

Primjena umjetne inteligencije u grafičkoj tehnologiji

Zdenka Bolanča¹, Ivana Bolanča Mirković^{1,2}

¹Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Kačićeva 28, 10000 Zagreb

²Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, Getaldićeva 2, 10000 Zagreb

Sažetak: U radu se diskutira primjena umjetne inteligencije (UI) u konvencionalnom i digitalnom tisku kroz radni proces, pripremu tiska, tisak, doradu i kontrolu kvalitete. UI tehnologije koje se koriste u toj domeni su: algoritmi, neuronske mreže, računalni vid, generativni modeli i prediktivna analitika. Značajna područja primjene umjetne inteligencije u grafičkoj tehnologiji su: obrada i priprema slike, DTP i automatizacija pripreme za tisak, upravljanje bojom i kontrola kvalitete, automatizacija proizvodnje i optimizacija procesa, te personalizirani tisak. Može se zaključiti da se s obzirom na razvoj tehnologija očekuju pozitivni trendovi u domeni grafičke tehnologije i umjetne inteligencije u području ambalaže, razvoju hibridnih sustava i održivosti, jer umjetna inteligencija pomaže smanjenju otpada, optimizaciji materijala i energetske resursa.

Ključne riječi: umjetna inteligencija, grafička tehnologija, UI tehnologije, inovacija

1. Uvod

Prema ISO/IEC standardu umjetna inteligencija (UI) je sposobnost sustava da za zadane ciljeve donosi predviđanja, preporuke i odluke [1]. Praktična primjena UI definira se kao sustav koji simulira kognitivne procese, učenje i zaključivanje, omogućujući automatizaciju, poboljšanje specifičnih procesa i operativnu učinkovitost. Sustavi uče iz podataka, a dobiveni rezultat je u obliku predviđanja, preporuke ili odluke.

Umjetna inteligencija predstavlja jedno od ključnih područja suvremene informacijsko-komunikacijske tehnologije i računalnih znanosti. U znanstvenoj se literaturi najčešće definira kao područje koje se bavi razvojem računalnih sustava sposobnih za izvođenje zadataka koji uobičajeno zahtijevaju ljudsku inteligenciju, uključujući percepciju, učenje, zaključivanje, donošenje odluka i rješavanje problema. Prema Russellu i Norvigu, umjetna inteligencija obuhvaća sustave koji mogu razmišljati i djelovati racionalno na temelju dostupnih informacija iz okoline [2].

Suvremeni autori dodatno naglašavaju da umjetna inteligencija nije samo tehnički fenomen, već i sociotehnički sustav ugrađen u organizacijski i društveni kontekst. UI se danas promatra kao skup algoritamskih, podatkovnih i računalnih struktura koje omogućuju automatizaciju kognitivnih funkcija u realnim uvjetima, pri čemu njezina vrijednost proizlazi iz praktične primjene i interakcije s ljudskim korisnicima [3, 4]. U tom kontekstu, umjetna inteligencija se definira kao temeljna tehnologija digitalne transformacije, s potencijalom velikog utjecaja na gospodarstvo, društvo i način rada organizacija.

Primjena UI sustava danas je prisutna u gotovo svim sektorima društva, uključujući industriju, zdravstvo, financije, obrazovanje, logistiku, marketing i javnu upravu. U domeni industrije UI omogućuje prediktivno održavanje, optimizaciju proizvodnih procesa u realnom vremenu, autonomno upravljanje procesima, analizu velikog skupa podataka [5].

U energetsom sektoru izazovi su dekarbonizacija i digitalizacija, a bitne stavke su rješavanje problematike vezane uz klimatske promjene u kombinaciji sve većom složenosti modernih energetskih sustava što zahtijeva inovativne pristupe [6]. Umjetna inteligencija se može koristiti u ovoj domeni putem napredne analize podataka, autonomnog donošenja odluka i prediktivnog modeliranja. Zhang i Štrbac ističu prednost UI u području optimizacije upravljanja energijom, koordiniranog rada distributivnih resursa i jačanja otpornosti sustava na poremećaje i vanjske uvjete, te smanjenje operativnih troškova [7]. Ovakve primjene pokazuju kako UI osim što rješava tehničke izazove omogućuje nove načine upravljanja resursima s ciljem povećanja pouzdanosti, održivosti i učinkovitosti tehnološkog sustava, smanjuje operativne troškove i povećava autonomiju sustava u realnom vremenu.

Osim navedenog, umjetna inteligencija nudi transformacijski potencijal primjenljiv od tehnološke implementacije do primjena u industriji i društvu kako slijedi: tehnologija, zdravstvo, astronomija, obrazovanje, robotika, transport, automobili, ekonomija, trgovina, sigurnost podataka, zabava i igre [8-15].

Metode umjetne inteligencije su višebrojne. Strojno učenje predstavlja temeljnu metodološku osnovu suvremene UI [16]. Obrada velikih skupova podataka omogućuje UI sustavima ekstrakciju znanja iz strukturiranih i nestrukturiranih izvora, a ključna je za donošenje odluka u složenim digitalnim okruženjima [17, 18]. Integracija UI s robotikom omogućuje razvoj autonomnih robotskih sustava koji mogu percipirati okolinu, planirati akcije i samostalno izvršavati zadatke, a ključna uloga je u industriji 5.0, pametnim tvornicama i logistici [19]. Strojni vid (engl. *machine vision*) omogućuje računalima analizu i interpretaciju vizualnih podataka iz slika i videozapisa, a jedna od primjena uključuje autonomna vozila [20]. Neuronske mreže, osobito one duboke, omogućuju modeliranje kompleksnih nelinearnih odnosa u podacima i temelj su suvremenih aplikacija [21].

Razvoj UI obilježen je inovacijama u algoritmima, računalnoj arhitekturi i dostupnosti podataka. Napredak u grafičkim procesima, računalstvu u oblaku i jezičnim modelima doveo je do eksponencijalnog rasta sposobnosti UI sustava [4]. Umjetna inteligencija se sve više razvija kao generička tehnologija opće namjene s dugoročnim transformacijskim učinkom na društvo [22].

Umjetna inteligencija omogućuje nove poslovne modele temeljene na automatizaciji procesa, personalizaciji usluga i podatkovnoj ekonomiji. U kontekstu održivog razvoja UI doprinosi optimizaciji potrošnje resursa, energetske učinkovitosti i pametnom upravljanju sustavima [23].

Organizacije koriste UI za postizanje konkurentske prednosti kroz inovacije i digitalnu transformaciju.

Prihvatanje UI ovisi o percepciji korisne vrijednosti, jednostavnosti uporabe, povjerenju u sustav, transparentnosti algoritama i etičkim aspektima. Empirijska istraživanja pokazuju da organizacije češće prihvaćaju UI kada postoji jasna poslovna korist, regulatorna podrška i dostupnost stručnih znanja [24].

U digitalnom dobu UI postaje strateški resurs. Organizacije je koriste za unapređenje donošenja odluka, digitalnu transformaciju, automatizaciju poslovnih procesa, razvoj inteligentnih digitalnih platformi.

Umjetna inteligencija se promatra kao ključni element dugoročne organizacijske strategije i izvor održive konkurentske prednosti [24].

