

Zbornik Istarskog veleučilišta

Rivista dell'Università Istriana
di scienze applicate



**Istarsko
veleučilište**
Università
Istriana
di scienze
applicate

Vol. 4 (2025.), No. 1

UDK 001+378.4(497.5 Pula)(05)
ISSN 2975-383X

Izdavač – Published by

Istarsko veleučilište
Università Istriana di scienze applicate
Preradovićeva 9D, 52100 Pula
Hrvatska – Croatia

Za izdavača – For the Publisher

dr. sc. Daglas Koraca
Dekan – Dean

Urednički odbor – Editorial Board

dr.sc. Daglas Koraca
dr.sc. Dijana Drandić
Sanja Grbac Babić
dr.sc. Vedrana Špada
dr.sc. Boris Marjanović
dr.sc. Mario Bogdanović
dr.sc. Neven Munjas
dr.sc. Roberto Žigulić
dr.sc. Goran Gregov

Glavni i odgovorni urednik – Editor-in-Chief

dr. sc. Daglas Koraca

Izvršni urednik – Executive editor

dr. sc. Mario Bogdanović

Oblikovanje naslovnice i prijelom – Design and Typesetting

Nela Dunato

Zbornik izlazi jedanput godišnje – Proceedings is issued once a year.

Adresa Uredništva – Editorial Board Address

Istarsko veleučilište – Zbornik Istarskog veleučilišta
Preradovićeva 9D, 52100 Pula, Hrvatska
Tel: +385 (0)52 381-412
Telefaks: +385 (0)52 381-412
e-mail: iokmaca@iv.hr
<https://www.iv.hr>

ISSN 2975-383X

Copyright © Dijelovi objavljenih radova smiju se koristiti za osobnu ili edukacijsku svrhu uz poštovanje autorskih prava autora i izdavača.

UDK 001+378.4(497.5 Pula)(05)

ISSN 2975-383X

Zbornik Istarskog veleučilišta

Rivista dell'Università Istriana
di scienze applicate

Vol. 4 (2025.), No. 1



Istarsko veleučilište
Università Istriana
di scienze applicate

PULA, 2025.

Sadržaj

Ljudevit Pranić

Neeuropski radnici u hrvatskome turizmu: Utjecaj unutarnje motivacije i radnih uvjeta na zadovoljstvo poslom 1–11

Boris Marjanović, Ivana Benolić

Prednosti i nedostaci korištenja e-mail marketinga na primjeru sportsko-modnog tržišta u Hrvatskoj .. 12–22

Luka Brodarič, Ilenia Belli

Korištenje alata umjetne inteligencije u email marketingu 23–30

Marko Turk, Igor Savić

A Review of Blockchain-based Quality Information Management Systems in Shipbuilding Industry 31–52

Zoran Čekerevac, Petar Čekerevac

Sigurnije financije: Kako AI, IoT i Blockchain revolucioniraju digitalnu sigurnost 53–68

Patrik Radolović, Luka Žužić, Ener Špada, Deni Vale

Ispitivanje udarne radnje loma termoplastike 69–77

Ivan Simetić, Dean Ivančić, Sanja Grbac Babić, Ivan Pentek

Odabir materijala za izradu vozačkog računala 78–83

Dean Ivančić, Igor Kegelj

Razina buke u odabranim industrijskim postrojenjima na području Istarske županije i mjere zaštite na radu 84–92

Matej Kolarik

Utjecaj tranzistora u izmjenjivačima na naponske prilike distribucijske mreže 93–99

Edo Cetina, Andi Kalčić

Životni ciklus projekta na primjeru projekta “Poduzetnički inkubator Barban” 100–107

Emil Burić

Prikupljanje, odvodnja i pročišćavanje otpadnih voda u aglomeraciji Rovinj u sklopu EU projekta UPOV Cuvri 108–119

Neeuropski radnici u hrvatskome turizmu: Utjecaj unutarnje motivacije i radnih uvjeta na zadovoljstvo poslom

Ljudevit Pranić^a

^a Izv. prof. dr. sc., Ekonomski fakultet Sveučilišta u Splitu, Cvite Fiskovića 5, 21000 Split, Hrvatska, ljudevit.pranic@efst.hr

Sažetak

Turistički i ugostiteljski sektor (TiU) u Hrvatskoj suočava se s nedostatkom radne snage, što je dovelo do sve većeg oslanjanja na strane radnike iz neeuropskih zemalja. Unatoč njihovoj važnoj ulozi, istraživanja o njihovoj motivaciji i zadovoljstvu poslom rijetka su, osobito u kontekstu unutarnjih pokretača radnog angažmana i radnih uvjeta. Cilj ovog istraživanja bio je ispitati povezanost unutarnje motivacije, sociodemografskih obilježja, radnih uvjeta i zadovoljstva poslom među neeuropskim djelatnicima zaposlenima u hrvatskome TiU. Rezultati pokazuju da unutarnja motivacija značajno korelira sa zadovoljstvom poslom, naglašavajući važnost autonomije, prilika za razvoj i osjećaja postignuća. Suprotno očekivanjima, većina radnih čimbenika (vrsta zaposlenja, rad vikendom) nije imala značajan utjecaj na zadovoljstvo, osim noćnih smjena koje su pokazale negativan učinak. Sociodemografske varijable nisu bile značajno povezane s unutarnjom motivacijom. Nalazi doprinose teorijama motivacije i nude praktične smjernice za prilagodbu smjenskog rada i razvoj strategija koje jačaju unutarnju motivaciju zaposlenika. Buduća istraživanja trebala bi koristiti longitudinalne pristupe kako bi se bolje razumjele dugoročne dinamike motivacije i zadovoljstva zaposlenika.

Ključne riječi: unutarnja motivacija, zadovoljstvo poslom, turizam i ugostiteljstvo, strani radnici, Hrvatska

1. Uvod

Strana radna snaga igra ključnu ulogu u suvremenim gospodarstvima, posebno u sektorima koji su radno intenzivni i oslanjaju se na neposredni međuodnos s kupcima, poput turizma i ugostiteljstva (TiU) (Butković i sur., 2022; Holjevac, 2010; Žigo i sur., 2017). U uvjetima manjka domaće radne snage, države se sve više oslanjaju na strane radnike kako bi zadovoljile rastuće potrebe tržišta rada

(Bartolini, 2024; Butković i sur., 2022; Hodak i sur., 2019; Valenta i sur., 2024). Hrvatska je turistički najovisnija država u EU, a turizam je ključni pokretač gospodarstva, s 20 milijuna turista u 2023. te udjelom od oko 20% u BDP-u i gotovo 40% u izvozu u 2019. (Državni zavod za statistiku 2023; Mikac i Kravaršćan, 2021; Pranić, 2023; Rašić Bakarić, 2020). Uz stalni rast broja turista, potražnja za radnom snagom u TiU nadmašuje kapacitete domaće radne snage, što je dovelo do značajnog

povećanja zapošljavanja stranih radnika, uključujući i one iz neeuropskih zemalja (Bartolini, 2024; Butković i sur., 2022; Valenta i sur., 2024). Posljednjih godina, zapošljavanje radnika iz Filipina, Nepala i Indije postalo je sve učestalije, jer Hrvatska postaje privlačno odredište za radnu snagu izvan EU (Valenta i sur., 2024).

Unatoč povećanoj prisutnosti stranih radnika, malo je istraživanja o njihovim motivacijskim čimbenicima i zadovoljstvu na radu. TiU se često percipira kao sektor s teškim radnim uvjetima, uključujući rad noću i vikendima, niske plaće i nesigurne ugovore. Zbog toga su takve pozicije manje privlačne lokalnom stanovništvu, a hrvatsko tržište rada dodatno je pogođeno demografskim izazovima, poput starenja stanovništva i emigracije (Bartolini, 2024; Valenta i sur., 2024). Da bi se osigurao stabilan priljev radne snage u turističko-ugostiteljski sektor, ključno je razumjeti procese zapošljavanja radnika iz neeuropskih zemalja te čimbenike koji oblikuju njihove radne uvjete i profesionalne ishode. Većina dosadašnjih istraživanja usredotočila se na ekonomske i regulatorne aspekte migracija (npr. Hodak i sur. 2019; Špadina, 2020; Valenta i sur., 2024), dok su subjektivne dimenzije radnog iskustva stranih radnika uglavnom zanemarene. Stoga je cilj ovog istraživanja ispuniti tu spoznajnu prazninu raščlambom motivacije, zadovoljstva i sociodemografskih čimbenika koji utječu na strane radnike u hrvatskom TiU. Ovi uvidi mogu pridonijeti razvoju boljih radnih uvjeta i politika zapošljavanja u TiU. Da bi se postigao cilj ovoga istraživanja, ono se temelji na sljedeća tri istraživačka pitanja (IP):

IP1: Postoji li veza između motivacije stranih radnika iz neeuropskih zemalja i njihovoga zadovoljstva poslom?

IP2: Postoji li razlika u zadovoljstvu poslom s obzirom na radni raspored stranih radnika iz neeuropskih zemalja?

IP3: Postoji li veza između sociodemografskih obilježja stranih radnika iz neeuropskih zemalja i njihove motivacije?

Struktura rada organizirana je na sljedeći način: nakon uvoda, u drugom dijelu prikazan je pregled relevantne literature o motivaciji, zadovoljstvu i

zapošljavanju stranih radnika u TiU. Treći dio rada opisuje metodologiju istraživanja, uključujući prikupljanje i raščlambu podataka. Četvrti dio donosi rezultate istraživanja, dok se u petom poglavlju raspravlja o glavnim nalazima, njihovim implikacijama, ograničenjima i preporukama za daljnja istraživanja.

2. Motivacija i zadovoljstvo zaposlenika te zapošljavanje stranih radnika

2.1. Motivacija zaposlenika u turističkom i ugostiteljskom sektoru

Motivacija zaposlenika opsežno je proučavana u različitim disciplinama, uključujući psihologiju, organizacijsko ponašanje i ekonomiju. Teorije motivacije općenito se dijele u teorije sadržaja (koje istražuju što motivira zaposlenike) i teorije procesa (koje objašnjavaju kako motivacija nastaje) (Ryan i Deci, 2000). Među klasičnim teorijama sadržaja, Herzbergova teorija motivacije razlikuje higijenske čimbenike (npr. plaća, radni uvjeti) i motivatore (npr. priznanje, razvoj), koji oba utječu na zadovoljstvo poslom (Sledge i sur., 2008). Maslowljeva hijerarhija potreba sugerira da zaposlenici najprije zadovoljavaju osnovne potrebe prije nego što dosegnu samoostvarenje, što oblikuje njihovu radnu motivaciju (Tartani i sur., 2023). Vroomova (1964) teorija očekivanja tvrdi da su zaposlenici motivirani kada vide jasnu povezanost između truda, učinka i nagrada, što je osobito važno u uslužnim djelatnostima (Pološki-Vokić i sur., 2008).

Za razliku od ovih teorija, teorija samoodređenja (Deci i Ryan, 1985) naglašava unutarnju motivaciju, gdje zaposlenici teže kompetenciji, autonomiji i povezanosti u svom radu. Ovo istraživanje isključivo se bavi unutarnjom motivacijom, jer je ona ključni pretkazatelj dugoročnog zadovoljstva poslom, predanosti radu i otpornosti na stres (Deci i Ryan, 2000; Gagné i Deci, 2005). Istraživanja su pokazala da kada ljudi za neku aktivnost, koju inače rade iz osobnog interesa, počnu dobiti nagrade, njihova unutarnja motivacija može oslabiti. Ovaj fenomen poznat je kao učinak smanjenja unutarnje motivacije zbog vanjskih poticaja (Lepper i sur., 1973).

2.2. Motivacija i zadovoljstvo poslom

Zadovoljstvo poslom opsežno je povezano s motivacijom u različitim industrijama. Model karakteristika posla (Hackman i Oldham, 1976) ističe pet ključnih dimenzija koje povećavaju motivaciju i zadovoljstvo zaposlenika: raznolikost vještina, identitet zadatka, značaj zadatka, autonomija i povratne informacije. Istraživanja potvrđuju da zaposlenici koji svoj posao doživljavaju smislenim i ispunjavajućim iskazuju višu razinu zadovoljstva (Judge i sur., 2001). Studije zaposlenika u uslužnom sektoru naglašavaju važnost unutarnjih nagrada, poput razvoja vještina i priznanja od strane korisnika, za povećanje zadovoljstva. Također, motivirani zaposlenici pokazuju veću emocionalnu uključenost u posao, što poboljšava njihovo zadovoljstvo (Saks, 2006, 2019).

2.3. Zadovoljstvo poslom i vrsta zaposlenja

Zadovoljstvo poslom značajno ovisi o vrsti ugovora o radu. Zaposlenici s punim radnim vremenom općenito imaju višu razinu zadovoljstva zbog sigurnosti zaposlenja i mogućnosti napredovanja, dok privremeni i sezonski radnici često iskazuju nižu razinu zadovoljstva zbog nesigurnih uvjeta rada (Kalleberg, 2009a, 2009b). Istraživanja pokazuju da sezonski radnici u TiU doživljavaju veći stres i nižu predanost poslu zbog nedostatka dugoročnih perspektiva zaposlenja (Žigo i sur., 2017). Posebno su ugroženi radnici izvan Europe, koji često rade u nesigurnim uvjetima, s ograničenom pravnom zaštitom i minimalnim mogućnostima za napredak (Laškarin Ažić i sur., 2022).

2.4. Sociodemografski čimbenici i motivacija

Dob, spol, obrazovanje i prethodno radno iskustvo mogu oblikovati razinu motivacije zaposlenika (Catania i Randall, 2013). Istraživanja pokazuju da unutarnja motivacija raste s godinama, dok mlađi zaposlenici češće traže vanjske nagrade (DeVoe i Iyengar, 2004; Lord, 2002). Također, spolne razlike u motivaciji ukazuju na to da žene češće doživljavaju unutarnju motivaciju kroz osjećaj smislenosti i povezanosti s radom, dok su muškarci skloniji motivaciji kroz autonomiju i postignuće (Konrad i

sur., 2000). Nacionalnost također utječe na motivaciju – primjerice, radnici izvan Europe mogu biti podložniji iskorištavanju zbog niže razine obrazovanja i manjka zaštite na tržištu rada (Butković i sur., 2022). Poslodavci koji prepoznaju ove razlike i prilagode motivacijske strategije mogu poboljšati zadržavanje zaposlenika i njihovu učinkovitost.

3. Metodologija

Budući da su radnici iz neeuropskih zemalja u Hrvatskoj stariji od 18 godina bili odgovarajući ispitanici za ovo istraživanje, a prikupljanje nasumičnog uzorka pojedinaca diljem države bilo bi vrlo skupo i vremenski zahtjevno, primijenjen je pristup prigodnog uzorkovanja. Za potrebe istraživanja izrađen je namrežni (*engl. online*) anketni upitnik na engleskom jeziku putem Google obrasca. Upitnik se sastojao od četiri dijela: (1) probirno pitanje za provjeru zaposlenja u TiU, (2) sociodemografska obilježja i radni raspored, (3) pet tvrdnji o unutarnjoj motivaciji, te (4) deset tvrdnji o zadovoljstvu poslom. Sve tvrdnje su preuzete iz relevantne stručne literature (Cocchi, 2023; Vijayamohan, 2023) i mjerene pomoću sedmostupanjske Likertove ljestvice (1 = "u potpunosti se ne slažem", 7 = "u potpunosti se slažem").

U lipnju 2023. anketiranje je provedeno metodom snježne grude kako bi se obuhvatio što širi uzorak ispitanika. Novačenje je započeto u jednoj hotelskoj tvrtki u Južnoj Hrvatskoj, koja je tada zapošljavala 50 filipinskih radnika na operativnim pozicijama. Ispitanici su putem unutarnjih komunikacijskih kanala dobili poveznicu na anketu, uz zamolbu da je proslijede kolegama koji rade u drugim hrvatskim turističko-ugostiteljskim tvrtkama i dolaze iz neeuropskih zemalja. Ovim pristupom osigurano je sudjelovanje različitih dobnih skupina i demografskih profila. Konačni uzorak od 77 ispitanika bio je primjeren za izviđajnu prirodu istraživanja te je omogućio dobivanje korisnih uvida u istraživačka pitanja. Iako uzorak nije bio nasumičan, poduzeti su naponi da se obuhvate različita sociodemografska obilježja, uključujući dob i spol.

Da bi se osigurala pouzdanost mjerenja, provedeni su testovi unutarnje dosljednosti Likertovih ljestvica pomoću Cronbachovog alfa pokazatelja, pri čemu su vrijednosti iznosile 0,74 za unutarnju motivaciju i 0,73 za zadovoljstvo poslom, što

ukazuje na zadovoljavajuću pouzdanost (Hair i sur., 2019). Za raščlambu podataka korištene su neparametrijske metode, budući da podaci nisu zadovoljavali pretpostavku normalnosti. Zadovoljstvo zaposlenika prvotno je tretirano kao redosljedna varijabla, dok je motivacija tretirana kao neprekidna varijabla, slijedeći istraživačke konvencije. Ordinalna logistička regresija korištena je kao početni model raščlambe, ali zbog metodoloških ograničenja prilagođena je binarnoj logističkoj regresiji.

4. Rezultati

4.1. Presjek ispitanika

Tablica 1. prikazuje obilježja sudionika istraživanja, uključujući njihova sociodemografska obilježja i radne uvjete. Većina ispitanika ima stručno obrazovanje u TiU (87%), a najveći udio čine žene (70,1%) i osobe u dobi od 30 do 39 godina (49,4%). Također, 67,5% ispitanika radi sezonski, dok većina radi u poslijepodnevnom ili noćnim smjenama (88,3%) te vikendom (79,2%).

Tablica 1. Obilježja ispitanika

Varijabla	Učestalost	Valjani %
Strukovno obrazovanje u turizmu i ugostiteljstvu (N=77)		
da	67	87,0
ne	10	13,0
Spol (N=77)		
muško	23	29,9
žensko	54	70,1
Dob (N=77)		
19-29	21	27,3
30-39	38	49,4
40-49	18	23,4
Radno iskustvo u turizmu i ugostiteljstvu (N=77)		
bez iskustva	7	9,1
<1 godine	15	19,5
1-4 godine	28	36,4
5-10 godina	24	31,2
>10 godina	3	3,9
Vrsta zaposlenja (N=77)		
sezonsko	52	67,5
cjelogodišnje	25	32,5
Vrsta dnevne smjene (rad u poslijepodnevnoj / noćnoj smjeni) (N=77)		
da	68	88,3
ne	9	11,7
Rad vikendom (N=77)		
da	61	79,2
ne	16	20,8

Što se tiče motivacije i zadovoljstva poslom (Tablica 2.), rezultati pokazuju da je prosječna ocjena unutarnje motivacije visoka, pri čemu sudionici najviše cijene osjećaj motiviranosti i prilike za

profesionalni razvoj. Slično tome, zadovoljstvo poslom je generalno na višoj razini, s naglaskom na mogućnosti za učenje i napredak u karijeri.

Tablica 2. Motivacija i zadovoljstvo poslom

Varijabla	Aritmetička sredina	Standardno odstupanje
Unutarnja motivacija (N=77)		
Osjećam se motiviran davati sve od sebe svaki dan	5,80	1,03
Dobivam prilike za razvoj novih vještina	5,65	1,33
Osjećam da pridonosim općim ciljevima tvrtke	5,52	1,34
Moj neposredni nadređeni povjerava mi visoku razinu odgovornosti	5,47	1,34
Priznanje koje dobivam od svoga izravno nadređenoga me motivira	5,45	1,50
Kompozitna ocjena (KO) unut. motivacije (N=77)	5,80	1,03
Zadovoljstvo poslom (N=77)		
Dobivam prilike za učenje i razvoj	6,04	1,17
Posao mi omogućuje razvoj novih vještina	5,97	1,20
Smatram da tvrtka pruža mogućnosti za karijerno napredovanje	5,88	1,16
Moje dnevne zadaće usko su povezane s mojim stručnim vještinama	5,87	1,18
Preporučio bih prijateljima i obitelji tvrtku u kojoj radim	5,86	1,26
Ponovno bih se prijavio za ovaj posao da moram krenuti otpočetak	5,86	1,15
Mislim da je posao ravnomjerno raspoređen u mom timu	5,82	1,21
Sretan sam i zadovoljan na poslu	5,58	0,92
Imam materijale i opremu neophodne za kvalitetno obavljanje posla	5,58	1,46
Smatram da je moj rad smislen i cijenjen	5,57	1,44
KO zadovoljstva poslom (N=77)	5,65	1,34

4.2. Motivacija i zadovoljstvo poslom

Spearmanov test korelacije pokazao je da postoji značajna pozitivna korelacija između motivacije i zadovoljstva poslom ($p = 0,412$, $p < 0,001$), što sugerira da je viša motivacija povezana s većim zadovoljstvom zaposlenika (Tablica 3.).

Tablica 3. Rezultati Spearmanove korelacije

Varijabla	Zadovoljstvo (p)	p -vrijednost
Motivacija	0,412***	<0,001
Vrsta zaposlenja	-0,014	0,904
Vrsta dnevne smjene	0,036	0,443
Rad vikendom	-0,110	0,214

*** $p < 0,001$. Prikazana je Spearmanova ρ (p) vrijednost.

Početno je korištena ordinalna logistička regresija, no zbog problema s malim brojem opažanja u nekim kategorijama zadovoljstva, model nije bio stabilan. Da bi se osigurala pouzdanost raščlambe, zadovoljstvo je sažeto u dvije kategorije (nisko i srednje naspram visoko zadovoljnih zaposlenika; Tablica 4.), a konačni model je binarna logistička regresija. Grupiranje je temeljeno na kompozitnoj ocjeni (KO) zadovoljstva poslom, izračunatoj kao aritmetička sredina odgovora na deset čestica zadovoljstva. Ispitanici s prosječnom ocjenom manjom od 6,00 klasificirani su u kategoriju “niska i srednja razina zadovoljstva”, dok su oni s

prosječnom ocjenom jednakom ili većom od 6,00 svrstani u kategoriju “visoka razina zadovoljstva”. Ova podjela temelji se na tumačenju sedmostupanske Likertove ljestvice, gdje ocjene 1–5 označavaju nižu i srednju razinu slaganja, a ocjene 6 i 7 visoku razinu slaganja s tvrdnjama. Iako se ocjene 5–7 često tumače kao pozitivne, u ovom istraživanju korišten je stroži uvjet; visoko zadovoljstvo definirano je samo na temelju najviših ocjena (6 i 7). Ovakva podjela omogućuje jasnije razlikovanje ispitanika koji dosljedno iskazuju izraženo zadovoljstvo poslom, u skladu s tumačenjem izraženog slaganja na Likertovoj ljestvici.

Tablica 4. Grupirana kompozitna ocjena (KO) zadovoljstva poslom

Varijabla	Učestalost	Valjani %
Grupirana KO zadovoljstva poslom		
niska i srednja (ocjene 1-5)	42	54,5
visoka (ocjene 6-7)	35	45,5

Ovaj model je bio brojidbeno značajan ($\chi^2(4) = 27,234$, $p < 0,001$) te objašnjava približno 40% varijance u zadovoljstvu zaposlenika (Nagelkerke $R^2 = 0,398$) (Tablica 5.).

Tablica 5. Binarna logistička regresija za predviđanje zadovoljstva zaposlenika

Pretkazatelj	B	SE	Wald	df	p-vrijednost	Exp(B) (Omjer izgleda)
Motivacija	1,774	0,443	16,042	1	<0,001***	5,893
Vrsta zaposlenja	0,622	0,610	1,039	1	0,308	1,862
Vrsta dnevne smjene	-2,080	0,988	4,432	1	0,035*	0,125
Rad vikendom	0,081	0,697	0,013	1	0,908	1,084
Konstanta	-8,880	2,553	12,099	1	0,001**	0,000

4.3. Radni raspored i zadovoljstvo poslom

Spearmanovi testovi korelacije pokazali su da vrsta zaposlenja, radna smjena i rad vikendom nisu značajno povezani sa zadovoljstvom zaposlenika (Tablica 3). Kako bi se dodatno ispitala njihova uloga, provedena je binarna logistička regresija, koja je pokazala da je jedino rad u noćnim smjenama značajan pretkazatelj zadovoljstva poslom ($p = 0,035$), dok vrsta zaposlenja i rad vikendom nisu imali značajan učinak (Tablica 5.).

4.4. Sociodemografska obilježja i motivacija

Spearmanove korelacije i neparametrijski testovi nisu pokazali brojidbeno značajne povezanosti između motivacije i sociodemografskih čimbenika (Tablice 6. i 7.). Ovi rezultati sugeriraju da dob, spol, obrazovanje i radno iskustvo ne utječu značajno na unutarnju motivaciju zaposlenika u TiU.

Tablica 6. Rezultati Spearmanove korelacije

Varijabla	Motivacija (ρ)	p-vrijednost
Stručno izobrazba u ugostiteljstvu	-0,214	0,062
Spol	-0,086	0,460
Dob	0,023	0,845
Radno iskustvo	-0,121	0,293

Prikazana je Spearmanova rho (ρ) vrijednost.

Tablica 7. Rezultati neparametrijskih testova za motivaciju

Pretkazatelj	Test	Testna vrijednost	p-vrijednost
Spol	Mann-Whitney U	574,50	0,603
Stručna izobrazba	Mann-Whitney U	265,50	0,290
Dobna skupina	Kruskal-Wallis	0,501	0,779
Radno iskustvo	Kruskal-Wallis	6,298	0,178

5. Zaključak i rasprava

Ovim istraživanjem raščlanjena je povezanost između unutarnje motivacije, radnog rasporeda i zadovoljstva zaposlenika u turističkom sektoru te ulogu sociodemografskih obilježja u tim odnosima.

5.1. Motivacija i zadovoljstvo

Ovo istraživanje potvrđuje da unutarnja motivacija značajno pridonosi zadovoljstvu zaposlenika u turističkom sektoru, što je u skladu s prethodnim istraživanjima (Hackman i Oldham, 1976; Judge i sur., 2001). Za razliku od istraživanja koja naglašavaju sigurnost zaposlenja i vanjske poticaje kao ključne činitelje motivacije kod radnika izvan EU (Dawson et al, 2017), ovo istraživanje usredotočeno je na unutarnju motivaciju. Prethodna istraživanja sugeriraju da dugoročno zadovoljstvo zaposlenika više ovisi o unutarnjim nego o vanjskim čimbenicima (Deci i Ryan, 2000; Gagné i Deci, 2005), što je relevantno za kontekst ovog istraživanja.

5.2. Raščlamba unutarnje motivacije

Iako su svi ispitanici pokazali visoku razinu unutarnje motivacije, dodatna raščlamba pojedinačnih

tvrdnji otkriva nijansiraniju sliku motivacijskih prioriteta. Najvišu prosječnu ocjenu ($M = 5,80$) dobila je tvrdnja "Osjećam se motiviran davati sve od sebe svaki dan", što sugerira snažan osjećaj osobne odgovornosti i radne etike među ispitanicima. Slijede tvrdnje "Dobivam prilike za razvoj novih vještina" ($M = 5,65$) i "Osjećam da pridonosim općim ciljevima tvrtke" ($M = 5,52$), koje ukazuju na važnost profesionalnog razvoja i osjećaja svrhe u radu. S druge strane, najniže ocjene dobile su tvrdnje koje se odnose na predodžbu odnosa s nadređenima – poput povjerenja i priznanja – što može ukazivati na prostor za poboljšanje u međuljudskim odnosima unutar organizacija. Na primjer, tvrdnja "Priznanje koje dobivam od svoga izravno nadređenoga me motivira" imala je najnižu ocjenu među pet tvrdnji ($M = 5,45$). Iako se priznanje može smatrati vanjskim poticajem, njegova uloga u jačanju osjećaja kompetencije i povezanosti čini ga važnim dijelom unutarnje motivacije, osobito u kontekstu teorije samoodređenja (Deci i Ryan, 2000). Dodatno, nalazi ovog istraživanja sugeriraju da neeuropski radnici u TiU možda razvijaju visoku razinu unutarnje motivacije kao mehanizam suočavanja s nesigurnim ili emocionalno zahtjevnim radnim uvjetima. Teorija očuvanja resursa (Hobfoll, 1989) podupire ovakovo tumačenje, ističući da zaposlenici u izazovnim radnim kontekstima

nastoje aktivno očuvati unutarnje resurse poput osjećaja postignuća i svrhe.

5.3. Radni raspored i zadovoljstvo

Unatoč očekivanjima da nesigurni radni rasporedi negativno utječu na zadovoljstvo zaposlenika, rezultati pokazuju da većina ispitanika ne percipira značajan utjecaj vrste zaposlenja, rada vikendom ili smjenskog rada. Jedini izuzetak su noćne smjene, koje smanjuju zadovoljstvo zaposlenika, što je u skladu s nalazima o negativnom utjecaju noćnog rada na ravnotežu između poslovnog i privatnog života (Tartani i sur., 2023; Žigo i sur., 2017). Jedno moguće objašnjenje jest da neeuropski radnici imaju različita očekivanja u vezi s radnim uvjetima, te su skloniji prihvaćanju izazovnih rasporeda kao dijela profesionalnog iskustva.

5.4. Sociodemografska obilježja i motivacija

Za razliku od nekih prethodnih studija koje su pokazale povezanost između dobi, spola ili obrazovanja i motivacije (Ahmad i sur., 2020; Huang i Van De Vliert, 2003), ovo istraživanje nije pronašlo značajne razlike. To sugerira da unutarnja motivacija zaposlenika u TiU nije uvjetovana sociodemografskim karakteristikama, već više individualnim čimbenicima i radnim iskustvom.

5.5. Teorijske implikacije

Ovo istraživanje doprinosi razumijevanju motivacije i zadovoljstva zaposlenika u turizmu kroz primjenu modela karakteristika posla (Hackman i Oldham, 1976), koji naglašava važnost autonomije, raznolikosti vještina i značaja zadatka u povećanju radne motivacije. Teorija očuvanja resursa (Hobfoll, 1989) ističe da zaposlenici nastoje zaštititi i očuvati ključne resurse, poput sigurnosti zaposlenja i prilika za napredak. U kontekstu ovog istraživanja, moguće je da unutarnja motivacija djeluje kao zaštitni mehanizam za neeuropske radnike, pomažući im da se nose s nesigurnim radnim uvjetima u turističkom sektoru. Nalazi ovog istraživanja upućuju na to da unutarnja i vanjska motivacija mogu djelovati istovremeno, što je u skladu s nekim prethodnim istraživanjima koja sugeriraju da se ti procesi mogu nadopunjavati ovisno o

kontekstu rada (Gagné i Deci, 2005). Ipak, druga istraživanja upozoravaju da određeni oblici vanjske nagrade mogu smanjiti unutarnju motivaciju, osobito ako nisu percipirani kao autonomni (Deci i sur., 1999).

5.6. Praktične implikacije

Da bi se smanjio negativan utjecaj noćnih smjena na zadovoljstvo zaposlenika,iskusni menadžeri u turističkom i ugostiteljskom sektoru predlažu omogućavanje zaposlenicima da kroz sustav glasaovanja ili fleksibilnih dogovora sudjeluju u raspodjeli noćnih smjena. Na taj način mogu imati veću kontrolu nad svojim radnim vremenom, što može smanjiti nezadovoljstvo i povećati osjećaj pravednosti unutar organizacije. Također, preporučuje se optimiranje smjenskog rada putem sustava rotiranja ili dodatnih koristi za noćne smjene kako bi se poboljšali radni uvjeti i smanjilo nezadovoljstvo zaposlenika.

Osim poboljšanja smjenskog rada, važno je razmotriti i psihološke aspekte radnog iskustva koji utječu na motivaciju i zadovoljstvo zaposlenika. Stoga bi organizacije koje prepoznaju i dodatno njeguju unutarnje izvore motivacije, primjerice putem mentorskih programa, mogućnosti učenja i jasnih putanja napredovanja, mogle dugoročno povećati razinu zadovoljstva i smanjiti fluktuaciju zaposlenika. Na temelju ovih uvida, preporučuje se da poslodavci razviju ciljanije strategije prepoznavanja doprinosa stranih radnika. Uključivanje redovitih povratnih informacija, priznanje individualnih uspjeha te povećanje autonomije zaposlenika mogli bi dodatno osnažiti njihovu unutarnju motivaciju i unaprijediti organizacijsku klimu.

5.7. Ograničenja i buduća istraživanja

Glavno ograničenje ovog istraživanja je veličina i specifičnost uzorka, koji se sastoji isključivo od neeuropskih radnika u turističkom sektoru. Iako su poduzeti napor da se obuhvate različiti demografski profili, nalazi ovog istraživanja ne mogu se nužno generalizirati na sve neeuropske radnike u hrvatskom turističkom i ugostiteljskom sektoru, kao ni na zaposlenike u drugim industrijama. Buduća istraživanja trebala bi uključiti širi raspon stranih radnika da bi se utvrdilo jesu li ovi obrasci motivacije i zadovoljstva jedinstveni za određene

skupine ili industrijske kontekste. Dodatno, u istraživanje je korišteno prigodno uzorkovanje putem metode snježne grude, što može dovesti do pristranosti u odabiru ispitanika. Nasumično uzorkovanje ili mješoviti metodološki pristup mogli bi poboljšati vanjsku valjanost nalaza.

Metodološki, istraživanje se oslanjalo na pre-sječni dizajn, što ne omogućava praćenje promjena u motivaciji i zadovoljstvu tijekom vremena. Longitudinalna istraživanja mogla bi pomoći u razumijevanju kako se unutarnja motivacija razvija, osobito u uvjetima nesigurnog zaposlenja. Buduće studije također bi trebale dublje istražiti međudnos unutarnje i vanjske motivacije, budući da prethodna istraživanja pokazuju različite efekte vanjskih nagrada na intrinzične procese motivacije (Deci i sur., 1999; Gagné i Deci, 2005). Konačno, potrebno je bolje razumjeti ulogu kulturnih čimbenika u oblikovanju radne motivacije. Radnici iz različitih kulturnih sredina mogu imati različite percepcije radnog ispunjenja, što može utjecati na njihovu reakciju na unutarnje i vanjske motivacijske čimbenike. Kvalitativna istraživanja (npr. dubinski razgovori ili fokusne grupe) mogla bi pružiti dublji uvid u subjektivna iskustva zaposlenika i njihov odnos prema radnim uvjetima u TiU.

Zahvalnica

Zahvaljujem Mateji Bakušić čiji je diplomski rad poslužio kao važna osnova za izradbu ovog rukopisa. Kao njezin mentor ne samo da sam nadgledao njezino izvorno istraživanje, već joj pružih smjernice u oblikovanju istraživačkog fokusa te preporučih relevantne izvore literature. Njezin rad pridonio je oblikovanju teme i uključivao je prikupljanje podataka korištenih u ovom radu. Iako sam podatke ponovno raščlanio rabeći drukčije brojidbene metode te samostalno napisao rukopis, njezin pregled literature i provedeno terensko istraživanje bili su od velike važnosti. Zahvaljujem joj na tom doprinosu i potvrđujem da sam pribavio njezinu pisanu suglasnost za uključivanje elemenata njezina diplomskog rada u ovaj rukopis.

Citirani izvori

- Ahmad, R., Abdul Rahman, R., Mustaffa, C. S., Mohd Shariff, N., Zainol, N. A., & Rashid Radha, J. Z. R. R. (2020). Policy changes and its enforcement toward foreign workers in hotel industry. *Journal of Tourism, Hospitality and Environment Management*, 5(18), 1-9.
- Bartolini, D. (2024). Addressing Labor Shortage in Croatia. Preuzeto 7.2.2025. s <https://www.elibrary.imf.org/view/journals/002/2024/247/article-A002-en.xml>.
- Butković, H., Samardžija, V., & Rukavina, I. (2022). Strani radnici u Hrvatskoj: Izazovi i mogućnosti za gospodarski i društveni razvoj/Foreign workers in Croatia: Challenges and opportunities for economic and social development.
- Catania, G., & Randall, R. (2013). The relationship between age and intrinsic and extrinsic motivation in workers in a Maltese cultural context. *International Journal of Arts & Sciences*, 6(2), 31.
- Cocchi, R. (2023). Employee Satisfaction Survey: Best Practices & Insights. Preuzeto 21.5.2023. s <https://www.hrmorning.com/articles/employee-satisfaction-survey/>.
- Dawson, C., Veliziotis, M., & Hopkins, B. (2017). Temporary employment, job satisfaction and subjective well-being. *Economic and Industrial Democracy*, 38(1), 69-98.
- Deci, E. L., Koestner, R., & Ryan, R. M. (1999). A meta-analytic review of experiments examining the effects of extrinsic rewards on intrinsic motivation. *Psychological Bulletin*, 125(6), 627-668.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The "what" and "why" of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological Inquiry*, 11(4), 227-268.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Springer.
- DeVoe, S. E., & Iyengar, S. S. (2004). Managers' theories of subordinates: A cross-cultural examination of manager perceptions of motivation and appraisal of performance. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 93(1), 47-61.
- Državni zavod za statistiku (2024). Dolasci i noćenja turista u 2023. Preuzeto 27.2.2025. s <https://www.dzs.hr/>.
- Gagné, M., & Deci, E. L. (2005). Self-determination theory and work motivation. *Journal of Organizational Behavior*, 26(4), 331-362.

- Hackman, J. R., & Oldham, G. R. (1976). Motivation through the design of work: Test of a theory. *Organizational Behavior and Human Performance*, 16(2), 250-279.
- Hair, J. F., Babin, B. J., Black, W. C., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis*: Cengage.
- Hobfoll, S. E. (1989). Conservation of resources: a new attempt at conceptualizing stress. *American Psychologist*, 44(3), 513.
- Hodak, D. F., Kesar, O., & Matečić, I. (2019). The influence of foreign labour force on service provision and hotel guests' experience – the case of coastal Croatia. *Tourism in Southern and Eastern Europe...* 5, 275-289.
- Holjevac, I. A. (2010). Work productivity in the Croatian hotel industry–fundamentals and concepts for achieving growth and competitiveness. *South East European Journal of Economics and Business*, 1(1), 85-90.
- Huang, X., & Van De Vliert, E. (2003). Where intrinsic job satisfaction fails to work: National moderators of intrinsic motivation. *Journal of Organizational Behavior: The International Journal of Industrial, Occupational and Organizational Psychology and Behavior*, 24(2), 159-179.
- Judge, T. A., Thoresen, C. J., Bono, J. E., & Patton, G. K. (2001). The job satisfaction–job performance relationship: A qualitative and quantitative review. *Psychological Bulletin*, 127(3), 376-407.
- Kalleberg, A. L. (2009a). Precarious work, insecure workers: Employment relations in transition. *American Sociological Review*, 74(1), 1-22.
- Kalleberg, A. L. (2009b). Rethinking the sociology of work, workers and the workplace. *Labour and Industry*, 19(3), 29-48.
- Konrad, A. M., Ritchie Jr, J. E., Lieb, P., & Corrigan, E. (2000). Sex differences and similarities in job attribute preferences: a meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 126(4), 593.
- Laškarin Ažić, M., Rašan, D., & Prahin, I. (2022). Measuring the quality of working conditions and behavioral intentions of seasonal hospitality workers in Croatia. *Tourism: An International Interdisciplinary Journal*, 70(3), 369-382.
- Lepper, M. R., Greene, D., & Nisbett, R. E. (1973). Undermining children's intrinsic interest with extrinsic reward: A test of the "overjustification" hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 28(1), 129.
- Lord, R. L. (2002). Traditional motivation theories and older engineers. *Engineering Management Journal*, 14(3), 3-7.
- Mikac, R., & Kravaršćan, K. (2021). Croatian Tourism Sector and Crisis Management-A Case Study Related to the COVID-19 Pandemic. *Tourism: An International Interdisciplinary Journal*, 69(4), 611-629.
- Pološki-Vokić, N., Klindžić, M., & Đaković, M. (2008). Work Motivation of Highly-Educated Croatian Employees–What Should Managers and HR Experts Know. *South East European Journal of Economics and Business*, 3(1), 89-96.
- Pranić, L. (2023). What Happens to the Entrepreneurial Intentions of Gen Z in a Crony Capitalist Economy Amidst the COVID-19 Pandemic? *Sustainability*, 15(7), 5750.
- Rašić Bakarić, I. (2020). *Sektorske analize - Turizam*. Preuzeto 7.1.2025. s <https://repozitorij.eizg.hr/islandora/object/eizg%3A359/datastream/FILE0/view>.
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, 55(1), 68.
- Saks, A. M. (2019). Antecedents and consequences of employee engagement revisited. *Journal of Organizational Effectiveness: People and Performance*, 6(1), 19-38.
- Saks, A. M. (2006). Antecedents and consequences of employee engagement. *Journal of Managerial Psychology*, 21(7), 600-619.
- Sledge, S., Miles, A. K., & Copping, S. (2008). What role does culture play? A look at motivation and job satisfaction among hotel workers in Brazil. *The International Journal of Human Resource Management*, 19(9), 1667-1682.
- Špadina, H. (2020). Migrants' access to social protection in Croatia. In J.-M. Lafleur & D. Vintila (Eds.), *Migration and social protection in Europe and beyond (Volume 1): Comparing access to welfare entitlements* (str. 81-94). Springer International Publishing.
- Tartani, M.-R., Tzavara, D., Argyropoulou, M., Koufopoulos, D., & Argyropoulou, R. (2023). Employee motivation and job performance of employees in the greek hospitality industry. Paper presented at the 16th Annual Conference of the EuroMed Academy of Business.

Valenta, M., Jakobsen, J., Gregurović, M., & Župarić-Iljić, D. (2024). Changes in the Croatian migration system: conceptualising the complexities of migrations, 1990-2023. *Labor History*, 65(4), 510-527.

Vijayamohan, P. (2023). *Employee Motivation Questionnaire: Examples & Templates*. Preuzeto 6.5.2023. s <https://surveysparrow.com/blog/employee-motivation-questionnaire/>.

Vroom, V. (1964). *Work and motivation*. San Francisco. In CA: Jossey-Bass.

Žigo, A., Gabruč, J., & Juvan, E. (2017). Employment experience of immigrant workers in tourism. *Academica Turistica-Tourism and Innovation Journal*, 10(2), 151-165.

Non-European Workforce in Croatian Tourism: The Impact of Intrinsic Motivation and Working Conditions on Job Satisfaction

Summary

The tourism and hospitality (T&H) sector in Croatia is facing a labor shortage, which has led to an increasing reliance on foreign workers from non-european countries. Despite their important role, research on their motivation and job satisfaction is rare, especially in the context of internal drivers of work engagement and working conditions. The aim of this study is to examine the relationship between intrinsic motivation, sociodemographic characteristics, working conditions, and job satisfaction among non-european workforce in Croatia's T&H. The results show that intrinsic motivation significantly correlates with job satisfaction, highlighting the importance of autonomy, opportunities for development, and a sense of achievement. Contrary to expectations, most work-related factors (type of employment, weekend work) did not have a significant impact on satisfaction, except for night shifts, which showed a negative effect. Sociodemographic variables were not significantly related to intrinsic motivation. The findings contribute to motivation theories and offer practical guidelines for adjusting shift work and developing strategies that enhance employees' intrinsic motivation. Future research should employ longitudinal approaches to better understand the long-term dynamics of motivation and job satisfaction.

Keywords: *intrinsic motivation, job satisfaction, tourism and hospitality, foreign workers, Croatia*

Prednosti i nedostaci korištenja e-mail marketinga na primjeru sportsko-modnog tržišta u Hrvatskoj

Boris Marjanović^a, Ivana Benolić^b

a Dr. sc., dipl. oec., profesor stručnih studija, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, bmarjanovic@iv.hr

b Struč. spec. oec., studentica, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, ibenolic@iv.hr

Sažetak

U suvremenom svijetu, gdje dominiraju digitalne tehnologije, a potrošači svakodnevno koriste digitalne komunikacijske kanale, neminovno je da tvrtke budu prisutne online kako bi mogle komunicirati s potencijalnim potrošačima upravo tamo gdje se oni nalaze. Digitalne tehnologije u velikoj su mjeri potisnule klasične komunikacijske kanale za potrebe promocije, stoga je digitalni marketing uzeo maha i postao značajna karika u poslovanju tvrtki u dosezanju, informiranju i poticanju potrošača na kupnju. E-mail marketing, kao jedan od alata digitalnog marketinga, ima značajnu ulogu u poticanju potrošača na kupnju. Međutim, e-mail marketing ima i svoje prednosti i nedostatke. Ovaj rad predstavlja rezime istraživanja provedenog na temelju dubinskog intervjua hrvatskih potrošača na sportsko-modnom tržištu. Rezultati analize ukazali su na određene slabosti, a sukladno tome ponuđeni su i prijedlozi poboljšanja za upravljanje e-mail marketingom s ciljem postizanja bolje učinkovitosti komunikacije i, u konačnici, povećanja stope kupnje. Prijedlozi poboljšanja usmjereni su na sljedeće kategorije: ciljanje potrošača, sadržaj poruke, dizajn poruke, odnos prema potrošačima te upravljanje e-mail marketingom. Učinkovitost se ne može postići djelomičnim poboljšanjima, već je nužno primijeniti holistički pristup i izvršiti poboljšanja u svim kategorijama koje su važne potrošačima u komunikaciji s tvrtkama putem e-maila.

Ključne riječi: digitalni marketing, e-mail marketing, sportsko-modno tržište, online komunikacija, učinkovitost marketinške komunikacije, optimizacija e-maila

1. Uvod

Današnji svijet je digitalni svijet, oblikovan revolucijom pokrenutom prvenstveno razvojem interneta. Internet je doveo do promjene načina življenja i ponašanja svakog pojedinca u dodiru s tom tehnologijom. Također je doprinio razvoju niza

web-temeljenih platformi, ponajprije društvenih mreža, koje su značajno promijenile prirodu ljudskih aktivnosti i olakšale društvene interakcije (Lv i Zhang, 2024). Internet, društvene mreže, mobilne aplikacije i druge prateće komunikacijske tehnologije postale su sastavni dio svakodnevnog života većine stanovnika Zemlje (Dwivedi i sur., 2021).

Značaj digitalnih tehnologija ogleda se i u činjenici da razvoj digitalnih komunikacijskih kanala ne prestaje, već se u njih neprestano ulaže (Goic i Rojas, 2019).

Međutim, zašto je to tako? Danas velika većina ljudi provodi značajan dio vremena u digitalnom prostoru – iz različitih razloga – a kao potrošači upravo ondje traže informacije o proizvodima i uslugama koje žele kupiti (Faruk i sur., 2021). Stoga, ako većina potrošača boravi u digitalnom prostoru, logično je da i tvrtke moraju biti prisutne u tom okruženju (Tiago i Verissimo, 2014). Sukladno tome, marketing se razvija u novom smjeru, poznatom kao digitalni marketing. On nudi niz strateških alata za promotivne svrhe, poput eWOM (elektronička usmena predaja), e-mail marketinga, partnerskog (engl. affiliate) marketinga, optimizacije za tražilice (SEO), marketinga na društvenim mrežama i korporativnog bloganja (Nuseir i sur., 2023). Sve to upućuje na činjenicu da tvrtke danas nemaju izbora nego biti prisutne na internetu ako žele uspješno prodavati svoje proizvode i usluge (Faruk i sur., 2021), zbog čega digitalne tehnologije postaju neminovna stvarnost poslovanja.

Svrha ovoga rada je istražiti specifičan segment digitalnog marketinga – e-mail marketing – te analizirati njegove prednosti i nedostatke na primjeru sportsko-modnog tržišta u Hrvatskoj.

2. Pregled literature

Ponašanje potrošača značajno se promijenilo zbog tehnoloških inovacija i sveprisutnog prihvaćanja mobilnih uređaja, što izravno doprinosi načinu na koji potrošači komuniciraju i koriste digitalne alate, posebno za donošenje odluka i online kupnju (Dwivedi i sur., 2021).

Budući da je marketinška komunikacija sve više integrirana s digitalnim prostorom, online alati, poput primjerice društvenih mreža, mogu se koristiti za stvaranje digitalnih poveznica s potrošačima (Lv i Zhang, 2024). Digitalno povezivanje tvrtki i potrošača nameće drugačije pristupe od klasičnih, donedavno korištenih marketinških alata. Digitalni marketing, upravo zbog svoje specifičnosti, temelji se na korištenju mobilnih uređaja, društvenih mreža, interneta, internetskih tražilica i drugih sličnih medija (Nuseir i sur., 2023), kako bi

se dosegli potrošači na nove načine u digitalnom prostoru.

Intenzivno korištenje digitalnih medija promijenilo je način na koji potrošači doživljavaju promotivne aktivnosti (Antczak, 2024) i dovelo do pada korištenja tradicionalnih komunikacijskih kanala te preusmjerilo najveće marketinške napore tvrtki prema digitalnim medijima radi zadržavanja potrošača i povećanja prodaje (Dwivedi i sur., 2021). U prilog tome ide i činjenica da rastuća ulaganja i veliki interes za digitalne medije, poput društvenih mreža, e-mail marketinga i digitalnog oglašavanja, pokazuju njihovu učinkovitost u ciljanju publike i postizanju ciljeva rasta tvrtke (Faruk i sur., 2021; Tiago i Verissimo, 2014).

E-mail marketing predstavlja jedan od najučinkovitijih načina oglašavanja na internetu (Jeshurun, 2018; Rosário, 2021) i može se definirati kao ciljano slanje komercijalnih i nekomercijalnih poruka na detaljan popis primatelja, odnosno e-mail adresa (Araújo i sur., 2022; Hudak i sur., 2017). E-mail marketing se temelji na e-mailu, što predstavlja alat za direktnu komunikaciju preko interneta koji gotovo trenutno dostavlja poruke i informacije između pojedinaca i organizacija (Ginn, 2024). E-mail marketing se pokazao kao učinkovit način interakcije s kupcima i promocije proizvoda ili usluga (Antczak, 2024) i, zbog svoje pouzdanosti i efektivnosti, široko se koristi u elektroničkoj trgovini (Sabbagh, 2021), gotovo na svakodnevnoj bazi (Thomas i sur., 2022).

Služi i za povećanje prometa na webu i podršku prodaji, za slanje informativnog newslettera (Hudak i sur., 2017), te je jedan od najbržih i najučinkovitijih načina za generiranje novih poslovnih prilika, privlačenje novih kupaca, održavanje kontakta s postojećima te poticanje prodaje (Jeshurun, 2018; Thomas i sur., 2022), uz minimiziranje operativnih troškova (Chaparro-Peláez i sur., 2022). Zbog svoje svestranosti predstavlja najbržu metodu razmjene digitalnih poruka na internetu (Sabbagh, 2021) te je jedan od najkorištenijih i najprofitabilnijih oblika izravnog marketinga u današnjim poslovnim uvjetima na internetu (Chaparro-Peláez i sur., 2022; Hudak i sur., 2017).

Prednosti e-maila, a time i e-mail marketinga, su višestruke, od kojih su najznačajnije navedene u nastavku. Prvenstveno, e-mail je široko korišten medij među populacijom, s gotovo 80% korisnika u razvijenim zemljama (Chaparro-Peláez i sur.,

2022), pa se putem e-maila može doseći velik broj potencijalnih potrošača. E-mail omogućuje trgovcima slanje poruka svojim potrošačima po vrlo niskim troškovima, zahtijeva manje vremena za pripremu i izvršenje, te generira brži odgovor i stvara priliku za interaktivnu komunikaciju s kupcima (Zhang i sur., 2017). Zbog interaktivnosti, koja olakšava dvosmjernu komunikaciju, e-mail je koristan i za zadržavanje kupaca i kao alat za akviziciju novih (Sabbagh, 2021). Visoka stopa ciljanja potrošača e-mail kampanjama postiže se korištenjem segmentacije, čime se ostvaruje veća učinkovitost, budući da se manje truda troši na komuniciranje pogrešnih poruka pogrešnim ljudima ili obraćanje pojedincima koji nisu ciljno tržište (Hanna i sur., 2015). E-mail je snažan i koristan alat za personalizaciju sadržaja (Chauhan, 2022), što podrazumijeva korištenje sustava koji prilagođava sadržaj određenom korisniku pomoću analitičkih podataka (Balta, 2020). Personalizacija jednostavno znači individualiziran pristup kupnji za potrošače na temelju podataka koje su o njima prikupili marketinški stručnjaci, kako bi se svakom kupcu pružilo jedinstveno iskustvo (Dangi i Malik, 2017).

