkih faktora (pravila prioritizacije, tipa POLCA kartice i nivoa WIP) na performanse dvofaznog POLCA proizvodnog sistema. Dalja struktura rada je sledeća: u poglavlju 2 prikazan je teorijski okvir kroz pregled relevantne literature. Poglavlje 3 pruža opis proizvodnog sistema i simulacionog eksperimenta. U poglavlju 4 analizirani su dobijeni rezultati. Konačno, poglavlje 5 sumira zaključke, praktične implikacije i predlaže pravce daljih istraživanja.

2. TEORIJSKI OKVIR

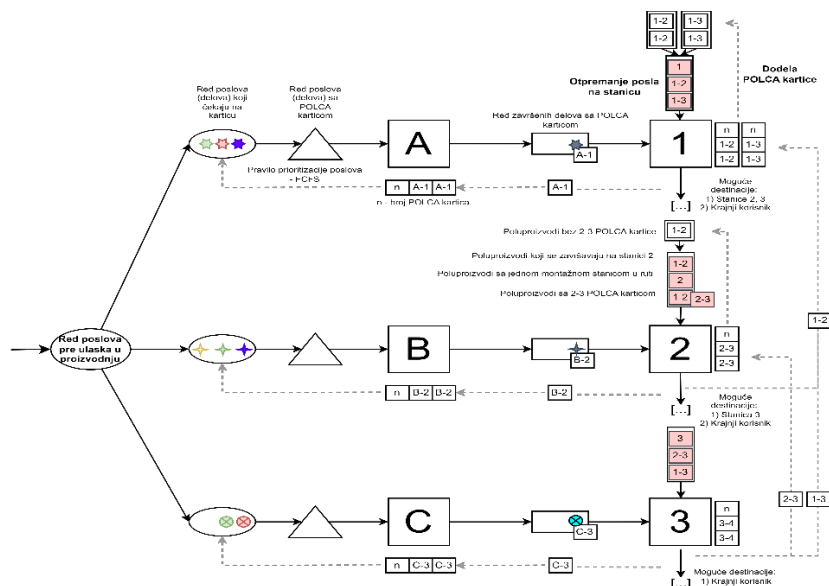
Većina simulacionih istraživanja o POLCA kontroli sprovedena je u jednostavnim jednofaznim proizvodnim sistemima koji pretpostavljaju snabdevenost radnih stanica svim potrebnim materijalima i delovima (Carmo-Silva et al., 2020; Riezebos, 2010; Thürer et al., 2017, 2019; Vandaele et al., 2008). Takvi modeli, iako korisni za razumevanje ponašanja POLCA mehanizma kontrole, ne oslikavaju u potpunosti složenost HMLV sistema u kojima je proizvodnja često organizovana u više faza, sa jasno razdvojenim etapama proizvodnje delova i montaže. U tim uslovima, izazovi koordinacije i kontrole materijalnog toka postaju znatno izraženiji (Thürer et al., 2013), pa višefazne konfiguracije predstavljaju pogodan okvir za proučavanje i analizu POLCA pristupa. U tom pravcu, Fernandes et al. (2020) proširuju model predložen od strane Thürer et al. (2019) i analiziraju dvofazni sistem pod POLCA kontrolom, poredeći ga sa *Immediate Release* pristupom. Međutim, analiza je ograničena na jednostavno FCFS pravilo, primenjeno kroz integrisano odlučivanje, gde se se dodela kartica i izbor posla za obradu obavljaju istovremeno, u trenutku kada stanica postane slobodna.

3. SIMULACIONI MODEL

U ovom poglavlju opisan je simulacioni model proizvodnog sistema pod POLCA kontrolom, uključujući njegovu strukturu, postavke simulacionog eksperimenta i mere performansi.