Umjetna inteligencija ima ključnu ulogu u postizanju ciljeva održivog razvoja, jer omogućuje učinkovitije upravljanje resursima, optimizaciju energetske sustava te smanjuje negativnog utjecaja na okoliš. U znanstvenoj literaturi UI se prepoznaje kao snažan alat za podršku održivosti kroz pametno upravljanje energijom, optimizaciju logističkih lanaca, prediktivnim održavanjem i smanjenjem otpada [25]. Primjena UI omogućuje modeliranje kompleksnih sustava i simulaciju scenarija održivog razvoja, što olakšava donošenje strateških odluka u području zaštite okoliša, pametnih gradova i kružne ekonomije [26]. Studije pokazuju da UI može pozitivno utjecati na čak 79 % ciljeva održivog razvoja Ujedinjenih naroda, posebice u područjima: energetske učinkovitosti, industrijske inovacije i odgovorne potrošnje [26]. S druge pak strane, znanstveni radovi upozoravaju da sama umjetna inteligencija mora biti razvijena i implementirana na održiv način, uzimajući u obzir energetske potrošnje podatkovnih centara, etičke aspekte i društveni utjecaj automatizacije [27, 28].

Inteligentna proizvodnja predstavlja koncept proizvodnih sustava koji integriraju umjetnu inteligenciju, internet stvari (IoT), analitiku podataka i kibernetičko-fizičke sustave radi postizanja visoke razine autonomije, fleksibilnosti i optimizacije procesa. Ključna prednost inteligentne proizvodnje je sposobnost sustava da u realnom

vremenu prikuplja, analizira i koristi podatke za kontinuirano poboljšanje performansi [6, 28]. Prednosti inteligentne proizvodnje uključuju: povećanje produktivnosti, smanjenje troškova, poboljšanje kvalitete proizvoda, te veću prilagodljivost tržišnim promjenama. Umjetna inteligencija omogućuje prediktivno održavanje, čime se smanjuju zastoji u proizvodnji i produžuje životni vijek opreme [29]. Nadalje, inteligentni sustavi omogućuju personaliziranu proizvodnju i masovnu prilagodbu proizvoda uz zadržavanje visoke učinkovitosti [30]. U kontekstu održivosti, inteligentna proizvodnja doprinosi racionalnoj upotrebi energije i materijala, smanjenju otpada, te integraciji obnovljivih izvora energije u proizvodne procese [31].

Industrija 5.0 predstavlja nadogradnju koncepta Industrije 4.0, te stavlja naglasak na suradnju između ljudi i inteligentnih strojeva, održivosti i društvene vrijednosti tehnologije [32]. Dok je Industrija 4.0 bila primarno usmjerena na automatizaciju i digitalizaciju proizvodnje, Industrija 5.0 promiče humanocentričan pristup u kojem tehnologija služi poboljšanju kvalitete rada i dobrobiti zaposlenika [32, 33]. U okviru Industrije 5.0 UI se koristi kao potpora ljudskom odlučivanju, koristeći kolaborativne robote, prilagodljive proizvodne sustave i pametne radne okoline. Cilj nije zamjena čovjeka strojem, već stvaranje sinergije između kreativnosti i strojne inteligencije [34, 35]. Znanstveni radovi ističu da Industrija 5.0 integrira tri temeljna načela: humanocentričnost, otpornost i održivost [36]. Umjetna inteligencija u tom kontekstu omogućuje ne samo tehnološku učinkovitost, već i društveno odgovornu industrijsku transformaciju [36].

2. Primjena umjetne inteligencije u tiskarskoj industriji

Umjetna inteligencija sve više postaje ključna tehnologija u transformaciji tiskarske industrije. U tom kontekstu bitna je identifikacija: primarne primjene UI u planiranju i kontroli proizvodnje (PPG), upravljanje kvalitetom (QM), upravljanje održavanjem (MM) i upravljanje lancem opskrbe (SCM) [37]. Primjena UI u planiranju i kontroli proizvoda koristi se za optimizaciju raspoređivanja i alokacije resursa, poboljšavajući učinkovitost proizvodnje. Salvin prikazuje primjenu UI u upravljanju opskrbnim lancem, što je često zanemaren aspekt tiskarske industrije [38]. Ovaj rad je posebno važan, jer pokazuje kako se UI koristi za: prognoziranje potražnje, optimizaciju zaliha i planiranje nabave sirovina. U tiskarstvu to izravno znači racionalnije upravljanje, papirom, bojama i potrošnim materijalom, što ima i ekonomske i ekološke implikacije.

Lin prikazuje teorijsku osnovu za razumijevanje primjene UI u proizvodnji, odnosno integracije UI u industrijsko inženjerstvo [39]. Iako nije specifično vezan uz tiskarstvo, rad je sadržajno zaslužan za razumijevanje transfera teoretskih modela iz opće proizvodnje u grafičku industriju.

U domeni upravljanja kvalitetom, često se koristi temeljni referentni okvir, jer sustavno obrađuje prediktivno održavanje, optimizaciju proizvodnih procesa i uprav-

ljanje kvalitetom, strojno učenje i računalni vid (engl. *computer vision*) otkrivaju nedostatke i optimiziranje zastoja, osiguravajući učinkovit rad strojeva. Prediktivno održavanje, jedno je od značajnih područja primjene UI u industriji, što je sadržaj rada Masoda i Zakaria [40]. Autori pokazuju kako se neuronske mreže i regresijski modeli koriste za predviđanje kvarova strojeva na temelju senzorskih podataka. Rad Wanga i Zhanga je izravno fokusiran na tiskarsku industrijsku u kontekstu pametne proizvodnje [41]. Autori analiziraju kako se algoritmi strojnog učenja mogu koristiti za optimizaciju parametara tiska, smanjenje otpada i automatizaciju odlučivanja u realnom vremenu. Navedeni rad posebno je relevantan jer povezuje primjenu umjetne inteligencije s pojmovima kao što su digitalni blizanac, kiber-fizički sustavi i Industrija 4.0. Digitalni blizanac (engl. *digital twin*) omogućuje simulaciju ponašanja tiskarskog stroja u virtualnom okružju, čime se unaprijed mogu predvidjeti kvarovi i optimizirati parametri procesa. Kiber-fizički sustavi predstavljaju integraciju fizičkih procesa, senzora i softverskih algoritama koji omogućuju autonomno upravljanje proizvodnim sustavima. Shah analizira kako digitalne tehnologije, uključujući UI mijenjaju organizaciju rada u tiskarama [42]. Poseban doprinos rada je povezivanje teorije i prakse u grafičkoj proizvodnji.

Prikazane postavke sugeriraju da je umjetna inteligencija obećavajuća, njezina korist ovisi o prevladavanju značajnih izazova implementacije. S obzirom da se tvrtke suočavaju s rastućom konkurencijom i promjenljivim zahtjevima potrošača, usvajanje umjetne inteligencije u tiskarskom sektoru postaje nužnost.

2.1 Primjena umjetne inteligencije u konvencionalnim tehnikama tiska

Ofsetni tisak je danas u hrvatskoj grafičkoj industriji najzastupljenija tehnika tiska. U toj tehnici se proizvode reprezentativni grafički proizvodi. Razlog tome su: visoko kvalitetna konstrukcija strojeva, jednostavan pripremni proces i kvalitetan otisak relativno niske proizvodne cijene. Primjenljivost ove tehnike je u segmentu komercijalnog i ambalažnog tiska. Zbog složenosti parametara procesa, varijabilnosti materijala i potrebe za stabilnom kvalitetom, ofsetni proces još uvijek ovisi o iskustvu operatera i ručnoj kontroli. Značajne varijable su: postavke valjaka, brzina tiska, tlak, parametri vezani uz boje. Upravo u tom segmentu primjena UI može značajno unaprijediti performanse i doprinijeti konkurentnosti proizvodnje.