Nužno je navesti i značajne nedostatke korištenja e-maila u marketinške svrhe. Budući da je e-mail neosoban medij, nedostatak neverbalnih znakova (poput izraza lica, govora tijela i tona glasa) može dovesti do pogrešnog tumačenja i sadržaja poruke i njezine emocionalne intonacije (Simpson i sur., 2024 prema Byron, 2008). Nadalje, nepažljivo planiranje i pretjerano slanje promotivnih e-mailova može dovesti do smanjenja njihove stope otvaranja (Chaparro Peláez i sur., 2022), stvarajući dojam irelevantnosti ("spam") i preopterećenja (Simpson i sur., 2024). Personalizacija, koliko god imala pozitivnih aspekata, ima i svoju negativnu stranu. Pretjerano personaliziranje poruka, poput uključivanja osobnih pozdrava, negativno utječe na korisnike jer dira u pitanje privatnosti (Kiselova, 2019). Također, pretjerana personalizacija može dovesti do osjećaja nametljivosti i manipulacije od strane pošiljatelja (Nobile i Cantoni, 2023). S druge strane, loša personalizacija može rezultirati ciljanim slanjem poruka nezainteresiranoj publici,

što vodi do percipiranja marketinških e-poruka kao nasumičnog "spama", te njihovog zanemarivanja i brisanja (Sabbagh, 2021).

U nastavku je analiziran primjer korištenja e-mail marketinga na sportsko-modnom tržištu u Hrvatskoj, temeljen isključivo na rezultatima istraživanja provedenog putem dubinskog intervjua. Na temelju toga identificirane su prednosti i nedostaci ovakvog promotivnog pristupa te su predložena moguća poboljšanja e-mail marketinga kao alata za postizanje prodajnih i drugih ciljeva tvrtke u ovom sektoru, ali i u drugim industrijama te u širem kontekstu digitalnog marketinga.

3. Metodologija istraživanja

Za potrebe istraživanja primijenjena je kvalitativna metoda, konkretno tehnika dubinskog intervjua, provedena s pet ispitanika iz aktivne Facebook grupe "Sportska odjeća i obuća", koja broji oko 2,5 tisuće članova i odlikuje se visokom razinom svakodnevne aktivnosti.

Ispitanici su odabrani na temelju iskazanog interesa za sudjelovanjem, a intervjui su provedeni online putem Zoom platforme, što je omogućilo veću fleksibilnost i pristupačnost.

Postavljena su tri istraživačka pitanja (Benolić, 2025):

- Istraživačko pitanje 1: Kako hrvatski potrošači percipiraju e-mail marketing u sportskom i modnom sektoru?
- Istraživačko pitanje 2: Na koji način e-mail marketing utječe na njihove kupovne odluke?
- Istraživačko pitanje 3: Koji su ključni faktori koji čine e-mail marketing učinkovitijim u poticanju kupnje?

Na temelju ovih pitanja formulirano je 12 potpitanja za intervju. Dobiveni rezultati su sažeti, analizirani i prikazani u Tablicama 1. i 2., dok su prijedlozi za učinkovitije korištenje e-mail marketinga objedinjeni u Tablici 3.

4. Analiza korištenja e-mail marketinga na primjeru sportsko-modnog tržišta u Hrvatskoj

E-mail marketing pokazao se kao korisno sredstvo, odnosno alat u rukama marketinških stručnjaka za dosezanje potencijalnih potrošača, poticanje kupnje i pružanje informacija. Međutim, e-mail

marketing ima svoje snage i slabosti, odnosno prednosti i nedostatke. Sljedeća analiza, temeljena na kvalitativnom istraživanju provedenom metodom dubinskog intervjua, pruža dublji uvid u značaj e-mail marketinga u očima potencijalnih potrošača sportsko-modnih artikala na hrvatskom tržištu. Tablica 1 i Tablica 2 prikazuju prednosti i nedostatke e-mail marketinga kao marketinškog alata.

Tablica 1. Prednosti korištenja e-mail marketinga na primjeru sportsko-modnog tržišta u Hrvatskoj

Kategorija	Ključne prednosti
1. Visok stupanj angažmana primatelja	• Prijava, slanje i čitanje newslettera • Personalizacija sadržaja • Mogućnost odabira preferiranih brendova • Direktn pristup internetskim poveznicama
2. Stvaranje emocionalne povezanosti i lojalnosti	• Rana informacija o ekskluzivnim ponudama, novim kolekcijama i slično • Dodatne korisne informacije vezane uz proizvode, savjeti i preporuke
3. Pozitivno percipiran i utjecajan komunikacijski kanal	• Jasnoća predloženih informacija i uredan izgled • Optimizacija newslettera za mobilne uređaje • Personaliziran pristup u oblikovanju informacija • Dodatni izvor informacija za donošenje odluke o kupnji u fizičkom dućanu
4. Poticanje kupnje	• Isticanje financijskih i drugih oblika poticaja • Personalizacija i relevantnost ponude • Jedinstvenost ponude • Ponude temeljene na prethodnim kupnjama i interesima potrošača • Vremenski ograničene ponude i akcije • Jasno osmišljen i strukturiran sadržaj • Jasna segmentacija potrošača • Vizualno privlačan dizajn

Izvor: prilagođeno prema Benolić (2025).

Tablica 1. prikazuje prednosti koje pruža e-mail marketing, a koje se mogu podijeliti u četiri kategorije: visok stupanj angažmana primatelja, stvaranje emocionalne povezanosti i lojalnosti, pozitivno percipirani i utjecajni komunikacijski kanal te poticanje kupnje.

Visok stupanj angažmana može se postići poticanjem potrošača na prijavu na newsletter (hrv. e-letak), čime se ostvaruje prvi kontakt s potencijalnim potrošačem i potiče njegov interes na način

da se prikupi njegov e-mail kontakt za buduću komunikaciju. Kontinuiranim slanjem newslettera ostvaruje se kontinuitet komunikacije s potrošačem, međutim to još uvijek nije dovoljno za postizanje višeg stupnja angažmana. Nužno je također oblikovati sadržaj prema mjeri i potrebama potrošača, što se može postići dodatnim upitima i praćenjem kupovina potrošača. Omogućavanjem potrošaču odabrati tematiku ili brendove koji ga zanimaju, moguće je dodatno personalizirati

ponude koje se mogu uključiti u newsletter. Pored toga, vrlo koristan alat jesu internetske poveznice prisutne u samom newsletteru, koje olakšavaju pristup željenom sadržaju na web stranici brenda (hrv. tržišne marke).

Cilj svakog brenda je stvoriti lojalne korisnike, odnosno uspostaviti emocionalnu povezanost između brenda i potrošača. Analiza je utvrdila da je moguće potaknuti stvaranje emocionalne veze s brendom kroz ekskluzivnost ponuda i informacija o novim kolekcijama koje su primarno dostupne putem newslettera, a još nisu prisutne u ponudi trgovina. Također, određeni korisnici preferiraju dodatne korisne informacije vezane uz proizvode koje kupuju ili za koje su zainteresirani, poput raznih savjeta i preporuka. Dakle, pružanje dodatnih vrijednosti putem newslettera, koje nije moguće ostvariti drugdje – primjerice u fizičkim ili web prodavaonicama – može doprinijeti stvaranju dublje veze između brenda i potrošača.

Stvaranje pozitivne percepcije e-mail marketinga kao komunikacijskog kanala ključno je za osiguravanje visokog stupnja angažmana potrošača s medijem i s brendom. Kako bi se stvorio pozitivan stav, nužno je poštivati potrošača i njegove potrebe, i to na način da se informacije koje se komuniciraju isporučuju jasno i razumljivo. Budući da većina potrošača danas koristi mobilne uređaje za komunikaciju, pretraživanje interneta, pa čak i za kupnju, optimizacija newslettera za mobilne uređaje nužna je kako bi informacije bile jasno predočene i pregledno prikazane. Potrošači preferiraju personalizirani pristup oblikovanju informacija – drugim riječima, generičke poruke i informacije koje nisu u sferi interesa potrošača treba izbjegavati. Također, potrošači koriste newslettere kao dodatni izvor informacija o proizvodima i brendovima, čak i ako ne obavljaju kupnje putem interneta, već kupuju u fizičkim trgovinama. Te informacije svejedno služe kao koristan poticaj za buduće kupnje. Iako navedene stavke nisu izravno povezane sa stvaranjem transakcije, one predstavljaju prateće koristi koje dugoročno mogu stvoriti ili osigurati temelj za buduće kupnje.

Ostvarenje transakcije krajnji je cilj e-mail marketinga. Međutim, poticanje kupnje, odnosno izazivanje same transakcije, jedan je od najtežih koraka. Stoga je nužno osigurati određene kvalitativne uvjete koji će maksimalno umanjiti otpor potrošača prema odluci o kupnji. Možda najznačajniji

motivatori kupnje jesu financijski poticaji, primjerice u obliku popusta, što je element koji svakako treba isticati kroz e-mail marketing. Zatim, personalizacija ponude i njezina relevantnost – odnosno usklađenost s potrebama potrošača – također su ključni preduvjeti. Potrošači neće kupovati nešto što im nije potrebno ili što je za njih irelevantno. Oblikovanje ponude u skladu s potrebama potrošača zahtijeva spoznaju o njihovim prethodnim kupnjama. Upravo te informacije mogu kod promoviranja brenda pružiti vrijedne uvide za oblikovanje budućih ponuda. Pokazalo se da vremenski ograničene ponude i akcije na određene artikule predstavljaju psihološki snažan motivator za poticanje kupnje, pa takav pristup može rezultirati dodatnim prodajama. Ako je vizualni izgled newslettera loš, nekvalitetan ili zastario, odnosno ako sam koncept nije dobro osmišljen i jasno strukturiran, može doći do gubitka pažnje i interesa potrošača. Dakle, dobra struktura, jasan sadržaj i ugodan dizajn temelj su za potencijalnu kupnju. Na kraju, kvalitetna segmentacija tržišta neophodna je jer kod promocije brenda omogućuje jasno razumijevanje koristi koje potrošači traže kako bi zadovoljili svoje potrebe.

Ostvarenje transakcije najteži je i konačni cilj za svaki brend. Sve prethodne točke – stvaranje visokog stupnja angažmana, pozitivne percepcije e-mail marketinga, emocionalne povezanosti i lojalnosti – predstavljaju preduvjete tog cilja. Zato je nužno voditi računa o cjelovitom konceptu e-mail marketinga, a ne fokusirati se isključivo na prodaju. Zanimarivanje bilo kojeg od prethodno navedenih elemenata može dovesti do loših prodajnih rezultata i neučinkovitosti e-mail marketinga.

Tablica 2. prikazuje nedostatke prepoznate u e-mail marketingu, koji se mogu podijeliti u tri kategorije: nizak stupanj angažmana primatelja, negativna percepcija komunikacijskog kanala te smanjena učinkovitost kampanja.

Uzroci niskog stupnja angažmana primatelja e-mail marketinga su višestruki. Možda najveći razlog tome jest pretjerano korištenje e-mail marketinga od strane raznih brendova, čime se stvara zamor kod potrošača zbog velikog broja informacija koje su često nepotrebne i ne odgovaraju njihovim stvarnim potrebama. U vezi s navedenim, generičke i nekreativne poruke koje ne pružaju dodatnu vrijednost za potrošače također nisu povezane s njihovim interesima, što rezultira

zasićenjem i otporom prema takvim promotivnim porukama. Još jedan važan razlog niskog stupnja angažmana može biti i to što korisnici uopće ne primaju promotivne e-mail poruke – najčešće zbog korištenja spam filtera koji ih automatski preusmjeravaju izvan primarne dolazne pošte ("inbox"). Time se dodatno smanjuje učinkovitost e-mail marketinga jer potrošači često neće ni biti svjesni da su primili takve promotivne e-maile od strane promotora brenda.

Negativna percepcija prema e-mail marketingu i newsletterima koji služe u tu svrhu prilično

je značajan čimbenik, jer takva percepcija stvara odbojnost prema toj vrsti komunikacije, što dovodi do automatskog odbacivanja bilo kakvog kontakta ili interakcije putem tog kanala. Jedan od glavnih strahova koje potrošači mogu razviti prema e-mail marketingu jest pretjerana ili prevelika personalizacija poruka, što može dovesti do percepcije da brendovi mogu zloupotrijebiti osobne podatke. Također, pretjerana učestalost primanja promotivnih poruka, a samim time i dojam agresivnog pristupa prodaji putem e-maila, može stvoriti odbijanje prema takvom načinu komunikacije brenda.

Tablica 2. Nedostaci korištenja e-mail marketinga na primjeru sportsko-modnog tržišta u Hrvatskoj

Kategorija	Ključne slabosti
1. Nizak stupanj angažmana primatelja	• Zasićenost informacijama zbog česte uporabe e-maila kao promotivnog alata • Generičke i nekreativne poruke koje ne ukazuju na konkretne koristi • Slaba vidljivost zbog korištenja spam filtera
2. Negativna percepcija kao komunikacijskog kanala	• Prevelika personalizacija koja izaziva zabrinutost zbog zloupotrebe osobnih podataka • Pretjerana učestalost primanja promotivnih poruka • Agresivan pristup prodaji
3. Smanjena učinkovitost kampanja	• Formalna ili površna personalizacija sadržaja • Neujednačena kvaliteta ponuda • Nemogućnost preciznog određivanja trenutka nastanka potrebe za kupnjom

Izvor: prilagođeno prema Benolić (2025).

Smanjena učinkovitost promotivnih aktivnosti putem e-mail marketinga nešto je čega se promotori brendova pribojavaju i žele smanjiti taj negativan utjecaj na svoju prodaju. Do smanjenja učinkovitosti dovodi formalnost ili površna personalizacija sadržaja, drugim riječima, ne vodi se dovoljno brige o specifičnim potrebama potrošača i sukladno tome ponude su oblikovane na neadekvatan način. Određeni potrošači su uočili da postoji neujednačenost kvalitete raznih ponuda, odnosno promoviraju se kvalitetni brendovi zajedno s nekvalitetnim. Potrošači očekuju od određenog brenda da u svojoj ponudi ima uravnotežen asortiman kvalitetnih proizvoda.

Možda najproblematičniji, a ujedno i najvažniji čimbenik koji može utjecati na poticanje prodaje jest vrijeme, odnosno spoznaja trenutka nastanka

potrebe kod potrošača. Upravo je taj trenutak ključan za stvaranje transakcija – kada potrošač ima potrebu, tada kupuje. Budući da je izuzetno teško prepoznati tu informaciju, posebno kad je riječ o komunikaciji koja nije direktna, dakle kada potrošač i brend ne komuniciraju simultano ili interaktivno, nije moguće preko e-mail marketinga uvijek prepoznati taj ključan trenutak i poslati adekvatnu ponudu u pravom trenutku koja bi potaknula kupoprodajnu transakciju.

Također i u ovom slučaju smanjena učinkovitost e-mail marketinga rezultat je kombinacije niskog stupnja angažmana primatelja i negativne percepcije e-mail marketinga kao komunikacijskog kanala. Zato je nužno primijeniti holistički pristup u razvoju e-mail marketinga – na način da se potenciraju njegove pozitivne strane, a uklone

negativne, kako bi se postigao željeni uspjeh u prodaji.

4.1. Prijedlozi za učinkovito korištenje e-mail marketinga na primjeru sportsko-modnog tržišta u Hrvatskoj

Zahvaljujući ovoj analizi bilo je moguće stvoriti kvalitetnu sliku o prednostima i nedostacima

e-mail marketinga u specifičnom istraživačkom kontekstu, odnosno na tržištu sportske modne odjeće u Hrvatskoj. Sagledavanjem cjelokupnih prednosti i nedostataka moguće je oblikovati opći pristup kako strukturirati i upravljati e-mail marketingom, s mogućnošću šire primjene u drugim područjima poslovanja. U nastavku, u Tablici 3., prikazane su smjernice za potencijalno učinkovit komunikacijski pristup putem e-mail marketinga.

Tablica 3. Prijedlozi za efikasno korištenje e-mail marketinga

Kategorija	Prijedlozi
1. Ciljanje	- Segmentacija potrošača prema demografskim i ostalim kriterijima - Razumijevanje razlika u potrebama i interesima potrošača - Interaktivno prikupljanje i selekcija interesa potrošača vezanih za brendove i proizvode
2. Sadržaj	- Personalizacija informacija i ponuda temeljenih na potrebama potrošača - Isticanje financijskih i drugih poticaja za kupnju - Kreativne i ne-generičke poruke koje privlače pažnju
3. Dizajn	- Jasno i pregledno predočenje informacija - Logična i jednostavna struktura sadržaja - Optimizacija newslettera za mobilne uređaje - Vizualno privlačan i moderan dizajn
4. Odnos	- Pružanje jedinstvenih i ekskluzivnih ponuda - Ponude temeljene na prethodnim kupnjama i interesima potrošača - Pravovremena informacija o ekskluzivnim ponudama, novim kolekcijama i sličnim sadržajima - Dodatne korisne informacije, poput savjeta i preporuka vezanih uz proizvode
5. Upravljanje	- Vremenski ograničene ponude i akcije za poticanje hitnosti kupnje - Optimalno određivanje intervala slanja newslettera za održavanje angažmana i smanjenja negativne percepcije - Smanjenje rizika od slanja u spam – osigurati da poruke ne budu blokirane spam filterima - Balansiranje asortimana kvalitete u skladu s očekivanjima potrošača - Poštivanje privatnosti potrošača – pažljivo upravljanje osobnim podacima u komunikaciji - Uspostava dodatne interakcije s potrošačem radi bolje spoznaje trenutaka nastanka potreba i kupovnih navika

Tablica 3. prikazuje četiri ključna područja na koja treba obratiti pažnju prilikom oblikovanja i provedbe e-mail marketinga: ciljanje potrošača, sadržaj poruke, dizajn e-maila/newslettera, razvijanje odnosa s potrošačima te upravljanje e-mail marketingom. Svaka od navedenih stavki sadrži ključne smjernice izvedene iz analize ponašanja potrošača na sportsko-modnom tržištu u Hrvatskoj.

Prijedlozi vezani uz ciljanje potrošača ukazuju na nužnost bolje segmentacije tržišta, kako bi se jasnije prepoznale potrebe, želje, interesi i kupovni obrasci potrošača, a time i kvalitetnije oblikovale promotivne ponude (Hanna i sur., 2015). To se može postići većom interaktivnošću u komunikaciji između brenda i potrošača putem digitalnih kanala (Nuseir i sur., 2023), poput e-maila i web

stranica, kroz korištenje interaktivnih alata za prikupljanje dodatnih informacija – primjerice web upitnika ili drugih obrazaca.

Prijedlozi vezani uz sadržaj obuhvaćaju visok stupanj personalizacije informacija i ponuda, što proizlazi iz kvalitetnog ciljanja potrošača te praćenja njihovih navika i ponašanja (Chaparro-Peláez i sur., 2022). Najjači motivator za poticanje kupnje je isticanje popusta i drugih financijskih poticaja, što predstavlja ključnu informaciju koju treba uključiti u sadržaj (Chittenden i Rettie, 2003). Budući da su potrošači zasićeni velikom količinom nepotrebnih informacija, prilikom oblikovanja sadržaja nužno je biti kreativan, izbjegavati općenite poruke te težiti tome da poruka bude atraktivna i korisna (Chaparro-Peláez i sur., 2022).

Prijedlozi vezani uz dizajn upućuju na to da vizualna prezentacija sadržaja može privući, ali i odbiti korisnika (Hudak i sur., 2017). Iz tog je razloga nužno primijeniti kvalitetne dizajnerske smjernice kako bi sadržaj bio vizualno privlačan i usklađen sa suvremenim trendovima (Sapawi i Nugroho, 2024). Također, mora biti jasno i pregledno oblikovan, logički strukturiran i jednostavan za praćenje. Budući da su današnje generacije intenzivni korisnici mobilnih uređaja i da se većina interakcija odvija putem mobitela, važno je osigurati da sve informacije budu optimizirane za mobilne preglednike (Kiselova, 2019).

Prijedlozi vezani uz razvijanje odnosa s potrošačima prvenstveno se odnose na oblikovanje i pružanje dodatnih informacija vezanih uz ponudu i proizvode, koje nisu isključivo tehnički opisi. Potrošači mogu biti pozitivno iznenađeni ako im brend promotor ponudi jedinstvene i ekskluzivne pogodnosti koje trenutno nisu dostupne drugima (Chaparro-Peláez i sur., 2022). Time brend stvara osjećaj poštovanja i posebnosti kod potrošača (Antczak, 2024). Nadalje, praćenjem prethodnih kupnji i ponašanja potrošača, brendovi mogu oblikovati personalizirane ponude koje su u većoj mjeri usklađene s individualnim potrebama korisnika, čime se dodatno gradi pozitivan stav prema brendu i stvara osjećaj da brend promotor brine o svojim kupcima. Također, pružanje dodatnih informacija koje nisu izravno povezane s proizvodom – poput savjeta i preporuka za korištenje – može dodatno angažirati potrošače i potaknuti njihov interes i povezanost s brendom (Hudak i sur., 2017).

Prijedlozi vezani uz upravljanje e-mail marketingom odnose se na nekoliko ključnih aspekata. Prvenstveno, nužno je optimizirati intervale slanja newslettera kako bi se postigla ravnoteža između održavanja angažmana potrošača i izbjegavanja njihove zasićenosti, što može dovesti do negativne percepcije e-mail marketinga (Chaparro-Peláez i sur., 2022; Simpson i sur., 2024). Također, važno je pronaći načine za smanjenje rizika da e-mailovi završe u neželjenoj pošti (spam), čime bi se umanjila njihova vidljivost i učinkovitost. Poštivanje privatnosti potrošača od iznimne je važnosti. Potrebno je osigurati da se osobni podaci korisnika neće zloupotrijebiti (Kiselova, 2019), čime se gradi povjerenje i osjećaj sigurnosti (Dangi i Malik, 2017). Uspostava direktnije interakcije s potrošačima omogućuje prikupljanje kvalitetnijih informacija o njihovim trenutačnim i budućim potrebama te ponašanju prilikom kupnje, što omogućuje bolje planiranje i personalizaciju ponuda (Kiselova, 2019). Na kraju, preporučuje se korištenje vremenski ograničenih ponuda i akcija kao psiholoških poticaja za kupnju, jer takva strategija može dodatno povećati učestalost kupnje određenih proizvoda ili usluga.

4.2. Ograničenja i preporuka za buduća istraživanja

Ograničenje ovog istraživanja očituje se u malom broju ispitanika i kvalitativnoj prirodi pristupa (dubinski intervju), koji je eksplorativan i usmjeren na prepoznavanje općih obrazaca i problema u području korištenja e-mail marketinga. Dobiveni rezultati predstavljaju temelj za buduća kvantitativna istraživanja šireg opsega, s ciljem prikupljanja preciznijih i reprezentativnijih podataka koji bi mogli pružiti jasniji uvid u stanje, prednosti i izazove e-mail marketinga na sportsko-modnom tržištu u Hrvatskoj, ali i izvan nje. Takvo istraživanje moglo bi pridonijeti identifikaciji potencijalnih zakonitosti primjenjivih i na druge sektore poslovanja.

5. Zaključak

Razumijevanje digitalnih tehnologija dovelo je do revolucije i promjena u ponašanju ljudi u svim sferama života. Digitalne tehnologije prožele su svaki aspekt svakodnevice, do te mjere da je danas

gotovo nemoguće živjeti bez interneta. Današnje stanovništvo svakodnevno provodi velik dio vremena online – komunicira, prikuplja informacije, kupuje i traži zabavu putem interneta. Takvom ponašanju pridonijeli su prvenstveno mobilni uređaji, prateće tehnologije i aplikacije, koje su neizbježno oblikovale ponašanje gotovo svake individue.

Budući da su potrošači prisutni online, postalo je nužno da i brendovi budu prisutni na digitalnim kanalima. E-mail marketing, kao jedan od oblika komunikacije između brenda i potrošača, prirodno se uklapa u ovu digitalnu stvarnost. S obzirom na utvrđene obrasce ponašanja potrošača, e-mail marketing dobiva dodatni značaj jer omogućuje promotorima brendova doprijeti do potrošača putem kanala koje oni već koriste za informiranje i kupnju proizvoda i usluga.

Ipak, e-mail marketing ima i svoje prednosti i nedostatke. Ako se koristi na pravilan način, može biti vrlo učinkovit alat, ali ako se koristi pogrešno, može odbiti potrošače i umanjiti učinkovitost komunikacije, što na kraju može rezultirati smanjenjem broja kupoprodajnih transakcija. Ovaj rad nastoji identificirati negativne aspekte korištenja e-mail marketinga te ponuditi prijedloge za cjelovit, holistički pristup njegovom oblikovanju i primjeni.

Uzimajući u obzir kvalitetno ciljanje potrošača kroz jasno razumijevanje njihovih potreba, personalizirani i relevantni sadržaj poruka, atraktivan i pregledan dizajn newslettera optimiziran za mobilne uređaje, razvijanje odnosa s potrošačima kroz dodatne korisne sadržaje te upravljanje e-mail marketingom koje uključuje balansiranu učestalost slanja, poštivanje privatnosti i uspostavljanje dodatne interakcije s potrošačima – moguće je povećati učinkovitost e-mail marketinga, doprinijeti povećanju prodaje te podići razinu zadovoljstva potrošača.

Citirani izvori

- Antczak, B. (2024). *The influence of digital marketing and social media marketing on consumer buying behavior*. *Journal of Modern Science*, 56(2), 310–335. <https://doi.org/10.13166/jms/189429>
- Araújo, C., Soares, C., Pereira, I., Coelho, D., Rebelo, M. Â., & Madureira, A. (2022). *A novel approach for send time prediction on email marketing*. *Applied Sciences*, 12(16), 8310. <https://doi.org/10.3390/app12168310>
- Balta, A. (2020). *Personalised news in the world of Internet: Exploring solutions for a tailored news experience*, Master's thesis. Umea: Umeå University (Sweden).
- Benolić, I. (2025). *Utjecaj e-mail marketinga na poticanje kupnje na sportsko-modnom tržištu: Primjer hrvatskih potrošača, specijalistički završni rad*. Pula: Istarsko veleučilište – Università Istriana di Scienze Applicate.
- Chaparro-Peláez, J., Hernández-García, Á., & Lorente-Páramo, Á. J. (2022). *May I have your attention, please? An investigation on opening effectiveness in e-mail marketing*. *Review of Managerial Science*, 16(7), 2261–2284. <https://doi.org/10.1007/s11846-022-00517-9>
- Chauhan, M. (2022). *Investigating the effects of personalization in email on student choice*, Master's thesis, Dundee: Abertay University (Scotland), School of Business, Law and Social Sciences.
- Chittenden, L., & Rettie, R. (2003). *An evaluation of e-mail marketing and factors affecting response*. *Journal of Targeting, Measurement and analysis for Marketing*, 11, 203–217.
- Dangi, H., & Malik, A. (2017). *Personalisation in marketing: an exploratory study*. *International Journal of Internet Marketing and Advertising*, 11(2), 124–136.
- Dwivedi, Y. K., Ismagilova, E., Hughes, D. L., Carlson, J., Filieri, R., Jacobson, J.,... Wang, Y. (2021). *Setting the future of digital and social media marketing research: Perspectives and research propositions*. *International Journal of Information Management*, 59, 102168. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102168>
- Faruk, M., Rahman, M., & Hasan, S. (2021). *How digital marketing evolved over time: A bibliometric analysis on Scopus database*. *Heliyon*, 7(12), e08626. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08603>
- Ginn, S. (2024). *Email in healthcare: Pros, cons and efficient use*. *BJPsych Advances*, 30(3), 195–201. <https://doi.org/10.1192/bja.2023.49>

- Goic, M., & Rojas, A. (2016), "Investigating the effectiveness of triggered email marketing". <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3217130>
- Hanna, R., Swain, S. D., & Smith, J. (2016), *Email marketing in a digital world: The basics and beyond*. Business Expert Press.
- Hudak, M., Kianičková, E., & Madleňák, R. (2017). The importance of e-mail marketing in e-commerce. *Procedia Engineering*, 192, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.059>
- Jeshurun, S. B. (2018). A study on the effectiveness of email marketing. *Management*, 6(1), 84–86. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1461282>
- Kiselova, H. (2019). *Effective email marketing: An empirical study of the impact of personalized communication on customer engagement and purchase decisions*, Master's thesis, Oslo: BI Norwegian Business School, University in Oslo (Norway).
- Lv, J., & Zhang, M. (2024). Changes and mechanisms of social interaction models in the digital age. *Communications in Humanities Research*, 36, 37–45. <https://doi.org/10.54254/2753-7064/36/2024BJ0008>
- Nobile, T. H., & Cantoni, L. (2023). Personalisation (in)effectiveness in email marketing. *Digital Business*, 3(2), 100058. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2023.100058>
- Nuseir, M.T., El Refae, G.A., Aljumah, A., Alshurideh, M., Urabi, S., & Kurdi, B. A. (2023), "Digital marketing strategies and the impact on customer experience: A systematic review", in *The effect of information technology on business and marketing intelligence systems*, pp. 21–44. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12382-5_2
- Rosário, A. T. (2021). E-mail marketing: Research and challenges. *International Journal of Online Marketing (IJOM)*, 11(4), 63–83. <https://doi.org/10.4018/IJOM.2021100104>
- Sabbagh, F. (2021). Email marketing: The most important advantages and disadvantages. *Journal of Economics and Technology Research*, 2(3), 14–29. <http://dx.doi.org/10.22158/jetr.v2n3p14>
- Sapawi, M. K. R., Anjarsari, V. T., & Nugroho, K. (2024, December). The influence of graphic design in digital marketing industry: An experimental study. *Proceeding of the International Conference on Mathematical Sciences, Natural Sciences, and Computing*, 1(2), 49–57.
- Simpson, J., Branagan, C., Lau Cheng Von, V., & Williams, L. (2024). Spamming our students? The use of email as a mass communication tool in higher education. *Perspectives: Policy and Practice in Higher Education*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/13603108.2024.2440705>
- Thomas, J. S., Chen, C., & Iacobucci, D. (2022). Email marketing as a tool for strategic persuasion. *Journal of Interactive Marketing*, 57(3), 377–392. <https://doi.org/10.1177/10949968221095552>
- Tiago, M. T. P. M. B., & Veríssimo, J. M. C. (2014). Digital marketing and social media: Why bother? *Business Horizons*, 57(6), 703–708. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2014.07.002>
- Zhang, X., Kumar, V., & Cosguner, K. (2017). Dynamically managing a profitable email marketing program. *Journal of Marketing Research*, 54(6), 851–866. <https://doi.org/10.1509/jmr.16.0210>

Advantages and Disadvantages of Using E-mail Marketing: A Case Study of the Sports-Fashion Market in Croatia

Summary

In today's world, where digital technologies dominate and consumers use digital communication channels on a daily basis, it is inevitable for companies to maintain an online presence in order to communicate with potential consumers where they are most active. Digital technologies have largely replaced traditional communication channels for promotional purposes, which is why digital marketing has gained momentum and become a key component in business operations aimed at reaching, informing, and encouraging consumers to make purchases. E-mail marketing, as one of the tools of digital marketing, plays a significant role in influencing consumers' purchasing decisions. However, e-mail marketing has its own advantages and disadvantages. This paper presents a summary of research conducted through a focus group of Croatian consumers in the sports-fashion market. The analysis results identified certain weaknesses, and accordingly, improvement proposals were made to enhance the management of e-mail marketing with the aim of improving communication effectiveness and, ultimately, increasing purchase rates. The proposed improvements are directed at the following categories: consumer targeting, message content, message design, customer relations, and e-mail marketing management. Effectiveness cannot be achieved through partial improvements, instead, a holistic approach must be adopted to improve all categories that are important to consumers in their communication with companies via e-mail.

Keywords: digital marketing, e-mail marketing, sports-fashion market, online communication, marketing communication effectiveness, e-mail optimization

Korištenje alata umjetne inteligencije u email marketingu

Luka Brodarič^a, Ilenia Belli^b

a univ. bacc. inf., student, Istarsko veleučilište-Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeva 9D, Pula, Hrvatska, lbroadaric@iv.hr; lukabroadaric81@gmail.com

b univ. mag. praesc. educ., Dječji vrtić- Scuola dell'infanzia Rin Tin Tin, Uspon Franje Glavinića 4/A, Pula, Hrvatska, ilenia.belli.9@gmail.com

Sažetak

Ovo istraživanje usmjereno je na analizu primjene alata umjetne inteligencije (AI) u email marketingu i njihov utjecaj na poslovanje u Republici Hrvatskoj. Cilj rada bio je istražiti potencijal AI alata u poboljšanju različitih aspekata email marketinga, uključujući izradu sadržaja, personalizaciju i angažman korisnika. Istraživanje je provedeno kvantitativnom metodom, korištenjem upitnika, a analizirani su odgovori 52 ispitanika. Rezultati istraživanja pokazuju da marketinški stručnjaci u Hrvatskoj prepoznaju važnost AI alata i da ih značajan dio već koristi u email marketingu. AI alati doprinose poboljšanju personalizacije, automatizaciji procesa i uštedi vremena, što dovodi do veće učinkovitosti email kampanja. Iako postoje izazovi poput etičkih pitanja i troškova implementacije, većina ispitanika preporučuje korištenje AI alata i smatra da imaju pozitivan utjecaj na email marketing.

Ključne riječi: umjetna inteligencija, email marketing, AI alati, digitalni marketing

1. Uvod

U suvremenom poslovnom okruženju, digitalni marketing zauzima sve značajniju ulogu u strategijama poslovnih organizacija usmjerenim na doseganje i interakciju s potrošačima. Među različitim kanalima digitalnog marketinga, email marketing se i dalje ističe kao moćan i preferirani način komunikacije između brendova i njihove publike, s visokim stupnjem angažmana korisnika (Patil, 2024). Unatoč pojavi novih digitalnih platformi, email marketing zadržava svoju važnost, što ukazuje na značajan potencijal za unaprjeđenje njegove učinkovitosti kroz integraciju naprednih tehnologija.

Umjetna inteligencija (engl. *artificial intelligence*) etablirala se kao transformativna tehnologija s dalekosežnim utjecajem na različite aspekte poslovanja i društva u cjelini. Definirana kao sposobnost računalnih sustava obavljati zadatke koji obično zahtijevaju ljudsku inteligenciju, umjetna inteligencija obuhvaća analizu velikih količina podataka, učenje iz tih podataka te donošenje složenih odluka (Manohar, 2024). Sve veća primjena AI alata u marketingu prepoznata je od strane značajnog broja marketinških stručnjaka koji uviđaju njezine brojne prednosti (Jain i Kumar, 2024). Ova široka prepoznatljivost potencijala AI alata u marketingu čini istraživanje njezine specifične primjene u email marketingu izuzetno relevantnim

i pravovremenim. Prema Smith i Jones (2023), umjetna inteligencija transformira način na koji tvrtke pristupaju email marketingu, omogućujući višu razinu personalizacije i automatizacije koja poboljšava angažman korisnika i učinkovitost kampanja.

Ovaj rad usmjerava se na detaljno istraživanje primjene AI alata unutar područja email marketinga. Cilj je istražiti potencijal AI alata u poboljšanju izrade sadržaja, personalizacije, angažmana korisnika i zadržavanja kupaca u sklopu email kampanja. Glavni cilj ovog rada je istražiti korištenje AI alata u email marketingu i njegove implikacije za poslovanje među stručnjacima u Republici Hrvatskoj.

S obzirom na postavljeni cilj, definirana su sljedeća istraživačka pitanja:

- **IP1:** U kojoj mjeri marketinški stručnjaci u Hrvatskoj koriste alate umjetne inteligencije u email marketingu?
- **IP2:** Koji su najčešće korišteni alati i funkcionalnosti umjetne inteligencije u email marketingu među stručnjacima u Hrvatskoj?
- **IP3:** Koji su percipirani glavni izazovi i prepreke pri implementaciji i korištenju alata umjetne inteligencije u email marketingu?

Na temelju istraživačkih pitanja, postavljene su sljedeće hipoteze:

- **H1:** Većina marketinških stručnjaka u Hrvatskoj koristi AI alate u email marketingu. Hipoteza će se smatrati potvrđenom ako više od 50% ispitanika odgovori potvrdno na tvrdnju o korištenju AI alata (redovito ili povremeno).
- **H2:** Najčešće korišteni AI alat za email marketing je ChatGPT. Hipoteza će se smatrati potvrđenom ako ChatGPT bude najčešće odabran alat među ponuđenim odgovorima.
- **H3:** Etička pitanja predstavljaju glavnu prepreku pri implementaciji AI alata u email marketingu. Hipoteza će se smatrati potvrđenom ako etička pitanja budu najčešće odabrana prepreka među ponuđenim odgovorima.

2. Pregled literature

2.1. Definiranje ključnih koncepata

Kako navodi Manohar (2024) umjetna inteligencija predstavlja širok pojam koji obuhvaća različite tehnike i metodologije usmjerene na stvaranje inteligentnih sustava. Unutar konteksta email marketinga, ključni koncepti uključuju strojno učenje (engl. *machine learning*), obradu prirodnog jezika (engl. *natural language processing*) i prediktivnu analitiku. Strojno učenje (engl. *acr. ML*) odnosi se na algoritme koji omogućuju računalima učiti iz podataka bez eksplicitnog programiranja, što je ključno za AI alate koji se koriste u email marketingu za analizu korisničkih podataka i poboljšanje performansi kampanja. Obrada prirodnog jezika (engl. *acr. NLP*) grana je umjetne inteligencije koja se bavi interakcijom između računala i ljudskog jezika, omogućujući AI alatima razumijeti i generirati tekst, što je izuzetno korisno za kreiranje email sadržaja i optimizaciju naslova (Manohar, 2024). Prediktivna analitika koristi statističke algoritme i tehnike strojnog učenja za predviđanje budućih ishoda na temelju povijesnih podataka, omogućujući marketinškim stručnjacima anticipirati ponašanje korisnika i personalizirati svoje kampanje.

2.2. Primjena AI alata u email marketingu

Prema Patilu (2024) alati umjetne inteligencije nalaze široku primjenu u različitim aspektima email marketinga, značajno utječući na personalizaciju, optimizaciju vremena slanja, segmentaciju publike i generiranje sadržaja.

2.2.1. Personalizacija

Personalizacija email sadržaja transformira način na koji brendovi komuniciraju sa svojim korisnicima. Algoritmi AI alata analiziraju individualne podatke o korisnicima, uključujući njihove preferencije, ponašanje pri kupnji i interakcije s brendom, kako bi kreirali visoko personalizirane email poruke. Istraživanja pokazuju da personalizirani emailovi postižu značajno bolje rezultate u smislu stope otvaranja, stope klikanja, angažmana i generiranja prihoda (Patil, 2024).

2.2.2. Optimizacija vremena slanja

AI alati analiziraju ponašanje korisnika kako bi predvidjeli optimalno vrijeme za slanje emailova svakom pojedinom primatelju, čime se maksimizira vjerojatnost otvaranja i angažmana. Umjesto oslanjanja na općenite rasporede slanja, alati umjetne inteligencije omogućuju slanje emailova u trenucima kada je korisnik najvjerojatnije aktivan i spreman na interakciju. Izvješća pokazuju da optimizacija vremena slanja pomoću AI značajno povećava stope otvaranja i druge metrike angažmana (Patil, 2024).

2.2.3. Generiranje sadržaja

Alati generativne umjetne inteligencije poput ChatGPT-a, Gemini-a i Claude AI-a sve se više koriste za kreiranje email sadržaja, uključujući tekst emaila, naslove i čak vizualne elemente (Bhattacharai, 2023). Generativni AI alati mogu pomoći marketinškim stručnjacima u brzom stvaranju relevantnog i privlačnog sadržaja, štedeći vrijeme i resurse.

2.3. Prednosti korištenja AI alata i etička razmatranja

Korištenje AI alata u email marketingu donosi niz značajnih prednosti, uključujući povećanu personalizaciju, poboljšani angažman korisnika, više stope otvaranja i klikanja, bolje zadržavanje kupaca, uštedu troškova i poboljšanu učinkovitost. Uz to, AI alati omogućuju skalabilnost automatskom obradom velikih količina podataka i upravljanjem kampanjama za tisuće korisnika istovremeno (Nair i sur. 2021).

Unatoč brojnim prednostima, primjena alata umjetne inteligencije u email marketingu suočava se s određenim izazovima i etičkim razmatranjima. To uključuje složenost i troškove implementacije, potencijal za smanjenje ljudske kreativnosti, etičke probleme vezane uz privatnost podataka, algoritamske pristranosti, transparentnost te potrebu za kvalitetnim podacima i stručnošću (Bormane i

Blaus, 2024). Manohar (2023) navodi da implementacija AI alata u email marketingu može predstavljati izazove povezane s troškovima, integracijom s postojećim sustavima i potrebom za specijaliziranim znanjem.

3. Metodologija istraživanja

U ovom radu primijenjen je kvantitativni istraživački pristup. Za prikupljanje primarnih podataka korištena je metoda prikupljanja podataka pomoću upitnika, a kao istraživački instrument primijenjen je online upitnik. Upitnik je distribuiran putem internetskih kanala ciljanoj skupini marketinških stručnjaka u Republici Hrvatskoj, čime je definiran geografski okvir istraživanja. Prikupljanje podataka provedeno je na prigodnom uzorku. Uzorak se sastojao od 52 ispitanika. Podaci su obrađeni metodama deskriptivne statistike, uključujući analizu frekvencija i izračun aritmetičkih sredina, a za vizualni prikaz podataka korišteni su grafikoni. Analiza je provedena s ciljem testiranja postavljenih hipoteza i pružanja odgovora na istraživačka pitanja.

4. Rezultati i rasprava

U ovom poglavlju prikazani su rezultati provedenog istraživanja te njihova interpretacija i diskusija u kontekstu postavljenih istraživačkih pitanja i hipoteza.

4.1. Demografska analiza ispitanika

Uzorak od 52 ispitanika analiziran je prema ključnim demografskim obilježjima. U uzorku je sudjelovalo 73,1% muškaraca i 26,9% žena. Najzastupljenija dobna skupina ispitanika bila je kategorija 25-34 godine života (42,3%). Većina ispitanika (40,4%) dolazi iz tvrtki s 11 do 50 zaposlenih. Najčešća radna pozicija bila je "radnik u marketingu" / "voditelj marketinga" (40,4%). Pregledan prikaz demografskih podataka predložen je Tablicom 1.

Tablica 1. Prikaz demografskih podataka ispitanika

Demografska varijabla	Kategorija	Frekvencija	Postotak (%)
Spol	Muškarac	38	73,1
	Žena	14	26,9
Dob	18-24	13	25
	25-34	22	42,3
	35-44	12	23,1
	45-60	5	9,6
Veličina tvrtke	1-10 zaposlenih	15	28,8
	11-50 zaposlenih	21	40,4
	51-200 zaposlenih	11	21,2
	Više od 200 zaposlenih	5	9,6
Uloga / pozicija	Radnik u marketingu / Voditelj marketinga	21	40,4
	Voditelj društvenih meža	8	15,4
	Voditelj ljudskih resursa	6	11,5
	Direktor / Vlasnik tvrtke	3	5,8
	Drugo	14	26,9

4.2. Korištenje i percepcija AI alata u email marketingu

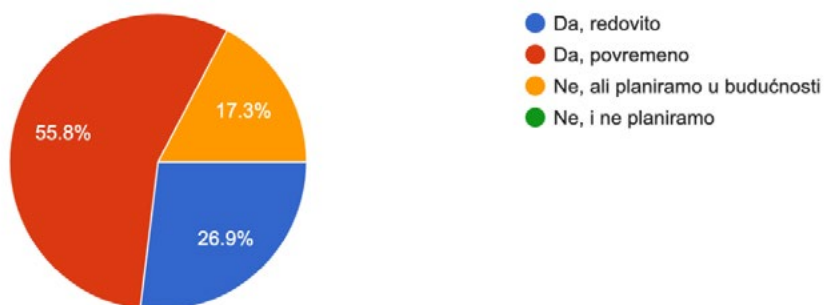
Prvo istraživačko pitanje odnosilo se na učestalost korištenja AI alata. Rezultati (Slika 1.) su pokazali da 26,9% ispitanika redovito koristi AI alate, dok ih 55,8% koristi povremeno. Ukupno 82,7% ispitanika koristi AI alate u email marketingu, čime

se potvrđuje hipoteza H1 da većina marketinških stručnjaka u Hrvatskoj koristi AI alate. Rastući interes vidljiv je i u podatku da 17,3% ispitanika planira koristiti AI alate u budućnosti.

Slika 1. Grafikon korištenja AI alata u aktivnostima email marketinga

Koristite li trenutno AI alate u svojim aktivnostima email marketinga?

52 responses



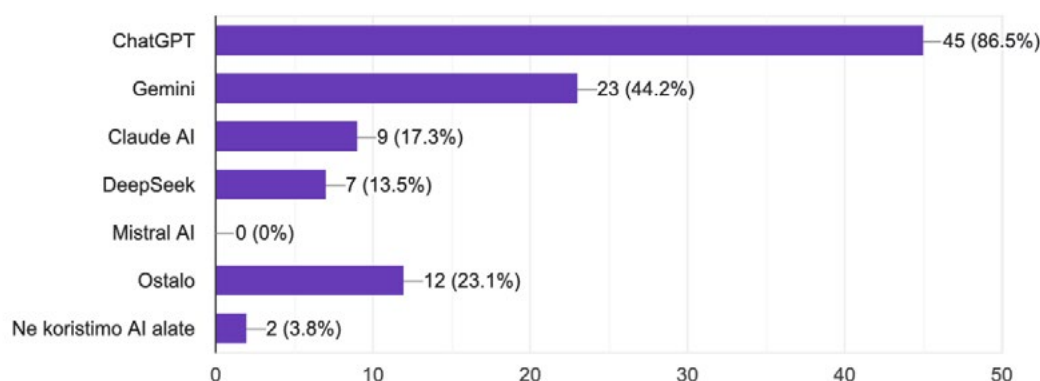
Drugo istraživačko pitanje bavilo se najčešće korištenim alatima i funkcionalnostima. Kao dominantan alat istaknuo se OpenAI ChatGPT, kojeg koristi

86,5% ispitanika, čime se potvrđuje hipoteza H2 (Slika 2.). Google Gemini koristi 44,2% ispitanika.

Slika 2. Grafikon korištenja različitih AI alata

Ako koristite AI alate, koje konkretno alate koristite? (Moguće je odabrati više odgovora)

52 responses



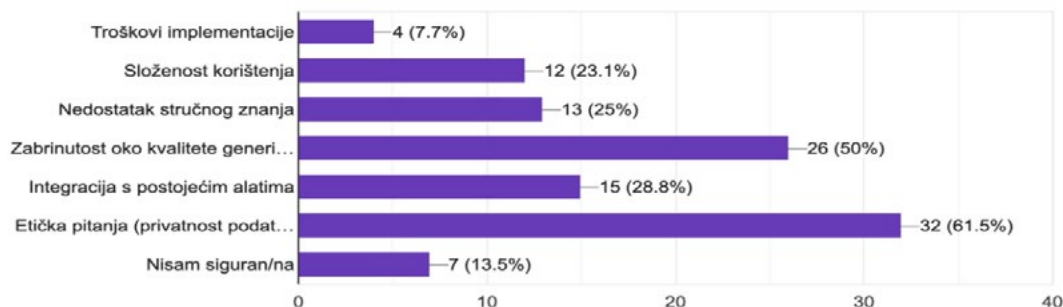
Treće istraživačko pitanje odnosilo se na izazove pri implementaciji. Kao glavna prepreka istaknuta su etička pitanja (privatnost podataka, pristranost),

što navodi 61,5% ispitanika, čime se potvrđuje hipoteza H3 (Slika 3). Zabrinutost oko kvalitete generiranog sadržaja izrazilo je 50% ispitanika.

Slika 3. Grafikon izazova i prepreka prilikom implementacije i korištenja AI alata u email marketingu

Koji su po vama glavni izazovi ili prepreke pri implementaciji i korištenju AI alata u email marketingu?

52 responses



4.3. Percipirane prednosti korištenja AI alata

Kako bi se stekao dublji uvid u percepciju vrijednosti AI alata, ispitanici su upitani o najvećim prednostima njihove primjene. Rezultati pokazuju da stručnjaci vide i stratešku vrijednost ovih alata. Kao ključne prednosti ističu se ušteda vremena, koju je 44,2% ispitanika ocijenilo kao prednost u velikoj mjeri, te poboljšanje personalizacije, što 32,7%

ispitanika smatra značajnom prednošću. Ovi podaci pružaju kontekst za razumijevanje motivacije za usvajanje AI tehnologija i temelj su za daljnju diskusiju.

4.4. Diskusija

Rezultati istraživanja pokazuju da je usvajanje AI alata u email marketingu u Hrvatskoj u zamahu, ali se suočava s prepoznatljivim izazovima. Potvrda

sve tri hipoteze pruža jasan uvid u trenutno stanje. Dominacija alata kao što je ChatGPT i fokus na generiranje sadržaja sugeriraju da se AI trenutno najviše koristi kao alat za operativnu efikasnost – bržu izradu sadržaja i automatizaciju. Ovaj nalaz u skladu je s radom autora Bhattarai (2023), koji ističe ulogu generativne umjetne inteligencije u kreiranju sadržaja.

Međutim, podaci o percipiranim prednostima, kao što su poboljšanje personalizacije (32,7%) i ušteda vremena (44,2% u velikoj mjeri), pokazuju da stručnjaci vide i stratešku vrijednost ovih alata. To znači da se AI ne percipira samo kao zamjena za postojeće procese, već i kao sredstvo za stvaranje dodatne vrijednosti. Time se potvrđuju i nalazi autora Patil (2024) koji naglašavaju važnost personalizacije za povećanje angažmana korisnika.

Ključni izazov predstavljaju etička pitanja, što je podatak koji se ističe u odnosu na globalna istraživanja gdje su troškovi i nedostatak znanja često primarni problemi (Manohar, 2023). Ova specifičnost hrvatskog tržišta može ukazivati na visoku razinu svijesti o Općoj uredbi EU o zaštiti podataka (engl. acr. GDPR-u) i važnosti privatnosti podataka, što je pozitivan znak zrelosti tržišta. S praktične strane, to znači da marketinški stručnjaci moraju aktivno raditi na transparentnosti i edukaciji korisnika o tome kako se njihovi podaci koriste.

Činjenica da 50% ispitanika ne može procijeniti utjecaj AI-ja na stope otvaranja i klikanja ukazuje na nedostatak sustavnog mjerenja i analize, što predstavlja prostor za napredak. Marketinški stručnjaci trebali bi implementirati preciznije metrike za praćenje povrata ulaganja u AI tehnologije.

5. Znanstveni i praktični doprinos

S teorijskog aspekta, rad doprinosi razumijevanju dinamike usvajanja novih tehnologija na specifičnom, regionalnom tržištu. Rezultati pokazuju relativno brzo usvajanje potaknuto operativnom efikasnošću, ali i usporeno strateško korištenje zbog prepreka poput etičkih nedoumica i nedostatka sustavnog mjerenja učinka.

S praktičnog aspekta, istraživanje pruža konkretne uvide marketinškim stručnjacima. Prepoznavanje etike kao ključnog izazova upućuje na nužnost razvoja internih politika i transparentne komunikacije. Podaci o popularnosti alata i

funkcionalnosti mogu poslužiti kao smjernica pri odabiru i implementaciji tehnologija.