3.1. Opis proizvodnog sistema

Proizvodni sistem obuhvata dve faze: proizvodnju (stanice A, B, C) i montažu (stanice 1, 2, 3), pri čemu svaka proizvodna stanica opslužuje tačno jednu montažnu stanicu time formirajući parove: A–1, B–2, i C–3. Montažna faza predstavlja *general flow shop* sistem sa usmerenim tokom i mogućnošću preskakanja stanica. Po dolasku posla u sistem, unapred se određuju njegova ruta u fazi montaže, vremena obrade na svim stanicama, zahtevani rok završetka i podskup delova koje je potrebno proizvesti na odgovarajućim proizvodnim stanicama. POLCA se koristi za kontrolu i koordinaciju toka između proizvodnih i montažnih stanica, kao i između montažnih stanica. U sistemu postoji ukupno šest POLCA petlji a maksimalni dozvoljeni nivo WIP u svakoj petlji određen je brojem POLCA kartica. Za početak proizvodnje dela na proizvodnoj stanici, potrebna je dostupnost odgovarajuće POLCA kartice (npr. A-1 za proizvodnju na stanici A). Deo se nakon proizvodnje šalje na zalihe delova ispred odgovarajuće montažne stanice, a kartica se oslobađa tek nakon ugradnje tog dela na montažnoj stanici. Kada se proizvede deo koji je potreban za prvu montažnu stanicu u ruti proizvoda, posao se pušta u fazu montaže i inicira se zahtev za odgovarajućom POLCA karticom koja omogućava njegov ulazak na tu stanicu. Nakon što posao dobije karticu i stanica postane slobodna, započinje operacija montaže. Kartice između montažnih stanica oslobađaju se nakon završetka montaže na narednoj stanici u ruti posla. Detaljan prikaz sistema dat je na Slici 1.



Slika 1: Grafički prikaz proizvodnog sistema

3.2. Tipovi POLCA kartica i pravila prioritizacije poslova u fazi montaže

U modelu su analizirana dva tipa POLCA kartica: (a) POLCA kartice po jedinici (tzv. *unit-based* POLCA) gde svaka kartica predstavlja jedan posao, bez obzira na dužinu ili složenost obrade, i (b) POLCA kartice po opterećenju (tzv. *load-based* POLCA) gde jedna kartica odgovara opterećenju izraženom kao vreme obrade na sledećoj stanici u ruti posla.

Dodela POLCA kartice i izbor posla za obradu na radnoj stanici sprovode se kao dve nezavisne odluke. Posebno se odlučuje kom poslu će biti dodeljena slobodna POLCA kartica, a potom se nakon oslobađanja radne stanice, između poslova koji već poseduju karticu odlučuje koji će imati prioritet obrade. U oba slučaja koristi se isto pravilo prioritizacije. Primenjena pravila su FCFS, SPT, ERD i MERD. Pravilo FCFS daje prioritet poslu koji je najduže čekao. U fazi proizvodnje se uvek primenjuje FCFS pravilo, nezavisno od pravila koje se koristi u fazi montaže. Pravilo SPT daje prednost poslu sa najkraćim vremenom obrade. Kod dodele kartica gleda se vreme obrade na narednoj stanici u ruti posla. Kod redosleda obrade gleda se vreme obrade na tekućoj stanici. Pravilo ERD daje prednost poslu čiji je planirani datum puštanja u obradu (ERD) najraniji. U ovom modelu, ERD posla za svaku montažnu stanicu procenjuje se tako što se od roka završetka posla oduzima suma planiranih vremena obrade na svim narednim montažnim stanicama kroz koje posao tek treba da prođe. Time se dobija najraniji trenutak kada bi posao trebao da započne obradu na tekućoj stanici kako bi završio na vreme. ERD se u ovom modelu koristi isključivo kao pravilo za određivanje prioriteta, bez stvarnog odlaganja obrade do tog trenutka, budući da je pokazano da takvo čekanje može negativno uticati na performanse sistema (Thürer et al., 2019). Kod pravila MERD poslovi se najpre razvrstavaju u dve grupe: (1) poslovi kojima je istekao ERD, koje se smatraju hitnim, i (2) poslovi kojima ERD još nije istekao. Prednost imaju hitni poslovi, koje se dalje rangiraju prema pravilu SPT. Ukoliko nema hitnih poslova, rangiranje se vrši među manje hitnim poslovima prema ERD pravilu. Kod POLCA kartica po opterećenju, pri dodeli kartica se najpre izdvajaju poslovi čije vreme obrade na narednoj stanici ne prelazi raspoloživi kapacitet (izuzetak je FCFS pravilo), a zatim se primenjuje odgovarajuće pravilo prioritizacije. Ovo filtriranje se ne primenjuje kod kartica po jedinici, jer svaka kartica predstavlja jedan posao.