Jedna od najvažnijih primjena umjetne inteligencije u ofsetom tisku je smanjenje varijacija u kvaliteti otisaka i poboljšanje stabilnosti procesa. Bratić i suradnici razvili su model koji integrira slučajnu šumu engl. *random forest* s metodologijom Six Sigma za identifikaciju kritičnih varijabli procesa i predviđanje odstupanja u kvaliteti otiska uključujući boje, gustoću obojenja i oštrinu [43]. Model slučajne šume primijenjen je za predviđanje odstupanja otiska na temelju ulaznih parametara procesa, čime se omogućuje automatizirana identifikacija kritičkih varijabli. Taj pristup omo-

gućuje prilagodbu parametara i smanjenje varijabilnosti proizvodnje. Rečeno kombinira statističke metode s UI modelima kako bi se dobila objektivna i automatizirana kontrola procesa umjesto tradicionalno subjektivne kontrole operatora.

Tema rada Masod i Masoda i Zakaria je također u području automatizacije kontrole kvalitete ofsetnih otisaka [44]. Primjena algoritama računalnog vida i strojnog učenja omogućuje automatsko otkrivanje vizualnih defekata, kao što su nepravilnosti u registraciji boja, mrlje, pojave linija ili nepravilni otisak. Takvi sustavi mogu u realnom vremenu ocjenjivati tisuće otisaka i signalizirati potrebu za korekcijom procesa, što smanjuje otpad i povećava kvalitetu. Specifični UI modeli za ofsetni tisak još su u razvoju, a opći trendovi u industrijskim primjenama. UI ukazuje na povećanu primjenu takvih sustava u QM unutar tiskarskih postrojenja. Za ofsetne strojeve sve je prisutniji koncept integracije digitalnih blizanaca, virtualnog modela stroja u realnom vremenu [45]. Dakle, Sharma prikazuje tiskarsku proizvodnju na principu Industrije 4.0, što znači prijelaz od analognih procesa na automatizirane i prediktivne sustave [45]. Korištenjem podataka u stvarnom vremenu te integracijom digitalnih blizanaca, prediktivne analitike i vizualizacijskih alata omogućuje se učinkovito upravljanje složenim tijekovima rada, uključujući postavljanje ploča, uvlačenje tiskovne podloge, kontrolu viskoznosti boje, automatizirano usklađivanje boje i otkrivanje nedostataka.

Primjena umjetne inteligencije u ofsetnom tisku kroz optimizaciju procesa, integraciju digitalnih blizanaca, automatiziranu kontrolu kvalitete, prediktivno održavanje, omogućuje ne samo poboljšanje kvalitete otiska, već i poboljšanje učinkovitosti, stabilnosti i konkurentnosti, pa je za očekivati širu primjenu u budućnosti.

Koncept digitalnog blizanca ofsetnog tiskarskog stroja Heidelberg Speedmaster XL 106 sastoji se od povezivanja fizičkog proizvodnog sustava s njegovim virtualnim modelom putem kontinuirane razmjene podataka u realnom vremenu, radi analize, simulacije i optimizacije tiskarskog procesa [46]. Digitalni blizanac koristi prikupljene podatke za predviđanje ponašanja sustava, optimizaciju parametara tiska i podršku odlučivanju u upravljanju proizvodnim procesom. Digitalni blizanac integrira se s višim razinama informacijskih sustava, čime se omogućuje povezivanje operativnih podataka s poslovnim i upravljačkim funkcijama, u skladu s konceptom pametne proizvodnje.

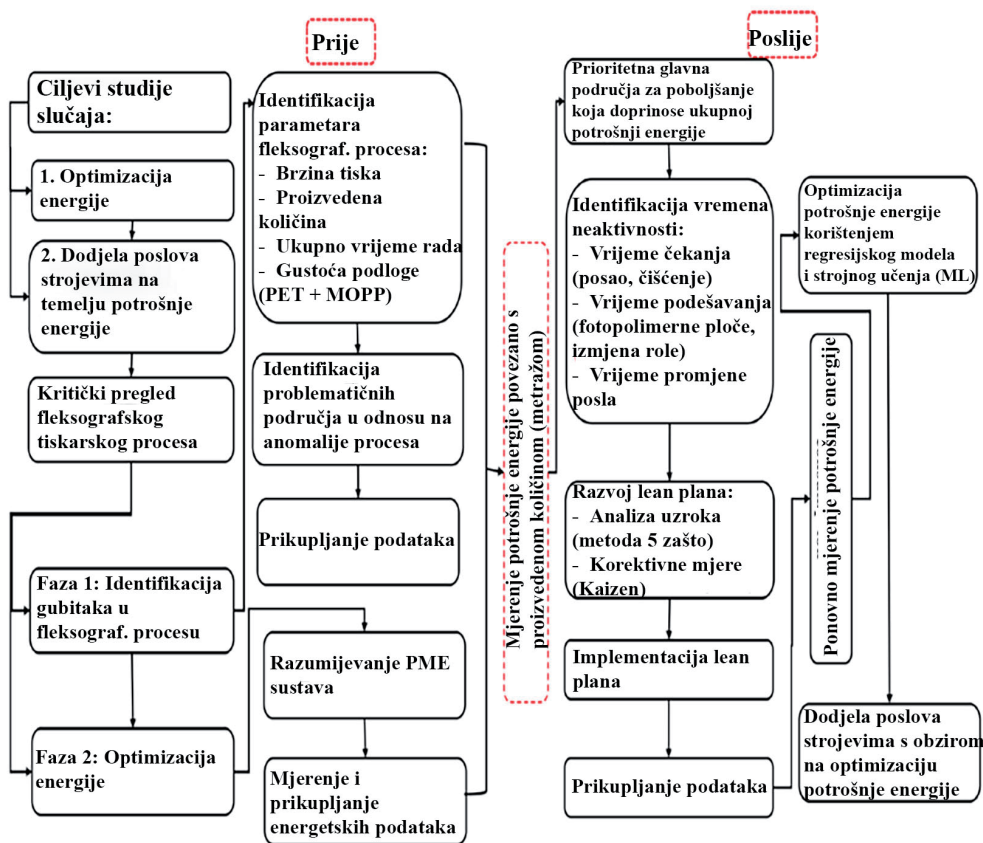
Može se zaključiti da primjena umjetne inteligencije u ofsetnom tisku predstavlja evoluciju konvencionalne grafičke proizvodnje prema automatiziranim, inteligentnim i podatkovno vođenim sustavima. Pomoću integracije digitalnih blizanaca, optimizacije procesa, automatizirane kontrole kvalitete i prediktivnog održavanje, umjetna inteligencija omogućuje poboljšanje kvalitete tiska, povećanje učinkovitosti, stabilnost i konkurentnost. S obzirom da je prepoznatljivo sve uspješnije integriranje UI modela u realne ofsetne procese, očekuje se još šira primjena u budućnosti grafičke industrije.

Bakrotisak je kvalitetna ali tehnološki zahtjevna konvencionalna tehnika tiska. Temelji se na prijenosu boje iz udubljenih tiskovnih elemenata na tiskovnu podlogu, pri čemu ključnu ulogu imaju gravirani cilindri, viskozitet boje, tlak, brzina tiska i sustav za sušenje. Zbog izrazite osjetljivosti procesa tiska na promjene parametara, proces bakrotiska zahtijeva visoku razinu kontrole i stručnosti operatera [47]. Opisana složenost čini bakrotisak pogodnim područjem za primjenu umjetne inteligencije. Posebno treba istaknuti segmente automatizacije, optimizacije procesa, prediktivnog održavanja i kontrole kvalitete.