6. Ograničenja istraživanja i preporuke za buduća istraživanja

Glavno ograničenje ovog istraživanja odnosi se na veličinu i metodu odabira uzorka. Uzorak od 52 ispitanika bio je prigodan, što ograničava mogućnost generalizacije rezultata na cjelokupnu populaciju marketinških stručnjaka u Hrvatskoj. Preporuke za buduća istraživanja uključuju:

- Provođenje istraživanja na većem i reprezentativnijem uzorku korištenjem stratificiranog ili slučajnog uzorkovanja.
- Primjenu kvalitativnih metoda, poput dubinskih intervjua, kako bi se dobio detaljniji uvid u iskustva, izazove i strategije primjene AI alata.
- Uključivanje detaljnije statističke obrade, kao što su korelacijske analize, kako bi se istražili odnosi između demografskih karakteristika, korištenih alata i percipiranih ishoda.
- Fokusiranje na specifične industrije kako bi se istražile razlike u primjeni i učincima AI tehnologija u različitim poslovnim kontekstima.

7. Zaključak

Cilj ovog istraživanja bio je pružiti sveobuhvatan uvid u korištenje, percepciju i izazove implementacije alata umjetne inteligencije u domeni email marketinga unutar specifičnog konteksta Republike Hrvatske. Kroz kvantitativnu analizu prikupljenih podataka na uzorku od 52 marketinška stručnjaka, rad je nastojao odgovoriti na ključna istraživačka pitanja vezana uz stupanj prihvaćenosti AI tehnologija, dominantne alate i funkcionalnosti te glavne prepreke s kojima se profesionalci susreću.

Rezultati su nedvosmisleno pokazali da je usvajanje AI alata u hrvatskom marketinškom ekosustavu u punom zamahu, čime je potvrđena prva hipoteza (H1). Čak 82,7% ispitanika već koristi ove tehnologije, bilo redovito ili povremeno,

što signalizira prepoznavanje njihove vrijednosti i relevantnosti. Dominacija globalno popularnih rješenja, s ChatGPT-om kao najčešće korištenim alatom (potvrda H2), ukazuje na to da hrvatsko tržište prati svjetske trendove, oslanjajući se na dostupne i provjerene platforme za optimizaciju svojih procesa. Primarno se ovi alati koriste za operativne zadatke poput generiranja sadržaja, što izravno vodi do percipirane uštede vremena – jedne od ključnih prednosti koju su ispitanici istaknuli.

Posebno značajan nalaz istraživanja, kojim je potvrđena i treća hipoteza (H3), jest isticanje etičkih pitanja kao glavne prepreke pri implementaciji. Za razliku od mnogih globalnih studija gdje prevladavaju tehnički ili financijski izazovi, visoka razina svijesti o privatnosti podataka i GDPR regulativi na hrvatskom tržištu upućuje na zrelost i odgovornost stručnjaka. Ovaj podatak ima duboke praktične implikacije, nalažući tvrtkama da razvoj internih politika o odgovornoj upotrebi umjetne inteligencije i transparentna komunikacija s korisnicima postanu prioriteta.

Iako je operativna efikasnost trenutno glavni pokretač usvajanja, istraživanje je otkrilo i rastuću svijest o strateškom potencijalu AI alata, posebice u domeni personalizacije sadržaja. Međutim, nedostatak sustavnog mjerenja utjecaja na ključne metrike, poput stope otvaranja i klikanja, predstavlja značajan prostor za napredak. Kako bi se iskoristio puni potencijal ovih tehnologija, nužan je pomak s pukog korištenja alata prema strateškoj integraciji koja uključuje postavljanje jasnih ciljeva, kontinuirano praćenje povrata ulaganja i razvoj analitičkih vještina unutar marketinških timova.

U konačnici, ovo istraživanje potvrđuje da umjetna inteligencija nije samo prolazni trend, već transformacijska sila koja preoblikuje email marketing. Kako tehnologija bude napredovala, omogućavajući, kako navodi Parker (2025), sve sofisticiranije oblike automatizacije i hiper-personalizacije, daljnja edukacija i prilagodba postat će ključni za održavanje konkurentne prednosti na tržištu.

Citirani izvori

- Abinaya, G., & Manohar, V. (2024). *The role of artificial intelligence in email marketing strategies. The Role of AI in E-Commerce Industry. Conference: the Role of AI in E-commerce Industry*. DOI:10.13140/RG.2.2.34276.18564. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/379311214_THE_ROLE_OF_ARTIFICIAL_INTELLIGENCE_IN_EMAIL_MARKETING_STRATEGIES.
- Bhattarai, A. (2023). *Exploring customer engagement through generative AI innovative strategies in digital marketing campaigns. Quarterly Journal of Emerging Technologies and Innovations*, Vol. 8., No. 12, p. 1-9. Preuzeto s: <https://vectoral.org/index.php/QJETI/article/view/51>
- Bormane, S., & Blaus, E. (2024). *Artificial intelligence in the context of digital marketing communication. Frontiers in Communication*, Vol. 9. p. 1-10. <https://doi.org/10.3389/fcomm.2024.1411226>. Preuzeto s: <https://www.frontiersin.org/journals/communication/articles/10.3389/fcomm.2024.1411226/full>
- Jain, R., & Kumar, A. (2024). *Artificial intelligence in marketing: Two decades review. NMIMS Management Review*, Vol. 32, No. 12., p. 75-83. <https://doi.org/10.1177/09711023241272308> Preuzeto s: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09711023241272308>
- Nair, R., Singh, N., Reddy, M., & Chopra, A. (2021). *Enhancing Email Marketing Automation with AI: Leveraging Natural Language Processing and Predictive Analytics Algorithms. Innovative AI Research Journal*, Vol. 10. No. 2. p. 3-14. Preuzeto s: <https://iairj.com/index.php/v1/article/view/1>
- Parker, P. (2025). *AI and email marketing: All hype or real game-changer? MarTech Research Report*. Preuzeto s: <https://martech.org/ai-and-email-marketing-all-hype-or-real-game-changer/>
- Patil, D. (2024). *Email marketing with artificial intelligence: Enhancing personalization, engagement, and customer retention. Engagement, and Customer Retention (December 01, 2024)*, p. 1-4. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5057438>. Preuzeto s: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5057438
- Smith, A., & Jones, B. (2023). *Ethical Considerations in AI-Driven Marketing: A Framework for Responsible Personalization. Journal of Business Ethics*, Vol. 12, No. 11, p. 405-421. Preuzeto s: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3869038>

Using artificial intelligence tools in email marketing

Summary

This research focuses on the analysis of the application of artificial intelligence (AI) tools in email marketing and its impact on business within the Republic of Croatia. The aim of the study was to investigate the potential of AI tools in improving various aspects of email marketing, including content creation, personalization, and user engagement. The research was conducted using a quantitative method, with a questionnaire, and the responses of 52 respondents were analyzed. The research results show that marketing experts in Croatia recognize the importance of AI tools and that a significant portion already uses them in email marketing. AI tools contribute to improving personalization, automating processes, and saving time, which leads to greater efficiency of email campaigns. Although challenges such as ethical issues and implementation costs exist, the majority of respondents recommend the use of AI tools and believe they have a positive impact on email marketing.

Keywords: artificial intelligence, email marketing, AI tools, digital marketing

A Review of Blockchain-based Quality Information Management Systems in Shipbuilding Industry

Marko Turk^a, Igor Savić^b

^a MA Economics, lecturer, Istrian University of Applied Sciences, Preradovićeva 9D, 52100 Pula, Croatia, marko.turk@iv.hr

^b Bacc. ing. mech., student, Istrian University of Applied Sciences, Preradovićeva 9D, 52100 Pula, Croatia, isavic@iv.hr

Summary

Quality management in manufacturing faces persistent challenges related to transparency, traceability, and data integrity across complex, multi-stakeholder production environments. This paper presents a systematic literature review investigating the potential of blockchain technology as a foundation for decentralized, trust-enhancing information systems in quality control and quality management in shipbuilding industry. By analyzing 55 peer-reviewed publications from Web of Science and Scopus databases, the study identifies key thematic clusters in current research, including supply chain traceability, smart contract automation, and the integration of blockchain within Industry 4.0 quality frameworks. Based on these insights, the paper proposes a conceptual framework for a blockchain-based quality management architecture tailored to the operational and regulatory needs by the manufacturing industry with the focus on shipbuilding. The system design emphasizes permissioned access, tamper-proof quality records, and programmable compliance through smart contracts. While the review affirms the conceptual feasibility of such systems, it also highlights areas for further research, particularly regarding system governance, interoperability, and implementation. This work provides a theoretical foundation for future development of a proof-of-concept platform aimed at validating blockchain-driven quality control and lifecycle compliance in shipbuilding.

Ključne riječi: blockchain, smart contracts, quality control, quality management, shipbuilding

1. Introduction

The manufacturing sector, and shipbuilding in particular, is undergoing a profound transformation catalyzed by the Fourth Industrial Revolution, characterized by the convergence of cyber-physical systems, data analytics, and automation under the term of Industry 4.0 (Tambare et al., 2022). Within this shifting industrial landscape, quality management has emerged as a domain undergoing

redefinition in Quality 4.0 (Bankoff et al., 2023). As manufacturing processes become increasingly distributed, multi-tiered, and technologically complex, ensuring product integrity, regulatory compliance, and customer satisfaction demands a shift in how quality is monitored, managed, and assured across the whole value chain.

For the background and context, quality management practices have historically heavily relied on centralized information systems, manual

inspection logs, and trust-based supplier relationships. While these approaches have supported the industry for decades, their limitations are becoming increasingly evident. In manufacturing sectors, where precision, regulation, and traceability are non-negotiable, existing quality control systems often fall short in ensuring transparency, data integrity, and end-to-end traceability (AlKhader et al., 2020). Information asymmetry, a key driver of communication risk which happens when one party in a communication exchange knows more than the other while their interests aren't aligned (Ceric, 2021), along with the data fragmentation, and susceptibility to manipulation or omission, continue to challenge quality assurance across multiple phases. At the same time, the supply chain, comprising multiple specialized suppliers, subcontractors, and service providers, exemplifies a setting where seamless, immutable, and verifiable data sharing is essential. The integration of blockchain technology may offer a response to these structural and operational deficits by enabling decentralized, tamper-proof recording of quality events where blockchain introduces trust by design, creating a single version of verified truth accessible to all permitted stakeholders (Sahoo, 2024; Westphal et al., 2023). Furthermore, smart contracts which are programmable blockchain elements, allow for the automatic enforcement of quality thresholds, compliance rules, and technical specifications that can reduce human error, bias, and delay in quality assurance processes (AlKhader et al., 2023). Further distinctions and detailed elaborations on the terms Quality Management, Quality Control, and Quality Management System, including their differences and implications, will be clearly addressed and defined in subsequent sections of this paper.

1.1. Rationale and Problem Statement

The challenges in quality management in manufacturing lies in the lack of trustworthy, interoperable, and real-time quality information. Existing digital systems are often fragmented and developed in isolation by contractors or departments, with little incentive or capacity for cross-organizational integration (Brandín & Abrishami, 2024; Wang et al., 2024). The reliance on human mediation in quality workflows, from paper-based inspection logs

to third-party audits, introduces delays and increases the risk of fraud, omission, or inconsistency.

As highlighted in recent literature, the fragmentation of quality data across the manufacturing ecosystem leads to systemic inefficiencies and undermines transparency (Wang et al., 2017; Ali et al., 2022; Li et al., 2020). These inefficiencies become particularly problematic when products and components traverse global value chains and involve sequential assembly stages, each with its own quality checkpoints.

To build a common conceptual foundation, the following section defines key terms and frameworks relevant to the paper's analytical focus. These definitions are drawn from contemporary literature and framed in relation to the shipbuilding and advanced manufacturing contexts. Quality Management refers to the structured set of activities and principles aimed at ensuring that products or services meet defined performance, safety, and compliance standards. It encompasses strategic and operational processes, ranging from policy development and resource allocation to inspections, audits, and continuous improvement cycles (ISO 9001:2015). Within manufacturing, quality management has evolved from reactive defect detection to proactive, data-driven assurance processes integrated across the entire product lifecycle (Tambare et al., 2022). The emerging Quality 4.0 paradigm extends traditional quality principles by integrating digital technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and blockchain. In this view, quality is not a final checkpoint, but an embedded, real-time dynamic process guided by data, automation, and machine-level intelligence (Bankoff et al., 2023; Kodumuru et al., 2025).

Quality control (QC) refers specifically to the inspection and testing activities designed to detect defects and ensure that outputs conform to specifications. While traditionally associated with final-stage inspection, modern QC systems are integrated throughout the production chain, using real-time sensors, automated testing routines, and feedback loops. The effectiveness of QC is heavily dependent on the accuracy, integrity, and timeliness of data. Recent research emphasizes the vulnerability of QC systems to data tampering, omission, and inconsistent documentation, particularly in settings where subcontractors and

external suppliers manage key quality checkpoints (Ng et al., 2023).

A Quality Management System (QMS) is a formalized framework that outlines policies, procedures, and responsibilities for achieving quality objectives. The ISO 9001 standard remains the dominant global benchmark, focusing on customer satisfaction, process improvement, and risk-based thinking. However, modern QMS platforms face limitations in multi-party environments due to their centralized design and lack of native support for distributed verification. Blockchain-enhanced QMS, sometimes referred to as decentralized quality networks, introduce transparency, immutability, and traceability into quality documentation and governance. These systems can track not only non-conformance reports or corrective actions but also the complete audit trail of all quality-related decisions and data entries (Ali et al., 2022; Ahmad et al., 2023).

Supply chain management (SCM) involves the coordination of materials, information, and financial flows across suppliers, manufacturers, logistics providers, and customers. In industries such as shipbuilding, where hundreds or thousands of components and raw materials converge in tightly regulated assembly sequences, traceability becomes an essential function not only for logistics but also for quality verification, warranty compliance, and legal accountability. Traceability allows stakeholders to track the origin, movement, processing, and transformation of every component and while blockchain technologies offer a decentralized ledger for tracking assets, capturing events such as material inspections, transit conditions, handover confirmations, and supplier certifications with immutable timestamps (Yu et al., 2021; Sahoo, 2024). Smart contracts can further enhance SCM by automating supplier validation, delivery acceptance, and regulatory notifications. At its core, blockchain is a cryptographically secured, distributed ledger system. It stores transaction records across a network of nodes in a structure that is immutable and verifiable. In manufacturing, blockchain can be used to securely record quality control results, supplier certifications, material handling events, and audit logs without relying on a central authority (Wang et al., 2024). This decentralized architecture that allows trust in environments where stakeholders

may have conflicting interests or limited visibility into each other's processes, which is particularly relevant for shipbuilding, blockchain ensures that quality records are not retroactively altered and that all entries are attributable and auditable by design. Blockchain frameworks that support smart contracts, which are automated protocols that execute specific actions when predefined conditions are met can be used to automatically flag non-conforming inspection results, approve shipments only upon certificate validation, or trigger corrective workflows based on sensor input anomalies. They reduce reliance on manual approval chains and ensure consistent, rule-based compliance (Shahbazi & Byun, 2021). Also, in the industrial contexts, consortium blockchains, as a specific type of permissioned blockchain, offer a balance between openness and control. Unlike public blockchains, which allow unrestricted access, consortium chains restrict participation to known, vetted organizations, making them ideal for regulated environments such as aerospace, automotive, and shipbuilding. This model enables manufacturers, subcontractors, classification societies, and clients to participate in a shared quality governance system with role-based permissions and distributed consensus (Matenga & Mpofu, 2022).

The aim of this review paper is to systematically examine the literature at the intersection of blockchain technology, quality management practices, and traceability within manufacturing and/or shipbuilding sectors. The goal is not merely to assess technical feasibility, but to develop a conceptual foundation for designing blockchain-enabled Quality in shipbuilding that can be validated in subsequent proof-of-concept implementations. The literature review conducted herein serves for identifying key themes, recurring issues, and implementation pathways and designs in industries as observed in recent academic and applied research.

2. Methodology

This paper follows a systematic literature review (SLR) methodology to critically examine the academic contributions at the intersection of blockchain technology, quality control/management,

and industrial/manufacturing applications, with a particular emphasis on the shipbuilding sector. The primary objective of this review is to assess the viability and scholarly foundation for blockchain-based solutions to address long-standing challenges in quality management regarding transparency, traceability, and trust across extended manufacturing and supply chains and to check for the foundations of designing a blockchain-enabled quality information management framework in the shipbuilding industry. The review process was designed to ensure a comprehensive, unbiased, and replicable exploration of relevant literature, encompassing recently published research seeking to answer following research questions:

RQ1: How has blockchain technology been conceptualized and applied in the domain of quality control and quality management across industrial contexts?

RQ2: What are the documented benefits and limitations of blockchain-based solutions in enhancing traceability, data integrity, and transparency in supply chains?

RQ3: Is there empirical or conceptual support in the literature for implementing blockchain in shipbuilding-related quality processes?

Two well-established academic databases were used to identify relevant peer-reviewed articles, Web of Science (WoS) Core Collection and Scopus, where the search strategies were crafted using Boolean logic to capture relevant intersections between blockchain, quality management/control, and industrial applications. To ensure the relevance and quality of studies, peer-reviewed articles and reviews were chosen, published after 2021 with an explicit mention of blockchain in the context of quality management, quality control, or traceability. The specific query in both databases was **("quality control" OR "quality management") AND blockchain AND (industry OR industries OR manufacturing OR shipbuilding) AND PUBYEAR >= 2021 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))**. Abstracts were read to check for the domains of applications within manufacturing, industrial processes or shipbuilding. Exclusion criteria involved

papers focused solely on financial or cryptocurrency applications, articles without abstracts or full-text availability and duplicates between database results which were taken care of manually and programmatically based on titles and DOIs. A total of 55 unique records were retained after cleaning and formed the basis for analysis. The papers' quality was assumed based on their inclusion in reputable, peer-reviewed journals that are indexed in before mentioned databases but was not assessed using formal quality appraisal criteria. Later, the study employed a narrative synthesis approach, emphasizing conceptual clustering and thematic mapping of the literature published to categorize papers based on primary focus: quality control, quality management, supply chain traceability, blockchain frameworks, smart contracts, and industrial implementation to identify recurring patterns, such as technological architectures, benefits and reported challenges and to trace sector-specific applications, especially in construction, aerospace, pharmaceutical, and indirectly related heavy industries to draw parallels to shipbuilding contexts as the empirical research focused explicitly on blockchain applications in shipbuilding was very scarce. For the limitations, this review is limited by the scope of its search terms and database selection. Some relevant work may reside in grey literature or domain-specific engineering databases not included.

In the next chapter, we present the results of the systematic review by synthesizing cross-sectoral findings from the literature and critically analyzing how blockchain applications are evolving within quality and manufacturing contexts, specifically organized into thematic clustering, domain mapping of industrial examples, and implications found for shipbuilding.

3. Systematic Literature Review

3.1. Thematic Taxonomy of Application Areas

To better understand the landscape of research on blockchain applications in quality-related industrial domains, the identified literature was classified using a thematic clustering approach. Abstracts from 55 unique publications were analyzed

for keyword frequency and semantic patterns. For text preprocessing, all abstracts were converted to lowercase, punctuation and special characters were removed using a regular expression, and words were tokenized and then lemmatized to their base forms using NLTK's WordNetLemmatizer. Using a combination of CountVectorizer for term extraction with parameters `stop_words='english'`, `min_df=5`, `max_df=0.8`, `ngram_range=(1, 2)` with

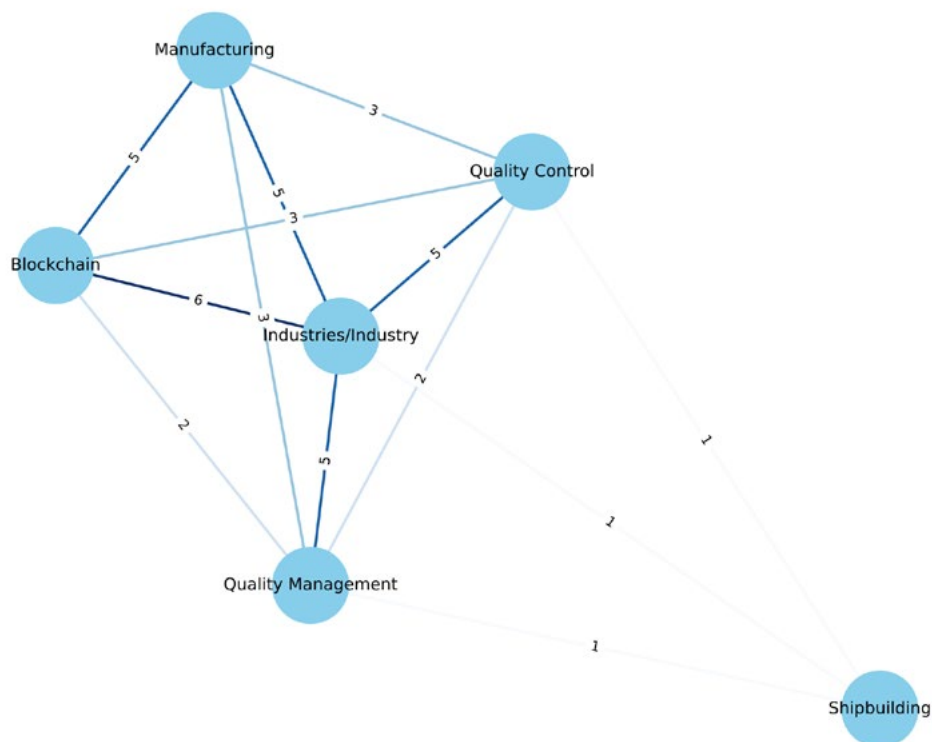
default analyzer "word" and `lowercase=True`. PCA was used for dimensionality reduction with the following parameters: `n_components=0.85`, `random_state=42` and KMeans clustering with the parameters `k-means++`, run with `n_init=10`, `max_iter=500` and `random_state=42`, where four distinct thematic groups emerged with the following distribution of papers:

Table 1. Distinct thematic groups from keyword frequency and semantic patterns

Cluster ID	Dominant Theme	Representative Topics	No. of Papers
Cluster 0	Blockchain Integration with AI & IoT for Quality	AI-enhanced inspections, IoT for real-time data, blockchain-enabled automation	16
Cluster 1	Traceability and Supply Chain Transparency	Supply chain integration, digital traceability, multi-tier manufacturing logistics	24
Cluster 2	Smart Contracts in Quality Compliance	Compliance verification, digital certification, regulatory auditing, rules enforcement	2
Cluster 3	Quality Management Frameworks in Industry 4.0	QMS modernization, organizational models, strategic quality systems with digital layers	13

These themes offer strong conceptual overlaps with the objectives of this study, particularly Clusters 1 and 2, which address traceability and compliance which are central concerns in the shipbuilding industry. To further validate, a curated set of domain-relevant keywords: "blockchain", "industry/industries", "shipbuilding", "manufacturing", "quality control", and "quality management" with the exemption of generic and high-frequency academic terms such as "study", "technology", "data", or "proposed", "paper" were intentionally excluded in text preprocessing for keyword frequency analysis. Then, a co-occurrence matrix was constructed to quantify how often each pair of keywords appeared together in the same abstract. Terms were considered co-occurring if they appeared within the same abstract, regardless of proximity. The matrix was transformed into a network graph with edge weights proportional to co-occurrence frequency showing in Figure 1.

The frequency analysis revealed that "blockchain" was the most dominant term, underscoring its centrality in current research narratives around quality systems. This was followed by "manufacturing" and "industry/industries", which together reflected the broader context within which quality management systems are being explored. The terms "quality control" and "quality management" appeared moderately across the corpus, while "shipbuilding" was less frequent but present, indicating a niche and underexplored application area. The co-occurrence network graph offers valuable structural insights as linkages were observed between "blockchain" and both "manufacturing" and "quality management", suggesting a thematic focus on digital traceability and quality assurance mechanisms within industrial environments. Interestingly, "shipbuilding" exhibited notable co-occurrence primarily with "quality management" and "blockchain", reinforcing its relevance as a high-integrity domain where immutable records and decentralized control can provide significant value.

Figure 1. Keyword co-occurrence network graph

3.2. Research papers across different industrial domains

To provide a structured perspective of blockchain application across various industrial domains, domain mapping was performed by categorizing the analyzed papers based on their explicit mention of specific industry contexts. The following table illustrates the quantitative distribution and representative titles from each identified domain, offering a clear overview of current research emphasis and practical implementations of blockchain-based quality management solutions across diverse industrial landscapes again showing limited direct empirical research in shipbuilding.

The domain mapping underscores the dominance of research efforts in general manufacturing, food, pharmaceutical, and construction

industries, reflecting their early adoption and exploration of blockchain technology. Notably, specific studies directly addressing shipbuilding remain scarce, emphasizing an important research gap. Consequently, insights from the aerospace, construction, and pharmaceutical sectors, known for stringent regulatory requirements and complex quality management systems like shipbuilding, are used extensively as analogies throughout this review. Recognizing sectoral differences, future research specifically tailored to shipbuilding's unique regulatory, operational, and technical environments is essential to validate the transferability of these findings.

Table 2. Distribution of reviewed literature across different industries with selected titles

Industrial Domain	Number of Papers	Representative Titles
General Manufacturing	17	"Blockchain-Enabled Open Quality System for Smart Manufacturing: Applications and Challenges" (Ali et al., 2022); "Integrating Lean Six Sigma with blockchain technology for quality management - a scoping review" (Ahmad et al., 2023); Integration of Blockchain, IoT and Machine Learning for Multistage Quality Control and Enhancing Security in Smart Manufacturing (Shahbazi et al., 2021);
Logistics and Supply Chain	13	Value and Design of Traceability-Driven Blockchains (Cui et al., 2023); Blockchain-enabled traceability systems for supply chain quality management: empirical insights from manufacturers (Sahoo, 2024); Blockchain-based Supply Chain System for Traceability, Regulation and Anti-counterfeiting (Lau et al., 2021); Application of IoT and blockchain technology in the integration of innovation and industrial chains in high-tech manufacturing (Li et al., 2025)
Food & Agriculture	9	Industry 4.0 digital transformation: Shaping the future of food quality (Bisht et al., 2025); Blockchain-based fresh food quality traceability and dynamic monitoring: Research progress and application perspectives (Yu et al., 2024); Integrating AI with detection methods, IoT, and blockchain to achieve food authenticity and traceability from farm-to-table (Liu et al., 2025); Enhanced Food Quality by Digital Traceability in Food Processing Industry (Verna et al., 2025);
Pharmaceutical	6	Smart Pharmaceutical Manufacturing: Ensuring End-to-End Traceability and Data Integrity in Medicine Production (Leal et al., 2021); Artificial Intelligence and Internet of Things Integration in Pharmaceutical Manufacturing: A Smart Synergy (Kodumuru et al., 2025); Blockchain Applications for Improving Track and Trace Process on Pharmaceutical Supply Chain (Lahjouji et al., 2022);
Construction	3	"IoT-BIM and blockchain integration for enhanced data traceability in offsite manufacturing" (Brandín & Abrishami, 2024); Quality Control for Offsite Construction: Review and Future Directions (Liu et al., 2022); Blockchain-enabled platform for the quality management of the ready-mixed concrete supply chain (Wang et al., 2024);
Aerospace, Aviation, Automotive	6	"Blockchain-Based Process Quality Data Sharing Platform for Aviation Suppliers" (Cao et al., 2023); Application of IoT and blockchain technology in the integration of innovation and industrial chains in high-tech manufacturing (Li et al., 2025); Development and Implementation of Autonomous Quality Management System (AQMS) in an Automotive Manufacturing using Quality 4.0 Concept - A Case Study (Singh et al., 2022)
Shipbuilding	1	"Digital Twin of Shipbuilding Process in Shipyard 4.0" (Iwańkiewicz & Rutkowski, 2023)

3.3. Recognized shipbuilding implications

The collected literature centers around traceability in supply chains, where blockchain is positioned as a foundational technology to enhance

data visibility and transactional trust. The studies consistently emphasize the fragmented nature of supply chain quality data and the inability of traditional systems to maintain consistent, tamper-proof records across organizational boundaries. For

instance, Ali et al. (2022) propose a blockchain-enabled open quality system designed for smart manufacturing environments, demonstrating how decentralized data architectures can ensure that quality records remain consistent and verifiable across suppliers and regulators. The system described shows how immutable recording of inspection and compliance events can streamline stakeholder trust and reduce auditing overheads. This framework strongly parallels the challenges in shipbuilding, where certification authorities, component manufacturers, and shipyards must synchronize quality documentation across a complex product lifecycle. Yu et al. (2024) explore how traceability mechanisms enabled by blockchain enhance food quality assurance by establishing clear provenance data, a concept directly translatable to shipbuilding for tracking materials and compliance from source to final product. Although their study is grounded in the food industry, the implementation of layered blockchain architecture to trace input origin and transformation closely mirrors the structure of a distributed manufacturing chain in shipbuilding. Additionally, Matenga and Mpofu (2022) introduce a blockchain-based cloud manufacturing system (BCMaaS) in railcar manufacturing, particularly for sheet metal parts which is also very common in shipbuilding. Their system supports real-time analytics, provenance tracking, and decentralized collaboration among SMEs. This directly informs the vision for a blockchain-based shipbuilding QMS that captures every quality-critical event across procurement, fabrication, logistics, and commissioning.

Next studies contribute to valuable insights into how programmable rules embedded in blockchain can actively monitor and regulate processes that traditionally require human oversight. KorkusuzPolat and Baran (2024) propose a blockchain-based Quality 4.0 model. Focused on the post-procurement storage process, the model emphasizes traceability, control, and sustainability of quality across technology, processes, and workforce. When applied to a sheet metal and profile warehouse, the BC-based system outperformed the traditional system in effectiveness and comprehensiveness ensuring real-time product tracking, restricting unauthorized access, and supporting decision-making for quality sustainability,

thus providing a scalable blueprint for digitized, secure quality control systems.

Tambare et al. (2022) showcase how companies like Rolls-Royce and Scania have operationalized these models to achieve efficiency and quality gains. Quality 4.0, characterized by digital tools and data analytics, is shown to enhance competitiveness and adaptability. However, the review calls for deeper, systematic analysis and statistical validation of these frameworks across industries to ensure their effective implementation and to facilitate broader adoption of smart manufacturing practices. Similarly, Shahbazi and Byun (2021) propose a smart manufacturing framework integrating blockchain technology and machine learning to enhance data security, reliability prediction, and quality control. Using the Hyperledger Fabric platform, the system addresses challenges such as fake datasets and data management inefficiencies. Machine learning models, particularly hybrid and non-linear approaches, are employed for fault diagnosis and quality evaluation, while big data techniques support system scalability and performance. The approach demonstrates high accuracy in quality control prediction.

On a more conceptual note, several studies explore the broader digital transformation of quality management systems in industrial contexts. These works provide the theoretical scaffolding necessary to position blockchain not simply as a technology stack for quality governance. Bisht et al. (2025) highlight the transformative role of Industry 4.0 in the agri-food sector, emphasizing how Quality 4.0 leverages advanced digital technologies to meet growing global demands for food quality. It outlines the integration of artificial intelligence, big data analytics, food printing, digital twins, smart sensors, and blockchain as essential tools in modernizing and enhancing quality monitoring systems. Positioned within the broader context of digital transformation, these technologies collectively aim to revolutionize quality management across diverse segments of the food industry. Kodumuru et al. (2025) examine the convergence of artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) in pharmaceutical manufacturing, highlighting its transformative role in bridging digital and physical systems. Through AI-enabled IoT sensors, real-time analysis, predictive maintenance, and automation are achieved, enhancing quality

control and operational efficiency. Their review also explores supporting technologies like cloud computing and data analytics while discussing recent innovations such as AI in drug discovery and blockchain for traceability. Despite notable benefits, the integration faces challenges related to data interoperability, ethical concerns, and regulatory compliance, necessitating robust frameworks for future implementation.

Cao et al. (2023) present a blockchain-based quality data-sharing platform tailored for aviation suppliers to address issues of data silos and information credibility in traditional manufacturing processes. By integrating blockchain technology with supply chain quality management, the platform enables real-time, secure, and transparent sharing of manufacturing process data. It introduces architectural elements such as data block packaging models, secure storage mechanisms, and supplier evaluation tools. Applied in a real-world aircraft industrial park, the platform demonstrates its capacity to streamline supplier collaboration and enhance the reliability of product quality data across aviation manufacturing networks. Liu et al. (2025) focus on AI-based detection technologies such as spectroscopy and sensor systems, the study explores how integrating these with IoT and blockchain contributes to transparent, automated, and secure traceability frameworks.

Given the scarcity of direct empirical research focused explicitly on blockchain applications in shipbuilding, the studied literature draws significantly on analogies from sectors with comparably strict regulatory environments, such as aerospace, pharmaceutical, and construction industries. Nonetheless, the transferability of these conclusions to shipbuilding must be viewed cautiously. Specific regulatory constraints, organizational complexities, and unique technical challenges inherent in multi-year shipbuilding projects limit the universality of solutions proven effective in other industries.

This synthesis affirms that a rich foundation may already exist in literature to inform the conceptualization of a blockchain-based quality management system tailored to shipbuilding. The review reveals not only technological enablers and barriers but also theoretical and operational models that can guide future implementation efforts.

4. Toward Blockchain-Based Quality Information Systems in Shipbuilding

The shipbuilding industry stands as one of the most quality-sensitive manufacturing domains. It requires close coordination between hundreds of suppliers, subcontractors, engineering teams, and classification societies over extended production timelines and within strictly regulated frameworks. Ensuring quality and compliance throughout this complex ecosystem is a challenge. This section proposes a conceptual design for a blockchain-based quality information system tailored to the specific needs of shipbuilding, integrating the principles and structure of the Hyperledger Fabric blockchain framework.

4.1. Conceptual design objective

The proposed system framework must overcome key limitations of conventional QMS implementations in shipbuilding by introducing several foundational enhancements such as decentralization of quality data governance that enables each stakeholder (shipyard, suppliers, classification and certification societies and customers) to verify quality events without depending on a central authority. Immutability and traceability of quality records should be ensured once an inspection reports, material or workers certificates, or non-conformance events are logged and cannot be altered or deleted for full immutability. Smart contract-based compliance enforcement should allow automated validation of quality events against predefined technical and regulatory criteria which can later be assessed with a secure, role-based access control, providing tailored visibility for each stakeholder depending on their contractual role and regulatory authority. These goals are tightly aligned with the challenges documented in the reviewed literature, which highlight the critical need for trust, visibility, and verifiability in complex industrial value chains.

While the proposed system design offers clear advantages in decentralization and immutability, several practical challenges must be acknowledged. Integrating blockchain into an existing shipyard's digital environment requires addressing interoperability with legacy systems, allocating

sufficient budgets for infrastructure and long-term maintenance, and managing potential institutional resistance to decentralized record-keeping. Effective implementation also depends on training stakeholders to correctly handle digital certifications, interact with smart contracts, and manage secure identities within the consortium.

4.2. System architecture overview

The architecture of the proposed framework is based on the Hyperledger Fabric¹ platform, a modular, permissioned blockchain framework designed for enterprise consortia (Hyperledger Fabric Docs Main Documentation, n.d.). Hyperledger Fabric was selected for its channel-based privacy architecture, pluggable consensus model, and support for various access control policies (Thummavet, 2023). These features make it particularly well-suited for shipbuilding environments, where multiple stakeholders require both data confidentiality and cross-party verification.

Zhong et al., (2020) prototype on construction industry practices, used Hyperledger Fabric consortium blockchain platform and can similarly be used as foundational layer for a shipbuilding system. Their framework demonstrates how blockchain can provide immutable, traceable, and transparent records of quality-related activities, while also enabling automated compliance checking through smart contracts. This system architecture can be adapted to the shipbuilding context, where trust among contractors, suppliers, inspectors, and regulators is critical, and where compliance with certification standards must be verifiable and audit-proof, featuring role-based information permissions and lifecycle governance, allowing each actor in the shipbuilding process (e.g., material suppliers, transporters, shipyards, certification agencies and end clients) to access, validate, or append quality data within their predefined scope. A consensus mechanism native to the Hyperledger Fabric platform ensures that all transactions (e.g., build, quality inspections, part certifications, or test results) are cryptographically verified before inclusion on the ledger. Smart contracts automatically rule-check against design

specifications or regulatory criteria such as inspection records for welds or structural integrity tests can be automatically validated against predefined parameters before progressing to the next production phase providing quality enforcement and audit trails that are accessible and verifiable across the entire chain.

Hence, the conceptual framework should be structured around a consortium network which is a system governed by a permissioned consortium of entities including shipyards, suppliers, regulatory authorities, classification societies, certification and inspection organizations and clients where each participant operates a peer node that maintains a local copy of the ledger and executes smart contracts (called chaincodes in Hyperledger Fabric). Hyperledger Fabric enables the creation of private channels, where only relevant parties have access to the transactions and data. For example, a shipyard and steel supplier might share one channel for procurement traceability, while the shipyard and a classification society operate on another for regulatory inspections. Smart contracts (chaincode) that can be written in Golang, Java, or Node.js, enforce quality compliance logic which for instance a contract might require that a welding process has passed certified inspection before the next process (e.g., painting) can be validated. The ordering service component ensures transaction consistency and deterministic ordering across the network. Fabric supports multiple consensus mechanisms to verify, order, and record transactions in a decentralized manner. To define the identity management and authentication policies for each organization, ensuring that only authorized entities can submit or verify quality events, a membership service providers (MSP) should exist for every stakeholder. Lastly, client applications should be developed as interfaces used by users (e.g., quality inspectors, project managers, auditors) to record events, retrieve documentation, and visualize lifecycle compliance dashboards

The quality management lifecycle in shipbuilding includes numerous milestones such as technical design validation, supplier certification, material acceptance, assembly inspections, testing protocols, and final product handover. In the

1 Introduction - Hyperledger Fabric Docs main documentation. (n. d.). <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/whatis.html#hyperledger-fabric>

proposed system design, each of these events need to be recorded on the blockchain as digitally signed, timestamped transactions. Considering a scenario of material procurement, when a supplier delivers certified steel plates, a digital certificate is issued and recorded on a shared channel with the shipyard and classification or certification body. This certificate is linked to the batch number and includes specifications, origin, and test data. Inside assembly and fabrication, as the hull structure is assembled, each weld is inspected by a certified inspector whose identity is verified via the MSP. The results are entered via a secure client interface and validated through a smart contract that checks qualification compliance. Inspection processes and non-conformance handling, for example a weld defect, a deviation report should be logged that automatically triggers a remediation workflow defined in the chaincode. At the final handover phase, once the ship is completed, a final compliance certificate is generated, aggregating all prior transactions into a verifiable quality trail. This dataset or document can be made accessible to clients, port authorities, and insurers through permissioned views.

4.3. Consensus mechanisms

In the following section, we examine the consensus mechanisms that govern trust and validation in blockchain system for the consistency and legitimacy of shared data across distributed nodes. Unlike traditional databases, where a centralized authority manages updates and enforces integrity, blockchain networks rely on consensus mechanisms to verify, order, and record transactions in a decentralized manner. The effectiveness of a blockchain-based quality management system in shipbuilding, therefore, depends not only on the structure of smart contracts or data models but also on the reliability and performance of its underlying consensus protocol (Zhang et al., 2021; Westphal et al., 2023).

In the context of enterprise and permissioned networks, such as the one proposed for the shipbuilding sector, the consensus process differs substantially from public blockchain platforms like Bitcoin or Ethereum. Permissioned systems

do not require energy-intensive proof-of-work or permissionless participation; instead, they rely on a known set of authorized participants and focus on fault tolerance, performance, and governance. This approach has been emphasized in multiple studies exploring blockchain for manufacturing and regulated industrial applications (Battisti et al., 2023; Zhang et al., 2021).

The proposed system architecture adopts the Raft consensus algorithm², which is natively supported in Hyperledger Fabric. Raft is a crash fault tolerant (CFT) consensus protocol designed to provide a balance between operational efficiency and consistency. It works by electing a leader among ordering nodes, which is responsible for proposing the sequence of transactions. Other nodes (followers) then replicate and validate these blocks. In the event of a leader failure, a new one is elected to continue the process with minimal disruption (Ongaro, 2014; Thummavet, 2023). Raft offers several key advantages that make it well-suited for the quality assurance environment in shipbuilding. It supports low-latency transaction finality, which ensures that inspection records, test results, and certifications are committed to the ledger quickly that is essential for dynamic manufacturing workflows. Raft provides deterministic ordering of transactions, which is critical when the sequence of quality events (such as inspections or approvals) must be preserved for regulatory or legal reasons.

Importantly, consensus in this architecture is decoupled from the execution of smart contracts and endorsement of transactions. Hyperledger Fabric's execute-order-validate model ensures that each transaction is first simulated and endorsed by a specified set of peers, then ordered by the consensus layer, and finally validated and committed across the ledger. This separation enhances performance and modularity while preserving deterministic results which is a requirement when compliance rules are encoded in chaincode and must be uniformly applied across all peer organizations (Hyperledger Foundation, 2024). From an implementation perspective, shipyards and certification agencies could operate ordering nodes to co-maintain the integrity of the network. This shared control over the consensus process would align with existing regulatory hierarchies and

2 Raft is a consensus algorithm for managing a replicated log, <https://raft.github.io/raft.pdf>

stakeholder relationships, enhancing trust in the system's impartiality and reliability. Suppliers and subcontractors, while not responsible for ordering, would participate as endorsing and committing peers, submitting quality data and receiving confirmations.

While the use of the Raft algorithm aligns with the permissioned nature of a shipbuilding consortium, it is important to clarify its trust model and compare it to possible Byzantine Fault Tolerant (BFT) alternatives. Sogaard et al. (2023) explain that crash fault tolerance (CFT) assumes that if a node fails, it does so by simply ceasing to function, it crashes but does not behave unpredictably or maliciously. Raft, as a CFT ordering protocol, is designed to ensure the system continues operating as long as most nodes remain available and honest. This is generally sufficient in a private, regulated industrial consortium where participants such as shipyards, classification societies, and regulatory agencies are known, vetted, and share aligned incentives to maintain trustworthy operations. However, CFT alone does not protect against intentional misbehavior by insider nodes. BFT, by contrast, extends fault tolerance to include arbitrary or malicious faults, providing consensus even when some nodes act dishonestly. This is particularly relevant when a distributed ledger must resist intentional data tampering or collusion among untrusted or partially trusted participants. Authors from the same study also note that BFT systems, such as PBFT or Tendermint, achieve this enhanced trust by requiring additional message exchanges to establish consensus, ensuring that even if a fraction of nodes acts maliciously, the system remains secure, and the ledger stays consistent but these stronger trust guarantees come at a cost. They found that CFT-based blockchains like Hyperledger Fabric using Raft (or its older Kafka variant) deliver significantly higher peak throughput than comparable BFT architectures under identical hardware and network conditions. Their testing showed that BFT protocols introduce substantial performance overhead due to the extra communication and verification required to guard against Byzantine faults. In large-scale or high-frequency transaction environments, such as national or transnational e-business systems, this performance cost can limit scalability or require more robust infrastructure to maintain acceptable response times.

For the shipbuilding industry's context, this means that while a Raft-based CFT model remains practical and efficient for a relatively small, permissioned consortium of known participants, trade-offs must be recognized. If the network expands to include more autonomous suppliers, subcontractors, or cross-border parties where trust is lower or the risk of insider misconduct is greater, adopting a BFT-capable consensus, even at higher computational cost, could become justifiable. The performance penalty may be acceptable if the added layer of distributed trust is critical for safeguarding high-value, long-lifecycle assets and immutable quality records.

Consequently, any real-world deployment should plan for resilience against the limitations of Raft, such as vulnerability to network partitions and the need for stable leader election. Robust fallback and monitoring procedures for leader node failures should be integrated. Likewise, if the project scope evolves to include less regulated or geographically dispersed participants, system architects should evaluate whether transitioning to a BFT consensus layer or a hybrid approach combining CFT with BFT elements for critical workflows, would better balance operational trust and performance requirements.

4.4. Use case scenarios for shipbuilding quality processes

To contextualize the proposed blockchain-based quality information system framework, this section outlines several use case scenarios relevant to key quality assurance processes in the shipbuilding lifecycle. These scenarios are presented not as implementation guides, but as illustrations of how blockchain can support traceability, compliance, and process transparency across interdependent actors and workflows in shipbuilding. Together, they serve as a theoretical foundation for future implementation and validation efforts.

Each of the following scenarios also corresponds to thematic concerns identified in the literature review: for example, procurement traceability and supply chain transparency directly address challenges in Cluster 1, smart contract-based compliance automation aligns with Cluster 2, and the integration of inspection and audit data into Quality 4.0 frameworks resonates with Clusters 0 and 3.

In traditional shipbuilding workflows, the procurement of raw materials and components such as steel plates, propulsion systems, valves, pumps or electronic modules involves a complex chain of suppliers. Each tier of this chain may provide its own documentation and certification, which are later manually aggregated or validated by the shipyard, certification organizations or a classification society. Blockchain-based system transforms this process by recording procurement events as immutable transactions. When a supplier dispatches a batch of certified material, a digital certificate is generated and registered on the blockchain. This certificate includes material specifications, batch identifiers, compliance codes, and links to original test data. It is digitally signed by the supplier's private key and verifiable by any authorized party on the network. In this way, the blockchain acts as a shared source of truth across supplier tiers, preventing document tampering or duplication, and allowing the shipyard to verify material authenticity prior to acceptance or usage. Moreover, in cases where regulatory bodies require long-term verification of part origin, the blockchain provides a permanent and accessible audit trail (Regueiro & Urquizu, 2024).

The shipbuilding process involves an array of inspections across various stages: dimensional checks during hull fabrication, weld quality control, coating inspections, system integration testing, and sea trials. Typically, these inspections are recorded in isolated logs and sometimes non-interoperable systems. With a blockchain-based approach, inspection events can be recorded as individual transactions, each tied to a specific quality activity. These records are submitted by authorized inspectors whose credentials are cryptographically verified via the system's membership service provider. Once submitted, the inspection outcome, time, and responsible party are fixed on the ledger and validated by smart contract logic to check conformity to process or regulatory standards (Ali et al., 2022; Cui et al., 2023).

This mechanism supports the real-time aggregation of inspection results across subsystems and timeframes meaning that a project engineer can query the ledger to view the inspection status of a hull block, subsystem, or the entire vessel, thus, the system can also provide automated compliance summaries during project handover

or certification audits, reducing the administrative burden traditionally associated with these phases.

In conventional systems, the identification and resolution of non-conformities (e.g., component failures, missed tolerances, process deviations) often involve multi-party communication, documentation delays, and versioning issues. These bottlenecks can be exacerbated in shipbuilding projects where external certification authorities or subcontractors are required to validate quality issues. The blockchain system introduces an approach in which a non-conformance report might be issued as a smart contract-triggered event, automatically linked to the process or inspection step that identified the issue. The record includes supporting documents, timestamps, and the party responsible for follow-up. The resolution process can be governed by another set of smart contracts that require corrective action validation from independent authorities before closing the issue which creates a transparent chain of accountability (Kuhn et al., 2018; Hariyani et al., 2025). Each step (issue identification, corrective proposal, verification, and closure) are time-stamped and linked to authenticated users, reducing the risk of undocumented fixes or post-hoc justifications. In doing so, the blockchain system contributes to a culture of continuous, auditable quality assurance across all stakeholders in cross-organizational non-conformance management.

The final handover and delivery phase of a shipbuilding project is traditionally administrative-heavy, relying on manual collation of quality documents, inspection records, and regulatory approvals and is marked by a culmination of certification, verification, and documentation consolidation for compliance archiving. Within the blockchain-enabled quality information system, all prior events, from component procurement to final testing, already exist on-chain in verifiable form. During handover, a smart contract can be triggered to generate a composite compliance report that aggregates all relevant transactions, digitally signs it, and anchors it as a final block in the vessel's quality history. That kind of report serves as a digital twin of compliance, an immutable, distributed archive that can be accessed by classification societies, clients, port authorities, certification authorities or insurers. Such framework also supports post-delivery lifecycle quality assurance,

such as warranty claims or refit projects, where historical inspection records and part provenance may be needed years after commissioning (Bisht et al., 2024; Brandin & Abrishami, 2024; Zhang et al., 2021).

To improve clarity, Table 3. outlines the stakeholders in the shipbuilding blockchain consortium, describing their typical access rights and quality-related responsibilities.

Table 3. System Components for the Blockchain-Based Shipbuilding Quality Information System

Stakeholder	Primary Role and Responsibilities	Relevant Quality Events	Access Rights
Shipyard	Oversees project execution, coordinates suppliers, subcontractors, manages inspections and quality records	Technical design validation, assembly inspections, non-conformance management, compliance certification	Full access to record, verify, append, and audit all project quality events
Suppliers	Provide raw materials, components, and documentation; supply certificates for delivered items	Material procurement certification, batch quality documentation	Write and read access to their own supply data; view relevant inspection outcomes
Classification Societies	Independent verification and certification of compliance with maritime standards	Approval of inspection reports, certification of critical processes	Verify inspection and compliance records; append final certificates
Certification & Inspection Bodies	Conduct detailed inspections, witness tests, verify corrective actions	Inspection reports, non-conformance findings, corrective action approvals	Submit inspection results; verify compliance with regulatory frameworks
Regulatory Authorities	Ensure compliance with legal and international maritime standards; issue final approvals	Final audits, compliance oversight, regulatory reporting	Read access to complete quality trails; verification authority for compliance records
Clients/ Owners	Commission and receive the final vessel; require proof of compliance for warranty, insurance, and operational licensing	Final handover certificate, quality documentation archive	Read access to final aggregated compliance reports and relevant certification records
IT Administrators (Consortium Operators)	Manage network nodes, oversee smart contract deployment, maintain system security and identity management	System configuration, MSP updates, access control management	Full administrative rights to manage technical aspects but no direct control over quality data

Also, Table 4. summarizes the key system components, their functionalities, and associated technologies with notes and together, with Table 3. helps to visualize how decentralized governance,

differentiated permissions, and smart contract rules are distributed across the shipbuilding quality lifecycle.

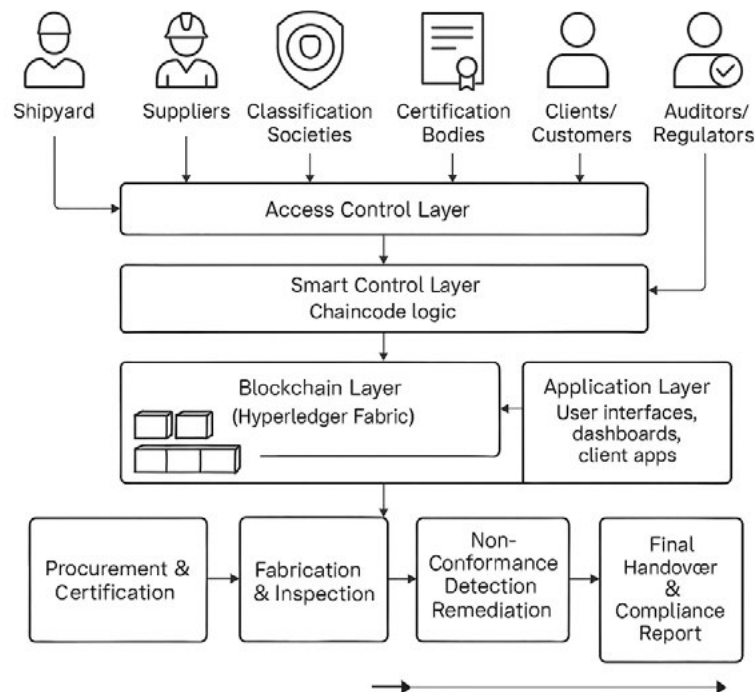
Table 4. System Components for the Blockchain-Based Shipbuilding Quality Information System

System Component	Description of Functionality	Technological Element	Notes
Stakeholder Identity	Verifies the identity of users, suppliers, inspectors, and regulatory bodies via digital certificates	Membership Service Provider (MSP)	Each stakeholder operates under strict role-based identity management; credentials verified before transactions are recorded.
Smart Contracts	Automate rule-based quality checks, trigger events for inspections, approvals, or non-conformance remediation	Chaincode (written in Go, Java, or Node.js)	Example: A welding inspection smart contract blocks progress until certification is validated. Non-conformance reports automatically trigger corrective workflows.
Access Management	Ensures different stakeholders can only access data relevant to their contractual and regulatory roles	Role-Based Access Control (RBAC)	Shipyard has full write/read, suppliers have limited write, regulators and classification societies have read/verify privileges.
Immutable Data Recording	Stores all quality-related records, including inspection logs, material certificates, test results, and final handover documents	Hyperledger Fabric Ledger	Transactions are digitally signed, time-stamped, and permanently stored.
Consensus Mechanism	Guarantees data consistency across all nodes by validating transactions in an agreed sequence	Raft (Crash Fault Tolerant) or optional Byzantine Fault Tolerant (BFT) module for higher trust guarantees	Raft is suitable for small, trusted shipbuilding consortia; PBFT could be applied if stakeholder trust is weaker or more malicious faults are anticipated.
Private Communication Channels	Enables confidential data sharing between defined parties	Hyperledger Fabric Channels	Channels: <i>Material Ordering Channel</i> (shipyard ↔ supplier); <i>Work Orders and Inspections Channel</i> (shipyard ↔ classification society); <i>Final Certification Channel</i> (shipyard ↔ regulator ↔ client).
Data Visualization	Provides stakeholders with dashboards to track real-time quality status, compliance progress, and audit trails	Client Apps (Web Interfaces, APIs, Mobile Apps)	Project managers monitor inspection status; clients view final compliance certificates; inspectors submit results via secure user portals.
Ordering Service	Manages the ordering and final commitment of transactions into the ledger	Hyperledger Fabric Ordering Service	Operated by shipyards and certification societies to ensure trustworthy sequencing and ledger consistency, aligned with the chosen Raft or BFT consensus module.