3.3. Postavke simulacionog eksperimenta i mere performansi

Vreme između dolaska poslova u sistem podleže eksponencijalnoj raspodeli sa prosečnom vrednošću od 0,634 jedinice vremena, što obezbeđuje prosečan stepen iskorišćenosti radnih stanica od 90%. Vremena trajanja operacija proizvodnje i montaže podležu skraćenoj Erlangovoj raspodeli drugog reda, sa prosečnom vrednošću od 1 i maksimalnom vrednošću od 4 jedinice vremena. U vremena trajanja operacije uključeno je i vreme podešavanja stanice, dok se vreme transporta zanemaruje u skladu sa standardnom praksom u sličnim simulacionim radovima. Svakom poslu se po dolasku u sistem nasumično dodeljuje ruta u fazi montaže montaže iz skupa: {(1), (2), (3), (1, 2), (1, 3), (1, 2, 3)}. Zahtevani rok isporuke određuje se dodavanjem vremenskog dodatka, koji predstavlja slučajnu promenljivu uniformno raspoređenu između 35 i 50 jedinica vremena, na vremenski trenutak dolaska posla u sistem. Radi ispitivanja uticaja različitih pristupa

upravljanju na mere performansi, posmatrani su efekti tri upravljačka faktora: (i) dva tipa POLCA kartica (po jedinici ili prema radnom opterećenju), (ii) šest nivoa WIP u svakoj POLCA petlji, izražen u jedinicama dostupnih kartica (sa vrednostima 18, 20, 22, 24, 26, i 28) i (iii) četiri pravila prioritizacije poslova u fazi montaže (FCFS, SPT, ERD, i MERD). U pitanju je potpun faktorski dizajn sa $2 \times 6 \times 4$ jedinstvenih kombinacija faktora tj. 48 scenarija. Svaki scenario simuliran je kroz 100 nezavisnih replikacija radi smanjenja uticaja stohastičkih odstupanja i obezbeđivanja statističke pouzdanosti rezultata. Svaka replikacija trajala je 40.000 jedinica vremena, pri čemu je prvih 4.000 jedinica tretirano kao period stabilizacije sistema (*warm-up period*), a prikupljanje rezultata vršeno je u preostalom delu vremena. Na kraju simulacije, izračunati su prosečni rezultati za svaki scenario. Za analizu performansi sistema korišćena su četiri pokazatelja: (i) prosečno ukupno vreme ciklusa (*Mean Total Throughput Time* - MTT), (ii) prosečno vreme ciklusa montaže (*Mean Assembly Throughput Time* - MAT), (iii) procenat zakasnelih porudžbina (*Percentage of Tardy Orders* - PTO) i (iv) prosečno vreme kašnjenja (*Mean Tardiness* - MTD). Za razliku od drugih sličnih simulacionih studija u kojima je pokazatelj (ii) korišćen kao pomoćna mera (Fernandes et al., 2020), u ovom radu posmatra se kao glavna mera performansi jer omogućava izolovano posmatranje efikasnosti faze montaže, čime se preciznije identifikuje uticaj faktora na drugu fazu proizvodnog sistema.