Jedan od trendova u bakrotisku je primjena umjetne inteligencije za kontrolu kvalitete graviranih cilindara, koji su ključni elementi u dubokom tisku [47]. Tvrtka 4Packaging GmbH, Njemačka koristi umjetne neuronske mreže za analizu podataka senzora koji dolaze od originalnih senzora na stroju i senzora koji su instalirani u kemijskim galvanizacijskim kupkama [48]. Sustavi temeljeni na računalnom vidu i UI analizi slika automatski detektiraju defekte na cilindrima i klasificiraju tip pogreške. Računalni vid pregledava slike i cilindre klasificira u odnosu na vrstu i mjesto nedostatka. Implementacija ovih tehnologija zahtijeva velike količine podataka, kao i kategorije koje su dodijeljene skupu podataka. Primjenom UI modula za nadziranje proizvodnje, smanjuje se broj nepravilnosti i deformacija cilindara za oko 20%, te se postiže značajna ušteda materijala i energije [49]. Osim toga korištenjem neuronskih mreža i računalnog vida postignut je doprinos u domeni održivosti. U području analize podataka senzora smanjen je ugljični otisak za 8-12 tona CO₂, a materijalni otisak za 26-73 tona CO₂ [49]. Schmidt i suradnici željeli su dokazati mogućnost, da je opća sustavna strategija poboljšanja kvalitete i smanjenja otpada moguća korištenjem metode dubokog učenja (DL) i DL algoritama s naglaskom na bakrotisak [50]. Strategija poboljšanja je razrađena u šest koraka, kako slijedi [50]. Prvi korak je sustav vizualnog pregleda nakon bakrenja, što daje informaciju li sustav nedostatke, a podaci se koriste za DL. Drugi korak je bilježenje podataka s korištenih strojeva za bakrenje. Podaci ulaze u DL sustav. DL sustav dobiva podatke vidljivosti procesa bakrenja i zna se koji parametri imaju najveći utjecaj na pojavu nedostataka. U četvrtoj fazi moguće je koristiti podatke, što dalje omogućuje transparentnost i identificirati zašto su se pojavili nedostaci. Integriranjem prognoze poduzimaju se preventivne protu mjere. Ovi koraci se ponavljaju dok se ne postigne potpuna automatizacija kontrole. Brumm i suradnici koriste metodu dubokog učenja za fenomenološku klasifikaciju formiranja uzoraka pri cijepanju fluida u bakro tiskarskom stroju [51]. DL algoritmi koriste se brze video snimke procesa cijepanja fluida između rotirajućeg graviranog cilindra i ciljane podloge koja se pomiče. U radu se diskutira kako se uzorci klasificiraju DL metodama i kako bi to moglo poslužiti za identifikaciju različitih hidrodinamičkih režima. Moglo bi se zaključiti da postoje jasni pokazatelji da se UI, algoritmi strojnog učenja, automatizacija i inovativna proizvodnja u bakrotisku brzo kroz: integraciju UI proizvodne linije za graviranje cilindra, automatiziranu kontrolu kvalitete, kontrolu proizvodnih čimbenika u realnom vremenu i digitalizaciju bakrotiska značajni u tisku ambalaže.

Fleksografski tisak je tehnika tiska koja se široko koristi za tisak ambalaže zbog sposobnosti ispisa na različite materijale uz visoke brzine i relativno niske cijene po jedinici proizvoda. Zbog kompleksne dinamike tiska, pogodan je za primjenu umjetne inteligencije. Chen je prikazao kako se prikupljaju, analiziraju i modeliraju podaci i kako ih se može svakodnevno primijeniti u domeni fleksografskog tiska [52]. Predlaže analizu podataka tiska u fazama kako slijedi: izrada plana proizvodnje, povećanje proizvodnje u stvarnom vremenu, kontinuirana optimizacija proizvodnje i proizvodnja u okviru koncepta Industrije 5.0 uz provođenje prediktivnog održavanja [52]. Basak i Maity su svoja istraživanja usmjerili na integriranje strojnog učenja na mogućnost procjene kvalitete fleksografskog otiska [53]. Analizu podataka i primjenu performansi proveli su korištenjem linearne regresije, stabla odlučivanja (engl. *decision tree*) i algoritma regresije slučajne šume. Algoritam stabla odlučivanja korišten je za modeliranje odnosa između procesnih parametara fleksografskog tiska, kao što su tiskovna podloga, pritisak stroja i svojstva boje te neželjenog prirasta rastertonske vrijednosti (engl. *dot gain*). Poznato je da je jedan od ciljeva grafičke tehnologije postizanje reprodukcije što sličnije originalu, to znači da je uspješno smanjenje prirasta rastertonskih vrijednosti jedan od preduvjeta postizanja kvalitetne reprodukcije. Svaka tiskara treba postići uvjete u kojima će pojava prirasta rastertonskih vrijednosti biti standardizirana na što manje tolerancije, jer prirast u realnoj grafičkoj proizvodnji nije moguće izbjeći.

Optimizacija energije ključna je za smanjenje troškova, povećanje učinkovitosti i minimiziranje utjecaja na okoliš. Za utvrđivanje potroška energije u proizvodnom procesu mogu se koristiti sustavi za praćenje energije, koji pružaju podatke o potrošnji energije u stvarnom vremenu, omogućujući identificiranje područja s visokom potrošnjom. Utvrđeno je da su glavni uzroci potrošnje energije duga razdoblja neaktivnosti stroja i loša raspodjela poslova [54]. Za optimizaciju performansi fleksografskih tiskarskih strojeva korišten je model linearne regresije koji koristi tehnike strojnog učenja i niza ulaznih čimbenika, kako bi predvidjeli potrošnju energije i optimiziral raspoređivanje poslova, što može rezultirati smanjenjem troškova, a u konačnici i uštedom energije.

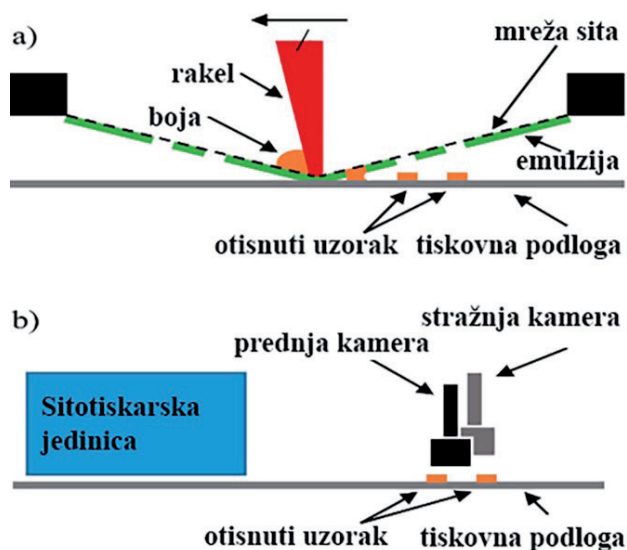


Slika 1: Dijagram toka metodologije korištene za optimizaciju potrošnje energije u procesu fleksografskog tiska [54]

Studija je pokazala da je lean tehnologija učinkovita za identifikaciju kritičnih područja i poboljšanje korištenja energije u procesu fleksotiska, s uštedom nešto više od 30 % (Slika 1) [54].