As a result of all fore-mentioned components of a proposed concepts in this chapter, Figure 2 illustrates the conceptual architecture of the

proposed blockchain-based quality information system framework.

Figure 2. Conceptual quality information system architecture



The proposed system integrates key stakeholders, core system layers, and the shipbuilding quality lifecycle. The three-tiered structure captures the interaction between actors (e.g., shipyards, suppliers, regulatory bodies), the blockchain infrastructure (including access control, smart contracts, and Hyperledger Fabric ledger), and quality management activities such as procurement certification, inspections, and final handover.

This visualization supports the theoretical framework presented in this study and demonstrates how decentralized data governance can be operationalized across interdependent phases of shipbuilding quality assurance.

While these use cases demonstrate significant potential, it is important to acknowledge that practical deployment may face obstacles such as stakeholder alignment, compliance with evolving data privacy regulations, smart contract audits and technical scaling limits, which will need to be validated through all future implementations.

4.5. Critical Challenges and Limitations in Implementing Blockchain in Shipbuilding

The adoption of blockchain technology within the shipbuilding industry promises considerable improvements in traceability, data integrity, and transparency. However, the implementation faces significant practical challenges and inherent limitations that must be critically addressed to realize its full potential as technical complexities may constitute a barrier to blockchain deployment. Issues such as interoperability with legacy systems, integrations with Enterprise Resource Planning (ERP) and Product Lifecycle Management (PLM) systems, which are typically proprietary or customized. Integrating blockchain solutions into such environments requires substantial adjustments and careful design to ensure seamless data exchange and prevent disruptions to existing workflows (Brandin & Abrishami, 2024; Westphal et al., 2023). Furthermore, maintaining data consistency across these platforms and managing large, dynamically evolving datasets raises additional difficulties, particularly when considering blockchain's immutable

nature and the need for accurate initial data entry (Karaduman & Gülhas, 2025). Cybersecurity concerns add another layer of complexity. Despite blockchain's inherent security benefits, vulnerabilities persist, especially when blockchain integrates with external technologies such as IoT devices, RFID tags, and sensors commonly used in shipbuilding logistics and quality management processes (Karaduman & Gülhas, 2025). Devices transmitting erroneous or deliberately manipulated data could severely compromise the integrity of blockchain records, undermining trust and transparency, essential elements that blockchain seeks to enhance. Addressing these vulnerabilities requires robust encryption, secure communication protocols, and rigorous validation mechanisms to ensure data authenticity and accuracy.

Another significant limitation arises from blockchain consensus mechanisms themselves. Consortium blockchains may typically employ consensus algorithms such as Raft or Byzantine Fault Tolerance (BFT). Although Raft provides operational efficiency suitable for smaller, trusted consortia, it does not offer resilience against malicious nodes or more sophisticated faults, limiting its effectiveness in broader or less regulated collaborations. On the other hand, BFT-based algorithms, while providing greater security against malicious behavior, introduce notable performance penalties in terms of latency, throughput, and computational overhead (Søgaard et al., 2023). Balancing security, performance, and scalability thus becomes critical in selecting the appropriate consensus model. Technical hurdles, such as latency, limited data formats, and the complex consensus processes inherent in consortium blockchains, further complicate their integration into existing industrial practices (Zhong, 2020; Cao et al., 2023).

Ethical and regulatory challenges further complicate blockchain adoption in shipbuilding. Given the international regulatory framework governed by bodies such as the International Maritime Organization (IMO) and classification societies, ensuring blockchain implementations meet certification standards and statutory compliance becomes crucial. Standards like ISO 9001 for quality management, ISO 14001 for environmental management, ISO 45001 for occupational safety, and ISO 3834 for welding quality must be integrally reflected within blockchain designs, requiring extensive

cross-disciplinary collaboration (ISO standards documentation; International maritime organization's (IMO) that sets policies for international shipping like regulations on safety, security, and environmental best practices. Ethical considerations, including data privacy, equitable stakeholder participation, and transparency in data handling, also require careful governance frameworks to avoid misuse or monopolization of data access within consortium-based blockchains.

Operational and organizational challenges should also be explicitly recognized. Blockchain solutions require significant upfront investments, not only financially but also in terms of stakeholder training and organizational adaptation to decentralized governance models. Institutional resistance to decentralized data management, common in industries with traditionally centralized quality control structures, may pose significant hurdles to acceptance and successful deployment. Moreover, ongoing maintenance costs and evolving regulatory landscapes require blockchain systems to maintain flexibility, adaptability, and resilience in the face of inevitable technological and regulatory changes.

In conclusion, while blockchain technologies offer compelling benefits to the shipbuilding sector, addressing these identified challenges and limitations is critical for successful real-world implementation. Future research must focus on developing robust, scalable, and secure blockchain architectures, ensuring regulatory compliance, ethical governance, and seamless integration with legacy systems and processes. Such informed approach should support the effective translation of blockchain's theoretical benefits into tangible operational improvements within the complex shipbuilding environment.

5. Discussion

Specifically for the shipbuilding sector, direct research on blockchain implementation remains scarce, with more available insights from comparably strict and regulated sectors, such as aviation and construction which are also required to quality standards and special regulations. Aviation industry experiences, characterized by highly complex processes, stringent security requirements, and pronounced data privacy concerns, might provide

relevant analogies for shipbuilding's similarly complex and tightly regulated environments (Cao et al., 2023). Likewise, construction sector studies highlight barriers like stakeholder agreement difficulties, privacy concerns, lack of established regulatory frameworks, and significant initial costs, issues equally pertinent to shipbuilding due to its long-term project cycles, regulatory rigor, standards conformity, extensive multi-tiered supplier networks, and critical long-term data archival requirements (Zhong, 2020; Brandín & Abrishami, 2024). These features may be suited for shipbuilding, where documentation of quality milestones is critical not only for regulatory compliance but also for commercial and legal clarity. Thus, while blockchain provides powerful tools for enhancing transparency and trust, its benefits are not automatically guaranteed and require careful planning, design, and resource allocation for these features to be particularly suited for shipbuilding, where quality is critical.

Synthesizing the insights from recent peer-reviewed literature, this paper proposes a conceptual framework that shows how quality data may be governed, shared, and validated across industrial networks or across various domains such as pharmaceuticals, aerospace, and food processing. In shipbuilding, where products are uniquely complex and quality failures can have regulatory or safety-critical implications, these attributes are not simply desirable, they are essential. These findings try to justify blockchain not just as a technical tool, but as a potential foundation for building trust and coordination in multi-actor manufacturing environments. This study identifies conceptual feasibility, not commercial maturity. Questions around consortium governance, identity management, privacy-preserving architectures, and integration with existing digital shipbuilding platforms still require technical, organizational and legal refinement. From a practical standpoint, the actual design and implementation of a blockchain-based quality management platform tailored to a shipbuilder and its cooperating stakeholders will involve rigorous experimentation. The framework proposed in this review presents a foundational blueprint, but it will need to be translated into smart contract logic, permission policies, and application interfaces which raise important future research directions, not just in

systems engineering and cybersecurity, but also in human-centered design, interoperability with enterprise resource planning (ERP) or product life-cycle management (PLM) systems, and standards development for blockchain-based quality data.

Another important limitation relates to the adaptability of the system when consortium membership changes over time. In dynamic industrial collaborations, new suppliers may join, or regulatory partners may be replaced. Updating membership service policies, access rights, and smart contract logic securely and without disruption will require robust governance mechanisms and operational protocols, which still need practical validation in production settings. Additionally, while this paper demonstrates conceptual feasibility, it does not address production-grade user interfaces or middleware necessary to handle multi-channel data fragmentation, as real implementations will likely demand greater granularity of data privacy alongside full end-to-end traceability.

6. Conclusion

This work has undertaken a systematic exploration of the intersections between blockchain technology and quality management systems (QMS) within industrial and manufacturing contexts, with a particular emphasis on the shipbuilding sector. Through a structured review of 55 peer-reviewed publications sourced from the Web of Science and Scopus databases, the analysis addressed three core research questions pertaining to the conceptualization, benefits and constraints, and sector-specific applicability of blockchain in quality control and assurance domains. This synthesis was guided by a combination of qualitative narrative analysis and computational methods, including principal component analysis (PCA) and KMeans clustering. The thematic taxonomy derived from these methods revealed clear quantitative trends: among the 55 reviewed studies, the largest thematic cluster relates to general manufacturing (17 papers), followed by logistics and supply chain (13), food and agriculture (9), pharmaceutical contexts (6), aerospace, aviation, and automotive (6), construction (3), and a single direct study in shipbuilding. These distributions support the claim that, while direct shipbuilding research is limited,

conceptual overlaps with other highly regulated, complex manufacturing domains justify the proposed adaptation.

In response to the first research question, the review demonstrates that blockchain technology has been increasingly conceptualized not merely as a secure data repository but as a distributed governance mechanism embedded within broader Quality 4.0 paradigms. Across diverse industrial applications, including pharmaceuticals, food logistics, aerospace, and smart manufacturing where blockchain is a foundational infrastructure that supports traceability, decentralized verification, and rule-based automation through smart contracts. The literature indicates a shift from traditional centralized quality architectures toward distributed systems of trust that facilitate cross-organizational transparency and compliance enforcement.

Second research question focused on the advantages and limitations of blockchain-based quality systems. The empirical and conceptual findings across the reviewed literature underscore multiple documented benefits: improved traceability across multi-tier supply chains, immutable recording of quality events, reduced auditing overhead through automated compliance validation, and enhanced stakeholder accountability. These outcomes are particularly relevant in industries marked by regulatory intensity and subcontractor fragmentation. At the same time, the review highlights several limitations, including integration complexities with legacy enterprise systems, a lack of standardized frameworks for quality data exchange, scalability concerns, and challenges in operationalizing smart contract governance in real-world industrial settings. Nonetheless, the adoption of permissioned blockchain models, particularly those based on Hyperledger Fabric, emerges as a prevalent mitigation strategy, offering access control, privacy-preserving mechanisms, and consortium-level governance structures.

Regarding the third research question, the literature provides conceptual justification for the implementation of blockchain solutions in shipbuilding-specific quality processes. Despite its relatively underexplored presence in shipbuilding publications, the thematic parallels between shipbuilding and other high-complexity manufacturing domains offer substantial support for its applicability. The

sector's reliance on extensive supplier networks, compliance requirements and certifications, and long-lifecycle documentation workflows mirrors many of the structural challenges that blockchain has addressed in other contexts.

Building on these findings, this paper proposed a conceptual framework for a blockchain-based quality information system tailored to shipbuilding based on the architectural capabilities of Hyperledger Fabric, which introduces a permissioned, consortium-led ledger infrastructure capable of governing quality data across diverse stakeholders, shipyards, suppliers, regulators, classification societies, certification authorities and clients. Key features of the framework include immutability of inspection records, smart contract-based enforcement of technical and regulatory compliance, and secure role-based access to quality data. The framework supports decentralized documentation of quality-critical milestones such as material certification, process inspections, non-conformance reports, and final product handover, all recorded as cryptographically verifiable transactions on-chain. In doing so, the proposed design aligns directly with the systemic needs of the shipbuilding sector, where quality management is not only operationally central but legally and commercially consequential. However, the conceptual framework's practical implementation in real shipbuilding conditions may face technical and operational challenges that require deeper validation. All technical aspects will need careful engineering to align the blockchain's architectural promise with shipbuilder day-to-day operational realities.

The findings of this review reinforce the argument that blockchain technologies may offer not only the technical affordances but also the architectural paradigms that have the potential to support a new generation of quality management systems. In the context of shipbuilding, where quality failures can have significant economic, regulatory, and safety repercussions, the introduction of immutable, auditable, and decentralized quality records may enable an incremental but potentially transformative shift in how assurance is executed across the value chain. This review also acknowledges that the proposed solution remains conceptual in nature and must be subjected to further empirical validation. Issues such as system interoperability with digital shipbuilding platforms (e.g.,

PLM and ERP systems), human-system interaction design, performance benchmarking under production conditions, and compliance with maritime regulatory frameworks require comprehensive investigation. Moreover, questions of governance, liability, and standardization in consortium-based blockchain networks call for interdisciplinary engagement across technical, legal, and organizational domains. In conclusion, this paper provides an academic foundation and forward-looking design framework to guide future implementation efforts aimed at integrating blockchain into quality management systems within shipbuilding not only as isolated digital tools, but as integral elements of resilient, transparent, and trusted quality ecosystems in the era of Industry 4.0. Future work should continue to strengthen the quantitative and empirical basis for these design directions, integrating broader industry data, explicit comparative benchmarks, and demonstrations under real shipyard operating conditions.

Cited sources

- A Blockchain Platform for the Enterprise - Hyperledger-Fabricdocs. Available online: <https://hlf.readthedocs.io/en/latest/whatis.html> (accessed on 21 February 2025).
- Ahmad, R. W., Khader, W. A., Jayaraman, R., Salah, K., Antony, J., & Swarnakar, V. (2022). Integrating Lean Six Sigma with blockchain technology for quality management – a scoping review of current trends and future prospects. *The TQM Journal*, 35(7), 1609–1631. <https://doi.org/10.1108/tqm-06-2022-0181>
- Ali, S., Shin, W. S., & Song, H. (2022). Blockchain-Enabled Open Quality System for Smart Manufacturing: Applications and challenges. *Sustainability*, 14(18), 11677. <https://doi.org/10.3390/su141811677>
- Alkhader, W., Alkaabi, N., Salah, K., Jayaraman, R., Arshad, J., & Omar, M. (2020). Blockchain-Based traceability and management for additive manufacturing. *IEEE Access*, 8, 188363–188377. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3031536>
- AlKhader, W., Jayaraman, R., Salah, K., Sleptchenko, A., Antony, J., & Omar, M. (2023). Leveraging blockchain and NFTs for quality 4.0 implementation in digital manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 34(7), 1208–1234. <https://doi.org/10.1108/jmtm-05-2023-0172>
- Bankoff, K. P., Muñoz, R., Pasini, A., & Pesado, P. (2023). Quality Management Systems and Blockchain in the 4.0 Era: A Literature review. *Communications in Computer and Information Science*, 140–155. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34147-2_10
- Battisti, J., Batista, V., Koslovski, G., Pillon, M., Miers, C., & Marques, M. (2023). Performance analysis of the Raft consensus algorithm on Hyperledger Fabric and Ethereum on cloud. *IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*, Naples, Italy, 2023, pp. 155–160, doi: 10.1109/CloudCom59040.2023.00035.
- Bisht, B., Rawat, K., Vohat, A., Jangid, N., Singh, N., Nishinari, K., Vlaskin, M. S., Kurbatova, A., & Kumar, V. (2024). Industry 4.0 Digital Transformation: Shaping the future of food quality. *Food Control*, 170, 111030. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.111030>
- Brandín, R., & Abrishami, S. (2024). IoT-BIM and blockchain integration for enhanced data traceability in offsite manufacturing. *Automation in Construction*, 159, 105266. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105266>
- Cao, P., Duan, G., Tu, J., Jiang, Q., Yang, X., & Li, C. (2023). Blockchain-Based Process quality data sharing platform for aviation suppliers. *IEEE Access*, 11, 19007–19023. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3246984>
- Ceric, A. (2021). Reducing information asymmetry and building trust in projects using blockchain technology. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, Lakusic, S. (Ed.) 73(10), 967–978. <https://doi.org/10.14256/jce.3310.2021>
- Cui, Y., Hu, M., & Liu, J. (2023). Value and design of Traceability-Driven blockchains. *Manufacturing & Service Operations Management*, 25(3), 1099–1116. <https://doi.org/10.1287/msom.2022.1161>
- Hariyani, D., Hariyani, P., Mishra, S., & Sharma, M. K. (2025). A literature review on transformative impacts of blockchain technology on manufacturing management and industrial engineering practices. *Green Technologies and Sustainability*, 100169. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100169>
- Hyperledger Foundation. (2024, May). Meet the Hyperledger fabric maintainers – David Enyeart, IBM. LF Decentralized Trust. Retrieved March 3, 2025, from <https://www.lfdecentralizedtrust.org/blog/meet-the-hyperledger-fabric-maintainers-david-eneart-ibm>
- Iwańkiewicz, R., & Rutkowski, R. (2023). Digital Twin of Shipbuilding Process in Shipyard 4.0. *Sustainability*, 15(12), 9733. <https://doi.org/10.3390/su15129733>

- Karaduman, Ö., & Gülhas, G. (2025). Blockchain-Enabled Supply Chain Management: A Review of Security, Traceability, and Data Integrity Amid the Evolving Systemic Demand. *Applied Sciences*, 15(9), 5168. <https://doi.org/10.3390/app15095168>
- Kodumuru, R., Sarkar, S., Parepally, V., & Chandarana, J. (2025). Artificial intelligence and Internet of things integration in pharmaceutical manufacturing: a smart synergy. *Pharmaceutics*, 17(3), 290. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17030290>
- Korkusuz Polat, T., & Baran, E. (2024). A Blockchain-Based Quality 4.0 application for warehouse management system. *Applied Sciences*, 14(23), 10950. <https://doi.org/10.3390/app142310950>
- Kuhn, M., Nguyen, H., Otten, H., & Franke, J. (2018). "Blockchain Enabled Traceability – Securing Process Quality in Manufacturing Chains in the Age of Autonomous Driving," 2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD), Marrakech, Morocco, 2018, pp. 131-136, doi: 10.1109/ITMC.2018.8691242.
- Lahjouji, M., el Alami, J., & Hlyal, M. (2022). Blockchain Applications for Improving Track and Trace Process on Pharmaceutical Supply Chain. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing* (pp. 471–493). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90633-7_40
- Lau, W. F., Liu, D. Y. W., & Au, M. H. (2021). Blockchain-Based Supply Chain System for Traceability, Regulation and Anti-Counterfeiting. In: 2021 IEEE International Conference on Blockchain (pp. 82–89). IEEE. <https://doi.org/10.1109/blockchain53845.2021.00022>
- Leal, F., Chis, A. E., Caton, S., González-Vélez, H., García-Gómez, J. M., Durá, M., Sánchez-García, A., Sáez, C., Karageorgos, A., Gerogiannis, V. C., Xenakis, A., Lallas, E., Ntounas, T., Vasileiou, E., Mountzouris, G., Otti, B., Pucci, P., Papini, R., Cerrai, D., & Mier, M. (2021). Smart Pharmaceutical Manufacturing: Ensuring End-to-End Traceability and Data Integrity in Medicine Production. *Big Data Research*, 24, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2020.100172>
- Li, J., Maiti, A., Springer, M., & Gray, T. (2020). Blockchain for supply chain quality management: challenges and opportunities in context of open manufacturing and industrial internet of things. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(12), 1321–1355. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2020.1815853>
- Liu, Z., Yu, X., Liu, N., Liu, C., Jiang, A., & Chen, L. (2025). Integrating AI with detection methods, IoT, and blockchain to achieve food authenticity and traceability from farm-to-table. *Trends in Food Science & Technology*, 104925. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104925>
- Matenga, A. E., & Mpofu, K. (2022). Blockchain-Based Cloud Manufacturing SCM System for Collaborative Enterprise Manufacturing: A case study of Transport manufacturing. *Applied Sciences*, 12(17), 8664. <https://doi.org/10.3390/app12178664>
- Ng, S., Ho, G., & Wu, C. (2023). Blockchain-IIoT-big data aided process control and quality analytics. *International Journal of Production Economics*, 261, 108871. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108871>
- Ongaro, D. (2014). Consensus: Bridging Theory and Practice. Doctoral dissertation. Available online: <https://web.stanford.edu/~ouster/cgi-bin/papers/OngaroPhD.pdf> (retrieved on 3rd March 2025).
- Regueiro, C., & Urquizu, B. (2024). Blockchain-Based Evidence Trustworthiness System in certification. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.3390/jcp5010001>
- Sahoo, S. (2024). Blockchain-enabled traceability systems for supply chain quality management: empirical insights from pharmaceutical manufacturers. *International Journal of Quality & Reliability Management*. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-03-2024-0091>
- Shahbazi, Z., & Byun, Y. (2021). Integration of blockchain, IoT and machine learning for multistage quality control and enhancing security in smart manufacturing. *Sensors*, 21(4), 1467. <https://doi.org/10.3390/s21041467>
- Singh, J., Ahuja, I. P. S., Singh, H., & Singh, A. (2022). Development and Implementation of Autonomous Quality Management System (AQMS) in an Automotive Manufacturing using Quality 4.0 Concept– A Case Study. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108121. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108121>
- Søgaard, J. S., Eklund, P. W., Herskind, L., & Spasovski, J. (2023). Improving Trust in a (Trans)National Invoicing System: The Performance of Crash vs. Byzantine Fault Tolerance at Scale. *Applied Sciences*, 13(12), 6941. <https://doi.org/10.3390/app13126941>
- Tambare, P., Meshram, C., Lee, C., Ramteke, R. J., & Imoize, A. L. (2021). Performance Measurement System and Quality Management in Data-Driven Industry 4.0: A review. *Sensors*, 22(1), 224. <https://doi.org/10.3390/s22010224>
- Thummavet, P. (2019, May 2). Demystifying hyperledger fabric (1/3): Fabric architecture. When coding is life... - Serial Coder. <https://www.serial-coder.com/post/demystifying-hyperledger-fabric-fabric-architecture/>

- Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2025). Enhanced Food Quality by Digital Traceability in Food Processing Industry. *Food Engineering Reviews*, 17(2), 359–383. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09392-4>
- Wang, J., Wu, P., Wang, X., & Shou, W. (2017). The outlook of blockchain technology for construction engineering management. *Frontiers of Engineering Management*, 4(1), 67. <https://doi.org/10.15302/j-fem-2017006>
- Wang, W., Hu, H., Luo, X., & Ding, S. (2024). Blockchain-enabled platform for the quality management of the ready-mixed concrete supply chain. *Advances in Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40436-024-00524-x>
- Westphal, E., Leiding, B., & Seitz, H. (2023). Blockchain-based quality management for a digital additive manufacturing part record. *Journal of Industrial Information Integration*, 35, 100517. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100517>
- Yu, H., Zhu, S., & Yang, J. (2021). The quality control system of Green Composite wind turbine blade supply chain based on blockchain technology. *Sustainability*, 13(15), 8331. <https://doi.org/10.3390/su13158331>
- Yu, Q., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2024). Blockchain-based fresh food quality traceability and dynamic monitoring: Research progress and application perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 109191. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109191>
- Zhang, Y., Zhang, L., Liu, Y., & Luo, X. (2021). Proof of service power: A blockchain consensus for cloud manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.01.006>
- Zhong, B., Wu, H., Ding, L., Luo, H., Luo, Y., & Pan, X. (2020). Hyperledger fabric-based consortium blockchain for construction quality information management. *Frontiers of Engineering Management*, 7(4), 512–527. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0128-y>

Pregled sustava upravljanja informacijama o kvaliteti temeljenih na blockchainu u brodogradnji

Sažetak

Upravljanje kvalitetom u proizvodnji suočava se s trajnim izazovima vezanima uz transparentnost, sljedivost i integritet podataka u složenim proizvodnim okruženjima s više dionika. Ovaj rad predstavlja sustavni pregled literature kojim se istražuje potencijal blockchain tehnologije kao temelja za decentralizirane informacijske sustave koji unaprijeđuju povjerenje u području kontrole i upravljanja kvalitetom u brodograđevnoj industriji. Analizom 55 recenziranih publikacija iz baza podataka Web of Science i Scopus, studija identificira ključne tematske skupine u suvremenim istraživanjima, uključujući sljedivost u opskrbnom lancu, automatizaciju putem pametnih ugovora te integraciju blockchaina unutar okvira upravljanja kvalitetom u sklopu Industrije 4.0. Na temelju dobivenih spoznaja, rad predlaže konceptualni okvir za arhitekturu sustava upravljanja kvalitetom temeljenog na blockchainu, prilagođenog operativnim i regulatornim zahtjevima proizvodne industrije, s posebnim naglaskom na brodogradnju. Predloženi dizajn sustava naglašava ovlašteni pristup, nepromjenjive zapise o kvaliteti te programiranu usklađenost putem pametnih ugovora. Iako pregled potvrđuje konceptualnu izvedivost takvih sustava, ističe i potrebu za daljnjim istraživanjima, osobito u područjima upravljanja sustavom, interoperabilnosti i implementacije. Ovaj rad pruža teorijsku osnovu za budući razvoj platforme u fazi dokazivanja koncepta, s ciljem validacije kontrole kvalitete i usklađenosti tijekom životnog ciklusa proizvoda u brodogradnji.

Ključne riječi: blockchain, pametni ugovori, kontrola kvalitete, upravljanje kvalitetom, brodogradnja

Sigurnije financije: Kako AI, IoT i Blockchain revolucioniraju digitalnu sigurnost

Zoran Čekerevac^a, Petar Čekerevac^b

^a Prof. dr. sc., dipl. ing. stroj., samostalni istraživač, Beograd, Srbija, zoran@cekerevac.eu

^b Mag. rel. int., samostalni istraživač, Beograd, Srbija, petar.cekerevac@gmail.com

Sažetak

Integracija umjetne inteligencije (AI), interneta stvari (IoT) i blockchain tehnologije predstavlja značajan korak u unapređenju digitalne sigurnosti u financijskom sektoru. AI omogućava analizu velikih količina podataka u stvarnom vremenu, detekciju prijetnji, automatizaciju sigurnosnih reakcija te predviđanje mogućih rizika na temelju povijesnih podataka, čime se unapređuje proaktivna sigurnost. IoT donosi podatke iz stvarnog svijeta u digitalne procese, omogućujući praćenje mrežnih aktivnosti, bržu reakciju na anomalije i personalizaciju usluga kroz interakciju s pametnim uređajima. Blockchain osigurava nepovredivost podataka putem decentraliziranih registara, pružajući transparentnost, sigurnost transakcija i otpornost na hakerske napade. Pametni ugovori dodatno automatiziraju procese, smanjujući rizik od prijevara i ljudskih pogrešaka. Unatoč trenutnim izazovima, kao što su sigurnosne ranjivosti, kompleksnost implementacije i relativno mali broj objavljenih radova o sinergiji ovih tehnologija, njihova integracija otvara mogućnost stvaranja naprednih sigurnosnih sustava. Ova kombinacija ne samo da jača otpornost na prijetnje, već i unapređuje povjerenje korisnika i klijenata. Rad može korisno poslužiti kao polazna točka za buduća istraživanja koja će dodatno rasvijetliti mogućnosti i izazove integracije AI-a, IoT-a i blockchaina u financijskom sektoru. Predviđa se da će zanimanje za ovu temu rasti u narednim godinama, kako se ove tehnologije budu razvijale i primjenjivale na širem globalnom nivou.

Ključne riječi: umjetna inteligencija (AI), internet stvari (IoT), blockchain, digitalna sigurnost, financijski sektor

1. Uvod

1.1. Opći uvod u temu

Digitalna transformacija omogućila je bržu i efikasniju razmjenu informacija, ali je također otvorila vrata novim prijetnjama i rizicima. U globalno

povezanom digitaliziranom svijetu, digitalna sigurnost postala je ključni aspekt za zaštitu podataka, resursa i privatnosti. Stoga je postala imperativ za sve tipove organizacija, od malih i srednjih poslovnih organizacija/poduzeća (MSP) do velikih korporacija, banaka i državnih financijskih institucija.

Razina zaštite uvelike ovisi o veličini, važnosti i razini znanja onoga tko se treba zaštititi. Velike

tvrtke mogu si priuštiti složene sigurnosne infrastrukture i timove stručnjaka, dok MSP raspolazu manjim resursima i ne mogu investirati u napredne sigurnosne sustave (Čekerevac i Bogavac, 2022). Ta disproporcija čini MSP ranjivijima na kibernetičke napade, što može imati značajne ekonomske i reputacijske posljedice. MSP se često oslanjaju na osnovne mjere zaštite koje su nedovoljne protiv sofisticiranih napada (Bogavac, 2019). Banke i državne financijske institucije su među najprivlačnijim metama za kibernetičke kriminalce zbog količine i vrijednosti podataka i financijskih sredstava kojima raspolazu. Ti entiteti moraju održavati visoke standarde sigurnosti kako bi se izborili sa sve sofisticiranijim prijetnjama, uključujući phishing napade, ransomware i napade na mrežnu infrastrukturu. Uspješna implementacija digitalne sigurnosti u bankarskom sektoru od ključne je važnosti za očuvanje povjerenja klijenata i stabilnost financijskog sustava.

Razina digitalizacije varira širom svijeta, što također utječe na sposobnost različitih regija efikasno se boriti protiv kibernetičkih prijetnji. Dok razvijene države imaju napredne digitalne infrastrukture i sofisticirane sigurnosne protokole, mnoge države u razvoju suočavaju se s osnovnim problemima digitalizacije, uključujući pristup Internetu i osnovnu kibernetičku sigurnost. (Bogavac, 2019) Ta razlika u neravnomjernosti razina zaštite, omogućava prelijevanje rizika iz regije u regiju, te povećava ranjivosti na globalnoj razini.

1.2. Cilj

Cilj ovog rada je predstaviti mogućnosti AI, IoT i blockchain tehnologija te njihove sinergijske efekte koji mogu poboljšati digitalnu sigurnost kroz efikasnije otkrivanje prijetnji, sigurno skladištenje podataka i bolju zaštitu mrežnih aktivnosti. Ove tehnologije predstavljaju budućnost digitalne sigurnosti i mogu transformirati borbu protiv cyber prijetnji.

Članak analizira koristi kao što su poboljšana proaktivna sigurnost i smanjeni rizici, te izazove povezane s implementacijom ovih tehnologija. Pregledom postojećih istraživanja i novih saznanja, članak doprinosi razumijevanju kako integracija tih tehnologija može unaprijediti digitalnu sigurnost u financijskom sektoru.

1.3. Istraživačko pitanje i hipoteze

Pristupajući istraživanju, autori su definirali istraživačko pitanje i odgovarajuće hipoteze, čime su postavljeni temelji za strukturiran i akademski pristup istraživanju te osigurana osnova za analizu.

Istraživačko pitanje: Trebaju li umjetna inteligencija, internet stvari i blockchain tehnologija biti integrirani u financijski sektor, koje koristi takva integracija može donijeti, te koje su potencijalne prijetnje povezane s ovim procesom?

Nulta hipoteza (H0): Integracija umjetne inteligencije, interneta stvari i blockchain tehnologije u financijskom sektoru ne donosi prednosti u osiguravanju otpornosti na sigurnosne prijetnje.

Alternativna hipoteza (Ha): Integracija umjetne inteligencije, interneta stvari i blockchain tehnologije u financijskom sektoru unapređuje otpornost na sigurnosne prijetnje.

1.4. Metodologija

Pri izradi ovog preglednog rada korištene su istraživačke metode koje obuhvaćaju pretragu, selekciju, analizu i sintezu relevantne literature. Literatura je pretražena u akademskim izvorima kao što su Google Scholar, IEEE Xplore, SpringerLink, MDPI i KOBSON te na relevantnim web-stranicama koje se bave zaštitom informacijskih sustava. Pretraga je uključivala i vlastite ranije objavljene radove autora, koji se bave temama iz područja IoT-a, blockchain tehnologije i digitalne sigurnosti.

U pretragu su bili uključeni i AI alati Copilot, DeepSeek i ChatGPT. Zadane su lokacije na kojima treba istražiti dostupnu literaturu i korištene su ključne riječi poput: umjetna inteligencija (AI), IoT sigurnost, blockchain, digitalna sigurnost, financijski sektor, kvantna kriptografija i kritička evaluacija. Dominantna literatura analizirana u radu bila je na engleskom jeziku, no korištena je i literatura na drugim jezicima radi obuhvatnijeg pregleda.

Pri pregledu literature izvršena je selekcija, a odabrani radovi uključeni su na temelju:

- Relevantnosti za temu (istraživanje digitalne sigurnosti u kontekstu AI-a, IoT-a i blockchaina).

- Kvalitete izvora (recenzirani radovi s pouzdanim podatkovnim osnovama).
- Datuma objave (radovi objavljeni u posljednjih pet godina, uz nekoliko relevantnih izuzetaka).

Ukupno je pretraženo 106 radova, od kojih je nakon primjene kriterija uključivanja i isključivanja za daljnju analizu odabrano 79 radova, a citirano 70 radova.

Proces evaluacije literature proveden je kroz kritičku analizu izvora, uzimajući u obzir pouzdanost podataka, metodološku valjanost i značaj nalaza za istraživačku temu.

Prikupljene informacije organizirane su tematskom analizom, pri čemu su identificirane ključne teme i obrasci koji objedinjuju dosadašnja saznanja. Tematska analiza omogućila je stvaranje konceptualnog okvira koji se fokusira na:

- Tehnološke inovacije u digitalnoj sigurnosti.
- AI, IoT i blockchain tehnologiju i digitalnu sigurnost.
- Sinergiju AI-a, IoT-a i blockchaina i
- Primjere integracije AI, IoT i blockchaina

Na temelju analize, kreirani su zaključci.

2. Tehnološke inovacije u digitalnoj sigurnosti

Tehnološke inovacije igraju ključnu ulogu u zaštiti podataka i sustava u današnjem digitalnom svijetu. Iako su inovacije nužne, nisu svima jednako dostupne, a veće organizacije često brže usvajaju nove tehnologije kako bi povećale sigurnost i nadmašile potencijalne napadače. Među najvažnijim inovacijama su:

- Umjetna inteligencija (AI) i strojno učenje (ML) za analizu podataka i otkrivanje prijetnji. Napredak u AI i ML omogućava automatizaciju složenih procesa, pružajući brzu i prilagodljivu reakciju na prijetnje. Međutim, izazovi uključuju privatnost podataka i odgovornost algoritama. Tradicionalni alati nisu dovoljni za zaštitu od novih cyber prijetnji, pa je prijelaz na

inteligentnije sustave nužan. Holistički pristup, koji uključuje suradnju stručnjaka, osigurava etičku i odgovornu primjenu ovih tehnologija (Mohamed, 2023).

- Blockchain, decentralizirana tehnologija koja omogućuje sigurno i nepromjenjivo bilježenje transakcija u distribuiranom lancu blokova. Svaki blok sadrži transakcije koje su kriptografski povezane. Sigurnost se postiže konsenzusnim mehanizmima, čime se eliminira potreba za centralnim autoritetom i smanjuje rizik od prijevare i manipulacije (Cekerevac i Cekerevac, 2022). Sadašnja razina razvoja ove tehnologije omogućuje njenu uspješnu primjenu i u velikim, ali i u MSP (Cekerevac i Cekerevac, 2023).
- Napredni kriptografski algoritmi za zaštitu podataka, uključujući kvantnu kriptografiju, homomorfno šifriranje, kao i njihovu kombinaciju, kvantno homomorfno šifriranje (QHE). Kvantna kriptografija koristi principe kvantne mehanike za osiguranje sigurne komunikacije. Najpoznatija primjena kvantne kriptografije je kvantna distribucija ključeva (QKD), koja omogućava bezuvjetno sigurnu razmjenu tajnih ključeva između dvije strane koristeći kvantne fenomene (Jaćimovski i sur. 2019). Homomorfno šifriranje omogućava izvođenje operacija na šifriranim podacima bez njihovog dešifriranja, čime se osiguravaju privatnost i sigurnost podataka tokom obrade (IBM, What is homomorphic encryption?, 2024). QHE omogućava izvođenje kvantnih operacija na šifriranim kvantnim podacima (kubiti) bez njihovog dešifriranja (Yarter i sur., 2022). Ove tehnologije predstavljaju značajan napredak u sigurnosti podataka, omogućujući zaštitu informacija čak i tijekom obrade. Homomorfno šifriranje je već u praksi, dok kvantno homomorfno šifriranje ima potencijal za revolucioniranje načina na koji će se obavljati računske operacije u budućnosti.
- Tehnologije kibernetičke obmane koje obuhvaćaju mjere koje omogućuju upućivanje napadača na lažne resurse i skreću napade na prave ciljeve. To omogućuje rano otkrivanje prijetnji, proaktivno djelovanje i poboljšanje odgovora na napade (EclipseForensics, 2024).

- Biometrijska autentifikacija koristi fizičke karakteristike za verifikaciju identiteta i danas je udomaćena na mobilnim uređajima i na stacionarnim uređajima kod kojih se zahtjeva visoka razina zaštite. Sofisticiranija je bihevioralna biometrija koja analizira jedinstveno ponašanje korisnika, kao što su obrasci tipkanja, pokreti mišem i čak geste na dodirnom ekranu (Finnegan i sur. 2024). Ove karakteristike dodaju dodatni sloj sigurnosti, poboljšavajući sustave višefaktorske autentifikacije.
- Zero Trust, arhitektura koja zahtijeva verifikaciju svakog korisnika i uređaja pri svakom pristupu sustavu (Levin, 2024). Napredak u alatima koji pojednostavljaju implementaciju Zero Trusta učinili su ovu tehnologiju jednostavnijom za primjenu.
- Sigurnost IoT uređaja primjenom laganih protokola šifriranja i autentifikacije. Ovi protokoli su posebno dizajnirani za uređaje s ograničenom procesorskom snagom i koriste implicitne certifikate za pružanje međusobne autentifikacije i dogovora o ključu između IoT uređaja (Siddharta i sur. 2020).
- Sigurni pristup na rubu mreže (SASE) je integrirana mrežna i sigurnosna arhitektura koja spaja funkcije mrežnog povezivanja i sigurnosti kroz distribuiranu cloud infrastrukturu. SASE omogućuje siguran pristup resursima i aplikacijama bez obzira na lokaciju korisnika. Dizajniran je da pruži efikasan, skalabilan i siguran pristup resursima, omogućujući organizacijama lakše suočavanje sa sve složenijim sigurnosnim prijetnjama (Cisco, 2024).
- Upravljanje identitetima i pristupom (IAM) podrazumijeva skup politika, procesa i tehnologija koji se koriste za upravljanje digitalnim identitetima korisnika i kontrolu pristupa resursima unutar organizacije. Cilj IAM-a je osigurati da su pravi korisnici u pravom trenutku ovlašteni za pristup pravim resursima, uz kontinuirano praćenje i prilagođavanje prava pristupa. IAM obuhvaća i novije pristupe poput Self-Sovereign Identity (SSI), koje omogućuju korisnicima veću kontrolu nad vlastitim digitalnim identitetima (Glöckler i sur. 2024). Posebna pažnja posvećuje

se sigurnosti u oblaku, koja omogućuje centralizirano definiranje i provođenje sigurnosnih politika, uz decentralizirano upravljanje pristupom podacima (Alsirhani i sur. 2022).

- Zaštita na razini podatka (DLP) prati, detektira i kontrolira osjetljive podatke kako bi se spriječio neovlašteni pristup, gubitak ili krađa. Implementira pravila i politike za zaštitu podataka u tranzitu, pohrani i upotrebi, osiguravajući usklađenost s regulativama i sigurnost informacija (Vaideeswaran, 2025).

Inovacije naglašavaju pomak ka proaktivnijim sigurnosnim mjerama, predviđajući ponašanje napadača. Težnja je automatizirati procese zaštite. Homomorfno šifriranje i kvantno-otporna kriptografija rješavaju dugoročne sigurnosne izazove. Pri ovome se podrazumijevaju primjena AI-a u zaštiti, suradnja u osiguranju samih AI sustava i dijeljenje informacija o prijetnjama. Okviri za osiguranje AI-a i dijeljenje informacija o prijetnjama ističu važnost suradnje i predviđanja u obrani protiv sve složenijih prijetnji. Svaka od ovih inovacija donosi izazove u pogledu pouzdanosti i otpornosti na napade, a potrebni su resursi i vrijeme za kompletne provjere.

3. AI, IoT i blockchain tehnologija i digitalna sigurnost

3.1. Umjetna inteligencija (AI)

Umjetna inteligencija (AI) je ključna tehnologija koja omogućava računalima obavljanje zadataka koji inače zahtijevaju ljudsku inteligenciju. Igra važnu ulogu u poboljšanju digitalne sigurnosti, posebno u bankama i državnim institucijama, ali i za zlonamjerne napadače. Korištenjem algoritama strojnog učenja, AI sustavi mogu analizirati velike količine podataka u stvarnom vremenu i otkriti prijetnje i anomalije. Glavni pozitivni utjecaji AI na sigurnost uključuju:

- Detekciju prijetnji (Skoromets, 2024): Mnoge banke koriste AI za detekciju i prevenciju prijevara u stvarnom vremenu. AI algoritmi analiziraju transakcije i ponašanje korisnika kako bi identificirali neuobičajene aktivnosti

(poput neovlaštenih transakcija ili pokušaja krađe identiteta) i spriječili potencijalnu štetu. Analizom podataka i identifikacijom sumnjivih aktivnosti, AI pomaže u otkrivanju i blokiranju zlonamjernog softvera. Također, AI podržava digitalne asistente u online bankarstvu koji klijentima nude sigurnije i personalizirane usluge.

- Upravljanje identitetima: AI omogućava precizno upravljanje identitetima i kontrolom pristupa osjetljivim informacijama.
- Automatizaciju sigurnosnih provjera: Automatizacija sigurnosti podrazumijeva odgovor na cyber prijetnje uz minimalnu ili nikakvu ljudsku intervenciju. Alati za automatizaciju detektiraju prijetnje, klasificiraju incidente i odlučuju o mjerama za ublažavanje prijetnji, osiguravajući skalabilno i učinkovito upravljanje sigurnošću. Umjetna inteligencija omogućuje značajno poboljšanje sigurnosnih sustava automatizacijom zadataka. Ova tehnologija osigurava agilniji pristup zaštiti podataka i sustava, pa je zato pogodna za "zero trust" sigurnosni koncept osmišljen za suočavanje s rastućim brojem i složenošću cyber prijetnji. AI se fokusira na preciznu kontrolu pristupa temeljenu na RBAC (kontrola pristupa prema ulozi), eliminirajući implicitno povjerenje unutar mreže. Zbog zahtjevnosti ovakve granularne sigurnosti, automatizacija sigurnosnih procesa je ključan element zaštite. Pored toga, automatizacija smanjuje opterećenje sigurnosnih timova automatizirajući rutinske zadatke, čime omogućuje brže reagiranje

na prijetnje i povećanje učinkovitosti. Također, automatizacija smanjuje rizik od ljudskih grešaka i osigurava usklađenost s regulativama. Jedan od značajnih razloga za uvođenje automatizacije u zaštitu je usuglašavanje sa propisima o cyber sigurnosti i industrijskim standardima. Upravljanje sigurnosnim zahtjevima i pojedinačnim certifikatima je složen proces, posebno imajući u vidu promjene u industriji i zakonskim zahtjevima. Automatizacija olakšava održavanje razine usklađenosti i certifikacije (Tubin, 2024).

No, AI također donosi rizike:

- Zlonamjerni napadači mogu koristiti AI za sofisticirane napade, poput phishing kampanja i deepfake tehnologije.
- Privatnost i sigurnost podataka: Analiza podataka putem AI može ugroziti privatnost ako se ne koriste odgovarajuće mjere zaštite.
- Etička pitanja: Transparentnost i odgovornost u donošenju odluka zasnovanih na AI također su važna.

Umjetna inteligencija može značajno poboljšati digitalnu sigurnost, ali također predstavlja nove rizike koji zahtijevaju pažljivo upravljanje i stalno poboljšanje obrambenih strategija. Stoga je važno razmotriti sve potencijalne scenarije primjene AI. Tablicom 1. sažeto je prikazana zastupljenost umjetne inteligencije u digitalnoj sigurnosti.

Tablica 1. Zastupljenost AI u digitalnoj sigurnosti

Tip AI u digitalnoj sigurnosti	Cilj	Primjeri
Obrambena AI	Korištenje AI tehnika za zaštitu računalnih sustava i mreža od napada	Anti-malware; Sustavi za detekciju upada (IDS)
Ofenzivna AI	Primjena AI tehnika za napad na računalne sustave i mreže	Razvoj novih cyber napada; Automatizacija iskorištavanja postojećih ranjivosti
Adversarialna AI	Zlonamjerno iskorištavanje i/ili napadanje AI/ML sustava i podataka	Trovanje podataka za obuku; Manipulacija ulaznim podacima

Izvor: Malatji i Tolah (2024).

Analize ofenzivnih AI cyber napada otkrivaju njihovu složenu i dinamičnu prirodu. Zbog toga su potrebni adaptivni obrambeni mehanizmi podržani umjetnom inteligencijom. Svaki napad vođen AI-om je višedimenzionalan i uključuje razne implikacije, strategije, motivacije i društvene utjecaje. To otežava zaštitu i naglašava potrebu za sofisticiranijim metodama obrane. (Sajid, 2024; Darktrace, 2021).

U vezi sa AI mora se naglasiti potreba ne samo za korisnim AI sustavima, već i otpornim na cyber napade. U tom pogledu pomažu tehnike kao što su "adversarial training". One pomažu AI sustavima braniti se od manipulacija, kao što su napadi koji pokušavaju prevariti algoritme strojnog učenja (Zhao i sur. 2022; Soundenkar i sur. 2024). Ovo je posebno važno, jer financijski sustavi moraju biti neprekidno sigurni, čak i protiv sofisticiranih prijetnji.

Kako AI postaje ključna tehnologija, zakonodavci i regulatori igraju važnu ulogu u osiguravanju sigurnog i etičkog korištenja. U financijskom sektoru, regulacije poput GDPR (Opća uredba EU o zaštiti podataka) (2024) u EU štite podatke korisnika, dok propisi potiču transparentnost u primjeni AI modela.

Uvođenje umjetne inteligencije realno zahtijeva suradnju između banaka, tehnoloških tvrtki i regulatora. Banke mogu surađivati s tehnološkim inovatorima na razvoju AI rješenja za sprječavanje prijevara, dok regulatori osiguravaju da su ta rješenja u skladu s pravnim okvirom. Takva sinergija je ključna za brži napredak i širu AI primjenu.

3.2. Internet stvari (IoT) i njegov utjecaj na financijsko poslovanje

Internet stvari (IoT) postaje sve značajniji u ekonomiji jer omogućava prikupljanje i razmjenu podataka u stvarnom vremenu, što je ključno za financijske transakcije. Pomaže u analizi imovine klijenata i digitalizaciji operacija financijskih kompanija, poboljšavajući usluge i korisničko iskustvo. IoT podržava prijenos podataka preko različitih uređaja povezanih putem Bluetootha, WiFi-a ili USB-a te omogućava praćenje mrežnih aktivnosti i detekciju prijetnji, čime poboljšava digitalnu sigurnost. Sigurnost IoT uređaja je od ključne važnosti zbog njihove povezanosti s mrežom i nedovoljno sigurnih protokola, što ih čini lakšom metom

napada (Kumar i sur. 2023; Alliou i Mourdi, 2023; Yilmaz i Hazar, 2019).

Globalno tržište IoT-a u sektoru bankarsko-financijskih i usluga osiguranja (BFSI) dostiglo je 2.030 milijuna dolara do 2023. godine, što je porast sa 249,4 milijuna dolara u 2018. godini, uz godišnji rast od 52,1% (techblog, 2022).

3.2.1. Kako IoT utiče na financijsko poslovanje?

Internet stvari (IoT) ima brojne primjene u financijskom poslovanju koje mogu poboljšati učinkovitost, sigurnost i kvalitetu usluga. IoT omogućava prikupljanje podataka u realnom vremenu, olakšavajući analizu i donošenje odluka. Primjerice, klijenti mogu biti odmah obaviješteni o neuobičajenim troškovima, a pametni uređaji mogu pratiti redove u poslovnica i omogućiti zakazivanje posjeta. IoT također poboljšava sigurnost otkrivanjem neuobičajenog ponašanja u realnom vremenu, kontroliranjem pristupa računima i korištenjem biometrijske autentifikacije. Među najznačajnijim doprinosima IoT uređaja nalazi se podrška za automatizaciju procesa, poput otvaranja računa i obrade zahtjeva, što može smanjiti troškove i povećati učinkovitost.

IoT omogućava financijskim institucijama bolje razumijevanje potreba klijenata i pružanje personaliziranih usluga. Uređaji prikupljaju podatke koji unapređuju financijske usluge tijekom cijelog ciklusa, dok analitika podataka pomaže u upravljanju novcem klijenata. Također omogućava praćenje imovine u realnom vremenu, optimizirajući upravljanje i smanjujući troškove. IoT podržava bolje praćenje i analizu tržišnih podataka te upravljanje zalihama. Omogućava bežične uplate putem uređaja poput pametnih satova i telefona, pružajući korisnicima pristup sredstvima bilo gdje i bilo kada (Nilay, 2024).

3.2.2. Primjeri primjene IoT u financijskom poslovanju

Financijska tehnologija (fintech), koristi nove tehnologije za unapređenje i automatizaciju financijskih usluga, omogućavajući brže, učinkovitije i sigurnije transakcije. Bankarstvo već desetljećima koristi koncept interneta stvari (IoT). Neki primjeri primjene IoT-a u financijskom poslovanju

uključuju pametne bankomate, bežična plaćanja putem pametnih telefona i satova te mobilne POS (*Point-of-Sale*) sustave.

Manje uočljive, ali značajne primjene IoT-a uključuju pametne uređaje za praćenje financijskog stanja korisnika, pametne bankarske strojeve za dodatne sigurnosne mjere, pametne alarme za sigurnost, te senzore za praćenje inventara, npr. u trezorima, skladištima i prodavaonicama (Čekerevac i sur. 2010). IoT tehnologija je revolucionirala financijsko poslovanje omogućavajući brže, sigurnije i personalizirane usluge klijentima (Nilay, 2024; techblog, 2022).

Fintech također koristi nove tehnologije za unapređenje financijskih usluga kao što su mobilno bankarstvo, P2P pozajmljivanje, kriptovalute, robo-savjetnici, digitalni novčanici. Fintech transformira način poslovanja s financijama, čineći ih pristupačnijima, transparentnijima i učinkovitijima (Bwalya i Paul, 2024; Suresh i Manoj. Nove tehnologije se koriste i u osiguranju (InsurTech) za poboljšanje procesa osiguranja. Najznačajniji primjeri uporabe IoT za ove namjene su preciznija procjena rizika, automatizacija obrade šteta, preventivne mjere i poboljšanje korisničkog iskustva. U tu svrhu, IoT uređaji, poput smart home uređaja, pametnih satova, GPS uređaja i senzora u vozilima, i uopće smart uređaja, omogućuju prikupljanje podataka u stvarnom vremenu. Osiguravatelji mogu koristiti ove podatke za precizniju procjenu rizika i prilagodbu premija na temelju stvarnog ponašanja korisnika. IoT senzori mogu automatski prijaviti nesreće ili štete, pružajući osigurateljima detaljne informacije o incidentu. To ubrzava proces obrade zahtjeva i smanjuje mogućnost prijevара. (Dallinger, 2024; Behm i sur., 2019). Pametni uređaji, poput detektora dima ili senzora za curenje vode, mogu ukazati na potencijalne probleme prije nastanka većih šteta.