3.4. Programska realizacija simulacionog modela

Simulacioni model je razvijen u programskom jeziku *Python* korišćenjem *SimPy* biblioteke za simulaciju diskretnih događaja. Implementiran je kroz objektno-orijentisani pristup sa tri glavne klase: (1) *POLCAConfig* koja definiše parametre simulacije (prosečno vreme između dolaska poslova, trajanje simulacije, nivo WIP, tip POLCA kartice i pravilo prioritizacije); (2) *Order* koja definiše poslove i čuva njihove attribute (rutu, vremena obrade na svim stanicama, zahtevani rok isporuke, ERD, trenutak dolaska i završetka posla, itd.); i (3) glavne klase *POLCASimulator* koja inicijalizuje simulaciono okruženje (*simpy.Environment*), proizvodne (*simpy.Resource*) i montažne stanice (*simpy.PriorityResource*) kao i POLCA petlje i nivoe raspoloživih kartica. Ova klasa sadrži glavne procese realizovane kroz metode: *source()* za generisanje poslova, *part_proc()* za obradu delova u proizvodnji i *order_proc()* za montažni proces. Pored toga, uključuje i pomoćne metode: *allocate()* za dodelu kartica uz primenu zadatog pravila prioritizacije, *need_load()* za određivanje radnog opterećenja shodno tipu POLCA kartice, *compute_erd()* za izračunavanje vrednosti ERD, *run()* za pokretanje simulacije i *report()* prikupljanje rezultata. Klasa *POLCASimulator* koristi parametre definisane u *POLCAConfig* i upravlja tokom svih poslova (instanci klase *Order*) kroz sistem, uključujući njihovu obradu, dodelu POLCA kartica i prikupljanje rezultata.

4. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju analizirani su prikupljeni rezultati i statistička značajnost uticaja faktora na performanse sistema.

4.1. Efekti faktora i međusobne interakcije (ANOVA)

Za statističku analizu rezultata sprovedena je trofaktorska ANOVA kako bi se procenio uticaj faktora na mere performansi. Nivo značajnosti testa iznosio je $\alpha = 0,05$. Rezultati su prikazani u Tabeli 1.