Sitotisak se može primijeniti na cijeli niz podloga: papire, različiti polimere, staklo, keramiku i metale. Na kvalitetu otiska djeluju slijedeće varijable: napetost mrežice, viskoznost boje, tlak i brzina rakela, razmak sita od podloge, uvjeti sušenja i drugo. Zbog svoje kompleksnosti sitotisak predstavlja pogodno područje za primjenu umjetne inteligencije u svrhu optimizacije, kontrole kvalitete i prediktivnog održavanja. Sitotisak se između ostaloga koristi i za izradu elektroničkih uređaja. Vizualna kontrola kvalitete uključuje: sustave računalnog vida temeljene na dubokom učenju, i konvolucijske neuronske mreže (engl. *convolutional neural networks*). Time se omogućuje: detekcija defekata u realnom vremenu, prepoznavanje nepravilnog nanosa boje, identifikacija mikrodefekata na tiskanim vodovima kod tiskane elektronike i

kontrola registra višebojnog sitotiska. Gafurov i suradnici razvili su UI modeli integrirali ga sa sustavom sitotiska s role na rolu kako bi se otkrilo razmazivanje, jedan od glavnih nedostataka sitotiska (Slika 2) [55]. UI pristupi značajni su u području strojnog vida, a neuronske mreže, uključujući klasifikaciju slike, detekciju objekta i segmentaciju slike, mogu riješiti otkrivanje nedostataka.



Slika 2: a) Postupak sitotiska s role na rolu, b) Položaj kamera za kontrolu kvalitete opreme za sitotisak [55]

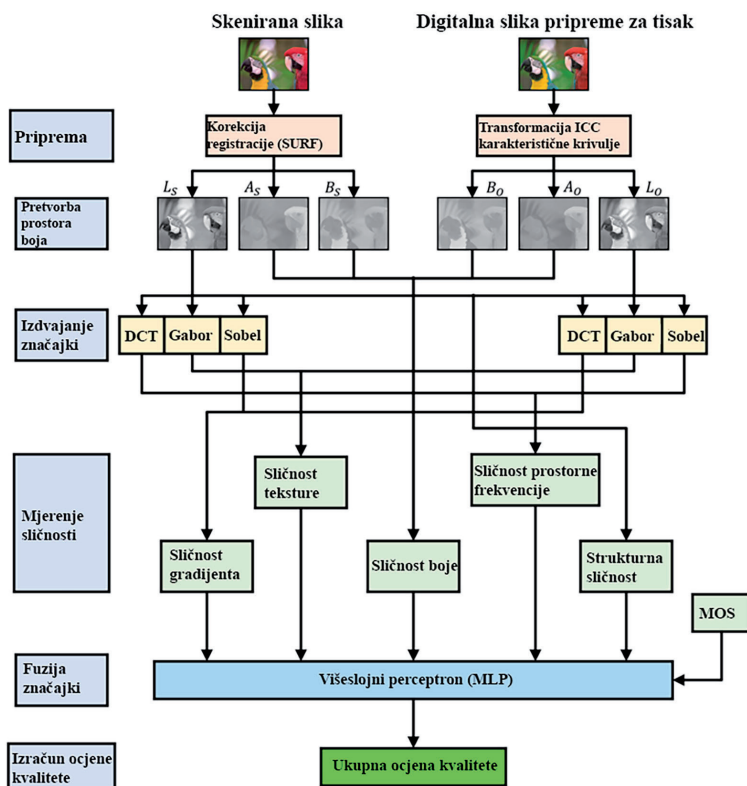
Nyabodza i koautori opisuju kontrolu kvalitete TiO_2 elektroda dobivenih sitotiskom [56]. Upotrebljavaju se metode strojnog učenja: slučajna šuma, stroj potpornih vektora i napredna neuronska mreža, koje se inače najčešće koriste u kontroli kvalitete proizvoda. Slučajna šuma se koristi za praćenje procesa u proizvodnji orijentiranoj na talinu analizom slika, snimljenih tijekom proizvodnje, što predstavlja konkretan primjer UI algoritama u automatskoj kontroli kvalitete sitotiska. Primjer se odnosi na tisak elektroda, međutim metodologija bi se mogla validno prenijeti na kontrolu kvalitete grafičkih sitotiskarskih otisaka u proizvodnji.

Jedno od područja primjene UI u sitotisku je prediktivno modeliranje kvalitete otiska. U toj tehnici tiska mogu se javiti problemi kao što su: neujednačeni prijenos boje, varijacija u debljini boje, nepravilno poravnavanje registra i zamućenje rubova. Primjenom algoritama strojnog učenja, kao što su slučajna šuma, stablo odlučivanja (engl. *decision trees*) i neuronske mreže, moguće je modelirati odnos između procesnih čimbenika, poput viskoznosti boje, napetosti sita i tlaka rakela, te kvalitete ispisa. Zahao i suradnici su u članku opisali metodu automatskog otkrivanja defekata u sitotisku u proizvodnji baterija s naglaskom na usklađivanje stacionarne mreže br-

zinskog polja i L-K algoritma optičkog toka [57]. Opisana metoda može prepoznati i klasificirati različite defekte zamućenja i slična iskrivljenja. U proizvodnji silicijskih solarnih ćelija u kontekstu srebrnih elektroda koristi se sitotisk. U tisku može doći kod linija manjih od $15\ \mu\text{m}$, odnosno radi nepravilnosti rada, prekida mrežice ili povećanog otpora mrežice do neočekivane potrošnje srebra [58]. Korištenjem metoda strojnog učenja omogućeno je predviđanje trodimenzionalne geometrije, što se može primijeniti za izvođenje zaključaka o utjecaju relevantnih parametara.

2.2 Primjena umjetne inteligencije u digitalnom tisku

Softver za optimizaciju ispisa u digitalnom tisku temeljen na umjetnoj inteligenciji koristi suvremene tehnologije za analizu i poboljšanje zadataka, raspoređivanje poslova te ekonomski opravdano korištenje resursa. Umjetna inteligencija omogućuje prediktivno održavanje, personalizaciju usluga, transformirajući operacije ispisa i poboljšavajući kvalitetu slika. Osim toga, UI pomoću automatizacije optimizira tijek rada i poboljšava ukupne rezultate rada.



Slika 3: Dijagram toka za predviđanje objektivne metrike kvalitete uključujući kontrast, oštrinu slike i homogenost boje [59]

Zhong i suradnici razvili su učinkovitu i pouzdanu metriku za procjenu kvalitete tiskanih slika, koje oponašaju ljudsku vizualnu percepciju. Metodologija za kvantitativnu procjenu kvalitete digitalnog ispisa koristi model umjetne inteligencije temeljen na višeslojnom perceptronu (MPL) [59]. U radu se kombiniraju značajke iz prostorne i frekvencijske domene digitalno otisnutih slika, kako bi se konstruirao multidimenzionalni model. Takav model ima mogućnost predviđanja objektivne metrike kvalitete, uključujući kontrast, homogenost boje i oštrinu slike (Slika 3). U radu je predstavljena pouzdana i učinkovita metrika za procjenu kvalitete otisnutih slika [59].

Umjetna inteligencija može dinamički pokrenuti profile boja ili rezoluciju slike kako bi se postigao željeni rezultat, pa i ušteda resursa. Osim toga može olakšati personalizirani tisak prilagođavanjem materijala za ispis, optimiziranjem radnih procesa i predviđanjem potreba za održavanjem opreme za ispis.