3.2.3. Može li IoT biti žrtva napada?

Elektronski podaci su česta meta napada, osobito kada su povezani s Internetom (Čekerevac i sur. 2018). IoT uređaji, uključujući one u financijskom sektoru, izloženi su napadima koji se mogu prenijeti i na pripadajuće blockchain sustave. Primjerice, napadači mogu iskoristiti slabosti u lozinkama ili ugrađenom programskom softveru kako bi neovlašteno pristupili uređajima, dok tzv.

Man-in-the-Middle (MITM) napadi omogućuju prešretanje komunikacije i manipulaciju podacima (Čekerevac i sur. 2017). Također, usluge se mogu ometati preplavlivanjem zahtjevima u *Denial of Service* napadima, a uređaji mogu postati ranjivi ako njihov ugrađeni programski softver nije adekvatno održavan.

Osim toga, fizički pristup uređajima napadačima omogućuje ugrađivanje zlonamjernog koda, dok su šifrirani podaci u opasnosti ako napadači steknu pristup ključevima za šifriranje. Slabosti u lozinkama, poput korištenja zadanih postavki, također mogu dovesti do neovlaštenog pristupa, a sofisticirani napadi, poput Side-Channel tehnika, iskorištavaju potrošnju energije ili zvuk za dobivanje povjerljivih informacija. "*Brute force*" metode dodatno ugrožavaju sigurnost pokušajima probijanja lozinki, dok ranjivosti u softverskim ažuriranjima omogućuju neovlaštenu kontrolu nad uređajima (Coston i sur. 2025; Madiarbekova, 2025; Devi i Majumder, 2020).

Glavni razlozi za ranjivost IoT uređaja leže u tome što mnogi IoT uređaji zbog ograničenih resursa mogu poduzimati samo minimalne sigurnosne mjere zaštite, što proizvođači rijetko pružaju redovita sigurnosna ažuriranja, a i kada ih pružaju, korisnici ih često ne koriste. Slabe lozinke ili nedostatak autentifikacije omogućuju neovlašten pristup, pa napadači mogu preuzeti kontrolu i koristiti uređaje za distribuirano uskraćivanje usluge (DDoS).

Stvarni i potencijalni napadi na IoT ističu potrebu za stalnim usavršavanjem obrambenih strategija kako bi se zaštitili financijski IoT uređaji i mreže, te očuvala njihova sigurnost.

3.3. Blockchain tehnologija

Koncept korištenja nematerijalne imovine, poput licenci, žigova, patenata i kriptovaluta, dobro je poznat u financijskom sektoru. Blockchain tehnologija, najčešće povezivana s Bitcoinom, omogućava decentraliziranu i transparentnu zaštitu podataka, čuvajući njihovu autentičnost i nepovredivost. Idealan je alat za sigurno skladištenje i provjeru transakcija, smanjujući rizik od manipulacija i prijevара (Čekerevac i sur. 2018).

Blockchain omogućava financijske transakcije bez vremenskih ograničenja i neovisno o bankama ili državama. Blockchain se neće detaljno opisivati,

ali treba pomenuti da se temelji na tri tehnologije: kriptografiji s privatnim ključem, P2P mreži i protokolu koji upravlja poticajima. Svaki od korisnika u distribuiranoj mreži ima kopiju glavne knjige što sprječava mogući gubitak podataka i jedinstvenu točku kvara (SPOF). Sve kopije transakcija se ažuriraju i provjeravaju u isto vrijeme. Glavna knjiga lanca blokova sadrži kronološki zapis svake transakcije u obliku lančano povezanih kriptografski provjerljivih dijelova (Čekerevac i sur. 2018). Stalna tehnološka poboljšanja ubrzavaju procese i stabiliziraju vrijednost kriptovaluta. Osim što smanjuje transakcijske troškove eliminiranjem posrednika, blockchain je otporan na mnoge vrste napada, uključujući i MITM napade.

Međutim, IoT uređaji povezani s blockchainom predstavljaju potencijalnu slabost ukoliko nisu pravilno zaštićeni, što može ugroziti integritet podataka i sigurnost sustava. Kompromitirani IoT uređaji mogu slati netočne podatke na blockchain, manipulirati pametnim ugovorima ili izazvati preopterećenje mreže kroz distribuirane DDoS napade. Također, krađa identiteta i ransomware napadi mogu dovesti do ozbiljnih sigurnosnih problema. Zbog toga je nužno provesti sigurnosne mjere kao što su osiguranje komunikacije prije nego podaci stignu na blockchain, snažno šifriranje i autentifikacija uređaja, implementacija sigurnih protokola za pokretanje uređaja te redovita ažuriranja softvera. Pravilna identifikacija IoT uređaja i kontinuirano praćenje njihovih sigurnosnih postavki pomaže u smanjenju rizika i očuvanju sigurnosti blockchain mreže.

Primjena ovih mjera, uključujući inicijalne i periodične provjere, kriptografske verifikacije transakcija i pametne ugovore, osigurava pouzdanost IoT uređaja i blockchain sustava te smanjuje prijetnje kojima su izloženi.

Primjena blockchain tehnologije povezana je i s problemima kao što su interoperabilnost, skalabilnost i upotrebljivost, koji mogu uzrokovati uska grla te se pojavila ideja da se formira mreža međusobno povezanih blockchain mreža, odnosno *"blockchain of blockchains"*. Ovaj koncept omogućava različitim blockchainovima međusobno komunicirati i dijeliti podatke, čime se povećavaju interoperabilnost i učinkovitost. Ideja postoji, na njoj se radi, ali nije dostigla razinu industrijskog standarda. Neki od aktualnih projekata su Polkadot i Cosmos (Puah, 2022).

4. Integracija AI, blockchain i IoT radi poboljšanja digitalne sigurnosti

Većina dosadašnjih studija bavila se integracijom IoT-a i AI-a ili IoT-a i blockchaina (Alharbi i sur. 2022). Razvoj umjetne inteligencije omogućava integraciju sve tri tehnologije, osiguravajući sigurnost IoT mreže. Za očekivati je da integracija umjetne inteligencije (AI), blockchain-a i Internet of Things (IoT) može značajno doprinijeti poboljšanju digitalne sigurnosti, posebno u kontekstu zaštite financijskih sustava i procesa.

Som i Kayal (2022) su zaključili da integracija umjetne inteligencije (AI), blockchaina i Interneta stvari (IoT) predstavlja temelje za transformaciju financijskog sektora. IoT omogućuje prikupljanje podataka u stvarnom vremenu, blockchain pruža decentraliziranu i sigurnu infrastrukturu, dok AI optimizira procese i analizira podatke. Ova kombinacija otvara prilike za stvaranje autonomnih poslovnih modela i novih izvora prihoda putem pametnih ugovora i tokenizacije IoT uređaja, čime se povećavaju konkurentnost i digitalna sigurnost. FinTech dodatno revolucionira financijske usluge kroz inovacije poput digitalnih novčanika i blockchain tehnologije, pružajući učinkovitije i transparentnije alternative tradicionalnim procesima. Međutim, izazovi poput sigurnosnih prijetnji i potrebe za značajnim ulaganjima i dalje otežavaju punu implementaciju ovih tehnologija. Ove tehnologije zajedno stvaraju temelje za decentralizirane, sigurnije i učinkovitije sustave, čime omogućuju digitalnu transformaciju koja će oblikovati budućnost financijskog sektora.

Zaključak studije Alharbi i sur. (2022) naglašava integraciju umjetne inteligencije (AI), blockchaina i Interneta stvari (IoT) kao obećavajući pristup za unapređenje sigurnosti IoT mreža. Analizirane su arhitekture IoT-a, sigurnosni zahtjevi, izazovi i ranjivosti, zajedno s karakteristikama i vrstama blockchain tehnologije. Na temelju istraživanja provedenog u razdoblju od 2017. do 2022., evidentan je rast interesa za ovu tehniku. Studija identificira tri klase rješenja: temeljena na AI, temeljena na blockchainu i ona koja integriraju obje tehnologije. Većina postojećih radova fokusira se na povezivanje IoT-a s jednom od ovih tehnologija, što ističe potrebu za njihovom zajedničkom

integracijom radi zaštite mreža. Studija identificira praznine u istraživanju, posebno u razvijanju distribuiranih modela obrane koji istovremeno osiguravaju privatnost. Integracija AI-a i blockchaina s IoT-om može rezultirati decentraliziranim sustavima, sigurnom razmjenom podataka i transakcijama te nepovredivim IoT mrežama. Ovo istraživanje predlaže buduće smjerove, uključujući reviziju distribuiranih IDS modela i izgradnju suradničkog sustava za ublažavanje napada. Tehnologija je u ranoj fazi razvoja i zahtijeva daljnja istraživanja.

Rane i sur. (2023) su zaključili da kombinacija blockchain tehnologije i umjetne inteligencije (AI) unosi transformativne promjene u financijski sektor, poboljšavajući sigurnost, transparentnost i učinkovitost. Blockchain, kao decentralizirani i nepovredivi zapisnik, omogućuje trajno čuvanje podataka, čime štiti od cyber prijetnji i prijevara. AI doprinosi prediktivnom analizom, strojnim učenjem i automatizacijom, omogućujući analizu podataka u stvarnom vremenu, procjenu rizika i optimizaciju procesa. Njihova zajednička primjena povećava točnost financijskih podataka i osigurava sigurnost kroz automatizirane procese poput "Know Your Customer (KYC)" i "Anti-Money Laundering (AML)". Blockchain omogućuje sigurnu pohranu korisničkih podataka, dok AI prepoznaje sumnjive aktivnosti u velikim bazama podataka, pridonoseći usklađenosti s regulativama. Pametni ugovori automatiziraju sporazume, smanjujući greške i troškove, dok AI dodatno prilagođava njihove funkcije. Transparentnost koju blockchain donosi jača povjerenje među sudionicima financijskih transakcija, a AI poboljšava detekciju prijevara i upravljanje rizicima. Integracija ovih tehnologija predstavlja revoluciju koja otvara nove mogućnosti za razvoj inovativnih i učinkovitih financijskih ekosustava.

Zalhusni (2024) također analizira mogući utjecaj blockchaina, IoT i AI na digitalnu transformaciju i zaključuje da napredak ovih tehnologija stvara povezan ekosustav koji transformira industrije. Blockchain pruža povjerenje kroz transparentnost i pametne ugovore, IoT generira podatke, dok AI koristi te podatke za optimizaciju procesa i stvaranje autonomnih uređaja. Digitalni novčanici, podržani blockchainom, integriraju tokenizirane depozite, povezujući tradicionalno bankarstvo s modernim tehnologijama. IoT uređaji mogu autonomno upravljati transakcijama, poput plaćanja

pri punjenju električnih vozila (EV), čime doprinose razvoju održivijih financijskih modela. Decentralizirane infrastrukturne mreže omogućuju zajedničama zajedničko upravljanje resursima, dok vlade istražuju blockchain kroz digitalne valute centralnih banaka (CBDC), integrirajući ga u financijske politike. Kombinacija ovih tehnologija obećava transformaciju industrija i stvaranje digitalnog ekosustava do 2030. godine (Zulhusni, 2024).

Chilamkurti i sur. (2024) razmatraju integraciju temeljnih koncepata blockchaina, IoT-a i umjetne inteligencije (AI), pružaju detaljan pregled tehnoloških izazova i mogućnosti u ovim područjima te istražuju kako njihova kombinacija redefinira poslovanje. Fokusiraju na stvarne primjere i aplikacije, ističući kako blockchain omogućuje povjerenje, transparentnost, pametne ugovore i automatizaciju. IoT može generirati podatke iz milijardi uređaja, dok AI pruža analitičke alate za optimizaciju procesa. Naglašavaju se brzina i stabilnost blockchaina, čime se olakšava stvaranje inteligentnih sustava i okruženja. Spomentni autori objašnjavaju kako blockchain može povećati točnost i integritet IoT podataka te ističu korištenje pametnih ugovora i distribuiranih knjiga.

Nofel i sur. (2024) su predstavili sustavni pregled literature o integraciji blockchaina, IoT-a i XBRL tehnologija unutar sustava za računovodstvene informacije (AIS). Analizirali su 309 istraživanja u razdoblju od 2013. do 2023., pri čemu je identificirana važnost ove tehnološke konvergenije za unapređenje transparentnosti, izvještavanja u stvarnom vremenu i sigurnosti podataka. Blockchain, decentralizirana i nepovrediva tehnologija zapisnika, može transformirati tradicionalno računovodstvo kroz trojni računovodstveni sustav, povećavajući transparentnost i smanjujući slučajeve prijevara. IoT omogućuje prikupljanje podataka u stvarnom vremenu i automatizaciju, dok XBRL donosi standardizaciju i usporedivost financijskih podataka za lakšu analizu i objavljivanje informacija. Autori su zaključili da iako ove tehnologije nude brojne koristi, njihova integracija suočava se s izazovima poput kibernetičkih prijetnji, velikih infrastrukturnih zahtjeva i nedostatka stručnjaka. Buduća istraživanja trebaju koristiti empirijske metode za testiranje praktične primjene i utjecaja integriranih sustava, uz razvoj standardiziranih protokola i najboljih praksi za smanjenje rizika i maksimizaciju koristi.

Cilj istraživanja autora Sharma i sur. (2024) bio je rasvijetliti budućnost financijskih transakcija kroz širu primjenu naprednih tehnologija, povećavajući povjerenje i učinkovitost u sve digitalnijem svijetu. I za ove autore integracija blockchaina, IoT-a i umjetne inteligencije (AI) predstavlja revolucionarnu priliku za bankarski sektor, posebno u unapređenju učinkovitosti pametnih ugovora. I po njima, ove tehnologije mogu značajno poboljšati transparentnost, sigurnost i učinkovitost financijskih transakcija: Blockchain pruža decentraliziranu i nepovredivu infrastrukturu, IoT omogućuje prikupljanje podataka u stvarnom vremenu, dok AI analizira podatke i optimizira procese. Njihova istraživanja ukazuju na sinergijske prednosti ove integracije, uključujući smanjenje prijevара, bolje upravljanje procesima i povećanje povjerenja dionika. Stvaranje odgovornijeg i transparentnijeg financijskog ekosustava zahtijeva rješavanje postojećih izazova i razvoj praktičnih rješenja za njihovu implementaciju. Integracija ima potencijal ne samo na teorijskoj razini, već i u praksi.

Iako se mali broj istraživanja do sada bavio sinergetskim djelovanjem blockchain tehnologije, AI i IoT uopće, a posebno u području financija, može se primijetiti da se u 2024. godini povećao broj objavljenih takvih radova, ali da im zaključci konvergiraju u isticanju potencijala njihovog objedinjavanja. Blockchain, IoT i AI stvaraju povezan ekosustav koji unaprjeđuje industrije kroz transparentnost, optimizaciju i autonomne procese. Blockchain pruža povjerenje, IoT generira podatke, a AI ih koristi za analizu. Digitalni novčanici i autonomna plaćanja omogućuju održive financijske modele povezivanjem tradicionalnog bankarstva s modernim tehnologijama. Ključni potencijali svakog od učesnika u integraciji su:

1. Umjetna inteligencija (AI) može analizirati velike količine podataka u stvarnom vremenu, prepoznati sumnjive obrasce ponašanja koji mogu prethoditi prijevaram ili napadu i automatski reagirati na prepoznate prijetnje, omogućavajući brže i efikasnije odgovore na incidente. Pomoću povijesnih podataka, AI modeli mogu predvidjeti moguće prijetnje i ranije upozoriti na rizike.
2. Blockchain osigurava nepromjenjive registre transakcija pri čemu su transakcije

transparentne i verificirane, čime se smanjuje mogućnost prijevara i osigurava nepovredivost podataka. Distribuiranost čini blockchain otpornim na hakiranje. Pametni samoizvršivi ugovori mogu automatski izvršavati transakcije kada su ispunjeni uvjeti, čime se smanjuje mogućnost ljudske greške i prijevara.

3. Internet stvari (IoT) omogućuje povezivanje različitih uređaja, osiguravajući da podaci iz fizičkog (analognog) svijeta budu integrirani u digitalne procese što može poboljšati efikasnost i bezbjednost transakcija. Pametni senzori mogu praćenjem aktivnosti i stanja uređaja omogućiti brzu detekciju i odgovor na sigurnosne prijetnje. IoT uređaji mogu generirati potrebne podatke koji se mogu koristiti za analizu i prepoznavanje potencijalnih prijetnji.

Kombiniranjem AI, blockchain i IoT tehnologija, organizacije mogu stvoriti robustan okvir za zaštitu svojih financijskih sustava i procesa. Ove se tehnologije međusobno nadopunjuju, omogućujući unaprjeđenje prediktivnih i reaktivnih mjera zaštite. Osim toga, ovakav sustav može povećati povjerenje među korisnicima i klijentima, čime se jača cjelokupna infrastruktura digitalne sigurnosti.

5. Primjeri integracije AI, IoT i blockchaina

Postoji niz proizvoda poznatih proizvođača koji se bave integracijom blockchaina, umjetne inteligencije (AI) i Interneta stvari (IoT). Neki nude potpuno integrirana rješenja, dok većina nudi ili integraciju dviju tehnologija ili pojedinačna rješenja koja se mogu integrirati uz primjenu dodatnih alata ili aplikacija. Neki od najpoznatijih ponuđača su:

- **IBM:** IBM Watson IoT® Platform i IBM Blockchain Platform. Prva platforma omogućuje upravljanje IoT podacima uz analizu i prilagodbu pomoću umjetne inteligencije (IBM, 2024). Također, IBM Blockchain Platform (IBM, IBM Support for Hyperledger Fabric, 2024) koristi podatke iz IoT uređaja za stvaranje sigurnih i nepovredivih zapisa transakcija.

- **Microsoft:** Azure Blockchain Service, Azure AI i Azure IoT Hub. Microsoft platforme Azure mogu surađivati kako bi stvorile rješenja za različite industrije, poput pametnih gradova, logistike i financija. Pritom Azure IoT omogućuje povezivanje i upravljanje IoT uređajima, Azure Blockchain Service pruža infrastrukturu za sigurne i decentralizirane transakcije, a Azure AI nudi alate za analizu podataka i optimizaciju procesa (Kataria, 2025; Azure, 2025; Azure, bez dat.).
- **Intel:** Intel nema specifičnu platformu koja eksplicitno objedinjuje AI, IoT i blockchain, ali nudi tehnologije i rješenja koja podržavaju ova područja. Intel pruža hardverske i softverske alate za AI kroz procesore i optimizirane algoritme, a njihova IoT rješenja omogućuju povezivanje uređaja i upravljanje podacima. Intel također podržava blockchain tehnologiju kroz procesore dizajnirane za optimizaciju rudarenja i sigurnost podataka. Integracija ovih tehnologija može se ostvariti kombiniranjem Intelovih proizvoda i platformi s dodatnim softverskim rješenjima (Intel Corporation, 2022; Intel, 2024; Intel Corporation, 2018).
- **Amazon Web Services (AWS) (2025):** Amazon Managed Blockchain, Amazon SageMaker, Amazon IoT Core i druge. Ove platforme nisu dizajnirane kao integrirana platforma koja automatski objedinjuje sve tri tehnologije, ali ih je uz pametne ugovore i AWS Lambda (AWS, 2025) usluge moguće integrirati.
- **Huawei:** Huawei za sada, ne nudi objedinjenu platformu, ali nudi komponente sustava. Kombiniranjem funkcionalnosti platforme OceanConnect IoT (Jidong i Yaqing, 2018), Huawei Cloud AI (Huawei, 2025) alata za umjetnu inteligenciju i Huawei Blockchain Service (BCS) (Xiaojun, 2025), uz dodatne prilagodbe za specifične aplikacije, može se ostvariti integracija AI, IoT i blockchaine.
- **Cisco Systems:** Cisco Kinetic for IoT (Venkatachalam i Siraj, 2019) i Cisco Blockchain (Vignette, 2019; Cisco, 2018). Cisco Kinetic for IoT fokusira se na upravljanje IoT podacima, dok Cisco Blockchain tehnologija koristi decentralizirane

registre za sigurnost i transparentnost podataka. Kombiniranjem ove dvije tehnologije kroz prilagođena rješenja, koristeći Cisco proizvode zajedno s dodatnim softverskim alatima moguće je postizanje integracije blockchaine, IoT-a i AI-a.

Postoje i rješenja manje poznatih proizvođača i startupova. Pitanje je koliko će ovakva rješenja biti uspješna na tržištu, ali su principi na kojima su rješenja kreirana inventivni i mogu nadživjeti same kompanije iz kojih potječu. Jednu grupu platformi, koja integracijom AI-a, blockchaine i kvantno-otporne sigurnosti jača digitalno povjerenje, kreirala je WISEKey. Ona uključuje (Choucair, 2025; SEALSQ, 2024):

- **WISEkey WISEID:** platforma za digitalni identitet i sigurnost. WISEID koristi umjetnu inteligenciju za analizu ponašanja i autentifikaciju, IoT za povezivanje uređaja, te blockchain za decentraliziranu infrastrukturu i zaštitu podataka (Choucair, 2025).
- **SEALSQ:** specijalizirana platforma za postkvantnu kriptografiju i sigurne digitalne identitete. Iako SEALSQ ne objedinjuje automatski AI, IoT i blockchain u jedinstvenu platformu, pruža tehnologije koje omogućuju njihovu integraciju. Postkvantni čipovi SEALSQ osiguravaju visok stupanj sigurnosti za IoT uređaje i podatke. Blockchain infrastruktura omogućuje sigurne transakcije i transparentnost podataka. AI-driven sigurnosni mehanizmi koriste umjetnu inteligenciju za prediktivnu analizu prijetnji i optimizaciju IoT sustava (SEALSQ, 2024).
- **WISECoin:** platforma za tokenizaciju i autentifikaciju. WISECoin, je dio WISEKey ekosustava. Integrira AI, IoT i blockchain tehnologije. Ova platforma omogućuje sigurne digitalne interakcije između ljudi, uređaja i strojeva koristeći blockchain za autentifikaciju i umjetnu inteligenciju za analizu i validaciju identiteta (Wisekey, 2020).
- **SEALCOIN:** decentralizirana platforma koja objedinjuje IoT, blockchain i autonomne transakcije. AI se koristi za analizu podataka i optimizaciju transakcija između IoT uređaja, čime

se omogućuju autonomne i sigurnije interakcije (Sealcoin, 2024).

Sva ova inovativna rješenja doprinose području digitalne sigurnosti i učinkovitosti.

6. Zaključak

Integracija umjetne inteligencije (AI), interneta stvari (IoT) i blockchain tehnologije nudi značajna poboljšanja u digitalnoj sigurnosti financijskog sektora. AI omogućava analizu velikih količina podataka u stvarnom vremenu, proaktivno predviđanje prijetnji te brzu reakciju na sigurnosne incidente. IoT donosi podatke iz stvarnog svijeta u digitalne procese, omogućujući praćenje i zaštitu mrežnih aktivnosti u realnom vremenu. Blockchain pruža decentraliziranu, nepovredivu infrastrukturu koja osigurava transparentnost i sigurnost transakcija, dok pametni ugovori automatiziraju procese smanjujući rizik od ljudskih pogrešaka.

Kombiniranjem ovih tehnologija financijske institucije mogu stvoriti robustan sigurnosni okvir koji unaprjeđuje povjerenje korisnika i klijenata. Trenutno je objavljen relativno mali broj radova koji se bave ovom integracijom, ali se može očekivati povećano zanimanje i razvoj istraživanja u narednim godinama, kako ove tehnologije budu dobijale na značaju. Međutim, izazovi poput sigurnosnih ranjivosti, kompleksnosti implementacije i nedostatka stručnjaka zahtijevaju kontinuirana istraživanja i unaprjeđenja. Implementacija preporučenih mjera, uključujući enkripciju, autentifikaciju, redovito ažuriranje sustava i kriptografsku verifikaciju, može dodatno smanjiti rizike i osigurati stabilnije i sigurnije financijsko okruženje.

Rezultati istraživanja ukazuju na to da integracija umjetne inteligencije (AI), interneta stvari (IoT) i blockchain tehnologije donosi značajne koristi u unaprjeđenju digitalne sigurnosti financijskog sektora, čime se omogućuje odbacivanje nulte hipoteze i potvrđuje alternativna hipoteza.

Citirani izvori

- Alharbi, S., Attiah, A., & Alghazzawi, D. (2022). *Integrating Blockchain with Artificial Intelligence to Secure IoT Networks: Future Trends. Sustainability*, 14(23), 16002. doi:10.3390/su142316002
- Alloui, H., & Mourdi, Y. (2023). *Exploring the Full Potentials of IoT for Better Financial Growth and Stability: A Comprehensive Survey. Sensors*, 23(19), 8015. doi:10.3390/s23198015
- Alsirhani, A., Ezz, M., & Mostafa, A. M. (2022). *Advanced Authentication Mechanisms for Identity and Access Management in Cloud Computing. Computer Systems Science and Engineering*, 43(3), 967-984. doi:10.32604/csse.2022.024854
- Amazon. (2025, 04 04). AWS Cloud Services. Retrieved from AWS: <https://aws.amazon.com/products/>
- AWS. (2025, 04 03). AWS Lambda. Retrieved from Amazon: <https://aws.amazon.com/lambda/>
- Azure. (2025). *Find solutions for putting your ideas into action.* Retrieved from Microsoft: <https://azure.microsoft.com/en-us#solutions>
- Azure. (n.d.). *What is Azure.* Retrieved from Microsoft: <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-azure/>
- Behm, S., Deetjen, U., Kaniyar, S., Methner, N., & Münstermann, B. (2019, 02 04). *Digital ecosystems for insurers: Opportunities through the Internet of Things.* Retrieved from McKinsey & Company: <https://www.mckinsey.com/industries/financial-services/our-insights/digital-ecosystems-for-insurers-opportunities-through-the-internet-of-things#/>
- Bogavac, M. (2019). *Research on the Influence of Digitalization on Small and Medium Enterprises.* Belgrade: ICIM+, Faculty of Business and Law, "Union - Nikola Tesla" University.
- Bwalya, K., & Paul, D. J. (2024, 10 02). *The Impact of Financial Technology on the Financial Services Industry: A Systematic Review. Heliyon - First Look*, 48.
- Cekerevac, Z., & Cekerevac, P. (2022, 07 15). *Blockchain and the application of blockchain technology.* (Z. Cekerevac, Ed.) *MEST Journal*, 10(2), 14-25. doi:10.12709/mest.10.10.02.02
- Cekerevac, Z., & Cekerevac, P. (2023, July 15). *Blockchain Technology and Application – SMEs Aspect.* (Z. Cekerevac, Ed.) *MEST Journal*, 11(2), 28-39. doi:10.12709/mest.11.11.02.04
- Cekerevac, Z., Dvorak, Z., Prigoda, L., & Cekerevac, P. (2017). *Internet of things and the Man-In-The-Middle attacks – Security and economic risks.* *MEST Journal*, 5(2), 15-25. doi:10.12709/mest.05.05.02.03

- Cekerevac, Z., Dvorak, Z., Prigoda, L., & Cekerevac, P. (2018). Hacking, protection and consequences of hacking. *Komunikacije Communications*, 20(2), 83-87.
- Cekerevac, Z., Prigoda, L., & Maletic, J. (2018, July 15). *Blockchain Technology and Industrial Internet of Things in the Supply Chains*. (Z. Cekerevac, Ed.) *MEST Journal*, 6(2), 39-47. doi:10.12709/mest.06.06.02.05
- Chilamkurti, N., Poongodi, T., & Balusamy, B. (Eds.). (2024). *Blockchain, Internet of Things, and Artificial Intelligence*. Chapman & Hall.
- Choucair, C. (2025, 02 18). WISEKey Unifies AI, Blockchain, and Quantum-Resistant Security to Strengthen Digital Trust. Retrieved from Quantum Computing Business: <https://thequantuminsider.com/2025/02/18/wisekey-unifies-ai-blockchain-and-quantum-resistant-security-to-strengthen-digital-trust/>
- Choucair, C. (2025, 02 18). WISEKey Unifies AI, Blockchain, and Quantum-Resistant Security to Strengthen Digital Trust. Retrieved from Quantum Insider: <https://thequantuminsider.com/2025/02/18/wisekey-unifies-ai-blockchain-and-quantum-resistant-security-to-strengthen-digital-trust/>
- Cisco. (2018, 12 17). *Blockchain by Cisco*. Retrieved from Cisco: <https://www.crowdfundinsider.com/wp-content/uploads/2019/03/Cisco-blockchain-whitepaper.pdf>
- Cisco. (2024, 12 16). What Is Secure Access Service Edge (SASE)? Preuzeto sa Cisco: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/security/what-is-sase-secure-access-service-edge.html#~sase-overview>
- Coston, I., Plotnizky, E., & Nojournian, M. (2025). Comprehensive Study of IoT Vulnerabilities and Countermeasures. *Applied Sciences*, 15(6), 3036. doi:10.3390/app15063036
- Čekerevac, Z., & Bogavac, M. (2022). Impact of the pandemic on blockchain and the IoT application in supply chains from the SME aspect. *Mechanics Transport Communications*, 20(3/3), 11-17.
- Čekerevac, Z., Matić, S., Djurić, D., Čelebić, D. i Dvorak, Z. (2010). SDD ITG 'smart shelf' RFID rešenje za inventarisanje robe na udaljenim policama [Eng. SDD ITG smart shelf RFID solution for the stocktaking of goods on remote shelves]. *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, 47-52.
- Dallinger, L. (2024, 04 10). IoT in InsurTech: Revolution of the Insurance Industry. Retrieved from RTInsights: <https://www.rtinsights.com/iot-in-insurtech-revolution-of-the-insurance-industry/>
- Darktrace. (2021, 04 08). Preparing IT Professionals for AI Cyber Attacks. Retrieved from Darktrace: <https://www.darktrace.com/news/96-of-it-and-security-professionals-preparing-for-ai-powered-cyber-attacks-4>
- Devi, M., & Majumder, A. (2020). Side-Channel Attack in Internet of Things: A Survey. *Applications of Internet of Things* (pp. 213-222). Singapore: Springer. doi:10.1007/978-981-15-6198-6_20
- EclipseForensics. (2024, 12 18). The Significance of Cyber Deception Technologies in Detecting and Analyzing Cyber Threats. Preuzeto sa EclipseForensics: <https://eclipseforensics.com/the-significance-of-cyber-deception-technologies-in-detecting-and-analyzing-cyber-threats/?form=MG0AV3>
- Finnegan, O., White, J., Armstrong, B., E. L. Adams, S. B., Bastyr, M., Zhu, X., . . . Weaver, R. G. (2024). The utility of behavioral biometrics in user authentication and demographic characteristic detection: a scoping review. *Systematic Reviews*, 13, Article number 61. doi:10.1186/s13643-024-02451-1
- GDPR. (2024, 04 22). General Data Protection Regulation (GDPR). Retrieved 04 03, 2025, from <https://gdpr-info.eu/>
- Glöckler, J., Sedlmeir, J., Frank, M., & Fridgen, G. (2024). A Systematic Review of Identity and Access Management Requirements in Enterprises and Potential Contributions of Self-Sovereign Identity. *Business & Information Systems Engineering*, 421-440. doi:10.1007/s12599-023-00830-x
- Huawei. (2025). The Smart Future Is Here: Winning the Next Decade on HUAWEI CLOUD AI. Retrieved from Huawei Cloud: https://www.huaweicloud.com/intl/en-us/cloudplus/thirdphase/detail_05.html
- IBM. (2024, 05 16). IBM Support for Hyperledger Fabric. Retrieved from IBM: <https://www.ibm.com/products/blockchain-platform-hyperledger-fabric>
- IBM. (2024, 07 09). IBM Watson to watsonx - 70 years advancing AI. Retrieved from IBM: <https://www.ibm.com/watson>
- IBM. (2024, 12 27). What is homomorphic encryption? Preuzeto sa IBM: <https://www.ibm.com/think/topics/homomorphic-encryption>
- Intel. (2024, 02 26). Intel Announces New Edge Platform for Scaling AI Applications. Preuzeto sa intel: <https://www.intc.com/news-events/press-releases/detail/1679/intel-announces-new-edge-platform-for-scaling-ai>

- Intel Corporation. (2018, 11 26). *Blockchain Technology - Moving Beyond The Hype*. Retrieved from intel: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/brief/blockchain-business-brief.pdf>
- Intel Corporation. (2022, 12 14). *Accelerate Critical Edge Workloads with Built-in AI and Security Capabilities*. Retrieved from Intel: <https://www.intel.com/content/dam/www/central-libraries/us/en/documents/2022-12/iot-4th-gen-xeon-sp-product-brief.pdf>
- Jačimovski, S., Šetrajčić, J., & Lamovec, J. (2019). O kvantnoj kriptografiji. *Žurnal za bezbjednost i kriminalistiku*, 1(1), 41-52.
- Jidong, D., & Yaqing, M. (2018, 02). *OceanConnect: Cloud IoT for the Future*. Retrieved from Huawei: <https://www.huawei.com/en/huaweitech/publication/84/ocean-connect-cloud-iot>
- Kataria, S. (2025, 03 06). *Secure and Transparent Cloud Solutions*. Retrieved from Services Quality Redefined: <https://www.qservicesit.com/azure-blockchain-powering-secure-and-transparent-cloud-solutions>
- Kumar, N., Joshi, S., & Alwan, A. S. (2023). *Impact of IoT on banking and financial services*. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing. doi:10.1063/5.0170918
- Levin, B. (2024, 11 17). *What is Zero Trust Architecture (ZTA)?* Palo Alto. (N. Kumar, Interviewer) Retrieved from Paloalto: <https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/what-is-a-zero-trust-architecture>
- Madiarbekova, A. (2025, 01 15). *Cybersecurity in IoT Devices: Vulnerabilities, Risks, and Mitigation Strategies*. KeAi - First Look, 13. doi:10.2139/ssrn.5075016
- Malatji, M., & Tolah, A. (2024, 02 15). *Artificial intelligence (AI) cybersecurity dimensions: a comprehensive framework for understanding adversarial and offensive AI*. *AI Ethics*. doi:10.1007/s43681-024-00427-4
- Mohamed, N. (2023, 10 25). *Current trends in AI and ML for cybersecurity: A state-of-the-art survey*. *Cogent Engineering*. doi:10.1080/23311916.2023.2272358
- Nilay, D. (2024, 10 28). *How IoT Transforms Finance: Applications & Benefits [2024]*. Retrieved from intuz: <https://www.intuz.com/blog/iot-impact-financial-services-industry>
- Nofel, M., Marzouk, M., Elbardan, H., Saleh, R., & Mogahed, A. (2024). *Integrating Blockchain, IoT, and XBRL in Accounting Information Systems: A Systematic Literature Review*. *Journal of Risk and Financial Management*, 17(8), 372. doi:10.3390/jrfm17080372
- Puah, R. (2022, 07 08). *The World of Interoperability — Cosmos vs Polkadot*. Preuzeto sa Switcheo: <https://blog.switcheo.com/the-world-of-interoperability-cosmos-vs-polkadot/>
- Rane, N., Choudhary, S., & Rane, J. (2023, 12 01). *Blockchain and Artificial Intelligence (AI) Integration for Revolutionizing Security and Transparency in Finance*. doi:10.2139/ssrn.4644253
- Sajid, H. (2024, 05 03). *Prijetnja ofenzivne umjetne inteligencije i kako se od nje zaštititi*. Retrieved from Unite.ai: <https://unite.ai/hr/prijetnja-ofenzivnog-AI-ja-i-kako-se-od-njega-za%C5%A1tititi/>
- Sealcoin. (2024). *Empowering IoT with Secure, Decentralized Transactions*. Retrieved from Sealcoin: <https://sealcoin.ai/>
- SEALSQ. (2024, 12 02). *SEALSQ and Parent Company WISEKey Advance AI Integration*. Retrieved from SEALSQ: <https://www.sealsq.com/investors/news-releases/sealsq-and-parent-company-wisekey-advance-ai-integration>
- Sharma, S., Selvi, G. P., Shailaja, M. L., Mehta, A., Srivastva, A., & Gupta, A. (2024). *Smart Contracts and Blockchain: Integrating AI and IoT for Transparent Banking Transactions*. *Journal of Informatics Education and Research*, 4(3), 2152.
- Siddhartha, V., Gaba, G. S., & Kansal, L. (2020). *A Lightweight Authentication Protocol using Implicit Certificates for Securing IoT Systems*. *Procedia Computer Science*, 85-96. doi:10.1016/j.procs.2020.03.185
- Skoromets, S. (2024, 04 24). *Fraud Detection Using AI in Banking: AI Model Explained*. Retrieved from Eliftech: <https://www.eliftech.com/insights/fraud-detection-using-ai-in-banking/>
- Som, A., & Kayal, P. (2022). *AI, Blockchain, and IOT. In Digitalization and the Future of Financial Services, Innovation and Impact of Digital Finance (pp. 141-161)*. doi:10.1007/978-3-031-11545-5_8
- Soundenkar, S., Bhosale, K., Jakhete, M. D., Kadam, K., Chowdary, V. G., & Durga, K. (2024). *AI Powered Risk Management: Addressing Cybersecurity Threats in Financial Systems*. *Library Progress International*, 44(3). doi:10.48165/bapas.2024.44.2.1
- Suresh, R., & Manoj, K. (2024). *Fintech: Revolutionizing financial service through digital platforms*. *International Journal of Research in Financial Management*, 562-566. doi:10.33545/26175754.2024.v7.i2f.410

- techblog. (2022, 11 10). Vodič za IoT u bankarstvu i Fintech-u. Retrieved from TechBlog.co.rs: <https://techblog.co.rs/vodic-za-iot-u-bankarstvu-i-fintech-u/>
- Tubin, G. (2024, 11 20). Security Automation: Tools, Process and Best Practices. Preuzeto sa Cynet: <https://www.cynet.com/incident-response/security-automation-tools-process-and-best-practices/>
- Vaideswaran, N. (2025, 03 12). A Comprehensive Survey on Data Loss Prevention (DLP). Preuzeto sa CrowdStrike: <https://www.crowdstrike.com/en-us/cybersecurity-101/data-protection/data-loss-prevention-dlp/>
- Venkatachalam, S., & Siraj, A. (2019, 04 16). Unlock the Value of Data with Cisco Kinetic (IoT). Retrieved from Cisco: https://www.cisco.com/c/dam/m/en_sg/events/connect-2019/pdfs/unlock-the-value-of-data.pdf
- Vignette, V. (2019, 10 24). Cisco Blockchain. Retrieved from Deep Analysis: <https://www.deep-analysis.net/wp-content/uploads/2019/11/DA-V-1910-Cisco-blockchain-no-distribution.pdf>
- Wisekey. (2020, 12 21). WISECoin, the Innovative Tokenized Service of WISEKey, Authenticates People, Products and Machines Using Blockchain and AI. Retrieved from Wisekey: <https://www.wisekey.com/press/wisecoin-the-innovative-tokenized-service-of-wisekey-authenticates-people-products-and-machines-using-blockchain-and-ai/>
- XiaoJun, Z. (2025). HUAWEI CLOUD Blockchain Technology – Building Trust in Industry Applications. Retrieved from Huawei Cloud Computing Technologies Co.: https://www.huaweicloud.com/intl/en-us/cloudplus/secondphase/detail_15.html
- Yarter, M., Uehara, G., & Spanias, A. (2022). Implementation and Analysis of Quantum Homomorphic Encryption. 2022 13th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA) (str. 1-5). IEEE Xplore. doi:10.1109/IISA56318.2022.9904399
- Yilmaz, N. K., & Hazar, H. B. (2019). THE RISE OF INTERNET OF THINGS (IoT) AND ITS APPLICATIONS IN FINANCE AND ACCOUNTING. PressAcademia Procedia, 10(1), 32-35.
- Zhao, W., Alwidian, S., & Mahmoud, Q. H. (2022). Adversarial Training Methods for Deep Learning: A Systematic Review. Algorithms, 15(8), 283.
- Zulhusni, M. (2024, 12 23). How blockchain, IoT, and AI are shaping the future of digital transformation. Retrieved from AINews: <https://www.artificialintelligence-news.com/news/how-blockchain-iot-and-ai-are-shaping-the-future-of-digital-transformation/>

Safer Finances: How AI, IoT, and Blockchain Revolutionize Digital Security

Summary

The integration of artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and blockchain technology represents a significant step forward in enhancing digital security within the financial sector. AI enables real-time analysis of large datasets, threat detection, automated security responses, and risk prediction based on historical data, thereby advancing proactive security measures. IoT brings real-world data into digital processes, allowing for monitoring of network activities, swift responses to anomalies, and personalized services through smart devices. Blockchain ensures data immutability via decentralized ledgers, providing transparency, transaction security, and resilience against cyber-attacks. Smart contracts further automate processes, reducing the risk of fraud and human error. Despite current challenges, such as security vulnerabilities, implementation complexities, and the relatively limited number of published studies on this integration, the combination of these technologies holds the potential to create advanced security systems. This combination not only strengthens resilience against threats but also enhances user and client trust. This paper serves as a valuable starting point for future research to further illuminate the possibilities and challenges of integrating AI, IoT, and blockchain in the financial sector. Interest in this topic is expected to grow in the coming years as these technologies evolve and see broader global application.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), Blockchain, Digital Security, Financial Sector

Ispitivanje udarne radnje loma termoplastike

Patrik Radolović^a, Luka Žužić^b, Ener Špada^c, Deni Vale^d

a Bacc. ing. mech., student, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, pradolovi@iv.hr

b Bacc. ing. mech., student, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, lzuzic@iv.hr

c Bacc. ing. mech., student, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, espada@iv.hr

d Mag. phys., predavač, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, dvale@iv.hr

Sažetak

U ovom radu je predstavljeno ispitivanje udarne radnje loma odabranih termoplastičnih filamenata koji se najčešće koriste u aditivnoj proizvodnji metodom modeliranja taložnim očvršćivanjem. Fokus ispitivanja stavljen je na usporedbu udarne žilavosti odabranih filamenata Charpy-jevom metodom prema normi HRN EN ISO 148-1. Ispitivanje je uključivalo sedam popularnih termoplastičnih filamenata: PLA, PETG, ABS, ASA, TPU, PA, PP. Svi uzorci korišteni u ispitivanju izrađeni su na istom uređaju za 3D ispis, pri identičnim uvjetima proizvodnje kako bi isključili vanjske faktore i osigurali što precizniju usporedbu svojstava samih materijala. Rezultati ispitivanja pružaju vrijedne podatke o razlici u otpornosti na udarna opterećenja između ispitivanih filamenata, što značajno doprinosi odabiru optimalnog materijala za konkretne inženjerske projekte, s ciljem povećanja pouzdanosti, sigurnosti i učinkovitosti konačnih proizvoda izrađenih tehnologijom aditivne proizvodnje.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja, 3D ispis, mehanička svojstva, termoplastika, ispitivanje materijala

1. Uvod

Aditivna proizvodnja, poznatija kao “3D Printanje” predstavlja tehnološki napredak koji omogućuje jednostavnu transformaciju digitalno izrađenih modela u fizičke objekte. Početak aditivne proizvodnje kreće iz 1980-ih godina, kad je Chuck Hull razvio stereolitografiju (engl. *Stereolithography*, SLA), prvu komercionalno uspješnu metodu baziranu na fotopolimerizaciji UV (engl.

Ultraviolet radiation) svjetlom. 1987. godine tvrtka 3D Systems lansirala je prvi industrijski stroj za izradu prototipa, čime se komercijalizira brzo prototipiranje korištenjem aditivne proizvodnje, iako su ovi objekti bili neprecizni bili su korisni za izradu ranih prototipova proizvoda (Slusarczyk, 2025). Metoda modeliranja taložnim očvršćivanjem (engl. *Fused Deposition Modeling*, FDM) prvi put se spominje 1991. godine kad tvrtka Stratasys patentira istoimenu tehnologiju, dok su se u istom vremenskom periodu paralelno razvijale metode

selektivnog laserskog sinteriranja i laminacije listova (Figiel, 2022). Ključan trenutak dogodio se 2009. godine, kad je prvi put uveden termin "Aditivna proizvodnja" (*engl. Additive manufacturing*), normizacija ovog pojma označila je prelazak iz metode prototipiranja u prihvaćenu metodu proizvodnje gotovih proizvoda čime je omogućena šira primjena u industriji (Stucker, 2012). Ključna razlika aditivne proizvodnje od tradicionalnih subtraktivnih metoda, koje uključuju rezanje, glodanje ili brušenje sirovog materijala, aditivna proizvodnja gradi objekte sloj po sloj bazirano na prije određenom digitalnom modelu, bez potrebe za posebne kalupe ili ikakve dodatne alate (Gibson, Rosen i Stucker, 2015). Mehanička svojstva proizvedenih dijelova i dalje predstavljaju jedan od ključnih aspekata pri razmatranju različitih metoda aditivne proizvodnje. Općenito mehanička svojstva uključuju čvrstoću, tvrdoću, žilavost, elastičnost i otpornost na trošenje materijala, svako od ovih svojstva izravno ovisi o izabranom materijalu, tehnologiji ispisa, te parametrima modela i okoline. Radi temelja aditivne proizvodnje, odnosno izrade modela sloj po sloj, aditivno proizvedeni objekti imaju slojevitú strukturu, te je često prisutna anizotropija svojstava, što znači da čvrstoća i izdržljivost značajno variraju ovisno o smjeru primjene opterećenja (Ahn i sur. 2002). Optimizacijom parametara kao što su temperatura ispisa, orijentacija objekta, gustoća ispune, debljina sloja i postavljanje "zidova", moguće je značajno utjecati na konačna mehanička svojstva proizvoda (Gao i sur. 2015), čime se omogućava prilagodba specifičnim zahtjevima primjene i cijene. Iako objekti proizvedeni aditivnom proizvodnjom često pokazuju nižu čvrstoću u usporedbi s dijelovima izrađenima konvencionalnim metodama kao što su injekcijska prešanja i strojna obrada, njihova jedinstvena mogućnost izrade objekata kompleksne geometrije omogućuje dizajn koji kompenzira navedene nedostatke (Verdejo de Toro i sur. 2020). U današnje vrijeme, FDM se zbog široke dostupnosti 3D pisača u različitim cjenovnim rangovima, te širokom spektrumu termoplastičnih filamenata postavila kao najpopularnija metoda 3D ispisa među hobistima (Protolabs Network, bez dat.). Razlog tome je jednostavna izrada raznih objekata, ali i praktičnost u industrijskoj i široj primjeni za izradu prototipova i maloserijskih proizvoda (Berman, 2012). U ovom radu je nakon ispitivanja Charpyjevom metodom

uspoređeno mehaničko svojstvo udarnog rada loma najčešće korištenih i cjenovno pristupačnih filamenata za FDM ispis. Svi uzorci proizvedeni su u istim uvjetima na istom FDM 3D pisaču kako bi se osigurala vjerodostojnost i usporedivost rezultata. Na taj način eliminiran je utjecaj razlika u procesu izrade, stoga izmjerena mehanička svojstva izražavaju razlike svojstava različitih materijala. Cilj ovih ispitivanja je izrada baze podataka, odnosno pružanje pouzdanih i ispitanih podataka o mehaničkim svojstvima različitih filamenata, što će inženjerima značajno olakšati izbor odgovarajućih materijala za različite zahtjeve projekata.

2. Materijali

U ovom radu pripremljeni su ispitni uzorci sedam termoplastičnih filamenata često korištenih u FDM 3D ispisu: polilaktična kiselina (*engl. Polylactic acid*, PLA), polietilen-tereftalat glikol (*engl. Polyethylene Terephthalate Glycol*, PETG), akrilonitril-butadien-stiren (*engl. Acrylonitrile Butadiene Styrene*, ABS), akrilonitril-stiren-akrilat (*engl. Acrylonitrile Styrene Acrylate*, ASA), termoplastični poliuretan (*engl. Thermoplastic Polyurethane*, TPU), poliamid odnosno najlon (*engl. Polyamide*, PA), polipropilen (*engl. Polypropylene*, PP). Cilj je pružiti jasan pregled u kemijska i mehanička svojstva svakog filameta budući da karakteristike objekata izrađenih tehnologijom 3D ispisa ne ovise samo o parametrima ispisa poput temperature i brzine, već i o strukturi samog materijala na molekularnoj razini. Primjerice, polimeri poput PA6.6 mogu izdržati udarce (udarnu žilavost) bolje od drugih polimera koji nemaju uređene lance molekula (tzv. amorfni polimeri) (Lay i sur. 2019). Hibridni materijali poput PETG-CF (PETG ojačan karbonskim vlaknima) kombiniraju karakteristike dvaju materijala: izdržljivi su poput karbonskih vlakana i otporni na kemikalije kao i poliester (eSUN, 2024).

2.1. PLA

PLA (polilaktična kiselina) je termoplastični polimer iz skupine alifatnih poliesterâ koji je postao vrlo popularan izbor materijala u 3D ispisu radi svoje jednostavnosti ispisa, zadovoljavajuće kvalitete i biorazgradivosti. Molekularna struktura PLA se temelji na ponavljajućim jedinicama laktidnih

monomera povezanih ester vezama, što znači da materijal ima relativno visoku krutost i tvrdoću, uz ograničenu fleksibilnost i žilavost. Među nedostacima PLA su slab otpor prema vlazi, te niska temperaturna otpornost, što znači da nije primjenjiv u područjima gdje bi bio izložen vlazi i visokim temperaturama, odnosno vanjskim uvjetima (Armani, 2017). Najčešće se koristi za izradu prototipova, dekoracija i raznih objekata.

2.2. PETG

PETG (polietilen-tereftalat glikol) je termoplastični poliester koji nastaje kompolimerizacijom etilen glikola i tereftalne kiseline uz dodavanje glikolnih modifikatora, što značajno povećava elastičnost materijala i otpornost na lomljenje u usporedbi sa čistim PET materijalom. Kao i PLA, PETG je veoma popularan izbor za 3D ispis radi jednostavnosti ispisa koja je veoma slična kao i kod PLA, ali uz nešto veću temperaturu. U usporedbi s PLA, PETG ima odličnu otpornost na udarce, visoku otpornost na UV zrake i vlagu, poboljšanu fleksibilnost i žilavost. Iako je njegova čvrstoća niža u usporedbi, to nadoknađuje boljom elastičnošću i mogućnošću deformacije prije puknuća materijala. Ove karakteristike čine PETG široko primjenjivim u raznim okruženjima, te se tako od njega mogu izrađivati funkcionalni prototipovi, dijelovi strojeva, boce, spremnici za hranu i mnogi drugi proizvodi (Khaled, 2025).

2.3. ABS

ABS (akrilonitril-butadien-stiren) je amorfni termoplastični polimer koji se sastoji od tri monomera: akrilonitrila, butadiena i stirena. ABS spada među najstarije i najpoznatije materijale korištene u industrijskom 3D ispisu, te se koristi za izradu objekata koji zahtijevaju visoku mehaničku čvrstoću, otpornost na udarce i nisko trošenje. Mehanička svojstva su glavna prednost ABS-a nad većinom drugih materijala, ima odličnu otpornost na udarce, dobru čvrstoću, visoku razinu žilavosti, visoku temperaturnu otpornost. Iako ima odlična mehanička svojstva, nedostaci ABS-a proizlaze iz težine ispisa, naime ABS zahtijeva visoku temperaturu mlaznice, postolja, te strogo kontrolirane uvjete okoline u kojoj se vrši ispis radi sprječavanja deformacije i nastajanja pukotina. Njegova svojstva

ga čine izvrsnim za primjenu u područjima koja zahtijevaju trajnost i otpornost na mehanička naprezanja, primjerice u izradi dijelova za automobile, zaštitnih kućišta za elektroniku i alate, te raznih mehaničkih komponenti (Vidakis i sur. 2020).