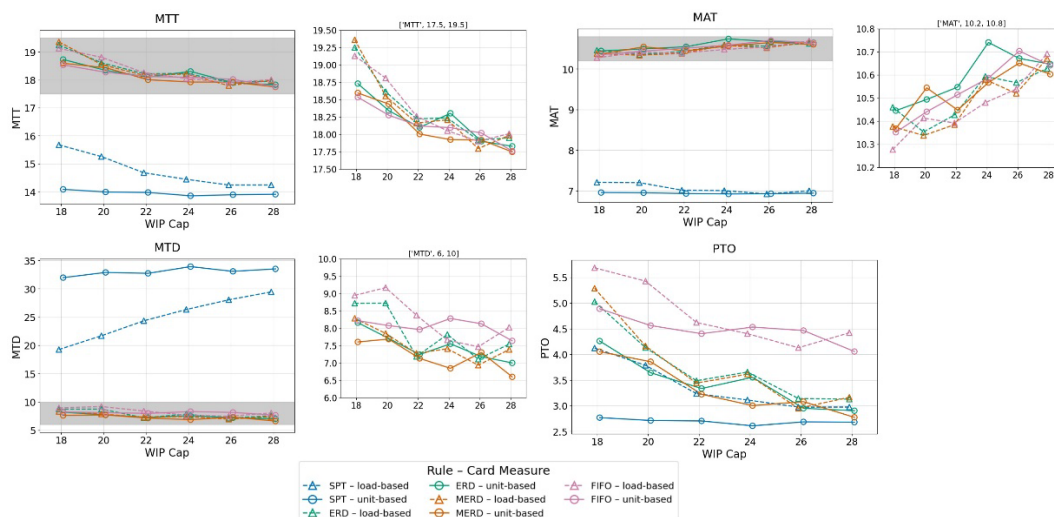
Tabela 1: ANOVA izveštaj

	Source of variance	Sum of Squares	df	F	p-value
Mean Total Throughput Time (MTT)	C(rule)	13628,26	3	4446,44	0,00
	C(card_measure)	152,58	1	149,35	0,00
	C(wip_cap)	583,41	5	114,21	0,00
	C(rule):C(card_measure)	79,82	3	26,04	0,00
	C(rule):C(wip_cap)	16,69	15	1,09	0,36
	C(card_measure):C(wip_cap)	89,48	5	17,52	0,00
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	29,55	15	1,93	0,02
	Residual	4844,71	4742		
Mean Assembly Throughput Time (MAT)	C(rule)	11098,50	3	15453,95	0,00
	C(card_measure)	0,67	1	2,80	0,09
	C(wip_cap)	20,00	5	16,71	0,00
	C(rule):C(card_measure)	8,27	3	11,51	0,00
	C(rule):C(wip_cap)	23,99	15	6,68	0,00
	C(card_measure):C(wip_cap)	3,34	5	2,79	0,02
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	4,68	15	1,30	0,19
	Residual	1135,18	4742		
Percentage of Tardy Orders (PTO)	C(rule)	1614,85	3	226,46	0,00
	C(card_measure)	222,28	1	93,52	0,00
	C(wip_cap)	926,47	5	77,96	0,00
	C(rule):C(card_measure)	26,56	3	3,73	0,01
	C(rule):C(wip_cap)	118,20	15	3,32	0,00
	C(card_measure):C(wip_cap)	134,37	5	11,31	0,00
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	40,55	15	1,14	0,32
	Residual	11271,28	4742		
Mean Tardiness (MTD)	C(rule)	405121,40	3	16862,92	0,00
	C(card_measure)	3843,57	1	479,96	0,00
	C(wip_cap)	300,35	5	7,50	0,00
	C(rule):C(card_measure)	15993,87	3	665,73	0,00
	C(rule):C(wip_cap)	5041,41	15	41,97	0,00
	C(card_measure):C(wip_cap)	498,53	5	12,45	0,00
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	2535,17	15	21,10	0,00
	Residual	37974,55	4742		

Rezultati ANOVA testa pokazuju da skoro svi glavni faktori imaju statistički značajan uticaj na sve mere performansi. Izuzetak je uticaj tipa POLCA kartice na MAT, čiji efekat nije statistički značajan. Pored pojedinačnih uticaja, značajna je i većina dvofaktorskih interakcija, naročito između pravila i tipa POLCA kartice, kao i pravila i nivoa WIP-a. Trofaktorska interakcija značajna je kod MTT i MTD, što sugerise da se kod ovih mera istovremeno mora razmatrati kombinovani uticaj svih faktora.

4.2 Analiza glavnih trendova i uticaja faktora na performanse

Grafički prikazi na Slici 2 ilustruju promene performansi sistema u zavisnosti od nivoa WIP-a, pri čemu su prikazane sve kombinacije pravila prioritizacije i tipova POLCA kartica.



Slika 2: Prosečni rezultati po merama performansi

Pravila prioritizacije: Pravila prioritizacije u fazi montaže imaju značajan uticaj na sve performanse sistema. Primena SPT pravila dovodi do najnižih vrednosti MTT i MAT, što ukazuje na visoku efikasnost sistema, pogotovo u kombinaciji sa POLCA karticama po jedinici. Međutim, zanemarivanje rokova rezultira visokim vrednostima MTD, usled čestog odlaganja poslova sa dužim vremenima obrade, uprkos tome što PTO ostaje nizak. Nasuprot tome, ERD i MERD omogućavaju bolju kontrolu kašnjenja, pri čemu MERD dodatno daje prednost hitnim poslovima, smanjujući verovatnoću da budu potisnuti u redovima od strane manje hitnih naloga. Efekti ovih pravila postaju posebno izraženi pri višim nivoima WIP-a, gde uspešno ostvaruju balans između efikasnosti, tačnosti isporuka i prosečnog kašnjenja. Pravilo FCFS, iako konceptualno najjednostavnije, daje stabilne ali prosečne rezultate u svim merama. Ne favorizuje ni kratke ni hitne poslove, čime doprinosi ujednačenosti tretmana, ali bez optimizacije bilo koje mere performansi.