Tablica 1: Primjena UI i prednosti automatizacije u digitalnom tisku [60]

Prednosti	Objasnenje	Primjer
Povećana učinkovitost	UI smanjuje ručni rad, pojednostavljuje procese	UI optimizira čekanje za ispis, smanjuje vrijeme 30%
Smanjena proizvodnja	UI identificira mogućnosti uštede troškova	Prediktivno održavanje, vođeno UI smanjuje troškove za 20 %
Poboljšana kvaliteta ispisa	UI poboljšava oštrinu slike i točnost boja	Algoritmi poboljšavaju rezoluciju za 25 %
Brže vrijeme obrade	UI automatizira, raspoređuje obradu zadataka ispisa	Raspoređivanje poslova temeljno na UI smanjuje vrijeme za 40 %
Poboljšano korištenje resursa	UI optimizira lokaciju resursa	UI dinamički dodjeljuje resurse pisača, smanjujući vrijeme neaktivnosti za 50 %
Minimiziranje pogreške i ponovni ispisi	UI detektira pogreške u stvarnom vremenu	Kontrola kvalitete uz UI smanjuje pogreške za 90 %
Optimizirana upotreba opreme za ispis	UI optimizira korištenje opreme	UI smanjuje vrijeme zastoja za 15 %
Pojednostavljeni tijek rada	UI automatizira zadatke tijekom rada, smanjuje uska grla	Optimizacija tijekom rada vođena UI smanjuje vrijeme procesa za 30 %
Veća fleksibilnost u rasporedu poslova	UI se prilagođava prioritetima i zahtjevima	Softver za raspoređivanje temeljen na UI omogućava prilagodbe rasporeda poslova u hodu

Posebno treba naglasiti da UI analizira preferencije kupaca i u skladu s time prilagođava tisak, što doprinosi zadovoljstvu kupaca.

Prediktivno održavanje revolucionira tiskarsku industriju. Korištenjem UI algoritama pisači mogu predvidjeti potrebu za održavanjem analizirajući mnoštvo podataka, što uključuje očitavanja senzora, koji detektiraju varijacije u temperaturi, vlažnosti i drugim čimbenicima, kao i povijesne zapise, koji dokumentiraju prošle probleme i rješenja. Opisana sposobnost omogućuje tiskarama da pravovremeno zakazuju intervencije, minimiziraju poremećaje u proizvodnji i maksimiziraju proizvodnju. Produktivno održavanje temeljeno na UI osnažuje tiskare da optimiziraju poslovanje, smanje troškove održavanja i pruže pouzdane visokokvalitetne usluge svojim klijentima te time povećaju konkurentnost na tržištu.

Prednosti prediktivnog održavanja su minimiziranje zastoja proizvodnje, pravovremeno održavanje koje sprečava prerano trošenje pisača, mogućnost prilagodbe rasporeda održavanja, omogućavanje daljinsko upravljanja pisačima, smanjenje potrebe za hitnim popravcima, osiguravanje optimalne performanse pisača, minimiziranje vremena zastoja, što doprinosi zadovoljstvu kupaca, osiguravanje pravovremene isporuke kao i kvalitetu ispisa, a optimalne prakse održavanja smanjuju potrošnju resursa, smanjuju otpad, i time pomiču održivost i ekološku odgovornost [61].

Algoritmi strojnog učenja omogućavaju analizu velikog broja procesnih varijabli s ciljem automatskog prilagođavanja parametara u realnom vremenu, stabilizaciju kvalitete ispisa i optimizaciju potrošnje materijala. Prediktivno održavanje u stvarnom svijetu prikazano je na primjerima: Xeroxa, Epsona i HP-a. Xerox koristi UI za praćenje performansi pisača i predviđanje potreba za održavanjem koristi analizu podataka i zapisnike o pogreškama, predviđa kvarove [61]. Epson Precision Core tehnologija uključuje sustave za nadzor rada inkjet mlaznica i automatizira cikluse održavanja koji stabiliziraju rad pri visokim produkcijskim opterećenjima [62]. HP PrintOS platforma omogućuje prikupljanje i analizu podataka o performansama i produktivnosti sustava kroz *cloud* infrastrukturu. Time se omogućuje prostor za implementaciju napredne analitike i modela prediktivnog odlučivanja [63].

2.3 Primjena umjetne inteligencije u personaliziranom ispisu

Personalizirani tisak na osnovu umjetne inteligencije revolucionira tisak korištenjem naprednih algoritama za prilagođavanje sadržaja, slika i poruka pojedinačnim primateljima. Korištenjem podataka o kupcima demografskim podacima algoritmi umjetne inteligencije dinamički prilagođavaju materijale za tisak kako bi odgovarali specifičnim preferencijama. Personalizirani ispis na osnovu UI omogućuje učinkovitiju komunikaciju s kupcima. Tiskani materijali prilagođeni su interesima kupaca i povećavaju vjerojatnost ponovnog poslovanja.

Primjer personaliziranog ispisa na osnovu umjetne inteligencije iz stvarnog svijeta uključuje ispis varijabilnih podataka (VDP). U tom slučaju UI se koristi za personalizaciju teksta, slika i ostalog sadržaja na svakom ispisnom primjerku prema podacima primatelja. Haik i suradnici predlažu sustav za automatsku kontrolu kvalitete varijabilnog tiska temeljen temeljenog na dubokom učenju, koji uspoređuje referentnu digitalnu sliku s otisnutom i skeniranom slikom kako bi otkrio defekte u personaliziranom tisku [64].

Osim toga umjetna inteligencija omogućuje stvaranje personaliziranih kampanja izravne pošte i prilagođene kataloge proizvoda.

3. Zaključak

Ne tako davno činilo se da će uz pomoć digitalnog oglašavanja, društvenih medija i online publikacija doći do irelevantnosti tradicionalnih tiskanih medija. Suprotno tome, tiskarska industrija pronašla je načine opstanka u digitalnom dobu.

Prihvaćenjem inovativnih rješenja i tehnologije uvođenja UI, tiskarska industrija mijenja paradigmu. Tiskarske tvrtke koje upotrebljavaju UI imaju koristi od povećanja produktivnosti, uštedi resursa, smanjenju troškova i mogućnosti ispunjavanja visokih standarda kvalitete čime stječu konkurentsku prednost na tržištu.

Koncept Print 2 Web znači da se tisak i digitalni materijali mogu nadopunjavati. Neki tiskani materijali imaju QR kodove ili web poveznice koje čitatelje usmjeravaju na online sadržaje. Varijabilni ispis podataka je inovacija koja omogućuje prilagodbu tiskovnih materijala. Tehnološki napredak NFC, odnosno komunikacija bliskog polja, omogućuje tiskanim materijalima interakciju s pametnim telefonima i drugim NFC uređajima.

Kako tehnologija umjetne inteligencije nastavlja s inovacijama očekuju se inovativne primjene koje će dodatno transformirati tiskarsku industriju. Tiskarske tvrtke koje integriraju umjetnu inteligenciju u svoje poslovne procese bit će dugoročno konkurentne i nudit će učinkovita rješenja uz trendove prilagodbe i održivosti.