2.4. ASA

ASA (akrilonitril-stiren-akrilat) je amorfni termoplastični kopolimer sastavljen od akrilonitrila, stirena i akrilata. Po sastavu je veoma sličan prije spomenutom ABS-u, no prisutnost akrilata značajno povećava otpornost na vanjske utjecaje kao što su UV zrake i oksidativno starenje. Budući da je sličan ABS-u, to naravno znači da su mu i mehanička svojstva odlična, naime, ima visoku otpornost na udarce, odličnu trajnost, visoku temperaturnu otpornost, te veću čvrstoću, žilavost, bolje kemijske otpornosti i bolja otpornost na UV zrake od ABS-a. Radi svojih odličnih mehaničkih svojstava, ASA je primjenjiva u svim područjima gdje i ABS, ali uz dodatnu prednost od znatno bolje otpornosti na vanjske uvjete. Također, proces ispisa ASA materijala je znatno jednostavniji od ABS-a budući da uglavnom nije potrebna kontrola temperature okoline (osim kod ispisa većih objekata), već samo visoka temperatura mlaznice i postolja (MatterHackers, 2025).

2.5. TPU

TPU (termoplastični poliuretan) je elastomerni polimer koji pripada grupi termoplastičnih poliuretana nastalih reakcijom diizocijanata, poliola i produživača lanaca. Ova kombinacija materijalu daje odličnu fleksibilnost, otpornost na habanje, visoku elastičnost i dobru kemijsku otpornost, posebno na ulja i masti. Zbog ovih svojstava TPU se najčešće koristi za izradu fleksibilnih dijelova kao što su brtve, maskice za telefone i remenje. Naravno budući da je materijal izrazito elastičan i fleksibilan, ima relativno nisku čvrstoću u odnosu na filamente manje elastičnosti i fleksibilnosti, ali njegova sposobnost istezanja i vraćanja oblika čini ga jedinstvenim materijalom sa specifičnim poljem primjene. Postupak ispisa je relativno jednostavan, ne zahtijeva visoke temperature niti kontrolu temperature okoline kao ABS. Međutim, zbog elastičnosti i slabijeg prijanjanja slojeva, potrebno je koristiti sporije brzine ispisa te posebno voditi

računa o dobroj adheziji prvog sloja na podlozi, te se preporučuje korištenje teksturirane podloge (Massivit3D, 2022).

2.6. PA

PA (poliamid) je termoplastični polimer koji nastaje reakcijom diamina i dikarboksilnih kiselina ili polimerizacijom aminokiselina. Postoji par vrsta poliamida, ali najčešće se koriste PA6 (primijenjen u ovom radu) i PA12, od kojih svaki posjeduje različita svojstva. Poliamidi su poznati po svojim izvrsnim mehaničkim svojstvima kao što su visoka žilavost, visoka čvrstoća, odlična otpornost na habanje, visoka otpornost na kemikalije, te dobar otpor na kontinuirano dinamičko opterećenje. Radi svojih svojstava iznimno je popularan u automobilske, zrakoplovnoj i tekstilnoj industriji, gdje se koristi za izradu funkcionalnih komponenti kao što su: zupčanci, klizni ležajevi, spojni elementi, te fleksibilni dijelovi koji podnose visoka opterećenja. Proces ispisa smatra se prilično zahtjevnim, naime, materijalu je potrebna visoka temperatura mlaznice, stroga kontrola temperature okoline kao kod ABS-a, ali uz sve to potrebna je i podloga napravljena od stakla, premazana specijaliziranim ljepljivom za adheziju prvog sloja i umanjenja opasnosti od savijanja ili deformacije objekata (Immould, 2025).

2.7. PP

PP (polipropilen) je termoplastični polimer dobitven polimerizacijom propilenskih monomera, s polukristalnom strukturom koja mu daje svojstva visoke kemijske inertnosti i odlične otpornosti na vlagu. Polipropilen je karakteriziran svojom visokom fleksibilnošću, otpornošću na zamor materijala i odličnu kemijsku otpornost, ali i relativno niskom čvrstoćom u usporedbi s drugim, ne fleksibilnim materijalima. Radi ovih karakteristika, PP se često koristi za izradu ambalaže, spremnika za agresivne kemikalije, u spremnicima, u medicinskim uređajima, te automobilske industriji. Međutim, proces ispisa polipropilena veoma je zahtjevan. Potrebna je niska brzina ispisa, stroga

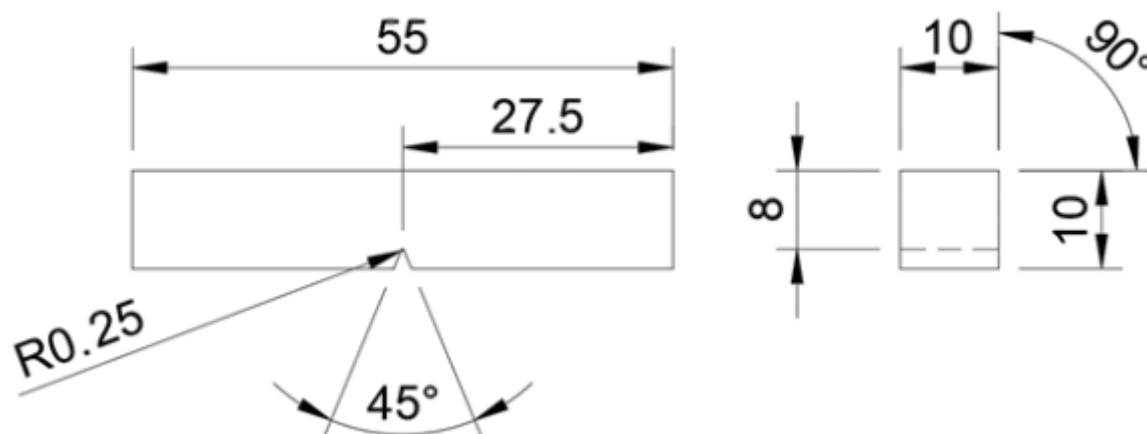
kontrola temperature okoline, visoka temperatura podloge, te je također potrebna ili specijalizirana podloga ili ljepljiva traka radi adhezije prvog sloja (McClements, 2022).

3. Ispitivanje udarne radnje loma prema Charpy-ju

Procjena žilavosti materijala, odnosno njegove sposobnosti apsorbirati energiju i oduprijeti se lomu pod naglim opterećenjem, ključna je u raznim inženjerskim primjenama, posebice u sektorima poput građevinarstva, automobilske industrije i zrakoplovstva gdje sigurnost i pouzdanost ovise o otpornosti materijala na iznenadna mehanička opterećenja (udarce). Za procjenu žilavosti materijala korišten je Charpyjev udarni test, te je provedeno ispitivanje prema HRN EN ISO 148-1 normi. Iako je izvorno razvijena za metale, Charpy metoda se uspješno primjenjuje i na ispitivanje polimera, keramike i kompozita (Pacorr Testing Instruments, 2023). Ova metodologija koristi standardizirani uzorak, oblika pravokutne epruvete s točno izrađenim V-urezom čija je svrha stvoriti kontroliranu koncentraciju naprezanja i potaknuti lom na točno određenom mjestu. Epruveta dimenzija 55x10x10 mm s V-urezom kuta 45°, dubine 2 mm, s polumjerom zaobljenja vrha ureza od 0,25 mm (kao što je prikazano na slici 1.) (ISO, 2016).

Sam postupak ispitivanja započinje postavljanjem uzorka na specijalizirani uređaj za ispitivanje udarne radnje loma. Uzorak je smješten na dva oslonca, tako da je V-urez okrenut suprotno od strane udara. Charpyjev bat, koji ima jasno definiranu masu i visinu početnog položaja, oslobađa se gravitacijom i ostvaruje udarac na sredinu uzorka, neposredno iza položaja ureza. Kinetička energija čekića prenosi se na uzorak, uzrokujući koncentraciju naprezanja na vrhu ureza, što rezultira njegovim lomom. Mjerenje količine energije koju je uzorak apsorbirao tijekom ovog procesa, a koja je potrebna za nastanak loma, izražava se u džulima (*engl. Joule, J*).

Slika 1. Nacrt epruvete



4. Metoda izrade ispitnih epruveta i postavke ispisa

Uređaj za izradu epruveta je 3D printer marke Creality K1C, koji koristi FDM metodu izrade. Konfiguracija printera je standardni "CoreXY". Veličina podloge za ispis je 220x220x250 mm. Ekstruder koristi novu vrstu mlaznice naziva "Unicorn", gdje su "hladni" i "topli" dio spojeni te time smanjuju mogućnost začepjenja. Mlaznica je standardnog promjera 0,4 mm. Sam printer je zatvorenog formata što omogućava printanje zahtjevnijih materija zbog konstantne temperature, te je opremljen ventilacijom s ugljenim filterom za smanjenje čestica u zraku (Creality, n.d.-b). Kako bi se osigurala kvaliteta pri ispisu korištena je sušilica za filament

Creality Space Pi. Sušenje je ključni korak u ovoj vrsti aditivne proizvodnje, potrebno je ukloniti vlagu iz filamenata kako bi se osigurala kvaliteta proizvoda i produžio životni vijek samog materija (Creality, bez. dat.-a). Važno je napomenuti kako su sve epruvete izrađene od 100% ispune sastavljene od zidova što osigurava bolju žilavost. Da bi se osigurala dimenzije epruveta navedenih normom odabrane su postavke preciznosti i rezolucije na srednje do najveće. Korištena je podloga s teksturom za poboljšanje prijanjanja prvog sloja tijekom 3D ispisa i posebno ljepilo za prijanjanje modela. Za svaki filament potrebni su posebni uvjeti sušenja i printanja. U tablici 1. u nastavku prikazane su karakteriske za svaki materijal kao i postavke printera i sušilice.

Tablica 1. Parametri printanja i sušenja filamenata

Filament	Temp. mlaznice [°C]	Temp. podloge [°C]	Brzina ispisa [mm/s]	Temp. sušenja [°C]	Trajanje sušenja [h]
PLA	230	50	200-300	50	4-8
PETG	250	70	200-300	60	4-8
ABS	260	100	200-300	65	8-12
ASA	260	100	200-300	65	8-12
TPU	230	35	200-300	55	4-8
PA	260	50	200-300	65	≥12
PP	240	60	200-300	55	4-8

Izvor: <https://www.creality.com/products/creality-space-pi-filament-dryer>

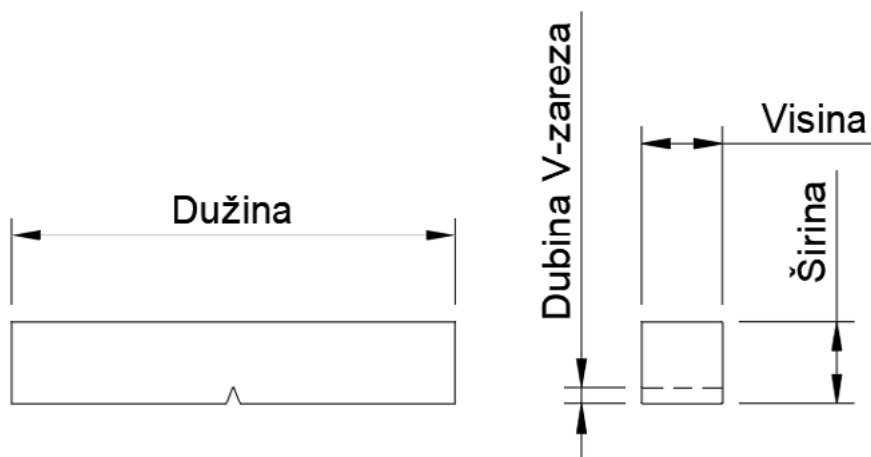
5. Opis provedbe ispitivanja udarne radnje loma

5.1. Priprema uzoraka i uređaja

Prije samog ispitivanja potrebno je odrediti dimenzije epruveta te podesiti sam stroj. Za svaku vrstu

filamenta izrađene su po 3 (tri) epruvete čije su dimenzije izmjerene kalibriranim mjerilom. U tablici 2. su prikazane srednje vrijednosti dimenzija izrađenih epruveta, te je na slici 2. prikazana skica koja ukazuje na koju veličinu se odnose izmjerene vrijednosti.

Slika 2. Prikaz dimenzijskih vrijednosti epruveta



Tablica 2: Dimenzije epruveta

Filament	Dužina [mm]	Visina [mm]	Širina [mm]	Dubina V-zareza [mm]
PLA	54,74	9,88	10,30	1,60
PETG	54,75	9,87	10,08	1,68
ABS	54,64	9,91	10,04	1,64
ASA	54,60	9,83	10,01	1,68
TPU	54,47	9,84	9,97	1,65
PA	54,79	10,08	10,86	1,67
PP	54,19	9,66	9,91	2,23

Korišteni uređaj za udarni test je Charpy njihalo Zwick RPK450. Sam uređaj ima energiju udarca od 450 J. Razlika između energije udarca i apsorbirane energije prenesene na epruvetu predstavlja žilavost materijala. Kako bi se preciznije očitali rezultati korišten je digitalni mjerač uparen s batom (ZwickRoell, bez dat.). Po smjernicama norme je potrebno izmjeriti gubitke zbog trenja bata. Dobiveni rezultati se obilježavaju kao K1, K2 i K3. Pomoću njih se izračunava faktor P koji ne smije prelaziti 0,5% nominalne energije stroja. Tijekom priprema je utvrđeno da su koeficijenti:

- K1=1,4
- K2=1,3
- K3=12

Izračunom dobivenih koeficijenata dobiva se da je kp kao gubitak energije 1,17 što zadovoljava uvjete za početak ispitivanja. Kao zadnji korak bitno je utvrditi temperaturu prostorije u kojoj se obavlja samo ispitivanje, ona je iznosila 22°C.

5.2. Provedba ispitivanja

Kako bi se započelo ispitivanje potrebno je postaviti bat u početni položaj te resetirati mjerni uređaj. Zatim se pripremljene epruvete postavljaju u prihvat pomoću samocentrirajućih hvataljki propisanih normom te sigurnosnim mjerama. Nakon toga zatvore se vrata uređaja i pričekava se zeleni indikator za početak. Ispitivanja su provedena na ukupno 3 (tri) epruvete od istog materijala, odnosno ukupno na 21 (dvadeset i jednoj) epruveti.

6. Rezultati

Nakon provedenih ispitivanja i prikupljanja ostataka ispitnih epruveta, provedena je analiza dobivenih rezultata. U nastavku su prikazane izmjerene vrijednosti apsorbirane energije loma (KV) za svaki ispitani filament te njihove srednje vrijednosti.

Rezultati se mogu povezati sa svojstvima i sastavom ispitivanih materijala. Svi analizirani čvrsti materijali pokazali su relativno slične vrijednosti, pri čemu se jedino termoplastični poliuretan (TPU) značajnije razlikovao od prosjeka. Naime, jedino uzorci izrađeni od TPU-a nisu doživjeli kritični zamor prilikom ispitivanja, nego su apsorbirali dio energije udarca savijanjem, iako je zabilježeno manje napuknuće pri korijenu V-zareza. Među neelastičnim uzorcima najveću vrijednost apsorpcije energije je pokazao materijal ASA, sa srednjom vrijednošću od 5,7 J. Na temelju dobivenih rezultata i prethodno navedenih svojstava materijala, može se pretpostaviti da ASA pokazuje poželjna mehanička svojstva, uzimajući u obzir ograničenja metode ispitivanja. Unatoč visokoj cijeni po kilogramu, ASA pruža najkvalitetnija mehanička svojstva među ispitivanim materijalima. S druge strane, popularni filament PLA i PETG pokazali su nešto slabije rezultate, no zbog svoje povoljne cijene i dostupnosti i dalje ostaju preferirani izbor među većinom korisnika. Iako se poliamid (PA) i polipropilen (PP) uobičajeno svrstavaju među tehničke polimere koji inače pokazuju dobra mehanička svojstva, u ovom istraživanju njihova relativno niska udarna žilavost može biti posljedica specifičnosti procesa aditivne proizvodnje. Možda problem leži u slojevitosti i međusobnoj adheziji istih slojeva.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Filament	KV [J]	Srednja vrijednost
PLA	1,9 1,9 1,8	1,87
PETG	1,8 1,8 1,8	1,8
ABS	4,3 4,5 4,5	4,43
ASA	6,2 5,5 5,4	5,7
TPU	8,3 8,9 8,3	8,5
PA	1,7 1,6 1,7	1,67
PP	2,8 2 1,9	2,23

7. Zaključak

U ovome radu provedeno je ispitivanje udarne radnje loma sedam različitih termoplastičnih filamenta (PLA, PETG, ABS, ASA, TPU, PA i PP) primjenom Charpyjeve metode, prema normi HRN EN ISO 148-1. Temeljem dobivenih rezultata utvrđene su značajne razlike među promatranim materijalima, što jasno ukazuje na različite mogućnosti njihove primjene u tehnologiji aditivne proizvodnje. Rezultati su pokazali da je najvišu vrijednost udarne radnje loma ostvario filament TPU (8,5 J), zahvaljujući specifičnoj molekularnoj strukturi koja mu pruža veliku elastičnost i sposobnost deformacije bez potpunog loma. Također se istaknuo filament ASA, s prosječnom vrijednošću od 5,7 J, koji osim dobre otpornosti na udar karakterizira i velika otpornost prema vanjskim vremenskim uvjetima, što ga čini pogodnim za izradu funkcionalnih dijelova koji će biti izloženi raznim atmosferskim utjecajima. Najniže vrijednosti izmjerene su za materijale PA (1,67 J) i PETG (1,8 J), što upućuje na njihovu

ograničenu primjenu kod komponenti izloženih većim udarnim opterećenjima.

Međutim, ovi filamenti zbog svojih povoljnih proizvodnih karakteristika, ekonomičnosti i dostupnosti ostaju prikladni za izradu dijelova koji ne zahtijevaju visoku otpornost na udar. Materijali koji se u tehničkoj praksi smatraju mehanički izdržljivima, poput poliamida (PA) i polipropilena (PP), pokazali su slabije rezultate od očekivanih, pri čemu je PA ostvario vrijednost od 1,67 J, a PP 2,23 J. Razlog ovih nižih vrijednosti moguće je pripisati specifičnostima procesa aditivne proizvodnje, osobito slabijoj međuslojnoj povezanosti koja može negativno utjecati na sposobnost materijala apsorbirati energiju udara. Zaključno, rezultati ovog rada pružaju jasne pokazatelje o razlici u vrijednostima udarne radnje loma različitih vrsta termoplastike korištene u aditivnoj proizvodnji, čime olakšavaju odabir prikladnog materijala ovisno o specifičnim zahtjevima budućih inženjerskih projekata. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti prema detaljnijoj analizi utjecaja parametara ispiisa, kako bi se dodatno optimizirali procesi aditivne proizvodnje.

Citirani izvori

- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Armani, M. (2017, May 1). What's the difference between PLA, ABS, and nylon? *Machine Design*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.machinedesign.com/buyers-journey/consideration/article/21835444/whats-the-difference-between-pla-abs-and-nylon>
- Berman, B. (2012). 3D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Crealty. (n.d.-a). Crealty Space Pi Filament Dryer. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.crealty.com/products/creality-space-pi-filament-dryer>
- Crealty. (n.d.-b). K1C Carbon 3D Printer. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.crealty.com/products/k1c-carbon-3d-printer>
- eSUN. (2024, December 3). The carbon fiber material family expands: Introducing PETG CF! Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://esun3dstore.com/blog/detail/the-carbon-fiber-material-family-expands-introducing-petg-cf>
- Figiel, M. (2022, June 13). The history of 3D printing – where did it start? *Botland Blog*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://botland.store/blog/the-history-of-3d-printing-where-did-it-start/>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies* (2. izd.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Immould. (2025). Nylon vs ABS: Comparison guide. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.immould.com/nylon-vs-abs/>
- International Organization for Standardization. (2016). *Metallic materials — Charpy pendulum impact test — Part 1: Test method (ISO 148-1:2016)*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.iso.org/standard/63802.html>
- Khaled, S. (2025, April 13). PLA vs ABS vs PETG: The main differences. *All3DP*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://all3dp.com/2/pla-vs-abs-vs-petg-differences-compared/>
- Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., & Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107341. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107341>
- Massivit3D. (2022, June 9). TPU filament – the good, the bad, and the ugly. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.massivit3d.com/blog/tpu-filament-the-good-the-bad-and-the-ugly>
- MatterHackers. (2025, February 11). ABS vs ASA filament in 3D printing: Durability, UV resistance and applications. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.matterhackers.com/articles/abs-vs-asa-filament-in-3d-printing>
- McClements, D. (2022, May 4). All about PP 3D printing filament: Materials, properties, definition. *Xometry Resources*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/pp-3d-printing-filament/>

- Pacorr Testing Instruments. (2023, July 29). Benefits of using Charpy impact tester for impact test. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.pacorr.com/blog/using-charpy-impact-tester-for-impact-test/>
- Protolabs Network. (n.d.). What is FDM 3D printing? Hubs Knowledge Base. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- Slusarczyk, P. (2025, March 11). 03 11 1986: Chuck Hull was granted a patent for stereolithography. The 3D Printing Journal. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://3dprintingjournal.com/2025/03/11/chuck-hull-stereolithography-patent>
- Stucker, B. (2012). Additive manufacturing technologies: Technology introduction and business implications. U R. J. Grosh, G. G. Herman, K. L. Majeski i L. C. Schmidt (ur.), *Frontiers of engineering: Reports on leading edge engineering from the 2011 symposium* (str. 5–16). National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/13274/chapter/4>
- Verdejo de Toro, E., Coello Sobrino, J., Martínez Martínez, A., Miguel Eguía, V., & Ayllón Pérez, J. (2020). Investigation of a short carbon fibre reinforced polyamide and comparison of two manufacturing processes: Fused deposition modelling (FDM) and polymer injection moulding (PIM). *Materials*, 13(3), 672. <https://doi.org/10.3390/ma13030672>
- Vidakis, N., Petousis, M., Maniadi, A., Koudoumas, E., Liebscher, M., & Tzounis, L. (2020). Mechanical properties of 3D printed acrylonitrile-butadiene-styrene TiO₂ and ATO nanocomposites. *Polymers*, 12(7), 1589. <https://doi.org/10.3390/polym12071589>
- ZwickRoell. (n.d.). Pendulum impact testers for tests on metals. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.zwickroell.com/products/products-for-impact-testing/pendulum-impact-testers-for-tests-on-metals/>

Impact fracture testing of thermoplastics

Summary

This paper reports an investigation of the impact toughness behavior of several thermoplastic filaments that are among the most widely used in additive manufacturing by fused deposition modeling. The focus of the test was on comparing the impact toughness of selected filaments using the Charpy method according to the HRN EN ISO 148-1 standard. The test included seven popular thermoplastic filaments: PLA, PETG, ABS, ASA, TPU, PA, PP. All samples used in the test were manufactured on the same 3D printing device, under identical production conditions to exclude external factors and ensure the most accurate comparison of the properties of the materials themselves. The test results provide valuable data on the difference in impact load resistance between the tested filaments, which significantly contributes to the selection of the optimal material for specific engineering projects, with the aim of increasing the reliability, safety and efficiency of final products manufactured using additive manufacturing technology.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, mechanical properties, thermoplastics, material testing

Odabir materijala za izradu vozačkog računala

Ivan Simetić^a, Dean Ivančić^b, Sanja Grbac Babić^c, Ivan Pentek^d

^a Mag. ing. mech., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, isimetic@iv.hr

^b Mag. ing. mech., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, divancic@iv.hr

^c Mag. ing. comp., viši predavač, prodekanica za nastavu i studente, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, sgrbac@iv.hr

^d Mag. ing. mech., predavač, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, ipentek@iv.hr

Sažetak

U ovom radu cilj je bio razmotriti razliku između termoplastičnih materijala (PLA, ABS i PET-G) u svrhu odabira optimalnog materijala, pogodnog za izradu kućišta vozačkog računala. Također, objašnjena su svojstva navedenih materijala za konkretnu upotrebu u okruženju u kojima bi se koristio proizvod napravljen od njih, te su ta ista svojstva rangirana prema važnosti u ovisnosti kako ih materijal zadovoljava. Navedena su i objašnjena svojstva, prednosti i nedostaci svakog materijala. Naposljetku, provedbom analize rezultata mehaničkih ispitivanja iz literature i daljnjom usporedbom prema zadanim kriterijima, koji se osim na mehaničkim svojstvima baziraju i na tehničkim i ekonomskim zahtjevima, izabran je ABS materijal za daljnji razvoj proizvoda u sklopu projekta "BusCARD 4.0 IoT."

Ključne riječi: PLA, ABS, PET-G, aditivne tehnologije, vozačko računalo

1. Uvod

Industrijska tranzicija i inovacije postavljaju nove zahtjeve pred dizajn i proizvodnju uređaja, osobito kada se radi o integraciji višestrukih funkcionalnosti u kompaktne sklopove. Projekt BusCARD 4.0 IoT predstavlja inovativni pothvat usmjeren na razvoj vozačkog računala (engl. *Driver Control Computer*, DCC) koje će se integrirati u vozila javnog prijevoza putnika i robe. Glavni cilj projekta jest stvaranje "all-in-one" sustava koji će objediniti funkcionalnosti tradicionalno raspoređene na više odvojenih uređaja, kao što su računalo, validator

karte i pisač. Projekt se provodi u sklopu poziva Ministarstva regionalnog razvoja i fondova Europske unije, a dodijeljena bespovratna sredstva podržavaju napore nositelja projekta tvrtke Penta d.o.o. te partnera Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, SUPERIUS d.o.o., DS&S d.o.o. i EINEL d.o.o. (Ministarstvo regionalnog razvoja i fondova EU, 2023).

Odabir odgovarajućeg materijala za kućište vozačkog računala igra ključnu ulogu za svojstva konačnog proizvoda u eksploataciji i trajnost uređaja. Kućište ne samo da mora osigurati mehaničku zaštitu osjetljive elektronike, već i doprinijeti

smanjenju operativnih troškova, povećanju energetske efikasnosti te poboljšanju sigurnosti i udobnosti putnika (Smith, 2021). Materijal za kućište vozačkog računala u javnom prijevozu mora prvenstveno biti otporan na udarce, vibracije i trošenje, kako bi osigurao mehaničku čvrstoću i trajnost u zahtjevnim uvjetima uporabe. Također, treba izdržavati širok raspon temperatura, biti kemijski i UV otporan te pružati zaštitu od vlage i korozije radi očuvanja funkcionalnosti i dugovječnosti uređaja. Stoga je cilj ovog rada analizirati tri najčešće korištena termoplastična materijala te na temelju njihovih mehaničkih, kemijskih i tehničkih svojstava odabrati najprikladniji materijal za izradu kućišta vozačkog računala za potrebe projekta BusCARD 4.0 IoT. U nastavku rada, nakon pregleda svojstava potencijalnih materijala, bit će detaljno objašnjen proces odabira odgovarajućeg materijala za navedenu primjenu.

U ovom radu uspoređuju se svojstva tri potencijalna materijala, polimera koja se komercijalno i učestalo koriste u proizvodnji različitih proizvoda od plastike: polilaktid (PLA), akrilonitril butadien stiren (ABS) i polietilen tereftalat glikol (PET-G), a sve u svrhu kako bi se izvršio odabir najprikladnijeg materijala za izradu kućišta vozačkog računala.

1.1. Polilaktid (PLA)

PLA je bioplastični polimer (termoplastični poliester) dobiven iz obnovljivih izvora, kao što su kukuruzni škrob ili šećerna repa. Temperatura tališta mu je 150–180°C ovisno o kristaliničnosti i aditivima, a molekulska masa mu obično iznosi 100,000–300,000 g/mol. Ovaj materijal je popularan zbog svoje ekološke prihvatljivosti, jer se u odgovarajućim uvjetima razgrađuje u okolišu. Međutim, iako je PLA jednostavan za obradu i pogodan za tzv. prototipiranje, ima relativno nisku temperaturnu otpornost i niže vrijednosti udarne radnje loma, što ga čini manje pogodnim za zahtjevnije primjene gdje su potrebna visoka mehanička svojstva (Gibson, Rosen i Stucker, 2015). S obzirom na svoje biološko podrijetlo, PLA se razgrađuje u okolišu pod određenim uvjetima, što je prednost iz ekološkog kuta, ali istovremeno predstavlja izazov u pogledu dugotrajnosti materijala u primjenama gdje je potreban dugoročni rad bez degradacije (Turner, 2016). Visoka krutost PLA također može dovesti do loma pod opterećenjem, što dodatno ograničava

njegovu primjenu u industrijskim okruženjima s visokim zahtjevima (Rasal, Janorkar i Hirt, 2010).

1.2. Akrilonitril butadien stiren (ABS)

ABS je termoplastični materijal poznat po svojoj izdržljivosti, otpornosti na udarni lom i dobroj kemijskoj stabilnosti. ABS nema jasno definirano talište jer je amorfan, ali se omekšava na 105–125°C (temperatura staklastog prijelaza ~105°C), a molekulska masa je obično 100,000–300,000 g/mol te varira zbog kopolimernog sastava. Mehanička svojstva ABS-a uključuju visoku čvrstoću, dobru elastičnost i sposobnost apsorpcije udaraca, što ga čini pogodnim za primjene u kojima se očekuju mehanička opterećenja i vibracije (Callister i Rethwisch, 2007). Kemijski gledano, ABS je otporan na mnoga otapala i agresivne medije, što je posebno važno u industrijskim primjenama gdje može doći do izloženosti različitim kemijskim tvarima. Temperaturna otpornost ABS materijala omogućava rad u širokom rasponu temperatura, iako pri vrlo visokim temperaturama može doći do deformacija. Osim toga, ABS se odlikuje dobrom obradivošću i mogućnošću precizne proizvodnje, što omogućava izradu kompleksnih geometrijskih oblika i integraciju dodatnih komponenti unutar kućišta. Upravo zbog tih svojstava, ABS je često izbor u automobilske industriji i za izradu kućišta elektroničkih sklopova (Strong, 2006).

1.3. Poli (etilen tereftalat) glikol (PET-G)

PET-G je modificirana verzija PET materijala koja posjeduje ravnotežu između čvrstoće, prozirnosti i otpornosti na udarni lom. Ovaj materijal se sve više koristi u 3D tisku i industrijskoj proizvodnji zbog svoje odlične otpornosti na udarni lom i kemijsku stabilnost (Campbell, 2018). PET-G, kao ni ABS, nema oštro talište, jer je amorfan, ali se pretađuje pri 220–250°C. Molekulska masa mu iznosi približno 30,000–60,000 g/mol. PET-G se odlikuje visokom toplinskom stabilnošću, što ga čini pogodnim za primjene gdje se očekuju promjene temperature. Međutim, u usporedbi s ABS materijalom, PET-G ima nižu čvrstoću i otpornost na dugotrajna opterećenja, što je važno razmotriti u kontekstu primjene u javnom prijevozu (Williams, 2019). Dodatno, PET-G nudi prednosti u smislu prozirnosti i estetskih svojstava, što može biti poželjno u

određenim dizajnerskim rješenjima. No, njegova obrada koristi specifične parametre temperature i brzine hlađenja, što ograničava fleksibilnost u serijskoj proizvodnji ako se uspoređuje s ABS materijalom (Dizon, 2016).

2. Ocjena svojstava potencijalnih materijala za izradu kućišta

Za podatke o mehaničkim svojstvima materijala uzeti su rezultati ispitivanja odrađenih na opremi Centra za istraživanje METRIS Istarskog veleučilišta u sklopu diplomskih radova (Slivar, 2022; Skitarelić

2024; Franković, 2024), u kojima su ispitana mehanička svojstva termoplastičnih materijala PLA, PET-G i ABS, sa svrhom usporedbe i naposljetku odabira odgovarajućeg materijala za izradu reduktora, dijela alata i upravljačke palice. U navedenim radovima od svakog materijala pripremljeno je po 3 (tri) uzorka u uvjetima tiska u kojima je temperatura prilagođena materijalu i orijentacija paralelno na silu djelovanja. Uzorci su ispitani vlačnim testom na univerzalnoj statičkoj kidalici MESSPHYSIK BETA 250, mjerenjem tvrdoće prema Vickersovoj metodi na mikrotvrdomjeru STRUERS DURAMIN 2 i mjerenjem udarne radnje loma Charpy-jevim batom ZWICK Roell RKP 450.

Tablica 1. Mehanička svojstva PLA, PET-G i ABS materijala

PLA	Vlačna čvrstoća Rm (MPa)	Tvrdoća prema Vickersu HV0,5	Udarne radnje loma Kv2 (J)
Prusa i3 MK3S	50,45	20,00	1,70
Zortrax M200	30,68	-	1,56
Prusa i3 MK2S	23,05	14,52	2,53
Creality K1C	-	-	1,87
PET-G	Vlačna čvrstoća Rm (MPa)	Tvrdoća prema Vickersu HV0,5	Udarne radnje loma Kv2 (J)
Prusa i3 MK3S	59,51	13,20	1,60
Zortrax M200	39,96	9,33	1,50
Creality K1C	-	-	1,80
ABS	Vlačna čvrstoća Rm (MPa)	Tvrdoća prema Vickersu HV0,5	Udarne radnje loma Kv2 (J)
Prusa i3 MK3S	39,79	14,28	2,70
Zortrax M200	22,32	11,83	2,46
Creality K1C	-	-	4,43

Izvor: pregledno prikazano prema više provedenih ispitivanja u sklopu diplomskih radova Slivar, 2022; Skitarelić 2024; Franković, 2024.

Tri različita ispitivanja realizirana su pomoću tri različita uređaja za 3D tisak (Slivar, 2022; Skitarelić 2024; Franković, 2024). Korišteni uređaji za potrebe izrade ispitnih uzoraka (epruveta) od navedenih materijala prikazani su u tablici 1. te su predloženi rezultati navedenih ispitivanja koji mogu poslužiti kao baza podataka na kojoj će se temeljiti odabir odgovarajućeg materijala za izradu kućišta vozačkog računala u ovom radu. U navedenim

ispitivanjima iz literature (Slivar, 2022; Skitarelić 2024; Franković, 2024), ispitne epruvete su proizvedene na isti način, odnosno istih dimenzija i ispitnih parametara što omogućuje međusobnu usporedbu materijala na temelju podataka dobivenih u navedenim radovima.

Vozila javnog prijevoza mogu biti izložena značajnim temperaturnim oscilacijama. Iako PET-G nudi dobru termalnu stabilnost, ABS također

pruža zadovoljavajuću otpornost na promjene temperature, a pri višim temperaturama osigurava minimalne deformacije, što je presudno za pouzdan rad uređaja (Strong, 2006). U industrijskim uvjetima, kućište može biti izloženo različitim kemikalijama i otapalima. ABS pokazuje izvrsnu otpornost na kiseline i lužine, čime se osigurava dugovječnost materijala unatoč mogućim agresivnim utjecajima iz okoliša (Gibson i sur. 2015).

Proces proizvodnje kućišta zahtijeva materijal koji je jednostavan za obradu, omogućava preciznu proizvodnju i integraciju dodatnih funkcionalnosti bez značajnih troškova. ABS je industrijski standard u mnogim aplikacijama zbog svoje relativno niske cijene, dostupnosti i jednostavnosti obrade, što ga čini ekonomičnim izborom za masovnu proizvodnju (Turner, 2016). Iako PLA nudi ekološke prednosti zbog svoje biorazgradivosti, u kontekstu primjene u javnom prijevozu, gdje je prioritet osigurati dugoročnu stabilnost i sigurnost, ekološki faktor dobiva manji značaj u odnosu na mehaničke i kemijske zahtjeve. Stoga, iako je PLA atraktivan s ekološkog aspekta, nedostatak visoke otpornosti na udarce i ograničena temperaturna stabilnost čine ga manje pogodnim (Rasal i sur. 2010).

Prema zahtjevima primjene kućišta vozačkog računala u javnom prijevozu, ključno je da materijal posjeduje sljedeće otpornosti, rangirane prema važnosti:

1. Otpornost na udarce i vibracije: Primarna svojstva koja osiguravaju mehaničku čvrstoću i dugovječnost uređaja, budući da se vozila često suočavaju s udarcima, vibracijama i drugim mehaničkim stresovima.
2. Otpornost na trošenje (tvrdoća): Radi utiskivanja raznih predmeta (novčići, ključevi) i rezbarjenja "grafita".
3. Temperaturna otpornost: Kućište mora izdržati širok raspon temperatura, od niskih vrijednosti u hladnim uvjetima do visokih vrijednosti uslijed sunčevog zračenja ili rada motora, bez značajnih deformacija ili gubitka svojstava.
4. Otpornost na vlagu i koroziju: Iako se radi o termoplastičnom materijalu, određena otpornost na vlagu je neophodna kako bi se zaštitile

elektroničke komponente unutar kućišta od kondenzacije, nakupljanja vlage i mogućeg korozivnog utjecaja.

5. UV otpornost: Ako je kućište izloženo sunčevoj svjetlosti, važno je da materijal održi svoje mehaničke i estetske osobine bez degradacije boje, što dodatno produžuje vijek trajanja uređaja.
6. Otpornost na otapala i kemikalije: Kućište će vjerojatno biti izloženo sredstvima za čišćenje i dezinficijensima i svakako treba razmotriti otpornost materijala na isto.

Ovakav popis prema rednom broju odražava prioritet u pogledu očuvanja integriteta i pouzdanosti sustava unutar zahtjevnih uvjeta primjene u javnom prijevozu. Kriterij 1 i 2 ispitani su u literaturi (Slivar, 2022; Skitarelić 2024; Franković, 2024), a za kriterije 3 do 6 dodjeljuju se važnost na temelju literaturnih podataka i inženjerskih razmatranja o važnosti pojedinih kriterija za eksploatacijska svojstva kad materija postane proizvod. Navedena svojstva odnose se isključivo na polimere proizvedene aditivnom tehnologijom 3D ispisa te nije preporučljivo promatrati ih kao svojstva tih polimera. Ukoliko se polimerni proizvod dobije nekim drugim proizvodnim postupkom uslijed temperature, homogenosti, brzine hlađenja i sl. važno je promatrati svojstva proizvoda od nekog polimera i ne dati sud o samom materijalu.

U uvjetima vožnje i čestih vibracija, kućište mora pružiti visoku otpornost na udarne sile i osigurati dugotrajnu zaštitu osjetljive elektronike. ABS materijal se ističe visokom otpornošću na udarce, što je ključno za očuvanje integriteta sustava u zahtjevnom okruženju (Callister i Rethwisch, 2007). Temeljem gore navedenih kriterija, ABS se odabire kao optimalan izbor za izradu kućišta, jer je prvi odabir prema otpornosti na udarce i vibracije te trošenje koji se smatraju najvažnijim svojstvima za kućište vozačkog računala. Njegova sposobnost izdržati visoke udarne sile, osigurati stabilan rad u promjenjivim temperaturnim uvjetima i pružiti dobru kemijsku otpornost čine ga idealnim materijalom za primjenu u zahtjevnom sektoru javnog prijevoza (Callister i Rethwisch, 2007; Strong, 2006). Treba uzeti u obzir kako pri ekstremno niskim temperaturama kod ABS materijala dolazi do

znatnog smanjenja žilavosti. Dodatno, ekonomski aspekti proizvodnje i dostupnost sirovina dodatno potvrđuju opravdanost ovog izbora, što je u skladu s ciljevima projekta BusCARD 4.0 IoT.

Primjena ABS materijala omogućit će integraciju certificiranih komponenti unutar "all-in-one" sustava, čime se postiže ravnoteža između inovativnosti, pouzdanosti i učinkovitosti. Industrijski procesi proizvodnje također mogu biti optimizirani za serijsku proizvodnju uz minimalne troškovne prilagodbe, što dodatno doprinosi povećanju konkurentnosti i održivosti konačnog proizvoda (Williams, 2019).

3. Zaključak

ABS materijal svojim svojstvima omogućava proizvodnju kućišta koje će učinkovito zaštititi osjetljivu elektroniku, osigurati dugotrajan rad u zahtjevnim uvjetima te doprinijeti smanjenju operativnih troškova u sektorima javnog prijevoza. Unatoč nekim ograničenjima u radu pri vrlo visokim temperaturama, prednosti ABS-a u smislu obrade, otpornosti na udarce i kemijske stabilnosti čine ga superiornim u usporedbi s PLA i PET-G materijalima. Konačno, odabir ABS materijala osigurava da inovativni koncept "all-in-one" sustava unutar projekta BusCARD 4.0 IoT zadovoljava sve ključne kriterije industrijske tranzicije i modernizacije sustava javnog prijevoza, čime se potiče regionalni razvoj i unapređenje usluga (Callister i Rethwisch, 2007; Gibson i sur. 2015).

Ovaj rad ilustrira važnost interdisciplinarnog pristupa pri odabiru materijala, gdje se tehnička, ekonomska i okolišna razmatranja moraju uzeti u obzir kako bi se donijela optimalna odluka. Prema analizi provedenoj u ovom radu, ABS materijal se preporučuje kao optimalno rješenje za izradu kućišta vozačkog računala, pružajući pouzdanost, dugovječnost i učinkovitost potrebnu za integraciju u suvremene sustave javnog prijevoza.

U daljnjem istraživanju fokus projekta stavit će se na vlastita ispitivanja svojstava radi što konzistentnijih uvjeta izrade ispitnih uzoraka i samim time bolje ponovljivosti rezultata te će navedeni rezultati omogućiti izradu prototipa kućišta vozačkog računala od odgovarajućeg materijala što je planirani rezultat projekta.

Zahvala

Projekt BusCARD 4.0 IoT je sufinanciran iz poziva "Jačanje strateških partnerstva za inovacije u procesu industrijske tranzicije" kojeg je objavilo Ministarstvo regionalnog razvoja i fondova Europske unije u sklopu Integriranog teritorijalnog programa 2021.–2027.

Citirani izvori

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Campbell, F. C. (2018). PET-G: A Comprehensive Review of its Mechanical and Thermal Properties. *Polymer Engineering Journal*, 42(3), 215–230.
- Dizon, J. R. (2016). Evaluation of 3D Printing Materials: PET-G vs. ABS and PLA. *Journal of Additive Manufacturing*, 1(2), 89–101.
- Franković, M. (2024). 3D modeliranje, izrada i test upravljačke palice za računalo. Diplomski rad. Pula: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Rasal, R. M., Janorkar, A. V., & Hirt, D. E. (2010). Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*, 35(3), 338–356.
- Skitarelić, M. (2024). Razvoj i optimizacija spojnog elementa napajanja ručnog alata. Diplomski rad. Pula: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli.
- Slivar, M. (2022). Odabir potencijalnih materijala za izradu reduktora i primjena 3D tiska u strojarstvu. Diplomski rad. Pula: Sveučilište Jurja Dobrile u Puli.
- Smith, A. (2021). *Innovations in Public Transportation Systems: Integrating Modern Technologies for Efficiency and Safety*. *Transportation Research Journal*, 15(1), 45–60.
- Strong, A. B. (2015). *Plastics: Materials and Processing* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Williams, M. (2019). Comparative Analysis of Thermoplastic Materials for Automotive Applications. *International Journal of Automotive Technology*, 20(4), 315–327.

Choosing materials for making a driver computer

Summary

The aim of this paper was to examine the differences between thermoplastic materials (PLA, ABS, and PET-G) in order to select the optimal material suitable for the production of a driver computer housing. Additionally, the properties of the aforementioned materials were explained in the context of specific usage environments in which the final product would be utilized. These properties were also ranked according to their importance and how well each material meets the requirements. The characteristics, advantages, and disadvantages of each material were listed and explained. Finally, based on an analysis of mechanical test results from the literature, and further comparison according to predefined criteria, encompassing not only mechanical properties but also technical and economic requirements, ABS was selected as the material for further product development within the framework of the "BusCARD 4.0 IoT" project.

Keywords: PLA, ABS, PET-G, additive technologies, driver computer

Razina buke u odabranim industrijskim postrojenjima na području Istarske županije i mjere zaštite na radu

Dean Ivančić^a, Igor Kegalj^b

^a Mag. ing. mech., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, divancic@iv.hr

^b Doc. dr. sc., dipl. ing., Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Tehnički fakultet u Puli, Zagrebačka 30, 52100 Pula, Hrvatska, igor.kegalj@unipu.hr

Sažetak

U ovom radu provedeno je istraživanje mjerenja buke u proizvodnim procesima u industrijskim pogonima kojim se analizira njezin utjecaj na zdravlje i radnu sposobnost radnika. Istraživanje se temelji na mjerenjima u trima različitim industrijskim postrojenjima: Tvornici stakla Pula, Tvornici duhana Rovinj i poduzeću TUBUS. Upotrijebljen je digitalni zvukomjer tvrtke Svantek (SVAN 959), a rezultati su uspoređeni s važećim zakonskim normama i pravilnicima. Na temelju dobivenih podataka analizirani su uzroci prekomjerne razine buke te su predložene tehničke, organizacijske i administrativne mjere zaštite, uključujući uporabu osobnih zaštitnih sredstava. Rad naglašava važnost periodičnih mjerenja buke i primjene suvremenih mjera zaštite kako bi se osigurao sigurniji radni okoliš.

Ključne riječi: buka, mjerenje buke, mjere zaštite od buke, zaštita na radu

1. Uvod

Problematika buke u industrijskim postrojenjima predstavlja značajan izazov s aspekta zdravlja radnika i sigurnosti na radu. Buka, definirana kao neželjeni zvuk visokog intenziteta, može uzrokovati ne samo gubitak sluha nego i druge zdravstvene komplikacije, uključujući kardiovaskularne i neurovegetativne poremećaje (Ingemansson, 1995; Klančnik, 2013). S obzirom na sve veću industrijalizaciju i tehnološki razvoj, pravilno mjerenje i kontrola razine buke postaju ključni elementi u zaštiti radnika.

Cilj ovog rada jest izmjeriti i analizirati razinu buke u odabranim industrijskim postrojenjima, usporediti ih s propisanim normama te predložiti konkretne mjere zaštite radnika. Rad se oslanja na empirijska mjerenja provedena u trima postrojenjima, a rezultati se interpretiraju prema relevantnoj literaturi i zakonskim odredbama.

2. Problem buke

2.1. Pojam zvuka i buke

Zvuk se definira kao mehaničko titranje čestica u mediju koje se širi u obliku longitudinalnih valova,

a njegova frekvencija kreće se u rasponu od 16 Hz do 20 kHz (Radanović, 1999). Buka se, s druge strane, smatra neželjenim zvukom koji ometa normalan rad i odmor, a dugotrajna izloženost visokim razinama buke može dovesti do trajnih oštećenja sluha (Ingemansson, 1995). Prag čujnosti predstavlja minimalnu razinu zvučnog tlaka koju ljudsko uho može percipirati, a područje najveće osjetljivosti kreće se između 3000 Hz i 4000 Hz (Bošnjaković, 1981). Dugotrajna izloženost buci ne samo da može uzrokovati gubitak sluha, već i pogoršati funkcije drugih organa, uzrokujući poremećaje u cirkulaciji, povišen krvni tlak, pa čak i kardiovaskularne probleme (Kirin i Lauš, 2011; Klančnik, 2013).

2.2. Zakonski okviri i mjere zaštite

Prema važećim zakonima i pravilnicima (Zakon o zaštiti na radu, NN 71/14; Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu, NN 46/08), poslodavci su obvezni osigurati radne uvjete u kojima razina buke ne prelazi propisane granice. Mjere zaštite

uključuju tehničke intervencije poput modernizacije opreme, kolektivne mjere zaštite (ugradnja fizičkih barijera) te organizacijske i administrativne pristupe koji uključuju raspoređivanje radnog vremena i uporabu osobnih zaštitnih sredstava (Varžić, 2010).

Granične vrijednosti koje propisuje pravilnik, a odnose se na izloženost buci tijekom jednog radnog dana koji traje osam sati su sljedeće:

- Granična vrijednost izloženosti $L(EX, 8h) = 87 \text{ dB(A)}$
- Gornja upozoravajuća granica izloženosti $L(EX, 8h) = 85 \text{ dB(A)}$
- Donja upozoravajuća granica izloženosti $L(EX, 8h) = 80 \text{ dB(A)}$

Postoji nekoliko kontrolnih mjera, prikazanih na slici 1, koje je moguće primijeniti kako bi se osigurala sigurnost radnika. Zaštita i sigurnost radnika traži kombiniranu primjenu tehničkih, tehnoloških, organizacijskih i medicinskih mjera.

Slika 1. Kontrolne mjere za sigurnost radnika

KOJE KONTROLNE MJERE PRIMIJENITI?



Izvor: interne prezentacije Tvornice stakla Pula

2.3. Osobna zaštitna oprema

Ušni štitnici su oprema koju radnik nosi preko ušiju, a pričvršćuju se na kacigu ili držačem na zatiljku. Upotreba ušnih štitnika se preporučuje na poslovima do kojih dolazi do kratkotrajne izloženosti

djelovanja prekomjerne buke i na poslovima na kojima dolazi do impulsne, povremene buke. Ušni čepovi izrađuju se od specijalne zaštitne vate ili poliuretanske pjene i silikona. Oni se stavljaju u ušni kanal ili ušnu šupljinu i koriste se na poslovima

kod kojih postoji trajna izloženost prekomjernoj buci (Varžić, 2010.).

3. Materijal i metode

Istraživanje je provedeno u tri industrijska postrojenja s različitim proizvodnim procesima. Za mjerenje razine buke korišten je digitalni zvukomjer tvrtke Svantek, model SVAN 959 (Slika 2), kalibriran prema normama HRN ISO 1996 i HRN EN ISO 9612:2010 (Jacobsen, Poulsen, Rindel, Gade i Ohlrich, 2009; Trbojević, 2011). Mjerenja su vršena na mjestima gdje radnici provode najviše vremena, a visina položaja uređaja za vrijeme mjerenja bila je usklađena s visinom uha radnika za vrijeme rada. Mjerenje se ponovilo dva puta te se uzela srednja vrijednost dobivenih rezultata. Dobiveni podaci su zabilježeni i uspoređeni s maksimalno dopuštenim vrijednostima propisanim za pojedine radne procese.

Analiza je obuhvatila:

- Identifikaciju područja s prekoračenjem zakonskih granica.
- Komparativnu analizu razina buke među postrojenjima.
- Procjenu učinkovitosti primijenjenih mjera zaštite.

Ekvivalentna razina buke, L_{Aeq} , je srednja energijska vrijednost koja se može izmjeriti. To je razina stalne buke koja bi tijekom određenog vremena jednako djelovala na čovjeka kao promatrana promjenjiva buka.

Zvukomjer je instrument za mjerenje razine zvučnog tlaka. Konstruiran je tako da prima zvuk na približan način kao i ljudsko uho i daje povratne informacije mjerenja zvučnog tlaka. Mikrofon pretvara zvuk u električni signal koji se širi i prolazi kroz različite filtere. Nakon toga signal se ujedinjuje i usrednjuje pomoću detektora, a rezultat se pretvara u decibele koji je vidljiv na zaslonu (Jacobsen i sur. 2009). Frekvencijsko vrednovanje zvučnog tlaka je postupak kojim se izmjerena vrijednost zvučnog tlaka približava subjektivnom osjetu i djelovanju zvuka i buke na osobu i njime se dobivaju vrednovane razine zvučnog tlaka (Trbojević, 2011.). Prije korištenja, zvukomjer se

kalibrira pomoću akustičnog kalibratora koji dolazi u paketu sa zvukomjerom.