Tip POLCA kartice: POLCA kartice po jedinici omogućavaju brži ulazak porudžbina u sistem što se odražava kroz niže vrednosti MTT, PTO i MTD u odnosu na POLCA kartice po opterećenju. S druge strane kartice po opterećenju uvode precizniju kontrolu kapaciteta, jer veliki poslovi zahtevaju više raspoloživog kapaciteta. U takvim situacijama, mali poslovi brže dolaze na red, dok se veliki nalozi akumuliraju i čekaju, što povećava verovatnoću za kašnjenjem i produžava ukupno vreme prolaska kroz sistem, naročito pri nižim nivoima WIP. Efekat ovakvog “zagušenja” vidljiv je kod FCFS pravila u kombinaciji sa POLCA karticama po opterećenju, gde se visoke vrednosti MTD i PTO jasno uočavaju. Izuzetak je SPT pravilo u kombinaciji sa karticama po jedinici, koje pri povećanju WIP-a dovodi do rasta MTD. Ovaj efekat posledica je sve veće dominacije kratkih poslova u redovima, usled čega duži nalozi ostaju blokirani i akumuliraju kašnjenje. Kod kartica po opterećenju ovaj problem je delimično ublažen, jer sistem filtrira ulaz na osnovu trajanja obrade, što omogućava dugim porudžbinama da uđu u sistem tek kada zaista postoji raspoloživ kapacitet i brže dođu na red za obradu.

Nivo WIP: Povećanje broja dostupnih POLCA kartica u celini doprinosi poboljšanju performansi sistema. Vrednosti MTT, PTO i MTD opadaju sa rastom WIP-a, što je očekivano s obzirom na veću protočnost i manju verovatnoću čekanja na slobodne kartice. Pri višim nivoima WIP-a razlike između pravila postaju manje izražene i rezultati konvergiraju ka sličnim vrednostima. Izuzetak predstavljaju pravilo SPT, koje i dalje pokazuje niže vrednosti MTT, MAT i više vrednosti MTD, kao i pravilo FCFS, koje se izdvaja po vrednostima PTO. Kod većine pravila, vrednosti MAT rastu sa WIP-om, što ukazuje na veće zadržavanje u montažnoj fazi zbog povećane dužine redova, ali ne nužno i na degradaciju performansi sistema kao celine.

5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirane su performanse dvofaznog proizvodnog sistema pod POLCA kontrolom. Na taj način proširen je opseg dosadašnjih istraživanja POLCA sistema (Carmo-Silva et al., 2020; Riezebos, 2010; Thüerer et al., 2017, 2019; Vandaele et al., 2008), koja su se pretežno fokusirala na jednostavne jednofazne konfiguracije ili su bila ograničena na jednostavna pravila prioritizacije poslova, poput integrisanog FCFS pravila (Fernandes et al., 2020). Uvođenjem tri dodatna pravila prioritizacije (SPT, ERD, MERD) i tretiranjem dodele POLCA kartice i izbora posla za obradu kao dve odvojene odluke, složenost sistema je dodatno povećana. Postavljena su sledeća istraživačka pitanja: (1) Kako bi se sistem ponašao pri primeni naprednijih pravila odlučivanja o dodeli POLCA kartica i izboru poslova (pravila prioritizacije poslova) za obradu u fazi montaže? (2) Kakav je uticaj tipa POLCA kartice i tih pravila, pri različitim nivoima WIP-a, na performanse sistema?