4. Literatura

- [1] ISO/IEC 22989:2022 Information Technology-Artificial intelligence- Artificial intelligence concepts and terminology, ISO-International Organisations for Standardisation, 2022. *Dostupan na:* <http://www.iso.org>.> standard, *Pristupljeno:* 2026-01-21
- [2] Russel, S.; Norving, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Pearson, ISBN 978-0-13, Hoboken, New Jersey (2021)

- [3] Rai, A.; Constantinides, P., Sarker, R.: Next-generation digital platforms: Toward human-AI-hybrids. *Management Information Systems Quarterly*, **43** (2019) 1, 3-9
- [4] Dwivedi, Y. K.; Hughes, L., Ismagilova, E., Aarts, G., Crica, T., Duan, Y., Dwivedi, R., Crick, F., Duan, Y., Dwivedi, R., Edwards, J., Janssen, M., Janes, P., Kumar, K. A., Keskin, H., Kronemann, B., Lal, B., Lucini, B., Medaglia, R., Williams, M. D.: Artificial intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and an agenda for research, practice, and policy, *International Journal of Information Management* **57** (2021) 101994, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.08.002>
- [5] Lindberg, D.; Harnessing, G.: AI for smart manufacturing: insights from industry 4.0, *Discover Artificial Intelligence*, **5** (2025) 111, <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00363-0>
- [6] Alatalo, J.; Hellimo, E., Rantanen, M., Väänänen, O., Sipola, T.: Reducing emissions using artificial intelligence in the energy sector: A scoping review, *Applied Sciences*, **15** (2025) 2, 999, <https://doi.org/10.3390/app15020999>
- [7] Zhang, T.; Štrbac, G.: Novel artificial intelligence applications in energy: A systematic review, *Energies*, **18** (2025) 143747, <https://doi.org/10.3390/en18143747>
- [8] Jenko, S.; Papadopoulou, E., Kumar, V., Overman, S. S., Krepelkova, K., Wilson, J., Dunbarr, E. L., Spice, C., Exarchos, T.: Artificial intelligence in healthcare. How to develop and implement safe, ethical and trustworthy AI systems, *AI*, **6** (2025) 6, 116, <https://doi.org/10.3390/ai6060116>
- [9] Kuo, C.-T.; Xu, D., Friesen, R.: A brief review of unsupervised machine learning algorithms in astronomy: dimensionality reduction and clustering, *Universe*, **11** (2025) 12, 412, <https://doi.org/10.3390>
- [10] Matos, T.; Santos, W., Zdravevski, E., Coelho, Pires, I. M., Madeira, F.: A systematic review of artificial intelligence applications in education: Emerging trends and challenges, *Decision Analytics Journal*, **15** (2025) 100571, <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2025.100571>
- [11] Rong, R.; Ma, S., Ren, N., Lin, Q., Ning, J.: Generative artificial intelligence transportation systems: A systematic review of applications, *Frontiers of Engineering Management*, **12** (2025) 1020-1036, <https://doi.org/10.1007/s42524-025-4241-9>
- [12] Hossain, M. N.: Artificial revolutionising the automotive sector: A holistic review, *Computers, Materials & Continua*, **82** (2025) 3, 59944, <https://doi.org/10.32604/cmc2025>
- [13] Rezaei, A.; Abdellatif, I., Umar, A.: Towards economic sustainability: A comprehensive review of AI and machine learning techniques in improving the accuracy of stock market movements, *International Journal of Financial Studies*, **13** (2025) 1, 28, <https://doi.org/10.3390/ijfs13010028>
- [14] Rong, R.: Generative AI revolution in cybersecurity: A comprehensive review of threat intelligence and operation, *Artificial Intelligence Review*, **58** (2025) 236, <https://doi.org/10.1007/s10462/025/112195>
- [15] Bosque, A.; Arias, P. F., Lampropoulos, G., Vergara, D.: The role of artificial intelligence in gaming, *Applied Sciences*, **15** (2025) 23, 12358, <https://doi.org/10.3390/app152312358>
- [16] Sadashiv, B. S.; Bansal, R., Suny, J., Paul, K., Al Said, N.: Bridging algorithms and intelligence: AI integration in core computer science solution, *International Journal of Environmental Sciences*, **11** (2025) 17, 710-719, <https://doi.org/10.64252/h7ztpv96>

- [17] Shaveta, J.: A review on machine learning, *International Journal of Science and Research Archive*, **9** (2023) 1, 281-285, <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.9.1.0410>
- [18] Yeh, Y. T.; Eden, R., Filet, E., Syed, R.: The role of use for the business value of big data analytics, *The Journal of Strategic Information Systems*, **34** (2025) 2, 101888, <https://doi.org/10.1016/j.sis.2025.101888>
- [19] Adenubi, A. D.; Oduroye, A.: Robotics and automations in 21st century: Innovation and applications, *Online Journal of Robotics & Automation Technology*, **4** (2025) 1, 9, <https://doi.org/10.33552/OJRAT.2025,04.000580>
- [20] Zhang, E.; Chen, Y., Gao, M., Duan, J., Jing, C.: Automatic defect detection for web offset printing based on machine vision, *Applied Sciences*, **9** (2019) 17, 3598, <https://doi.org/10.3390/app9173598>
- [21] Gajiwala, C.: The rise of deep learning and neural networks: Revolutionising artificial intelligence, *European Journal of Computer Science and Information Technology*, **13** (2025) 17, 88-99, <https://doi.org/10.37745/ejcsit.2013/vol13n178898>
- [22] Makridakis, S.: The forthcoming artificial intelligence revolution, *Futures*, **90** (2017) 46-60, <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.03.006>
- [23] Palmie, M.; Aebersold, A., Oghazi, P., Pashkevich, N., Gassmann, O.: Digital-sustainable business models: definition, systematic literature review, integrative framework and research agenda from a strategic management perspective, *Strategy in the Digital Transformation Era*, **27** (2025) 346-374, <https://doi.org/10.1111/ijmr.12380>
- [24] Berges, A. F. S.; Laurindo, F. J. B., Spinola, M. M., Concavles, R. F.: The strategic use of AI in the digital era: Systematic literature review and future research directions, *International Journal of Information Management*, **57** (2020) 102225, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102225>
- [25] Costa, A.; Crupi, A., Casaroni, F., Abbate, T.: Exploring the role of artificial intelligence in addressing sustainable development. A semantic analysis of AI patents, *Technovation*, **148** (2025) 103335, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103335>
- [26] Pietrzak, P.; How, A. I.: Can support the sustainable development of organisations? Findings from a literature review, *Issues Information Systems*, **26** (2025) 1, 296-307, https://doi.org/10.48009/1_iis_122
- [27] Toderas, H.: Artificial intelligence for sustainability: A systematic review and critical analysis of AI applications, challenges, and future directions, *Sustainability* **17** (2025) 17, <https://doi.org/10.3390/su17178049>
- [28] Nayak, S.: Enhancing manufacturing with artificial intelligence: An overview of the present situation, insights, obstacles and future trends, *World Journal of Advanced Research and Reviews*, **28** (2025) 3, 9-19, <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.28.3.4033>
- [29] Sallam K.; Mehamed, M., Muhamed, A. W.: Internet of Things (I_OT) in supply chain management: Challenges, opportunities, and best practices, *Strategic Management Innovation Journal*, **2** (2023), <https://doi.org/10.61185/smij.2023.2210>
- [30] Roberts, E.: Supply Chain 4.0: The role of artificial intelligence in enhancing resilience and operational efficiency, *International Journal of Advanced Artificial Intelligence Research*, **2** (2025) 8, 29-34