Slika 2. Zvukomjer Svantek SVAN 959



Izvor: autorska fotografija

4. Rezultati

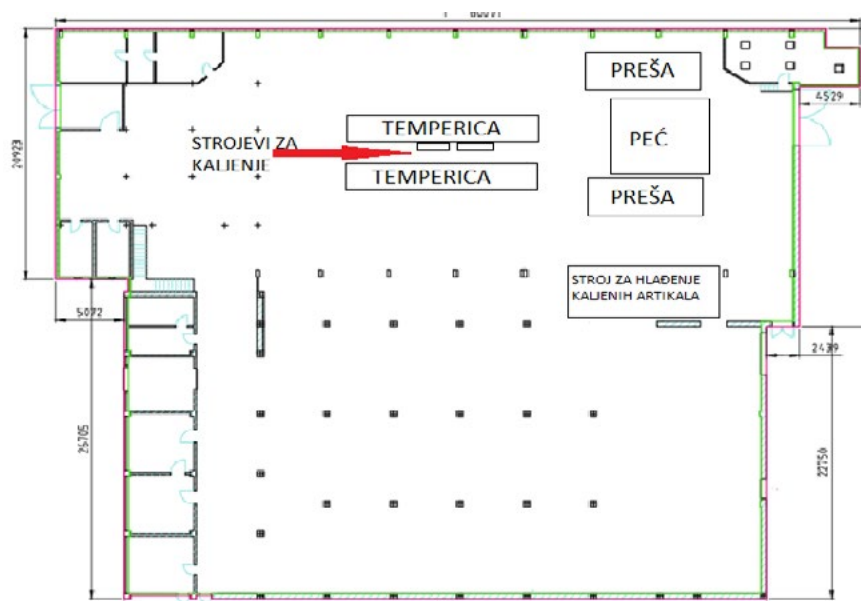
4.1. Tvornica stakla Pula

Tvornica stakla Pula je poslovna organizacija za proizvodnju i preradbu stakla sa sjedištem u Puli. Sljedbenik je Poduzeća za izradu laboratorijskog stakla – Pula, osnovanoga 1949 (Hrvatska tehnička enciklopedija, 2021.). U tvornici stakla Pula mjerenje buke provedeno je u staklani. U njoj se nalaze dvije temperice, dvije preše, dva stroja za kaljenje te peći za staklo (Slika 3.). Peć je uvijek u pogonu, dok se ostali strojevi pale ovisno o procesu rada, odnosno o artiklima koji su na programu za izradu. U tempericama se užareni stakleni produkti postupno hlade radi uklanjanja napetosti. Koriste se za sve proizvode osim kaljenih proizvoda jer se oni moraju naglo "šokirati". Kaljenju prethodi

priprema stroja za grijanje, montaža odgovarajućih plamenika i kalupa za prihvata, postavljanje artikla na prihvata na stroju za grijanje te pokretanje stroja pritiskom na dugme. Artikel se grije u zadanom vremenskom periodu, zatim se skida sa prihvata i zaustavlja rad plamenika te se postavlja

u dio za hlađenje, na stroj za hlađenje kaljenih artikala. Uključuje se ventilator i hladi artikl u zadanom vremenskom periodu. Nakon završetka hlađenja, artikl se skida sa stroja i zaustavlja se rad ventilatora. Slijedi pregled kvalitete proizvoda i spremanje artikla na paletu ili prijenosna kolica.

Slika 3. Tlocrt staklane Pula



Izvor: autorska skica pogona staklane Pula

Slika 4. Prigušnice



Izvor: autorska fotografija

Mjerenja u Tvornici stakla Pula pokazala su da su u glavnom radnom prostoru, posebno u staklani, razine buke znatno veće od dopuštenih granica. Najviši intenzitet mjerio se kod uređaja za kaljenje, gdje su dizne za hlađenje stvarale zaglušujuću buku. Uvođenjem prigušnica prikazanih na slici 4 zabilježen je pad razine buke, no ukupni prosjek i dalje je ostao iznad propisanih normi. Kako je najviša dopuštena razina buke $L_{Aeq} = 80$ dB(A) premašena, rizik za oštećenje sluha je velik i moraju se poduzeti koraci kako bi se radnici zaštitili. Poslodavac je dužan osigurati da radnici za vrijeme rada obavezno koriste zaštitne čepiće za zaštitu

sluha u skladu s Pravilnikom o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu, NN 46/08.

4.2. Tvornica duhana Rovinj (TDR)

Tvornica duhana Rovinj (TDR) je poslovna organizacija za proizvodnju duhana i duhanskih proizvoda sa sjedištem u Rovinju, osnovano 1872. godine. Od 2003. TDR je bio u sastavu Adris grupe, a od 2015. je u vlasništvu korporacije British American Tobacco. Godine 2007. proizvodni pogoni premješteni su u Kanfanar (Hrvatska tehnička enciklopedija, 2022.). U tablici 1 prikazana su mjerenja buke u proizvodnom pogonu tvornice.

Tablica 1. Mjerenja buke u proizvodnom pogonu tvornice TDR-a

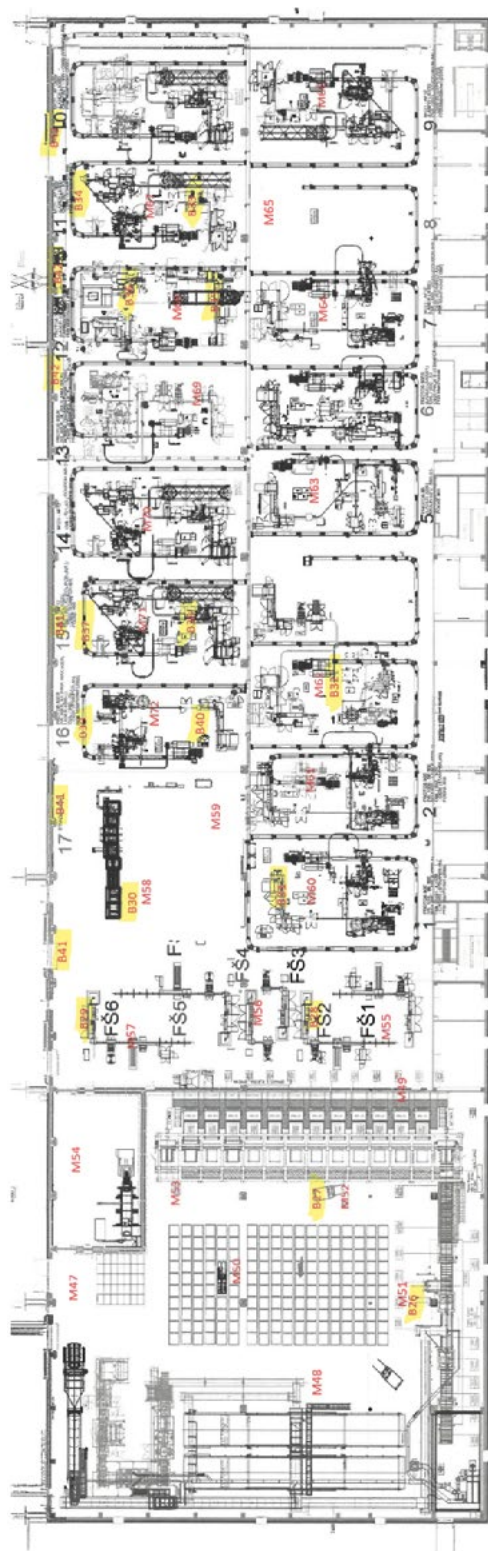
R.BR.	MJERNO MJESTO	NAJVIŠA DOPUŠTENNA RAZINA BUKE		ZADOVOLJAVJA
		IZMJERENA BUKA L_{Aeq} / dB(A)	L_{Aeq} / dB(A)	
B26	Mjerno mjesto 1	71,30	80	DA
B27	Mjerno mjesto 2	60,60	80	DA
B28	Linija za izradu filter štapića	83,33	80	NE
B29	Linija za izradu filter štapića	83,80	80	NE
B30	Magomat	82,40	80	NE
B31	Mjerno mjesto 3	83,58	80	NE
B32	Mjerno mjesto 4	83,58	80	NE
B33	Pakiranje	84,88	80	NE
B34	Izrada	82,62	80	NE
B35	Izrada	83,96	80	NE
B36	Pakiranje	80,66	80	NE
B37	Izrada	82,70	80	NE
B38	Pakiranje	80,56	80	NE
B39	Pakiranje	80,51	80	NE
B40	Izrada	84,28	80	NE
B41	Prolaz uz strojeve lijevo	77,60	80	DA
B42	Prolaz uz strojeve desno	79,80	80	DA

Istraživanje u TDR-u je otkrilo da, unatoč modernoj opremi, na određenim mjernim mjestima razina buke prelazi zakonom propisane vrijednosti. Primjerice, u proizvodnim halama, mjerenja su pokazala da je na nekoliko lokacija potrebno koristiti osobnu zaštitnu opremu, osobito u blizini

ventilacijskih sustava koji utječu na ukupnu buku. Na mjernim mjestima od B28 do B40 izmjerena buka viša je od najveće dopuštene buke s obzirom na vrstu djelatnosti koja se obavlja. S obzirom da na tim lokacijama razina buke prelazi donju upozoravajuću granicu izloženosti koja iznosi 80

dB(A) poslodavac je dužan staviti radnicima na raspolaganje osobnu opremu za zaštitu sluha u vidu ušnih čepova ili antifona, a radnicima se preporučuje korištenje osobne zaštitne opreme. Na slici 5. prikazana su mjerna mjesta u proizvodnom pogonu.

Slika 5. Mjerna mjesta u proizvodnom pogonu TDR-a

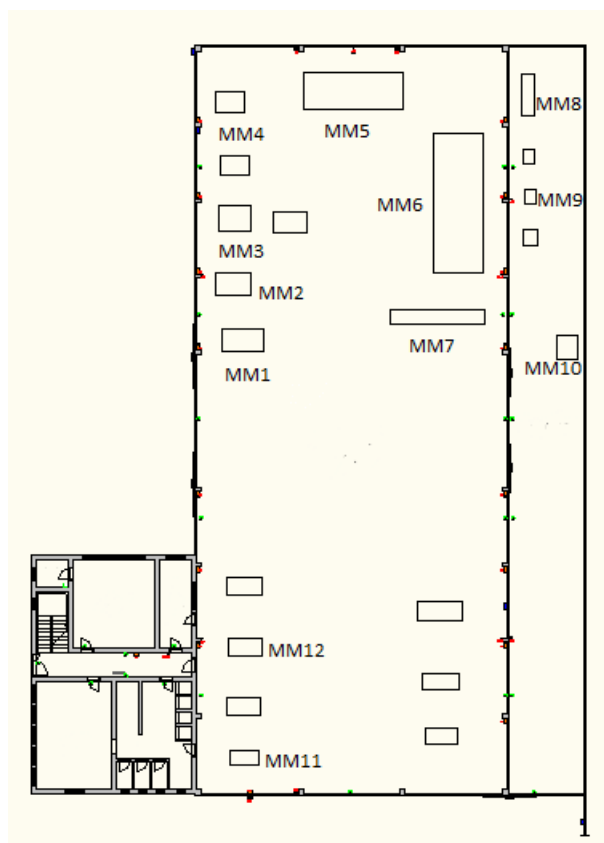


Izvor: interni dokumenti TDR-a

4.3. Tvrtka TUBUS d.o.o. - Galižana

Proizvodni pogon tvrtke TUBUS d.o.o. - Galižana, smješten je u jednoj proizvodnoj hali u Zoni male privrede u Galižani. Tamo se vrši obrada i montaža predmeta u manjim i većim serijama, odnosno pojedinačni komadi, te je takvoj djelatnosti prilagođen i pogon u kojem se na ulaznim strojevima vrši trasiranje, tokarenje, glodanje, varenje, rezanje, skošavanje i savijanje. Na slici 6. prikazan je tlocrt proizvodnog pogona sa razmještajem strojeva i mjernim mjestima za mjerenje razine buke.

Slika 6. Tlocrt proizvodnog pogona tvrtke TUBUS d.o.o. - Galižana s označenim mjernim mjestima za mjerenje razine buke



Izvor: autorska skica tvrtke TUBUS d.o.o.-Galižana

U postrojenju tvrtke TUBUS d.o.o., karakteriziranom obradom i montažom metalnih elemenata, najveći su izazivači buke strojevi za rezanje i varenje. Mjerenja su pokazala značajno prekoračenje dopuštenih granica na mjestima gdje se vrši ručna obrada, čime se naglašava potreba za dodatnim kolektivnim mjerama zaštite poput postavljanja apsorbera zvuka (Uredništvo, 2021).

Na mjernim mjestima MM1, MM5 i MM7 izmjerena ekvivalentna razina buke je ispod najviše dopuštene razine buke prema Pravilniku o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu, NN 46/08. Na mjernim mjestima MM2, MM3, MM4 i MM6 izmjerena razina buke, prema istom pravilniku, je iznad dopuštene razine i radnicima se savjetuje korištenje osobne zaštitne opreme za zaštitu sluha. Na pozicijama MM8 i MM10 razina izmjerene buke prelazi najvišu dopuštenu razinu, dok je na poziciji MM9 izmjerena razina buke ispod najviše

dozvoljene prema Pravilniku o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu, NN 46/08. Radnicima se savjetuje korištenje osobne zaštitne opreme za zaštitu sluha. Na posljednjim izmjerenim pozicijama, MM10 i MM11, gdje se obavljaju poslovi ručne obrade, izmjerena razina buke je prelazila najvišu dopuštenu razinu prema Pravilniku o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu, NN 46/08, te se stoga radnicima savjetuje korištenje osobne zaštitne opreme za zaštitu sluha od buke. U tablici 2 prikazani su izmjereni podaci za sve pozicije.

Tablica 2. Izmjerene razine buke u proizvodnom pogonu tvrtke TUBUS d.o.o.-Galižana

R.BR.	MJERNO MJESTO	IZMJERENA BUKA	NAJVIŠA DOPUŠTENA	ZADOVOLJAVJA
		L_{Aeq} / dB(A)	L_{Aeq} / dB(A)	
MM1	Valjci za savijanje limova	79,2	80	DA
MM2	Probijač lima	83,5	80	NE
MM3	Tračna pila	84,3	80	NE
MM4	Tračna pila	84,8	80	NE
MM5	Hidraulična preša	77,7	80	DA
MM6	Rezanje lima plazmom	99,1	80	NE
MM7	Hidraulične škare za rezanje lima	73,8	80	DA
MM8	Tokarski stroj	82,9	80	NE
MM9	Radijalna bušilica	78,5	80	DA
MM10	Tračna pila	83,1	80	NE
MM11	Ručna obrada (brušenje)	96,0	80	NE
MM12	Ručna obrada (rezanje)	103,2	80	NE

5. Diskusija

Analiza rezultata ukazuje na značajne razlike među postrojenjima, što je posljedica različitih tehnoloških procesa i stupnja modernizacije. U tvornici stakla Pula, starija oprema i nedostatak kolektivnih mjera rezultirali su visokim razinama buke, dok moderni pristupi u TDR-u omogućuju bolju kontrolu buke, premda su određene lokacije u pogonu i dalje problematične. Kod tvrtke TUBUS d.o.o.-Galižana, intenzivna ručna obrada dodatno povećava rizik od oštećenja sluha, čime se ističe nužnost implementacije svih dostupnih mjera zaštite. Važno je napomenuti da mjerenja

buke treba redovito provoditi, a rezultati trebaju biti transparentno komunicirani s radnicima kako bi se osigurala njihova sigurnost. Osim tehničkih rješenja, organizacijske i administrativne mjere igraju ključnu ulogu u minimiziranju štetnih utjecaja buke na zdravlje radnika (Kiran i Lauš, 2011). Osim provedbe zakonom propisanih izvida i mjerenja, kao i uvođenja zakonom propisanih mjera zaštite radnika od buke što rade u svim navedenim proizvodnim pogonima, tvrtke ulažu sredstva i u pogonsku opremu, kako bi se smanjila buka na izvoru.

6. Zaključak

Na temelju provedenog istraživanja može se zaključiti da sve tri analizirane industrijske jedinice pokazuju područja u kojima razina buke značajno prelazi zakonski propisane granice. Dok TDR, zahvaljujući modernoj opremi, pokazuje bolju usklađenost s propisima, tvornica stakla Pula i tvrtka TUBUS d.o.o.-Galižana zahtijevaju dodatne mjere zaštite.

Preporučuje se:

- Ulaganje u modernizaciju opreme i primjenu tehničkih mjera za smanjenje izvora buke.
- Implementacija kolektivnih mjera zaštite, poput postavljanja zvučnih barijera.
- Osiguranje redovite uporabe osobnih zaštitnih sredstava.
- Kontinuirano praćenje i evaluaciju razine buke u svim kritičnim radnim zonama.

Ove mjere doprinose stvaranju sigurnijeg radnog okruženja, smanjenju rizika od oštećenja sluha i poboljšanju cjelokupne radne učinkovitosti.

Citirani izvori

- Bošnjaković, R. (1981). *Redukcija buke*. Ljubljana: TOZD GOSPODARSKI VESTNIK.
- Ingemansson, S. (1995). *Zaštita od buke - Načela i primjena*. Zagreb: ZIRS.
- Jacobsen, F., Poulsen, T., Rindel, J. H., Gade, A. C., & Ohlrich, M. (2009). *Fundamentals of Acoustics and Noise Control*. Copenhagen: Technical University of Denmark.
- Kiran, S. i Lauš, K. (2011). Istraživanje razine buke u tehnološkom procesu šivanja. *Sigurnost*, 53(3), 243–250.
- Klančnik, M. (2013). Utjecaj buke na zdravlje i radnu sposobnost. *Časopis Nastavnog zavoda za javno zdravstvo*, 7(2).
- Radanović, B. (1999). *Fizikalne štetnosti – Buka* (2. izdanje). Zagreb: IPROZ.
- Trbojević, N. (2011). *Osnove zaštite od buke i vibracija*. Kalovac: Veleučilište u Karlovcu.
- Hrvatska tehnička enciklopedija (2021). Pojam "Duran d. d. (tvornica stakla u Puli)." Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Preuzeto s <https://tehnika.lzmk.hr/duran-d-d/> (pristupljeno 11. siječanj 2023).
- Interni dokumenti tvornice duhana Rovinj (TDR)
- Interne prezentacije tvornice stakla Pula
- Hrvatska tehnička enciklopedija (2022). Pojam "Tvornica duhana Rovinj d. o. o." Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Preuzeto s <https://tehnika.lzmk.hr/tvornica-duhana-rovinj-d-d/> (pristupljeno 14. siječanj 2023).
- Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu, NN 46/08.
- Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave, NN 145/04.
- Varžić, D. (2010). Primjena osobne opreme za zaštitu sluha. *Sigurnost*, 52(3), 263–274.
- Zakon o zaštiti na radu, NN 71/14.

Noise levels in selected industrial facilities in the Istrian County and occupational safety measures

Summary

This study investigates the measurement of noise in industrial production processes and its impact on workers' health and performance. Measurements were carried out in three facilities: a glass factory in Pula, a tobacco factory in Rovinj, and the TUBUS company. A digital sound level meter Svantek (SVAN 959) was used, and the results were compared with legal noise exposure standards. The study highlights the need for technical, organizational, and administrative protective measures, including the use of personal protective equipment, to ensure a safer working environment.

Keywords: noise, noise measurement, noise protection, work safety

Utjecaj tranzistora u izmjenjivačima na naponske prilike distribucijske mreže

Matej Kolarik^a

^a Mag. ing. el., predavač, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, mkolarik@iv.hr

Sažetak

Obnovljivi izvori energije čine značajan udio u ukupnoj proizvodnji električne energije. Elektrane koje proizvode električnu energiju su u velikom udjelu hidroelektrane, nuklearne elektrane i termoelektrane koje imaju generatore s rotorima koji tvore pravilan trofazani sinusoidni oblik napona i struje. Izuzevši hidroelektrane, od obnovljivih izvora energije, najzastupljenije su vjetroelektrane i sunčane elektrane koje nisu direktno povezane na distribucijsku ili prijenosnu mrežu već koriste elektronički sklop koji se naziva izmjenjivač (engl. Inverter). U radu je prikazano načelo rada izmjenjivača koristeći tranzistore kao glavni element kao i zahtjeve za kvalitetom napona koji trebaju zadovoljiti elektrane priključene na hrvatsku distribucijsku mrežu. Izmjenjivači visokim frekvencijama uključivanja i isključivanja sklopki povratno utječu na mrežu te dolazi do izobličenja sinusnog oblika napona koji može dovesti do pregrijavanja i kvara na osjetljivim trošilima, a koja su povezana na obližnju distribucijsku mrežu.

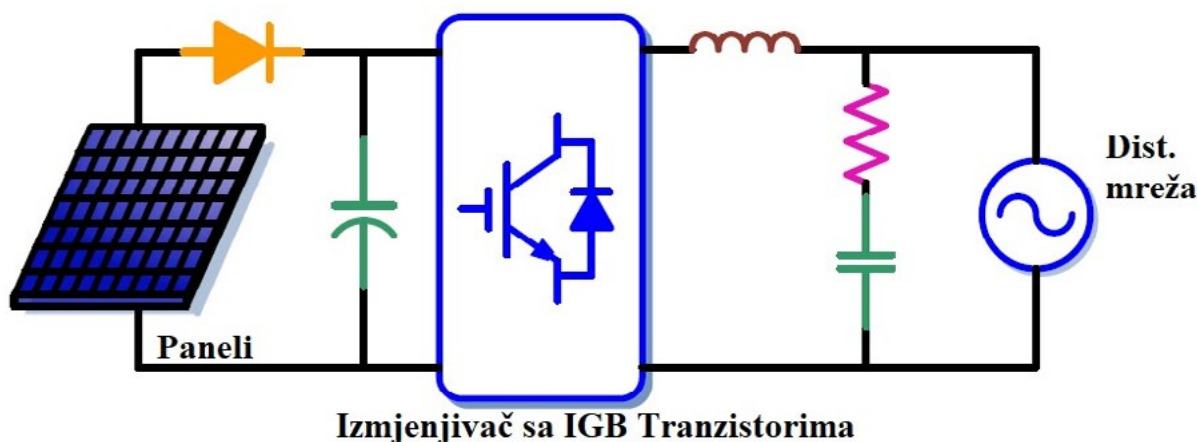
Ključne riječi: IGBT, tranzistor, kvaliteta napona, distribucijska mreža

1. Uvod

Jedan od najvažnijih oblika energije za svakodnevni život je električna energija. Osim informatičke opreme, industrije i rasvjete, električna energija se uvelike koristi za grijanje i hlađenje. Razvojem električnih vozila dodatno se povećavaju procjene povećane buduće potrošnje električne energije. Obnovljivi izvori energije sa svojim razvojem su sve učinkovitiji i zastupljeniji. Električnu energiju koja se proizvodi iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana potrebno je prilagoditi na mrežni izmjenični napon pomoću izmjenjivača. Rad prikazuje zahtjeve

koje izmjenjivači trebaju zadovoljiti te probleme koji nastaju pri korištenju tranzistora za pretvorbu istosmjernog u izmjenični napon. Na slici 1. prikazana je osnovna struktura izmjenjivača koji se povezuje na distribucijsku mrežu. Fotonaponski paneli daju istosmjerni napon te većim brojem panela napon se zbraja te izmjenjivač koji sadrži tranzistore i diode brzom pulsno širinskom modulacijom cjepka napon kako bi se prividno dobio izmjenični izvor. Na izlazu se nalaze prigušnice i kondenzatori kojima je uloga ugađivanje izlaznog napona da bude sličniji trofazno sinusnom obliku kao što u elektranama tvore generatori s rotorom.

Slika 1. Struktura osnovnog izmjenjivača za paralelni rad s distribucijskom mrežom



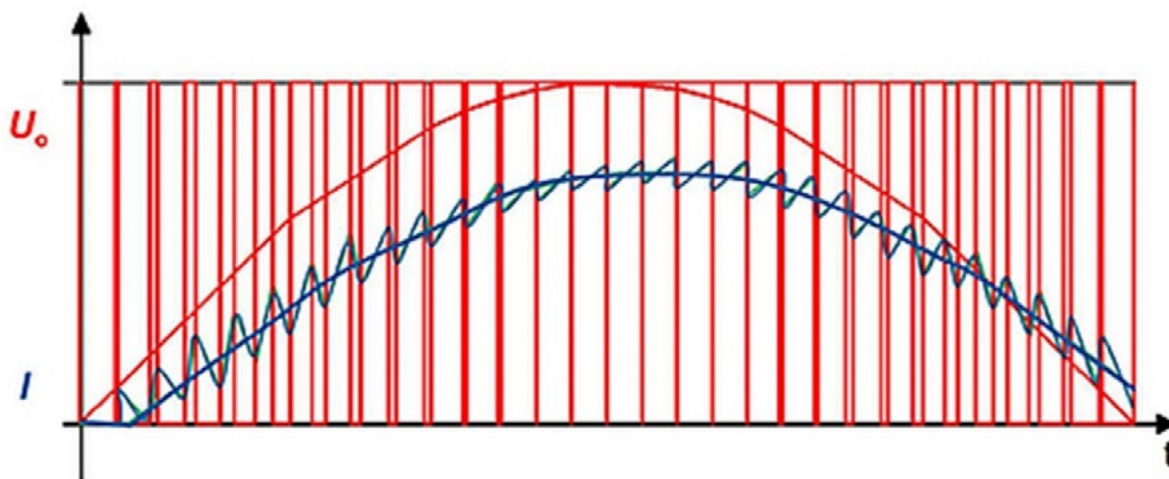
Izvor: Zeng i sur. (2013, str. 224).

2. Zahtjevi za kvalitetom napona u distribucijskoj mreži

Elektroenergetski sustavi su najveći sustavi na svijetu, a ono što ih karakterizira je nužnost iste frekvencije za svaki sustav te se stoga svi rotori elektrana okreću podjednako brzinom i kutom. Kao što je navedeno da se sunčane elektrane i vjetroelektrane ne spajaju direktno na mrežu već se koriste izmjenjivači koji visokom frekvencijom uključivanja i isključivanja tranzistora prividno tvore sinusoidni oblik napona ukoliko se gleda srednja vrijednost napona. Prema radu Chou (2008, str. 22) frekvencija uključivanja i isključivanja IGBT-a u

izmjenjivačima za sunčane elektrane koji trebaju modulirati sinusoidni napon od 50 Hz, frekvencije sklapanja tranzistora pretežito iznose 20 kHz. Na slici 2. je prikazan izlazni valni oblik napona i struje na izlazu iz izmjenjivača koji ne koristi filter. Crveni pravokutni oblik napona je različite širine, ali srednja vrijednost napona prividno tvori sinusoidni oblik napona. Plavom bojom je prikazan valni oblik struje koje poprima sinusoidni oblik. Vidljivo je kako je i valni oblik struje distorziran, ali je daleko ugađeniji u usporedbi s naponskim valnim oblikom, a to je zbog ne mogućnosti naglog prekidanja struje uslijed prijelaznih pojava u induktivitetu mreže i trošila.

Slika 2. Stvarni valni oblik struje i napona na izlazu izmjenjivača bez filtera



Izvor: Zdenković (2017, str. 23).

Problem se javlja iz razloga što veliki broj uređaja ne može funkcionirati s pravokutnim oblikom napona koji je visoke frekvencije te se dolazi do značajnih visokih harmonika koji bi posebice loše utjecali na sve električne motore, ali i na veliki broj pretvarača koji se oslanjaju na sinusoidni oblik napona frekvencija 50 Hz. Prema radu Zeng i sur. (2013, str. 225) navedeno je kako zbog nelinearnosti i reaktivnosti trošila izlazni valni oblik napona od izmjenjivača se dodatno distorzira što dovodi do većih gubitaka i pregrijavanja opreme, a kod rotacijskih strojeva dolazi do oscilacija u momentu i buke. U praksi se događa da korisnici s kućnim sunčanim elektranama imaju problema s dizalicama topline i pumpama za bazene koje se kvare zbog loših izmjenjivača kod sunčane elektrane i prisutnosti povećane harmoničke distorzije valnog oblika struje i napona.

2.1. Regulativa za utjecaj elektrana na distribucijsku mrežu

Operator distribucijskog sustava u svakoj zemlji je zadužen za praćenje i osiguravanje isporuke kvalitetne električne energije kako ne bi dolazilo do neispravnog rada industrijskih i kućanskih uređaja. Na distribucijsku mrežu povratno djeluje svaki potrošač stoga svi uređaji koji se koriste moraju biti usklađeni s brojnim normama kako ne bi utjecaj pojedinog trošila uništio preostale uređaje u blizini. Osim što potrošači utječu na distribucijsku mrežu, također i proizvođači električne energije povratno utječu na mrežu stoga svi izmjenjivači moraju biti izrađeni prema europskim normama kako bi predavali električnu energiju unutar propisanih granica.

Tablica 1. Važni pokazatelji kvalitete napona

Parametar	Granične vrijednosti	Napomena
Treperenje napona	<0,9 – kratkotrajno <0,7 – dugotrajno	Srednji napon (SN) – Čl. 38 St. 1
	<0,8 – kratkotrajno <0,5 – dugotrajno	Niski napon (NN) – Čl. 41 St. 1
Ukupno harmoničko izobličenje – THD	<6,5%	SN – Čl. 38 St. 4
	<8%	NN
Nesimetričnost napona	<1,8% Un	SN – Čl. 38 St. 7
	<0,7% Un	NN – Čl. 41 St. 3
Kolebanje napona	90-110% Un	SN
	90-110% Un	NN – 95% vremena u rasponu, a u 5% vremena može biti 85-110% Un
Frekvencija	±1%	99,5% vremena, a u 0,5% vremena može biti unutar +4% i -6%
Viši harmonici	2.h. <2% U	Prikazani su samo harmonici s većom tolerancijom koji su izraženiji u distribuciji.
	3.h. <5% U	
	5.h. <6% U	
	7.h. <5% U	
	11.h. <3,5% U	
	13.h. <3% U	

Izvor: HEP ODS (2018).

Temeljni dokument koji propisuje tehničke zahtjeve na području Republike Hrvatske su Mrežna pravila distribucijskog sustava kojeg donosi HEP

Operator distribucijskog sustava d.o.o. [HEP ODS] uz suglasnost Hrvatske regulatorne agencije.

Prema Mrežnim pravilima distribucijskog sustava (HEP ODS, 2018) koristi se više tehničkih

zahtjeva za kvalitetu električne energije te se pozivaju na nekoliko sljedećih normi:

1. HRN EN 50160 – Naponske karakteristike iz javnog distribucijskog sustava,
2. HRN EN 61000-X Razine dopuštenog povratnog utjecaja, smetnji postrojenja i instalacije korisnika mreže te metode mjerenja kvalitete električne energije,
3. HRN EN 50549 – Zahtjevi za priključak elektrane na distribucijsku mrežu.

Mrežna pravila distribucijskog sustava (2018) u poglavlju 2.4.6. definiraju Povratni utjecaj na mrežu tako da ne prelazi propisane razine za kratkotrajne promjene napona, treperenje napona, pojavu viših harmonika u struji i naponu te ometanje rada pomoćnih sustava.

U tablici 1. prikazane su najznačajnije granice koje su povezane s kvalitetom električne energije za rad izmjenjivača.

Povratni utjecaj elektrane je definiran te je nagađena tolerancija za treperenje napona koje se vidljivo primijeti na rasvjetnim uređajima i potencijalnim kvarovima na kućanskim odnosno industrijskim uređajima. Sunčane elektrane i vjetroelektrane imaju velike oscilacije u snazi što utječe na treperenje napona. Prema Rahimi i sur. (2016, str. 1) izlazna snaga sunčane elektrane može pasti za 80% uslijed prolaska oblaka odnosno pojave sjene na panelima. Nagle promjene utječu brzo na naponske prilike, na povratne tokove snaga i ostale poteškoće s kvalitetom napona.

3. Izmjenjivači za distribucijsku mrežu

Rad sunčanih elektrana odnosno sunčanih panela na svome izlazu ima istosmjerni napon (DC) kojeg izmjenjivač treba preoblikovati u izmjenični napon (AC) kako bi mogao predati električnu energiju u distribucijsku mrežu. Kao što su u prethodnom poglavlju navedena regulativna i tehnička ograničenja, postavljeni su visoki uvjeti za priključenje koji su se unazad nekoliko godina mijenjali i postalo pristupačniji za spajanje izmjenjivača na distribucijsku mrežu.

3.1. Osnovne komponente mrežnog izmjenjivača

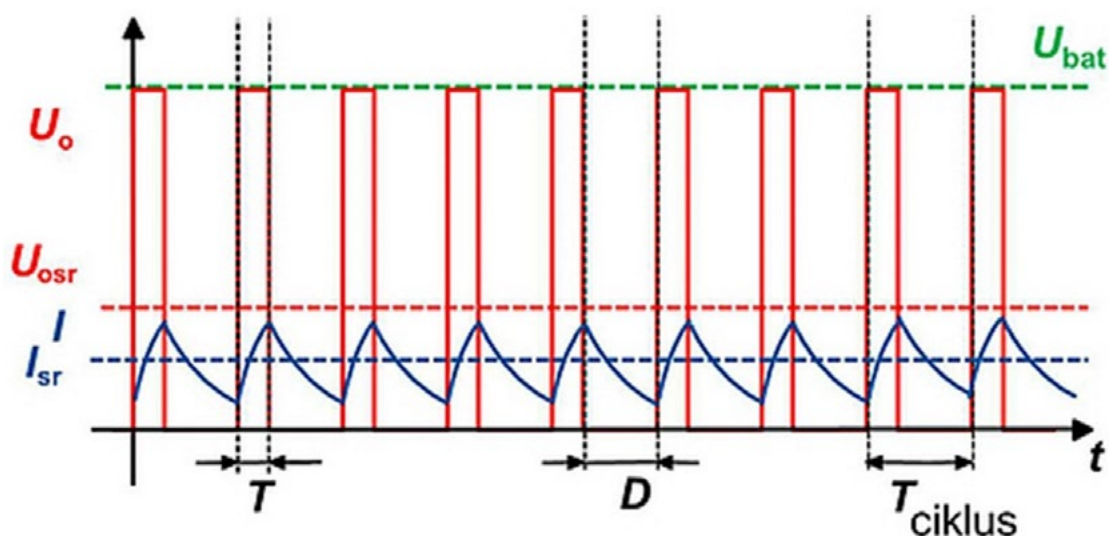
Kako bi se lakše shvatilo rad izmjenjivača, rad prikazuje osnovne i najvažnije elemente od kojih se mrežni izmjenjivač sastoji, a to su:

1. Kondenzatori za kratkotrajnu pohranu energije prije tranzistora,
2. IGBT tranzistori (engl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*),
3. Povratne diode za omogućavanje protoka struje trošila,
4. Prigušnice – filter za ujednačavanje izlaznog valnog oblika struje,
5. Kondenzatori - filter za ujednačavanje izlaznog valnog oblika napona
6. Transformator – podizanje napona i galvansko odvajanje DC i AC dijela

3.2. Princip rada izmjenjivača

Izmjenjivači korištenjem pulsno širinske modulacije (engl. *PWM – Pulse Width Modulation*) i preciznim računanjem vremena uključanja tranzistora tvore promjenjivi iznos srednje vrijednosti napona. Na slici 3. je prikazan valni oblik napona koji se nalazi na izlazu iz pojednostavljenog izmjenjivača bez filtera. Oznaka U_{osr} prikazuje srednju vrijednost napona iako je stvarni napon pravokutnog oblika i daleko veće amplitude.

Slika 3. Princip oblikovanja struje i napona pomoću tranzistora i modulacije

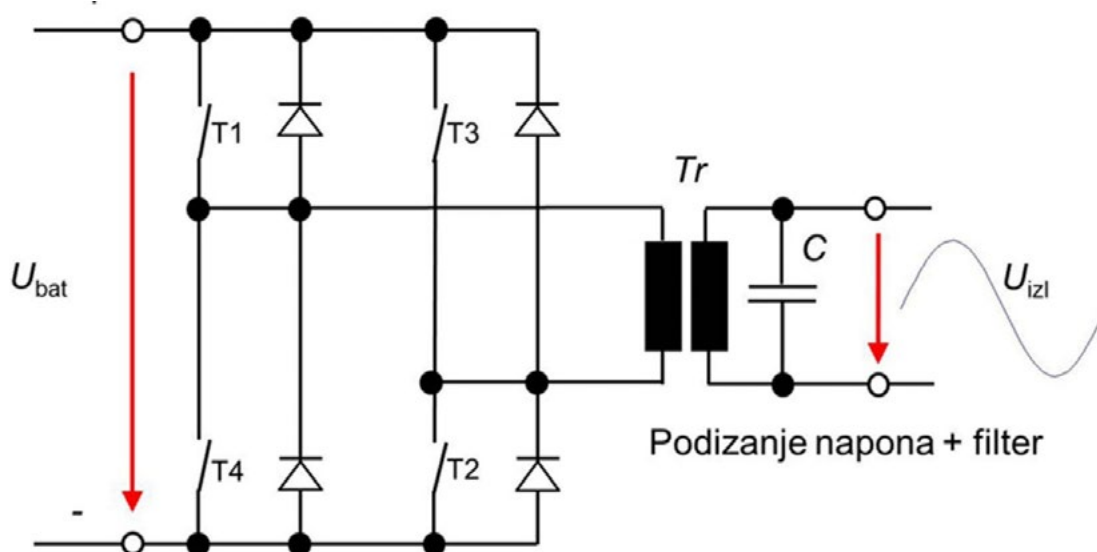


Izvor: Zdenković (2017, str. 23).

Za moduliranje izmjeničnog napona iz istosmjernog napona koristiti se sljedeća konfiguracija na slici 4. Sklopke T1 do T4 označavaju četiri bipolarna tranzistora s izoliranim vratima za upravljanje sklopkom. Tranzistorom se upravlja pomoću naponskog nositelja signala stoga je omogućena visoka frekvencija upravljanja i manje zagrijavanje tranzistora odnosno učinkovitija izmjena napona.

Izolacijski transformator se koristi za galvansko odvajanje AC i DC kruga te podizanje napona što je korisno ukoliko ne postoji veliki broj fotonaponskih panela. Transformator zbog svojeg induktiviteta djelomično filtrira više harmonike struje, a kondenzator se ponaša kao niskopropusni naponski filter, sve kako bi izlazni napon bio u propisanim granicama iz prethodnog poglavlja.

Slika 4. Konfiguracija izmjenjivača sa sinusnim valnim oblikom izlaznog napona

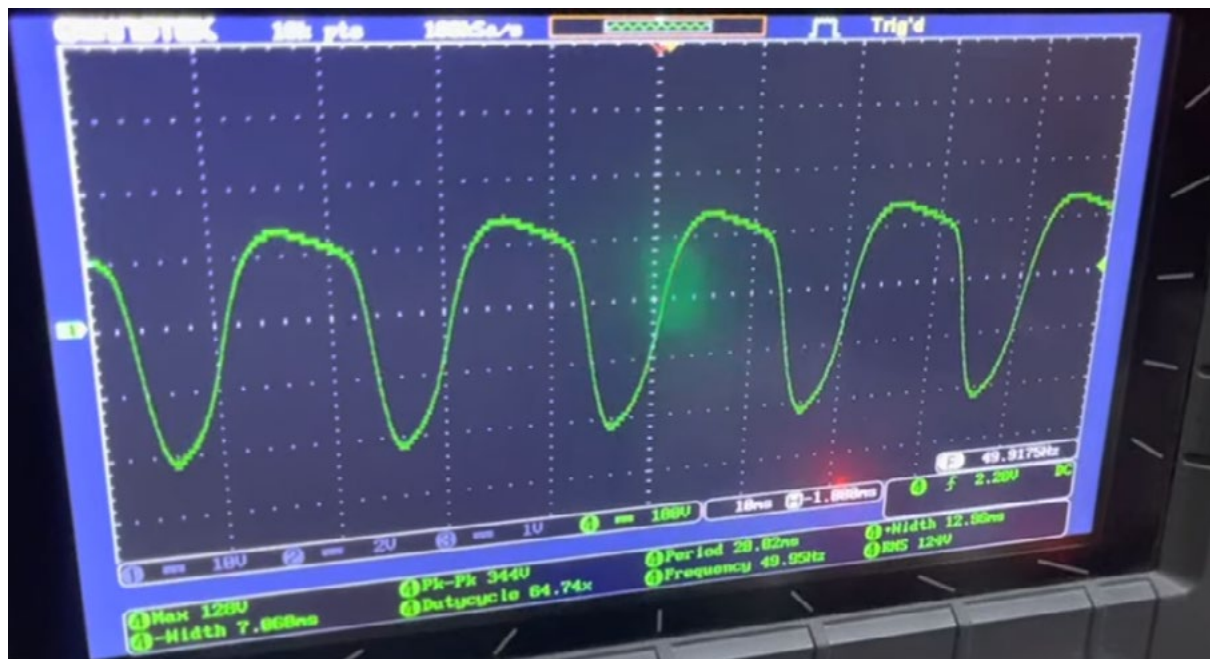


Izvor: Zdenković (2017, str. 25).

Renomirani proizvođači mrežom vođenih izmjenjivača usavršavaju odabir topologije izmjenjivača i komponenti te prema uputama proizvođača ABB postižu učinkovitost izmjenjivača iznad 98% (ABB, 2017), ali većina proizvođača deklarira da je utjecaj na ukupno harmoničko izobličenje ispod 3% što zadovoljava mrežna pravila od 8% odnosno 6,5%

za srednji napon, ali i dalje ne uspijevaju značajnije suzbiti harmoničko izobličenje. Na slici 5. prikazan je valni oblik napona amaterskog izmjenjivača s IGBT tranzistorima i filterima na izlazu. Vidljivo je da valni oblik sadrži šum i nepravilnog je sinusnog oblika zbog značajnih viših harmonika.

Slika 5. Osciloskopski prikaz izlaznog napona izmjenjivača s IGBT-ima



Izvor: Mondal (2023).

Zbog važnosti održavanja kvalitete napona unutar propisanih granica, za elektrane snage iznad 500 kW postavljaju se uređaji za trajno mjerenje kvalitete napona kako ne bi došlo do oštećenja opreme kod drugih korisnika. Trajnim mjerenjem kvalitete napona jednostavno je utvrditi utjecaj elektrane na mrežu te utjecati na proizvođača da poduzme korektivne mjere.

4. Zaključak

Izmjenjivači sa svojim radom utječu povratno na distribucijsku mrežu. Sve većom zastupljenosti sunčanih elektrana u mreži dolaziti će do više slučajeva kvara opreme u kućanstvima i u industriji. Preporuka je koristiti izmjenjivače od poznatih proizvođača opreme koji jesu nešto skuplji, ali neće utjecati na uređaje u blizini. Većom zastupljenosti izmjenjivača očekivano je da će se način filtriranja izlaznog napona usavršiti te da će se smanjiti negativni povratni utjecaj na mrežu. Pred operatorom distribucijskog sustava je izazovna budućnost u pogledu kontroliranja napona po dubini niskonaionske mreže te utvrđivanja štetnosti izmjenjivača na potrošače električne energije.

Citirani izvori

- ABB (2017). *Product Manual PVS-100/120-TL*, Revizija H, izdanje 12. 12. 2017.
- Chou, W. (2008). *Choose Your IGBTs Correctly for Solar Inverter Applications*. *Power Electronics Technology* (Elektrotehnički časopis međunarodne energetske istraživačke tvrtke Infineon Industries), str. 20-23. Dostupno na: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/60/54/infineon-choose-your-igbt-correctly-for-solar-inverter-applications-article-en.pdf?fileId=5546d462533600a4015356926b322b5f>
- HEP Operator distribucijskog sustava (2018). *Mrežna pravila distribucijskog sustava NN 74/18*, 52/20.
- Mondal, S. (2023). *IGBT Based Pure Sine Wave Inverter*. Preuzeto 4.8.2025. s <https://www.youtube.com/watch?v=6n5NGR04IMc>
- Rahimi, K., Mohajeryami, S., & Majzoobi, A. (2016). *Effects of Photovoltaic Systems on Power Quality*, *North American Power Symposium (NAPS)*, p. 1-6. Conference held in Denver (CO, USA), 18-20 September 2016., DOI: 10.1109/NAPS.2016.7747955.
- Zdenković, J. (2017). *Autonomni izmjenjivač (inverter)*. *Burza nautike* (Nautički časopis i informativni portal), str. 20-25.
- Zeng, Z., Yang, H., Zhao, R., & Cheng, C. (2013). *Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review*. *Renewable and Sustainable Energy Review* (Međunarodni časopis namijenjen publiciranju istraživanja u području obnovljivih izvora energije), 24, 223-270, DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.033.

The effect of transistors in inverters on power quality in the distribution grid

Summary

Renewable energy sources make up a large share of the electricity produced. Power plants that produce electricity are largely hydro power plants, nuclear and thermal power plants that have generators with rotors that create a true three-phase sinusoidal voltage and current form. Excluding hydro power plants, the most common renewable energy sources are wind power plants and solar power plants that are not directly connected to the distribution or transmission grid but use an electronic circuit called an inverter. The paper presents the principle of operation of an inverter using transistors as the main element and the power quality requirements that power plants connected to the Croatian distribution grid must meet. Inverters have a negative effect on the grid due to the high frequencies of transistors turning on and off, resulting in a distortion of the sinusoidal voltage waveform that can lead to overheating and failure of sensitive devices connected to the nearby distribution grid.

Keywords: IGBT, transistors, power quality, distribution grid

Životni ciklus projekta na primjeru projekta “Poduzetnički inkubator Barban”

Edo Cetina^a, Andi Kalčić^b

a Mr. sc., dipl. oec., predavač, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, ecetina@iv.hr

b Mag. oec., načelnik Općine Barban, Hrvatska, andi.kalcic@gmail.com

Sažetak

Ovaj rad istražuje faze životnog ciklusa projekta kroz studiju rekonstrukcije “Poduzetničkog inkubatora Barban”. Cilj analize je primjena teorijskog okvira životnog ciklusa projekta na konkretan slučaj. U uvodu je definiran pojam projekta i projektnog menadžmenta, uz isticanje značaja razumijevanja njegovih faza za uspješnu realizaciju ciljeva. Glavni dio rada obuhvaća detaljnu analizu faza: iniciranja, planiranja, provedbe, nadzora i zatvaranja projekta, s posebnim osvrtom na specifične izazove i korištene metode upravljanja. Svaka faza prikazana je kroz ključne aktivnosti, identifikaciju rizika i primjenu relevantnih alata, analize rizika i strategija upravljanja resursima. Rezultati istraživanja potvrđuju da je sustavno upravljanje životnim ciklusom ključno za uspješnu provedbu projekata. Naglašena je važnost pravovremenog prepoznavanja i rješavanja izazova te kontinuiranog praćenja napretka. Dobivena saznanja mogu poslužiti kao orijentir za buduće projekte u području poduzetništva i razvoja lokalne zajednice, doprinoseći boljoj uporabi resursa i ispunjavanju ključnih ciljeva. Studija slučaja potvrdila je značaj koordiniranog i sveobuhvatnog vođenja svih faza projekta kako bi se ostvario planirani ishod.

Ključne riječi: projekti, projektni menadžment, poduzetnički inkubator Barban, poduzetnička infrastruktura

1. Uvod

Projekti predstavljaju temeljni instrument za ostvarenje strateških ciljeva unutar suvremenih organizacijskih sustava. Efikasno upravljanje projektima zahtijeva temeljito poznavanje i primjenu teorijskog okvira životnog ciklusa projekta, koji obuhvaća niz međusobno povezanih faza neovisno o prirodi i složenosti samog projekta. Detaljna analiza svake faze životnog ciklusa omogućuje

sveobuhvatno razumijevanje dinamike projektnog upravljanja te identifikaciju ključnih determinanti uspješnosti provedbe projekta. U ovom radu definiran je pojam projekta te projektnog menadžmenta, a također su pojašnjene ključne faze životnog ciklusa projekta: inicijacija, planiranje, provedba, nadzor, kontrola te zatvaranje projekta, naglašavajući njihovu povezanost. Ishod projekta, bilo uspješan ili ne ovisi o svakoj pojedinoj fazi, pri čemu je svaka od njih jednako važna za ostvarenje

postavljenih ciljeva. Projektne faze zajedno čine lanac u kojem svaka mora biti provedena kako bi omogućila početak sljedeće. Uspješnost svake naredne faze uvelike ovisi o kvaliteti provedbe prethodne, pri čemu se neke faze mogu i preklapati te odvijati paralelno. Cilj ovog rada je analizirati životni ciklus projekta na primjeru uspješno provedenog projekta "Poduzetnički inkubator Barban". Ovaj projekt je odabran kao primjer zbog važnosti u poticanju i razvoju poduzetništva na primjeru razvoja lokalnih zajednica te kao takav analizira i pruža uvid u faze životnog ciklusa projekta. Pinto i Slevin (1988) navode da su pokušaji razumijevanja procesa upravljanja projektima, a koji uključuje uspješnu implementaciju projekata u organizacijama, predstavljaju problem koji kontinuirano brine i zanima kako istraživače, a tako i voditelje projekata.

Slika 1. Faze životnog ciklusa projekta



Izvor: Kissflow (2025).

Za razliku od rutinskih i stalnih poslovnih procesa, projekti su privremeni i jasno vremenski ograničeni, često s jedinstvenim ishodom. Upravo zato, upravljanje projektima zahtijeva posebne metode, alate i pristupe. Glavni cilj projektnog menadžmenta je omogućiti uspješnu realizaciju zadataka, uz optimalnu upotrebu dostupnih resursa – ljudskih, materijalnih i financijskih. Ključne komponente uključuju postavljanje ciljeva, procjenu rizika, izradu vremenskog plana, praćenje napretka i pravovremenu prilagodbu ako dođe do odstupanja od plana. U praksi, projektni menadžeri moraju vješto koordinirati timove, komunicirati sa svim dionicima, donositi odluke pod pritiskom te osigurati da se projekt dovrši na vrijeme i unutar budžeta. Sve više organizacija prepoznaje važnost ovakvog upravljanja, posebno u kontekstu promjenjivog tržišta, gdje su brzina i učinkovitost ključne za opstanak i rast.

Zekić (2008, str. 8-9) naglašava da po završetku razvoja novog proizvoda, dolazi faza eksploatacije

1.1. Izvori i metode istraživanja

Prilikom istraživanja i pisanja ovog rada korištena je stručna literatura koja je usko povezana sa temom rada – knjige, znanstveni i stručni članci, internetski izvori, ali i projektna dokumentacija projekta Poduzetnički inkubator Barban – investicijska studija, poziv na dostavu projektnih prijedloga, prijava projekta.

2. Projektni menadžment

Projektni menadžment obuhvaća sve aktivnosti povezane s pokretanjem, planiranjem, izvršavanjem, nadzorom i završetkom jednog konkretnog zadatka ili cilja, koji se naziva projekt. Pritom se glavne skupine projektnih aktivnosti nazivaju fazama životnog ciklusa projekta (Slika 1.).

koja uključuje proizvodnju, plasman na tržište, širenje tržišnog udjela, generiranje prihoda i dobiti te ostvarenje dodatnih poslovnih ciljeva. Projekt je nastojanje transformacije nezadovoljavajućeg u zadovoljavajuće stanje u okviru determiniranog vremena s danim ograničenim resursima (Cleland i Gareis, 1994, str. 8). Vodeća svjetska organizacija za standardizaciju primjene projektnog menadžmenta, Project Management Institute, u vodiču za projektni menadžment definira projekt kao privremeno nastojanje da se stvori jedinstven proizvod ili usluga (Project Management Institute, 2000, str. 6)

Svaki projekt ima svog naručitelja ili klijenta koji očekuje da krajnji rezultat bude ostvarenje njegovih zamisli u visokoj kvaliteti. Da bi realizacija projekta bila uspješna i usklađena s očekivanjima klijenata, ključno je detaljno isplanirati aktivnosti te ih uravnotežiti s dostupnim proračunom, raspoloživim resursima i vremenskim okvirom u

kojem projekt mora biti završen. Na realizaciju i ishod projekta utječu brojni čimbenici koji mogu potjecati iz unutarnjeg okruženja organizacije (poput ljudskih i financijskih resursa, organizacijske i upravljačke strukture) ili iz njezine vanjske okoline (uključujući gospodarske, pravno-političke, tehnološke, ekološke i socio-kulturne aspekte). Svaki projekt nosi svoje posebnosti – razlikuju se po aktivnostima, budžetu i rokovima – no svi imaju zajednički cilj: transformaciju postojećeg stanja u željeno, odnosno pretvaranje ulaznih elemenata u korisne rezultate.

2.1. Projekt – ciljano i ograničeno djelovanje

Projekt kao ograničen proces s jasnim ciljem stvaranja jedinstvenog proizvoda, usluge ili rezultata. Svaki projekt ima jasno definiran početak i kraj. Projekt završava kada su planirani ciljevi ostvareni, kad se ustanovi da ih nije moguće postići ili kad nestane potreba za njegovom provedbom, što dovodi do njegova prekida. Pojam "privremen" ne podrazumijeva nužno kratko trajanje; određeni projekti mogu potrajati i nekoliko godina. Bez obzira na trajanje, svaki projekt ima jasno određen vremenski okvir.