Rezultati simulacije pokazuju da izbor pravila značajano utiče na performanse sistema. Pravilo SPT daje ubedljivo najniža vremena ciklusa, ali uz veća kašnjenja manjeg broja porudžbina sa dužim vremenom obrade. Stoga, SPT se preporučuje za okruženja gde je brzina protoka prioritet. Nasuprot tome, pravila ERD i MERD postižu bolji balans između efikasnosti i tačnosti isporuka, posebno pri visokom WIP-u, što ih čini pogodnim za sisteme osetljive na kašnjenja i fokusirane na zadovoljstvo kupaca. Pravilo FCFS može biti jednostavna opcija za sisteme gde se očekuje ravnomeran tretman porudžbina i veća otpornost na varijacije. Tip POLCA kartice, u kombinaciji sa pravilima prioritizacije, ostvaruje značajan uticaj na performanse, pri čemu kartice po jedinici, u većini scenarija, rezultiraju nižim ukupnim vremenom ciklusa i manjim procentom kašnjenja u odnosu na kartice po opterećenju. Povećanje broja dostupnih kartica (WIP) u većini slučajeva dovodi do poboljšanja performansi. Međutim, kako se WIP približava najvišim nivoima, razlike između pravila postaju manje izražene, uz izuzetak SPT pravila koje zadržava specifična odstupanja u vremenima ciklusa i kašnjenja. Imajući u vidu sve prethodno, zaključuje se da izbor strategije upravljanja treba prilagoditi operativnim ciljevima i karakteristikama sistema, uz uvažavanje međuzavisnosti između pravila, tipa kartice i nivoa WIP-a. Glavno ograničenje rada je oslanjanje na simulaciju idealizovanog proizvodnog sistema, pa je za validaciju rezultata neophodno sprovesti dodatna empirijska istraživanja. Budući rad može obuhvatiti proširenje modela na konfiguracije sa više faza sa većim brojem radnih stanica, ili drugačijom logikom toka materijala, kao poređenje sa drugim pristupima kontrole materijalnog toka.

LITERATURA

- Carmo-Silva, S., Fernandes, N., Thüerer, M., & Ferreira, L. P. (2020). Extending the POLCA production control system with centralized job release. *Production*, 30, e20190159. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20190159>
- Fernandes, N. O., Thüerer, M., Mirzaei, N., Ferreira, L. P., Silva, F. J. G., & Carmo-Silva, S. (2020). POLCA Control in Two-Stage Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 51, 1491–1496. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.207>
- Fernandes, N. O., Thüerer, M., Stevenson, M., & Carmo Silva, S. (2017). Load-Based POLCA: An Assessment of the Load Accounting Approach. In Á. Rocha, A. M. Correia, H. Adeli, L. P. Reis, & S. Costanzo (Eds.), *Recent Advances in Information Systems and Technologies* (Vol. 570, pp. 397–405). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56538-5_40
- Riezebos, J. (2010). Design of POLCA material control systems. *International Journal of Production Research*, 48(5), 1455–1477. <https://doi.org/10.1080/00207540802570677>
- Suri, R. (1998). *Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times*. Productivity Press.
- Thüerer, M., Fernandes, N. O., Carmo-Silva, S., & Stevenson, M. (2017). Improving performance in POLCA controlled high variety shops: An assessment by simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.05.006>
- Thüerer, M., Fernandes, N. O., Stevenson, M., Silva, C., & Carmo-Silva, S. (2019). POLC-A: An assessment of POLCA's authorization element. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(6), 2435–2447. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1402-2>
- Thüerer, M., Stevenson, M., Silva, C., Land, M., & Filho, M. G. (2013). Workload control and order release in two-level multi-stage job shops: An assessment by simulation. *International Journal of Production Research*, 51(3), 869–882. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.676685>
- Vandaele, N., Van Nieuwenhuyse, I., Claerhout, D., & Cremmery, R. (2008). Load-Based POLCA: An Integrated Material Control System for Multiproduct, Multimachine Job Shops. *Manufacturing & Service Operations Management*, 10(2), 181–197. <https://doi.org/10.1287/msom.1070.0174>