- [31] Deokar, S.; Bansode, V., Wankhede, S., Kharche, P.: Industry 4.0 moving towards smart manufacturing: A comprehensive review, *International Journal of Science and Research Archive*, **16** (2025) 3, 630-642, <https://doi.org/10.30574/ijsva.2025.16.3>
- [32] Xu, X.; Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L.: Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, conception and perception, *Journal of Manufacturing Systems*, **61** (2021) 530-535, <https://doi.org/10.1016/j.msy.2021.10.006>
- [33] Kamble, S. S.; Gunasekaran, A., Sharma, R.: Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry, *Computers in Industry*, **101** (2018) 107-119, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.06.004>
- [34] europa.eu, Industry 5.0: Towards More Sustainable, Resilient and Human, *Dostupno na: http://www.research-and-innovation.eu.europa.eu*, *Pristupljeno: 2026-02-04*
- [35] Nahavandy, S.: Industry 5.0 - A human-centric solution, *Sustainability*, **11** (2019) 4371, <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- [36] Nasir, V.; Hosseini, A., Binfield, L., Hasani, N., Ghoth, S., Diederichs, V.: Human-centric Industry 5.0 manufacturing: A multi-level framework from design to consumption within Society 5.0, *International Journal of Sustainable Engineering*, **18** (2025), <https://doi.org/10.1080/19397038.2025.2551000>
- [37] Chu, Z.; Guo, X., Zou, S.: Impact of information and communications technology alignment on supply chain performance in the Industry 4.0 era: mediation effect of supply chain integration, *Journal of Industrial and Production Engineering*, **39** (2022) 7, <https://doi.org/10.1080/21681015.2022.2099472>
- [38] Toorajipour, R.; Sohrabpour, V., Nazarpour, A., Oghazi, P., Fischl, M.: Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review, *Journal of Business Research*, **122** (2021) 502-517, <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.009>
- [39] Lin, X.: Artificial Intelligence in the Industrial Engineering, *Advances in Operation Research and Production Management*, **1** (2024) 1, 1-6, <https://doi.org/10.54254/3006-1210/direct/0106>
- [40] Masod, M. Y. B.; Zakaria, S. F.: Artificial intelligence in the printing industry: A systematic review of industrial applications, challenges and benefits, *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, **8** (2024) 9, 1713-1732, <https://doi.org/10.47772/IJRISS.2024.8090141>
- [41] Wang, X.; Zhang, Y.: Smart manufacturing and artificial intelligence: Applications in the printing industry, *Computers in Industry*, **129** (2021) 103458 <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103458>
- [42] Deokar, S.; Bansode, V. H., Wankhede, S., Kharche, P.: Industry 4.0 moving towards smart manufacturing: A comprehensive review, *International Journal of Science and Research Archive*, **16** (2025) 3, 630-642, <https://doi.org/10.30574/ijsva.2025.16.3.2596>
- [43] Bratić, D.; Miljković, P., Jurčević, D., Grabarić, T.: AI-Driven Random Forest Model and the Six Sigma Approach for Enhancing Offset Printing Process and Product Quality, *Applied Sciences*, **15** (2025) 5, 2266, <https://doi.org/10.3390/app15052266>
- [44] Masod, M. Y.; Zakaria, S. F.: How AI and automation are revolutionising the printing industry, *Dostupno na: https://offsetprintingtechnology.com*, *Pristupljeno: 2026-02-10*

- [45] Sharma, A.: Architecting data-driven print manufacturing using digital twin technology, *International Journal of Computing and Artificial Intelligence*, **6** (2025) 2, 70-76, <https://doi.org/10.33545/27076571.205.v6.i172>
- [46] Heidelberg, Speedmaster XL 106, *Dostupno na*: <http://www.heidelberg.com>, *Pristupljeno*: 2025-12-11
- [47] Higgins, S. G.; Boughey, F. L., Hills, R., Steinke, J. H. G., Muir, B. V. O., Campbell, A. J.: Quantitative Analysis and Optimization of Gravure Printed Metal Ink, Dielectric, and Organic Semiconductor Films, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7** (2015) 9, 5045-5050, <https://doi.org/10.1021/am508316f>
- [48] Singlaengravureslip.com, How AI and automation are transforming rotogravure cylinder *Dostupno na*: <https://singlaengravureslip.com>, *Pristupljeno*: 2025-12-11
- [49] Green-AI Hub Mittelstand, AI-based quality assurance for rotogravure cylinders, *Dostupno na*: <https://green-ai-hub.de>, *Pristupljeno*: 2026-02-10
- [50] Schmidt, D.; Gevers, R., Schwiep, Ordieres-Mere, J., Villaba-Diez, J.: Deep learning enabling quality improvement in rotogravure manufacturing, *Procedia Manufacturing*, **51** (2022) 330-336, <https://doi.org/10.116/j.promfg.2020.10.047>
- [51] Brumm, P.; Ciotta, N., Sauer, H. M., Blaeser, A., Dörsam, E.: Deep learning study of induced stochastic pattern formation in the gravure printing fluid splitting process, *Journal of Coatings Technology and Research*, **20** (2020) 1, 51-72, <https://doi.org/10.1007/s11998-02200687-x>
- [52] Chen, D.: The application of artificial intelligence (AI) in flexography, *Dostupno na*: <https://www.kyms.com/aitymsg/application-of-ai-flexo.html>, *Pristupljeno*: 2026-02-12
- [53] Basak, S. P. C. S.; Maity, A., Paul, K. C.: Machine learning approach to predict the dot gain of flexographic prints, *Acta Graphica*, **33** (2025) 1, 34-43, <https://doi.org/10.25027/ag.33.1.4>
- [54] Abusaq, Z.; Zahoor, S., Habib, M. S., Rehman, M., Mahmud, J., Kanan, M., Mushtaq, R. T.: Improving energy performance in flexographic printing process through Lens A case study, *Energies*, **16** (2023) 4, 1972, <https://doi.org/1.3390/en16041972>
- [55] Gafurov, A. N.; Phung, F. H., Ryu, B.-H., Kim, I., Lee, T.-H.: AI-aided printed line smearing analysis of the roll-to-roll screen printing process for printed electronics, *International Journal of Precision Engineering and Green Technology*, **10** (2023) 339-352, <https://doi.org/10.1007/s40684-022-0>
- [56] Nyabadza, A.; Azoulay-Younes, L., Vazquez, M., Brabazon, D.: Machine learning-based process quality control of screen-printed titanium dioxide electrodes, *Results in Materials*, **26** (2025) 100692, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100692>
- [57] Nyabadza, A.; Usman, M., Bilal, M., Ashraf, M. A., Abdullahi, A., All, W., Dubey, A., Arepalli, S., Choubey, P., Fernando, D., Azoulay-Younes, L., Brabazon, D.: Artificial intelligence for electrode quality control in battery manufacturing: Evaluating machine learning, deep learning and transfer learning models for tin, zinc and titanium electrodes, *Journal of Engineering Research, In Press*, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2026.02.010>
- [58] Singler, M.; Butget, M., Preu, R., Clement., R, Lorrenz, A.: Enhancing inline quality control: Machine learning for full scale 3 D prediction of screen-printed silver contacts, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **286** (2025) 113592, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113592>

-
- [59] Zhong, J.; Zhan, H., Xu, F., Zhang, Y.: Research on a multidimensional digital printing image quality evaluation method based on MLP neural network regression, *Applied Sciences*, **14** (2024) 14, 5986, <https://doi.org/10.3390/app14145986>
- [60] Biz4Group: What are the real-world use cases of AI in printing? *Dostupno na:* <http://www.biz4g/cases-of-ai-in-print>, *Pristupljeno:* 2025-12-11
- [61] Xerox, Global Service Experience for Predictive Maintenance, *Dostupno na:* <https://www.xerox.com/en-us/services/remote-services>, *Pristupljeno:* 2025-12-12
- [62] Epson Corporate, PrecisionCore Technology, *Dostupno na:* <http://www.corporate.epson.com/overview>, *Pristupljeno:* 2025-12-11
- [63] HP, PrintOS-HP Print production operating system, *Dostupno na:* <https://www.hp.com/printers>, *Pristupljeno:* 2025-12-11
- [64] Haik, O.: A novel inspection system for variable data printing using deep learning, *Dostupno na:* <http://www.researchgate.net>, *Pristupljeno:* 2026-12-11