Također, privremeno se obično ne odnosi na usluge, proizvode i rezultate stvorene projektom. Naime, u većini slučajeva projekti imaju za cilj ostvariti dugoročne rezultate. Projekti nerijetko uzrokuju društvene, gospodarske i okolišne posljedice koje sežu znatno dalje od samih aktivnosti unutar projekta. Upravo zato je važno još u fazi planiranja uzeti u obzir širi kontekst i moguće dugoročne utjecaje koje projekt može imati na zajednicu i okolinu.

Privremena priroda projekata može se odnositi i na druge aspekte:

- Prilike su obično privremene – projekti imaju vremenski okvir u kojem će proizvoditi svoje proizvode.
- Projektni timovi, kao radne jedinice, obično ne traju nakon završetka projekta – timovi koji su formirani za izvršenje projekta obavljaju svoj zadatak i potom se raspadaju, a članovi se raspoređuju na druge zadatke.

Projekt stvara jedinstvene rezultate, koji mogu biti:

- Proizvod razvijen tijekom projekta – može se kvantificirati i može predstavljati krajnji ishod ili biti dio rezultata projekta.
- Usluge koje unapređuju proizvodnju ili distribuciju.

Ukratko, "privremeno" kod projekta ne znači samo da on ima početak i kraj, već da su i sve njegove komponente – strukture, ciljevi, resursi i odnosi – oblikovane isključivo za tu svrhu i to vremensko razdoblje. Jedinstvenost rezultata projekta ključna je karakteristika. Na primjer, mnogi softverski alati su razvijeni, ali svaki pojedini alat je jedinstven jer se razlikuje po funkcionalnostima, korisničkom sučelju, tehnologijama koje koristi i pristupu razvoju.

Sustavni pristup projektu ističe važnost gledanja na svaki projekt kao na proces u kojem se inputi, odnosno potrebe i želje, pretvaraju u konačni rezultat koji zadovoljava ta očekivanja. Svaki projekt zahtijeva specifičan dokument koji jasno definira potrebu ili željeni cilj koji se želi postići provedbom projekta. Tijekom trajanja projekta, mogu se razvijati i nove potrebe, uslijed promjena u željama klijenta ili njegovoj percepciji tržišnih uvjeta. Bilo bi prejednostavno kada bi klijent točno znao što želi, no stvarnost je često drugačija. Stoga će tijekom projekta biti nužno da voditelj projekta i njegov tim tumače te potrebe. Potrebe i želje klijenata često uključuju određena ograničenja koja utječu na brzinu, složenost i konačnu uspješnost projekta. Ova ograničenja često dolaze izvan samog projekta, poznata kao vanjski faktori, na koje se projektni tim mora prilagoditi kako bi osigurao kvalitetan ishod koji zadovoljava očekivanja klijenta.

Outputi određenog projekta jesu zadovoljenje određenih ideja, potreba i želja klijenta, a mogu biti vidljivi ili nevidljivi, jasni ili nejasni, jednostavni ili kompleksni proizvod i/ili usluga. Na primjeru projekta izgradnje poduzetničkog centra Barban, glavni planirani i ostvareni outputi jesu (Općina Barban, bez dat.):

- rekonstruirana i opremljena jedna građevina u vlasništvu Općine Barban
- izgrađen kapacitet infrastrukture za osam poslovnih ureda

- dvije postojeće tvrtke koriste infrastrukturu
- dvanaest novih tvrtki koristi infrastrukturu
- jedna poduzetnička potporna institucija koristi infrastrukturu
- popunjenost infrastrukture preko 76,38% u 2022. godini.

Očekuje se da će realizacija projekta imati širi utjecaj na lokalnu zajednicu:

- rješavanje problema nepostojanja poduzetničkih potpornih institucija
- poticanje razvoja i osnivanja novih tvrtki, posebice poduzetnika početnika
- doprinos razvoju poduzetništva na lokalnom području
- transfer znanja i tehnologije između novih poduzetnika
- zadržavanje mladih obrazovanih ljudi i dodatno zapošljavanje
- povezivanje s gospodarskom zonom Barban-Krvavci

3. Životni ciklus projekta "Poduzetnički inkubator Barban – Centar poduzetničke kreativnosti"

U 2016. godini, nakon provedbe odgovarajućih analiza, Općina Barban započela je s pripremom projektne dokumentacije za inicijativu pod nazivom "Poduzetnički inkubator Barban – Centar poduzetničke kreativnosti". Projekt je prijavljen na natječaj "Razvoj poslovne infrastrukture", a njegova ukupna vrijednost iznosila je 2.624.674,33 kuna. Od tog iznosa, čak 97,4% odnosno 2.554.440,48 kuna, osigurano je kroz bespovratna sredstva Europske unije, konkretno iz Europskog fonda za regionalni razvoj. Projekt je uspješno realiziran, a rezultat je otvorenje modernog poduzetničkog inkubatora s ukupno osam opremljenih ureda, smještenog u mjestu Šajini, u općini Barban. U nastavku rada, temeljem prethodno iznesenih teorijskih okvira i tvrdnji, detaljnije se razmatraju pojedine faze životnog ciklusa ovog projekta kroz konkretnu analizu njegova razvoja (Općina Barban, bez dat.).

Faza iniciranja se može podijeliti na sljedeće podfaze:

- definiranje projekta i ključnih dionika
- izrada investicijske studije

3.1. Definiranje projekta

Na početku faze iniciranja provedena je analiza financijskih mogućnosti Općine Barban za moguću realizaciju projekta, kao i analiza tržišta, koja je uključivala prepoznavanje postojećih problema i nedostataka. Utvrđeno je da na širem području ne postoji nijedan poduzetnički inkubator, što je ukazalo na potrebu za njegovim osnivanjem. S druge strane, analiza financijskih kapaciteta pokazala je da Općina Barban raspolaže s dovoljnim proračunskim sredstvima za sufinanciranje projekta. Na temelju ove analize i najave objave Poziva za dostavu projektnih prijedloga od strane Ministarstva poduzetništva i obrta, općinska uprava je odlučila nastaviti s razradom projektne prijave. Glavni cilj ovog projekta bio je osnivanje Poduzetničkog inkubatora na području Općine Barban te poboljšanje dostupnosti poduzetničko-poslovne infrastrukture za male i srednje tvrtke u Općini Barban, kako bi se olakšao njihov rast i razvoj, privukle investicije te stvorile mogućnosti za otvaranje novih radnih mjesta. U sklopu projekta planirana je rekonstrukcija i opremanje zapuštene zgrade stare škole u Šajinima te njezino pretvaranje u 8 poslovnih ureda, koji će kasnije biti na raspolaganju za 14 tvrtki ("Poduzetnički inkubator Barban – Centar poduzetničke kreativnosti", 2016, str. 12).

3.2. Metodologija

U stručnom radu korištena je kombinirana metodologija koja uključuje analizu sekundarnih izvora i studiju slučaja. Autori su se primarno oslanjali na stručnu literaturu, znanstvene i stručne članke, kao i na službene dokumente projekta "Poduzetnički inkubator Barban", uključujući investicijsku studiju, prijavu projekta i dokumentaciju s javnog poziva. Analiza je provedena kroz faze životnog ciklusa projekta: inicijacija, planiranje, provedba, nadzor i zatvaranje. Kroz studiju slučaja analizirani su konkretni postupci provedeni u svakom koraku, uključujući identifikaciju dionika, provedbu javne nabave, upravljanje rizicima i evaluaciju

rezultata. Također je korišten deskriptivni pristup radi prikaza procesa i aktivnosti, uz komparaciju teorijskih modela s praktičnom primjenom. Time je metodologija omogućila evaluaciju učinkovitosti upravljanja projektom u realnim okolnostima.

3.3. Izrada investicijske studije

U ovoj fazi vanjski stručnjak izradio je investicijsku studiju koja obuhvaća sve tehničke aspekte projekta, pružajući čvrstu osnovu za odluku o nastavku njegove realizacije. Studija sadrži detaljne informacije o projektu, prijavitelju, projektnim partnerima, suradnicima i članovima tima zaduženog za provedbu, kao i ostalim dionicima. Osim toga, investicijskom studijom nastojali su se prikazati troškovi i koristi provedbe projekta, analizirati tržište te identificirati ključni problemi koji su potaknuli njegovo pokretanje.

U investicijskoj studiji za Poduzetnički inkubator Barban provedena je detaljna analiza tržišta i problema, čiji su ključni zaključci bili sljedeći (Centar za ulaganja Eurokonzalting, 2016, str. 19) :

- U Općini Barban i širem okolnom području ne postoje institucije koje pružaju podršku poduzetnicima, a isto vrijedi i za susjedne općine (Svetvinčenat, Gračišće, Pićan, Raša, Žminj, Marčana).
- Na području središnje Istre ne postoji nijedan poduzetnički inkubator. Postojeći inkubatori smješteni su u većim gradovima poput Pule i Rovinja, koji su znatno udaljeni, a prostori su često potpuno popunjeni. Svake se godine osniva veliki broj novih tvrtki, područje zaostaje u primjeni naprednih poduzetničkih metoda i globalnih trendova. Postojeći inkubatori preferiraju poduzetnike s inovativnim projektima i novim tehnologijama, no postoji manjak potrebnog znanja i iskustva u primjeni razvojnih metoda novih proizvoda i usluga, kao i u kreativnom poduzetničkom razmišljanju i aktivnostima.
- U Općini Barban, kao i u susjednim općinama, nedostaje povezanost među lokalnim jedinicama samouprave u smislu poticanja i razvoja poduzetništva.

4. Provedba i kontrola projekta

Kao što je ranije istaknuto, upravljanje kvalitetom jedan je od ključnih procesa svakog projekta, a njegove faze uključuju planiranje kvalitete, provjeru kvalitete i upravljanje kvalitetom. Na primjeru ovog projekta, u fazi planiranja definirani su željeni ishodi te su određeni koraci potrebni za njihovo postizanje, dok se tijekom implementacije kontinuirano pratila kvaliteta postignutih rezultata. Kako bi se osigurala visoka razina kvalitete, prijavitelj projekta angažirao je vanjske izvođače i stručnjake specijalizirane za pojedina područja ključna za uspješnu realizaciju projektnih aktivnosti. Tako je, primjerice, izvođač radova odabran temeljem registracije za odgovarajuću djelatnost i dokazane stručnosti u izvođenju građevinskih radova, što je potvrdio popisom referenci prilikom prijave na javni natječaj. Uz građevinske radove, na isti su način ugovoreni i stručnjaci zaduženi za provedbu postupaka javne nabave, vođenje projekta, reviziju, nadzor gradnje te druge specijalizirane zadatke, što je rezultiralo kvalitetnom provedbom projekta. Unutar projektne faze nazvane "Priprema natječajne dokumentacije i provođenje postupaka nabave" definirani su i provedeni svi potrebni procesi javne nabave kako bi projekt bio uspješno realiziran. Krajnji cilj ove aktivnosti bio je pravovremeno izvršenje projekta u skladu s predviđenim proračunom, dok je uspješna i pravovremena provedba nabavnih postupaka značajno doprinijela ostvarenju projektnih ciljeva.

Aktivnosti koje su prethodile izradi dokumentacije i provođenju postupaka javne nabave potrebnih za realizaciju sljedećih ciljeva bile su:

- angažiranje stručnjaka za upravljanje projektom,
- obnova i opremanje Poduzetničkog inkubatora Barban,
- angažiranje nadzornog stručnjaka za građevinske radove,
- angažiranje stručnjaka za pripremu natječajne dokumentacije.

Koordinaciju postupaka javne nabave preuzeo je voditelj projekta, dok je izrada dokumentacije bila povjerena vanjskom stručnjaku specijaliziranom za javnu nabavu. Prije početka nabavnih aktivnosti, provedena je analiza tržišta potencijalnih izvođača

kao i pregled tržišta relevantnih proizvoda i usluga koje su bile predviđene projektom.

U pripreмноj fazi koja je prethodila provedbi samog projekta, projektni asistent i predstavnik prijavitelja pripremili su poziv za dostavu ponuda za izbor vanjskog stručnjaka koji je bio zadužen za postupke javne nabave, kao i za stručnjaka koji će voditi projekt. Po sklapanju ugovora s odabranim vanjskim suradnicima, stručnjak za javnu nabavu je, u suradnji s voditeljem projekta i projektnim asistentom, izradio i proveo preostale postupke potrebne za realizaciju projekta.

U projektu je definiran vremenski rok kada će se pojedini predmeti nabave provesti sa jasno definiranim zadacima. Pri završetku projektnih aktivnosti, raspisan je natječaj za angažiranje usluga vezanih uz provjeru prihvatljivosti projektnih troškova, s ciljem izrade revizorskog izvješća. Uz ovu nabavu, dodatno je izrađena i dokumentacija potrebna za provođenje postupaka jednostavne nabave.

Svi postupci javne nabave provedeni su u skladu s važećim zakonodavnim okvirom. Kako bi se osigurala zakonitost i cjelovitost procesa, predstavnik nositelja projekta imenovao je evaluacijsko povjerenstvo odgovorno za odabir najpovoljnijih ponuda za izvođenje radova, nabavu opreme i pružanje usluga. Donesene odluke povjerenstva dodatno su potvrđene od strane ovlaštene osobe prijavitelja.

Po uspješnom dovršetku svih potrebnih nabavnih procedura, angažirani su stručnjaci s odgovarajućim kvalifikacijama. Njihovim uključivanjem omogućena je brža i učinkovitija provedba projektnih aktivnosti, čime je Općina Barban ostvarila planirane ciljeve u predviđenom vremenskom okviru.

Svrha osnivanja Poduzetničkog inkubatora u Općini Barban bilo je poboljšanje dostupnosti poduzetničke infrastrukture malim i srednjim tvrtkama u Općini Barban u svrhu rasta i razvoja malog i srednjeg poduzetništva, otvaranja novih radnim mjestima, rekonstruirana je zgrada stare škole u Šajinima u Općini Barban te je na završetku projekta uređeno osam novih poslovnih prostora koje mogu primiti nove poduzetnike. Projekt je iniciran i odobren od strane općinske uprave Barban dok je projekt većinski financiran iz vanjskih izvora Ministarstva gospodarstva i obrta koja je financijska sredstva odobrilo za potrebe provedbe projekta.

Projektni partneri bili su Općina Žminj te općina Svetvinčenat, dok je Studentski poduzetnički inkubator SPIN Fakulteta ekonomije i turizma u Puli odabran za projektnog suradnika. Za svaku je nabavu na samom početku projekta određeno kada će biti realizirana, kao i kada će se izvršiti predmet same nabave. Za postupak nabave za izvođenje radova na rekonstrukciji i opremanju Poduzetničkog inkubatora Barban na planiranoj lokaciji proveden je između 1. i 3. mjeseca trajanja projekta. Radovi su se izvodili od 5. do 14. mjeseca, dok je faza opremanja započela u 17., a završila u 21. mjesecu provedbe.

U završnoj fazi projekta proveden je i postupak nabave usluge verifikacije projektnih troškova s ciljem izrade revizorskog izvješća. Osim tih nabava, izrađena je i potrebna dokumentacija za pokretanje postupaka jednostavne nabave, sukladno internom Pravilniku o jednostavnoj nabavi prijaviteljeve općine, kao i pojedinih drugih uključenih općina. U završnoj fazi projekta proveden je i postupak nabave usluge verifikacije projektnih troškova s ciljem izrade revizorskog izvješća. Osim tih nabava, izrađena je i potrebna dokumentacija za pokretanje postupaka jednostavne nabave, sukladno internom Pravilniku o jednostavnoj nabavi prijaviteljeve općine, kao i pojedinih drugih uključenih općina.

Nakon provedbe projekta slijedila je i kontrola projekta. Tijekom faze kontrole i praćenja projekta, koja se odvijala istovremeno s njegovom implementacijom, redovno su se mjerili i analizirali indikatori napretka. Ovo je omogućilo članovima projektnog tima pravovremeno prepoznati moguća odstupanja ili kašnjenja u isporuci planiranih rezultata. Sustav praćenja provodio se i radi ispunjavanja obveze izvještavanja prema nadležnom kontrolnom tijelu – u ovom slučaju Središnjoj agenciji za financiranje i ugovaranje (SAFU) – putem izrade kvartalnih izvještaja koji su služili kao prateća dokumentacija u procesu traženja nadoknade bespovratnih sredstava. Aktivnosti nadzora i upravljanja projektom podrazumijevaju stalnu procjenu trenutnog stanja projekta, identifikaciju mogućih rizika te provođenje nužnih korektivnih mjera tijekom provođenja projekta. Uspoređujući planirano sa stvarno ostvarenom realizacijom, projektni je tim imao pristup preciznim i aktualnim informacijama o napretku projektnih aktivnosti, što mu je omogućilo brže i učinkovitije donošenje

odluka u vezi s eventualnim poduzimanjem korektivnih mjera.

5. Rezultati projekta

Projekt je službeno okončan krajem 2019. godine kad je projekt izgradnje Poduzetničkog inkubatora Barban završio. Zatvaranje projekta označavalo je finalizaciju svih projektnih aktivnosti, a za potrebe službenog zaključivanja projekta, u listopadu 2019. godine izrađeno je završno izvješće, koje je također dostavljeno odgovarajućem kontrolnom tijelu. S obzirom na potrebu za financijskom kontrolom, na kraju projekta angažiran je vanjski revizor koji je pripremio detaljno izvješće o stvarnom stanju, odnosno potvrdio o verifikaciji izdataka prema ugovoru o dodjeli bespovratnih sredstava. Cilj ovog izvješća bio je utvrditi usklađenost računovodstvenih evidencija i financijskih izvještaja projekta s važećim hrvatskim računovodstvenim propisima i standardima, kao i osigurati da izvještaji vjerno i objektivno prikazuju financijski status i uspješnost realizacije projekta. Revizorsko izvješće potvrdilo je da su svi troškovi bili u skladu s proračunom projekta te da su ispunjavali uvjete prihvatljivosti troškova prema pravilima Europske unije. Ostvareni su svi planirani rezultati te je projektom rekonstruiran i adaptiran nekorišteni poslovni prostor u napuštenoj zgradi u Šajinima te je stavljen u funkciju i razvoja malog i srednjeg poduzetništva na području koje je bilo deficitarno poduzetničkom infrastrukturom.

6. Zaključak

Obnovom stare škole u Šajinima u općini Barban stvoreni su novi uvjeti za razvoj lokalnog poduzetništva. Korištenjem sredstava Europske unije, objekt je prenamijenjen u suvremeni poduzetnički inkubator s osam potpuno opremljenih kancelarija. Projekt predstavlja primjer uspješne revitalizacije javne infrastrukture u ruralnom području. Time je postavljen temelj za poticanje samozapošljavanja, inovacija i održivog gospodarskog razvoja na lokalnoj razini. U današnjem dinamičnom poslovnom okruženju, projekti predstavljaju jedan od ključnih mehanizama putem kojih organizacije ostvaruju svoje ciljeve. Uspješno upravljanje

projektima zahtijeva dubinsko poznavanje i primjenu koncepta životnog ciklusa projekta. Ovaj rad bavio se definiranjem pojmova projekta i upravljanja projektima te razradom osnovnih faza kroz koje projekt prolazi – od inicijacije, preko planiranja i provedbe, pa sve do kontrole, nadzora i završnog zatvaranja. Poseban naglasak stavljen je na povezanost ovih faza te njihovu ulogu u postizanju željenih ishoda. Inicijalna faza obuhvaća jasno određivanje svrhe, ciljeva i potreba projekta, kao i procjenu njegove izvedivosti. Tijekom planiranja, izrađuje se sveobuhvatan projektni plan koji uključuje raspodjelu resursa, vremenski okvir i raspored aktivnosti. U fazi provedbe, projektni tim realizira zadane aktivnosti, dok se u fazi nadzora i kontrole prati napredak, osigurava kvaliteta i identificiraju mogući rizici, s mogućnošću pravovremenih prilagodbi. Završna faza, odnosno zatvaranje projekta, uključuje ocjenu postignutih rezultata, izradu završne dokumentacije i formalno okončanje projekta.

Analizom životnog ciklusa projekta "Poduzetnički inkubator Barban" istaknuta je važnost sustavnog i koordiniranog upravljanja svim fazama projekta kako bi se osigurali željeni ishodi. Naglašena je i potreba za stalnim upravljanjem rizicima te prepoznavanjem i prilagođavanjem tijekom cijelog procesa. Ovim radom pružen je uvid u primjenu teorijskih okvira projektnog menadžmenta, pri čemu dobiveni rezultati mogu poslužiti kao orijentir za realizaciju budućih projekata slične prirode, kao i za unapređenje učinkovitosti u vođenju poduzetničkih i lokalno-razvojnih inicijativa.

Napomena: Ovaj rad izveden je na osnovu obranjenog diplomskog rada na Sveučilištu u Puli (Fakultet ekonomije i turizma "Dr. Mijo Mirković") autora Kalčić, A. (2023). Analiza životnog ciklusa projekta na primjeru projekta "Poduzetnički inkubator Barban-Centar poduzetničke kreativnosti" i "Pazin UP", pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Sabine Lacmanović.

Citirani izvori

A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) (2000). Newtown Squire, Pensilvania USA: Project Management Institute. Dostupno na: <https://www.cs.bilkent.edu.tr/~cgatay/cs413/PMBOK.pdf>

- Centar za ulaganja Eurokonzalting. (2016). Investicijska studija: Poduzetnički inkubator Barban – Centar poduzetničke kreativnosti. Barban: Općina Barban.
- Cleland, D. I., & Gareis, R. (1994). *Global Project management Handbook: Planning, Organizing, and Controlling International Projects* (2nd Edition). New York: Mc Graw Hill.
- Poduzetnički inkubator Barban - Centar poduzetničke kreativnosti" (2016). Investicijska studija (Pula). Sudionici projekta: Općina Barban-Općina Žminj-Općina Sventvinčenat-Sveučilište J. Dobrile u Puli-Fakultet ekonomije i turizma "Dr. Mijo Mirković". Osnovne informacije dostupne na: <https://barban.hr/poduzetnicki-inkubator-barban-centar-poduzetnicke-kreativnosti/>
- Kalčić, A. (2023). Analiza životnog ciklusa projekta na primjeru projekta "Poduzetnički inkubator Barban - Centar poduzetničke kreativnosti" i "Pazin UP". Diplomski rad. Pula: Sveučilište u Puli (Fakultet ekonomije i turizma "Dr. Mijo Mirković"), mentor: Sabina Lacmanović. Dostupno na:
- <https://dabar.srce.hr/en/islandora/object/unipu%3A7912>,
- Kissflow, T. (2025). 5 Phases of Project Management-A Complete Breakdown. Preuzeto 01. 07. 2025. s <https://kissflow.com/project/five-phases-of-project-management>
- Pinto, J. K., & Slevin, D. P. (1988). Critical success factors across the project life cycle: definitions and measurement techniques. *Project Management Journal*, 19(3), 67 – 75.
- Općina Barban (bez dat.). Poduzetnički inkubator Barban – Centar poduzetničke kreativnosti. Službene stranice Općine Barban. Preuzeto 27. 03. 2025. s <http://barban.hr/poduzetnicki-inkubator-barban-centar-poduzetnicke-kreativnosti/>
- Zekić, Z. (2010). *Projektni menadžment - Upravljanje razvojnim promjenama*, Rijeka: Sveučilište u Rijeci (Ekonomski fakultet u Rijeci). Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:192:299542>

Project Life Cycle on the Project on the Example of the Project "Entrepreneurial Incubator Barban"

Summary

This paper elaborates the life cycle phase of the project through the study of the reconstruction of the "Barban Business Incubator". The aim of the analysis is to apply the theoretical framework of the project life cycle to a specific case. The introduction defines the concept of project and project management, emphasizing the importance of understanding its phases for the successful realization of goals. The main part of the work includes a detailed analysis of: initiation, planning, implementation, supervision and closure of the project, with special reference to specific challenges and used management methods. Each phase is presented through key activities, risk identification and application of relevant tools, risk analysis and resource management strategy. The results of the research confirm that the fair management of the life cycle is essential for the successful implementation of the project. The importance of timely recognition and resolution of challenges and continuous monitoring of progress was emphasized. The knowledge gained can serve as a landmark for future projects and the area of entrepreneurship and local community development, contributing to better use of resources and the fulfillment of key goals. The case study confirmed the importance of coordinated and comprehensive management of all phases of the project in order to achieve the planned outcome.

Keywords: projects, project management, business incubator Barban, business infrastructure

Prikupljanje, odvodnja i pročišćavanje otpadnih voda u aglomeraciji Rovinj u sklopu EU projekta UPOV Cui

Emil Burić^a

^a Mag. ing. p.p.- b.s., pred., student doktorskog studija, Istarsko veleučilište-Universita Istriana di scienze applicate, Predradovičeva 9D, 52100 Pula, Hrvatska, emil.buric@iv.hr

Sažetak

U ovom radu prikazuje se projekt sustava prikupljanja, odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda u aglomeraciji Rovinj, s posebnim naglaskom na uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Cui (UPOV Cui), realiziran u sklopu EU sufinanciranih infrastrukturnih ulaganja. Sustav predstavlja odgovor na sve veće izazove vezane uz opterećenje vodne infrastrukture u turističkim destinacijama te je usklađen s ciljevima Direktive (EU) 2024/3019 Europskog Parlamenta i Vijeća od 27. studenoga 2024. o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda. Analiza uključuje tehnički opis projekta, pregled tehnologije obrade otpadnih voda s naglaskom na primjenu MBR (membranskog bioreaktora) te analizu učinkovitosti i prednosti u odnosu na konvencionalne sustave. Posebna pažnja posvećena je utjecaju sustava na okoliš, komunalni standard i očuvanje kakvoće obalnog mora. Evaluacija pokazuje da projekt ima značajan doprinos u povećanju ekološke održivosti, zaštiti resursa te u stvaranju preduvjeta za cjelogodišnji turizam i unaprjeđenje kvalitete života stanovništva.

Projekt UPOV Cui može biti referentni model za druge sredine sličnih obilježja koje se suočavaju s izazovima usklađivanja lokalne komunalne infrastrukture s europskim standardima zaštite okoliša.

Ključne riječi: otpadne vode, UPOV Cui (Uređaj za pročišćenje otpadnih voda na lokaciji Cui), Rovinj, MBR tehnologija, zaštita okoliša, EU direktive, održivi razvoj

1. Uvod

U suvremenim uvjetima sve izraženijih pritisaka na okoliš, osobito u turistički razvijenim priobalnim područjima, pitanje prikupljanja, odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda postaje jedno od ključnih aspekata održivog razvoja. Grad Rovinj, kao destinacija s dugom tradicijom turizma i visokom sezonskom fluktuacijom stanovništva, suočen je s

izazovima očuvanja okolišne kvalitete i komunalne infrastrukture koja može odgovoriti na potrebe lokalnog stanovništva i velikog broja posjetitelja. U tom kontekstu, provedba projekta izgradnje uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Cui (UPOV Cui) predstavlja strateški korak u smjeru postizanja višeg komunalnog i ekološkog standarda te usklađivanja s europskim direktivama o zaštiti voda.

Ekspanzija turizma u drugoj polovici 20. stoljeća dovela je do povećane potrošnje vode i generiranja velikih količina otpadnih voda, što je osobito izraženo u priobalnim područjima poput Rovinja. Autori Nakić i sur. (2024, str. 15) smatraju da zbog sve češćih nestašica tekuće slatke vode, uzrokovanih dugim sušnim razdobljima, porastom stanovništva i velikom potražnjom za vodom, nove strategije i rješenja održivoga upravljanja vodnim resursima temelje se, osim na zaštiti i racionalnom korištenju površinskih i podzemnih voda, također i na pročišćavanju te ponovnom korištenju pročišćenih voda za različite namjene. Time se smanjuje opterećenje na izvorišta pitke vode i povećava otpornost komunalnih sustava na klimatske promjene.

Grad Rovinj je prepoznao važnost pravovremenog i planskog pristupa ovom pitanju te je izgradnjom sustava za prikupljanje, odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda ušao u krug europskih gradova koji sustavno ulažu u modernizaciju vodnog komunalne infrastrukture. Projekt UPOV Cuv koristi MBR (membransku bioreaktorsku) tehnologiju pročišćavanja, kojom se postiže viša razina pročišćenosti vode u odnosu na prethodni sustav, što doprinosi smanjenju opterećenja na priobalno more i poboljšanju sanitarnih uvjeta. Takvi projekti doprinose očuvanju biološke raznolikosti i zdravlju stanovništva te mogu pozitivno utjecati na održivost turističkih destinacija u kontekstu ekoloških zahtjeva. Ujedno, implementacija ovog sustava usklađena je s ciljevima i zahtjevima Direktiva (EU) 2024/3019 Europskog Parlamenta i Vijeća od 27. studenoga 2024. o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda, koja naglašava važnost centraliziranih i učinkovitih sustava pročišćavanja. Ramm i Wojciechowska (2025, str. 1) smatraju da korištenje obnovljene vode nudi brojne mogućnosti zamjene slatke vode u navodnjavanju usjeva, uređenju okoliša, održavanju cesta i navodnjavanju golf terena.

Kroz pregled planiranja i provedbe projekta, tehničke karakteristike sustava s naglaskom na MBR tehnologiju, usporedbu

s konvencionalnim sustavima te procjenu učinkovitosti i utjecaja na okoliš, rad će ponuditi uvid u koristi i izazove implementacije naprednih sustava pročišćavanja otpadnih voda u malim, ali turistički iznimno opterećenim urbanim sredinama. U tom smislu, Rovinj može biti referentni model i

kao ogledni primjer za slične sredine u Republici Hrvatskoj i šire, koje teže uspostavi dugoročno održivih rješenja u upravljanju otpadnim vodama.

2. Ciljevi rada

Cilj ovog rada je analizirati sustav prikupljanja, odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda u aglomeraciji Rovinj kroz studiju slučaja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Cuv (UPOV Cuv) u tehničkom, okolišnom i regulativnom kontekstu. Glavni ciljevi uključuju:

- Prikaz tehničkih i infrastrukturnih značajki sustava s naglaskom na UPOV Cuv,
- Analizu primjene MBR (membranske bioreaktorske) tehnologije te njezinu usporedbu s konvencionalnim tehnologijama obrade otpadnih voda,
- Procjenu učinkovitosti sustava u kontekstu zaštite okoliša i poboljšanja komunalnog standarda,
- Usporedbu s europskim standardima i regulatornim okvirom, s posebnim naglaskom na Direktivu (EU) 2024/3019,
- Izdvajanje koristi i izazova koje ovakav sustav donosi u turistički razvijenim priobalnim gradovima poput Rovinja.

3. Metodologija rada

U radu je korišten kvalitativni pristup temeljen na studiji slučaja. Prikupljeni su i analizirani tehnički dokumenti projekta, podaci dobiveni od sudionika u njegovoj izgradnji i upravljanju, kao i relevantna stručna i znanstvena literatura. Provedena je komparativna analiza primijenjene MBR tehnologije u odnosu na konvencionalne sustave pročišćavanja otpadnih voda, s naglaskom na ekološke, tehničke i regulatorne aspekte. U evaluaciji su uzeti u obzir pokazatelji učinkovitosti pročišćavanja, energetske učinkovitosti, te utjecaja na kvalitetu obalnog mora i ukupnu održivost sustava.

4. Opis projekta sustava prikupljanja, odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda u aglomeraciji Rovinj

Sukladno suvremenim zahtjevima zaštite okoliša, racionalnog korištenja vodnih resursa i unaprjeđenja komunalne infrastrukture, 2022. godine u sklopu EU projekta izgrađeno je novo postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda Cuvi (UPOV Cuvi) na području grada Rovinja.

Uređaj, projektiran za kapacitet od 63 000 ekvivalent stanovnika (PE), temelji se na primjeni napredne membranske tehnologije – membranskog bioreaktora (MBR), koja omogućuje visok stupanj pročišćavanja otpadnih voda te posljedično značajno smanjenje negativnog utjecaja na okoliš (Godišnje izvješće UPOV Cuvi društva 'Odvodnja Rovinj Rovigno d.o.o.' za 2024. godinu, lipanj, 2025).

Izgradnja UPOV-a Cuvi predstavlja ključni infrastrukturni zahvat za aglomeraciju Rovinj. Odbrana MBR tehnologija pripada skupini separacijskih procesa koji kombiniraju biološku obradu otpadnih voda aktivnim muljem s membranskom filtracijom. Ovakav pristup omogućuje postizanje visoke kvalitete pročišćene vode, smanjene emisije štetnih tvari u okoliš i potencijalnu ponovnu upotrebu vode u sekundarne svrhe. Na području grada Rovinja predviđena su dva osnovna podstava javne odvodnje: sjeverni i središnji.

Sjeverni podsustav obuhvaća područje od turističkog naselja Valalta do zone nekadašnje hladnjače "Mirna", danas preuređene u poslovno-stambene objekte. Na ovom dijelu trenutno nije izgrađena cjelovita kanalizacijska mreža niti uređaj za pročišćavanje otpadnih voda.

Središnji podsustav obuhvaća područje od zone "Mirna" do uvale Veštar, uključujući i industrijske zone Turnina i Gripole. U okviru tog sustava izgrađena je mreža glavnih i sekundarnih kolektora, precrpnih stanica te novo postrojenje UPOV Cuvi s predtretmanom otpadnih voda i podmorskim ispustom.

Prethodno postrojenje koje se nalazilo na istoj lokaciji nije zadovoljavalo tehničke ni ekološke standarde – ni u pogledu stupnja pročišćavanja, ni u kontekstu osjetljivosti primatelja (Jadranskog mora). Nedostatci starog sustava očitovali su se kroz pojavu neugodnih mirisa, estetsku

neprihvatljivost objekta te nepovoljan utjecaj na okolni morski ekosustav.

S obzirom na izražen sezonski porast broja stanovnika i opterećenje sustava tijekom turističke sezone, bilo je nužno implementirati suvremeno rješenje koje će dugoročno zadovoljiti potrebe stanovnika, gospodarstva i okoliša. Svrha provedbe projekta bila je izgradnja i modernizacija središnjeg sustava javne odvodnje, uključujući dogradnju i optimizaciju UPOV-a Cuvi.

Konačan rezultat projekta jest funkcionalan i učinkovit sustav pročišćavanja otpadnih voda, koji osigurava:

- visoki stupanj priključenosti stanovništva na sustav odvodnje,
- značajno poboljšanje kakvoće obalnog mora i kopnenih voda,
- smanjenje korištenja pitke vode za zalijevanje zelenih površina kroz planiranu ponovnu upotrebu pročišćene vode,
- očuvanje vodnih resursa i postizanje ciljeva održivog razvoja,
- usklađenost sa zahtjevima Direktive (EU) 2024/3019 o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda.

Unatoč činjenici da su ulaganja u podzemnu infrastrukturu često tehnički zahtjevnija i financijski intenzivna, a u konačnici manje vidljiva javnosti, realizacija ovog projekta uvelike je doprinijela podizanju kvalitete života u gradu Rovinju. Time se ostvaruje jedan od temeljnih preduvjeta održivog urbanog razvoja – zaštita i učinkovito upravljanje vodnim resursima u funkciji stanovnika, posjetitelja i okoliša.

4.1. Sudionici u gradnji

Provedba infrastrukturnih projekata sufinanciranih sredstvima Europske unije u Republici Hrvatskoj, uključujući i projekte iz područja gospodarenja vodama, u pravilu se realizira na temelju FIDIC-ovih općih uvjeta ugovaranja. Ovi ugovori definiraju pravni i tehnički okvir suradnje između glavnih sudionika u gradnji – naručitelja, izvođača

i inženjera – pri čemu se jasno utvrđuju njihove međusobne obveze, odgovornosti i prava, uz pravednu raspodjelu rizika. Cilj ovakvog pristupa jest osiguranje transparentne i učinkovite provedbe složenih investicijskih zahvata u skladu s europskim standardima.

U kontekstu projekta **“Prikupljanje, odvodnja i pročišćavanje otpadnih voda u aglomeraciji Rovinj”**, ugovaranje radova na izgradnji novog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV Cuv) temeljilo se na **FIDIC Žutoj knjizi**. Ovaj model ugovaranja predviđa da izvođač preuzima odgovornost za izradu cjelokupne izvedbene projektne dokumentacije, kao i za samu izvedbu radova, pri

čemu je cijena ugovorena kao jedinstveni paušalni iznos. Za razliku od toga, raniji radovi na postojećoj kanalizacijskoj mreži odvijali su se u skladu s **FIDIC Crvenom knjigom**, gdje je investitor – u ovom slučaju Grad Rovinj, odnosno gradska komunalna tvrtka **Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o.** – prethodno osigurao svu potrebnu projektну dokumentaciju i građevinske dozvole, a izvođač je bio angažiran isključivo za izvedbu radova.

Projekt je sufinanciran sredstvima **Kohezijskog fonda Europske unije**, a njegovom realizacijom omogućeno je značajno unaprjeđenje sustava prikupljanja i obrade otpadnih voda na području aglomeracije Rovinj što je prikazano na slici 1.

Slika 1. Tlocrt postrojenja UPOV Cuv



Izvor: EU projekt – aktivnost i KUVI-CUVI prezentacija (travanj, 2020).

Izgrađen je i stavljen u funkciju novi uređaj za pročišćavanje svih gradskih otpadnih voda, izvedeno je 24,1 km novih kolektora, 700 novih kućnih priključaka te 7 novih crpnih stanica. Također, planirana je ili je već započeta sanacija ukupno 3,56 km dotrajalih obalnih i kopnenih kolektora.

4.2. Radovi u projektu

Grad Rovinj je izradio idejne projekte te osigurao sve potrebne lokacijske dozvole koji su poslužili kao temelj za daljnje projektiranje. Također,

naručitelj (grad Rovinj) je izradio studiju utjecaja na okoliš, pratio kvalitetu zraka, izvedena su geomehnička istraživanja sastava tla, a sve s ciljem kako bi se dokazalo višestruko bolje stanje nakon izgradnje postrojenja za prikupljanje, odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda. Radovi u okviru izgradnje postrojenja za prikupljanje, odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda aglomeracije Rovinj na mikrorazini UPOV Cuv se sastoje od: projektiranja kojega čine idejni projekt, glavnog projekta, izvedbenog projekta, projekta izvedenog stanja, ishoda odobrenja i dozvola, izgradnje

postrojenja, puštanja postrojenja u pogon, obuke osoblja, poslova s naručiteljem, dokazivanja traženih parametara u pokusnom radu i tijekom testova po dovršetku i otklanjanja nedostataka tijekom razdoblja odgovornosti za nedostatke.

4.3. Ciljevi projekta

Valorizirajući sve čimbenike utvrđeno je da se radi o trenutno najvećoj investiciji usmjerenoj na učinkovito upravljanje sustavom odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda s osnovnim ciljem zaštite okoliša. Po završetku projekta, stupanj priključenosti na sustav odvodnje na području aglomeracije Rovinj dosegao je 100%. Dostignuti ciljevi na kraju realiziranog projekta jesu razvoj i poboljšanje sustava odvodnje, sanacija, rekonstrukcija i izgradnja kanalizacijske mreže u Rovinju i gravitirajućim naseljima oko Rovinja (izgradnja 24,2 km i sanacija 3,56 km kolektora), izgradnja 7 novih crpnih stanica, nabava vozila i opreme za održavanje mreže, pročišćavanje otpadnih voda aglomeracije Rovinj, izgradnja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda III. stupnja pročišćavanja i kapaciteta 63.000 ES, izgradnja postrojenja za obradu mulja, unaprijeđenje sustava odvodnje otpadnih voda za 15.300 stanovnika, priključenje novih 1.792 stanovnika na javni sustav odvodnje otpadnih voda, mogućnost priključenja na sustav odvodnje i pročišćavanje

otpadnih voda III. stupnjem pročišćavanja za 100% stanovništva, smanjenje ispuštanja nepročišćenih otpadnih voda u osjetljivo područje rovinjskog akvatorija, poboljšanje i zaštita kvalitete podzemnih voda i tla u osjetljivim područjima smanjenjem nekontroliranog ispuštanja otpadnih voda u podzemne vode, povećanje učinkovitosti i sigurnosti sustava javne odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda uz uvođenje ekonomske cijene vode, zaštita prirodnih resursa te postizanje dobrog stanja voda u skladu sa EU Direktivama.

5. Tehnološki okvir pročišćavanja otpadnih voda MBR tehnologijom

5.1. Općenito o tehnologiji

Membranskom (MBR) tehnologijom se u današnje vrijeme ostvaruje daleko najbolja učinkovitost među svim postupcima pročišćavanja otpadnih voda. Iz sustava izlazi efluent visoke kakvoće kao što je prikazano na slici 2. čime se omogućava nesmetano ispuštanje u recipijent (u našem slučaju morski akvatorij grada Rovinja) te je kvaliteta pročišćene otpadne vode takvih karakteristika da je adekvatna kao resurs za potrebe poljoprivrede, zalijevanja rekreacijske zona i parkova, pranje javnih površina i sl.

Slika 2. Očekivana učinkovitost MBR uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

Parametar	Kakvoća efluenta	Učinak čišćenja (%)
BPK ₅	< 2 mg/l	>99
KPK	< 20 mg/l	>98
Suspendirana tvar	< 1 mg/l	>99
NH ₃	< 1 mg N/l	>97
N _{uk}	hladna klima: < 10 mg N/l	-
	topla klima: < 3 mg N/l	-
P _{uk}	< 0,1 mg P/l	>99
Mutnoća	< 1 NTU	>99
Ukupni koliformi	< 100 bc/100 ml	> 6 log
Fekalni koliformi	< 20 fc/100 ml	> 6 log

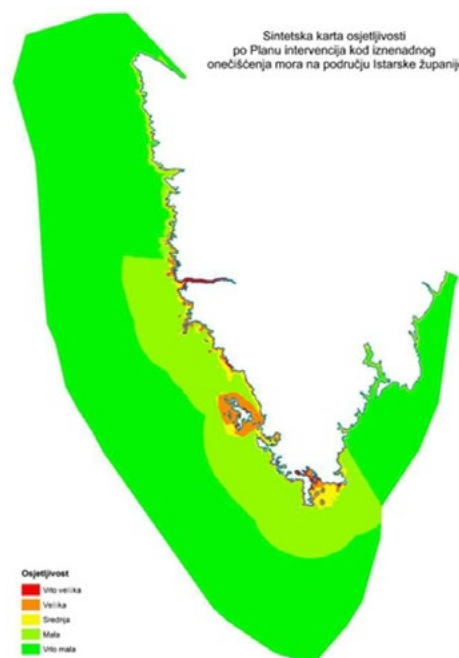
Izvor: Studija o utjecaju na okoliš sustava javne odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda Poreč-jug (Debeli rt) (listopad, 2010).

MBR (membranski bioreaktor) uređaj za pročišćavanje otpadnih voda kao dio UPOV Cuvri koristi kombinaciju biološke obrade i membranske filtracije za uklanjanje nečistoća. Proces uključuje aeraciju, biološku razgradnju organskih tvari pomoću mikroorganizama, te naknadnu filtraciju kroz fine membrane koje zadržavaju preostale čestice i bakterije.

1. **Aeracija:** Otpadna voda ulazi u sustav i izlazi se zraku, što omogućava stvaranje povoljnih uvjeta za rast i aktivnost mikroorganizama.
2. **Biološka obrada:** Mikroorganizmi, koji su dio aktivnog mulja, razgrađuju organske tvari u otpadnoj vodi te je sukladno toj činjenici na slici 3. prikazana je sintetska karta osjetljivosti u Istarskoj županiji. Ovaj proces je sličan onome koji se događa u prirodnim vodenim tokovima, ali je u MBR sustavu intenzivniji i pod nadzorom.
3. **Membranska filtracija:** Pročišćena voda prolazi kroz fine membrane, koje imaju pore veličine 0,05 mikrometara. Ove membrane zadržavaju preostale čestice, bakterije i druge

nečistoće, što rezultira visokokvalitetnom pročišćenom vodom.

Slika 3. Sintetska karta osjetljivosti u Istarskoj županiji



Izvor: www.istra-istria.hr

Slika 4. Pregledna situacija planiranih zahvata na DOF-u



Izvor: Elaborat zaštite okoliša o postupku i potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš (travanj, 2022).

Zaključno, membranski bioreaktor odnosno MBR tehnologija u Rovinju omogućava učinkovito pročišćavanje otpadnih voda korištenjem kombinacije biološke razgradnje i membranske filtracije, što rezultira vodom koja zadovoljava visoke standarde kvalitete kao što je prikazano na slici 4. pregledna situacija planiranih zahvata.

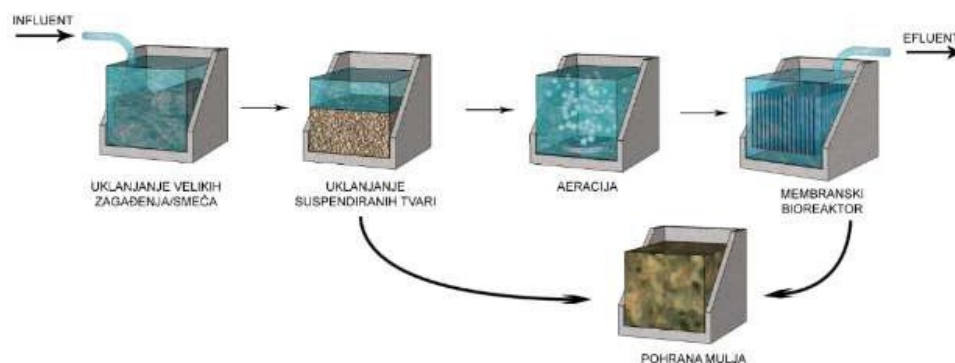
6. Osnovne komponente UPOV Cuvi s primjenom MBR tehnologije (tehnologije membranskog reaktora) za pročišćavanje otpadnih voda

Pročišćavanje otpadne vode na MBR uređaju izvodi se kroz nekoliko procesa. U prvoj fazi izvodi se mehanički predobrada kojega čine gruba i fina rešetka, aerirani pjeskolov – mastolov kojima

se efikasno uklanjaju krute tvari, pijesak i masti. Nakon što je mehanička predobrada finalizirana pristupa se biološkoj obradi koju čine bazeni za denitrifikaciju, tj. biološku redukciju nitrata do elementarnog dušika i nitrifikaciju, tj. aerirani dio kojim se odvija oksidacija organske tvari i amonijaka kao što je prikazano na slici 5.

Aeracijom vode i zadržavanjem optimalne količine aktivnog mulja za rast mikroorganizama u periodu 10-15 dana efikasno se obrade sve organske tvari koje onečišćuju vodu. Završetkom biološke obrade voda prolazi kroz membrane, koje zadržavaju mikroorganizme i sve zaostale organske i anorganske tvari, a propuštaju vodu visokog stupnja čistoće. Dolaskom vode koja je prethodno biološki tretirana na membrane djelovanjem povišenog tlaka određena količina prolazi kroz membrane tzv. Permeat, tj. pročišćena voda, a ostatak membrana zadrži tzv. koncentrat odnosno koncentrirane otopljene tvari.

Slika 5. Shematski prikaz MBR tehnologije pročišćavanja otpadnih voda



Izvor: Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (30. travnja 2018).

Primjenom MBR tehnološkog procesa pročišćavanja s membranskom tehnologijom, realizira se mogućnost ponovnog korištenja pročišćene vode prije svega u poljoprivredi, za navodnjavanje ili zalijevanje javnih zelenih površina na području grada Rovinja s ciljem povećanja turističke atraktivnosti. Primjenom membranske tehnologije na uređaju, ostvaruje se izuzetno visoka razina pročišćavanja iz čega proizlazi da nema opasnosti od narušavanja prirodne biološke ravnoteže u gravitirajućem morskom akvatoriju, a istovremeno je postignuta visoka zaštita zdravlja. Nužno je naglasiti kod MBR tehnologije pročišćavanje otpadnih voda taj sustav ima mješoviti tip odvodnje gdje se određene

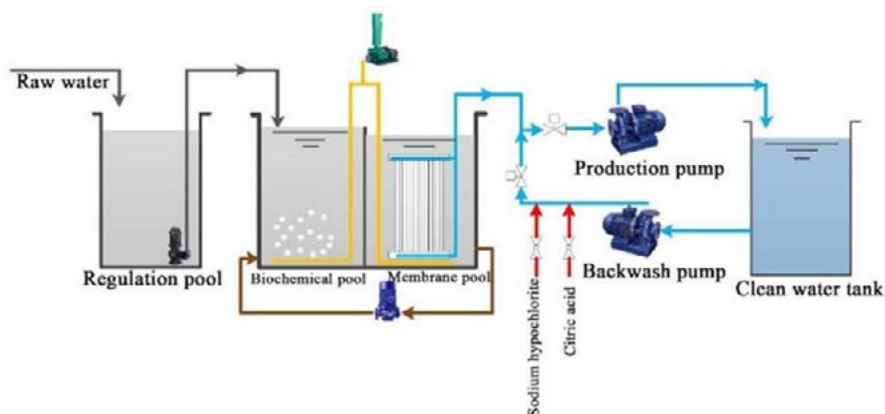
količine mješavine oborinskih i otpadnih voda prelijevaju na kišnim preljevima u obalni pojas.

6.1. Usporedna analiza MBR sustava naspram konvencionalnih tehnologija

Elementarna prednost MBR sustava nad konvencionalnim sustavom je kompaktnost i dimenzionalno je manji uređaj, nije potreban niti primarni, niti sekundarni taložnik te na taj način dolazi do znatne uštede prostora kao što je prikazano na slici 6. Izgradnja MBR sustava iz navedenih razloga može biti izrazito brza i kratkotrajna. Značajno je i to što MBR uređaji mogu primati otpadne vode s

višim stupnjem onečišćenja nego što je to prihvatljivo za klasične biološke sustave.

Slika 6. Prikaz MBR uređaja sa odgovarajućom opremom



Izvor: Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (30. travnja 2018).

Ključna prednost MBR uređaja u odnosu na konvencionalne sustave je ta što pročišćena voda na izlazu ima znatno višu razinu kvalitete i uporabljivosti. Također, primjenom MBR tehnologije značajno se smanjuje količina nastalog mulja tijekom obrade otpadnih voda, pri čemu se može postići i do pet puta manja količina mulja po kilogramu ulaznog BPK₅, što posljedično dovodi do smanjenja troškova vezanih uz rukovanje i zbrinjavanje mulja. Konstrukcijska fleksibilnost MBR tehnologije omogućuje projektiranje uređaja u podzemnim ili nadzemnim varijantama, uz primjenu arhitektonskih rješenja koja integriraju krajobrazno-prostorne čimbenike te doprinose valorizaciji okoliša kroz njihovo skladno uklapanje u postojeći prostor. MBR tehnologija pročišćavanja otpadnih voda osigurava postizanje konstantne i visoke kvalitete izlazne vode, pri čemu se izlazni parametri održavaju unutar propisanih graničnih vrijednosti, neovisno o fluktuacijama sastava i opterećenja ulazne vode, čime se omogućuje trajna usklađenost s važećim zakonodavnim i regulatornim zahtjevima, uključujući relevantne nacionalne propise i europske direktive. S ekonomskog aspekta, troškovi upravljanja, amortizacije i eksploatacije MBR sustava za pročišćavanje otpadnih voda značajno su niži u usporedbi s konvencionalnim biološkim sustavima, što ovu tehnologiju čini financijski učinkovitijom u dugoročnom operativnom smislu.

Slika 7. Vizualizacija UPOV Cuvri Rovinj



Izvor: Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (29. rujan 2022).

MBR tehnologija predstavlja napredno tehnološko rješenje koje omogućuje gotovo potpuno uklanjanje bakterija iz otpadnih voda, zahvaljujući učinkovitosti membranske filtracije u zadržavanju mikrobioloških onečišćivača kao što je prikazano na slici 7. Proces pročišćavanja otpadnih voda primjenom MBR tehnologije odvija se uz smanjene emisije mirisa i buke u odnosu na konvencionalne sustave, a rizik od gubitka biomase sveden je na nižu razinu zahvaljujući kontroliranim radnim uvjetima. Osim toga, smanjuje se potreba za primjenom kemikalija za uklanjanje fosfora te se omogućuje učinkovito uklanjanje spororazgradivih frakcija biokemijske potrošnje kisika (BPK₅). MBR tehnologija pročišćavanja otpadnih voda odlikuje se visokim stupnjem prilagodljivosti, pri čemu učinkovito funkcionira

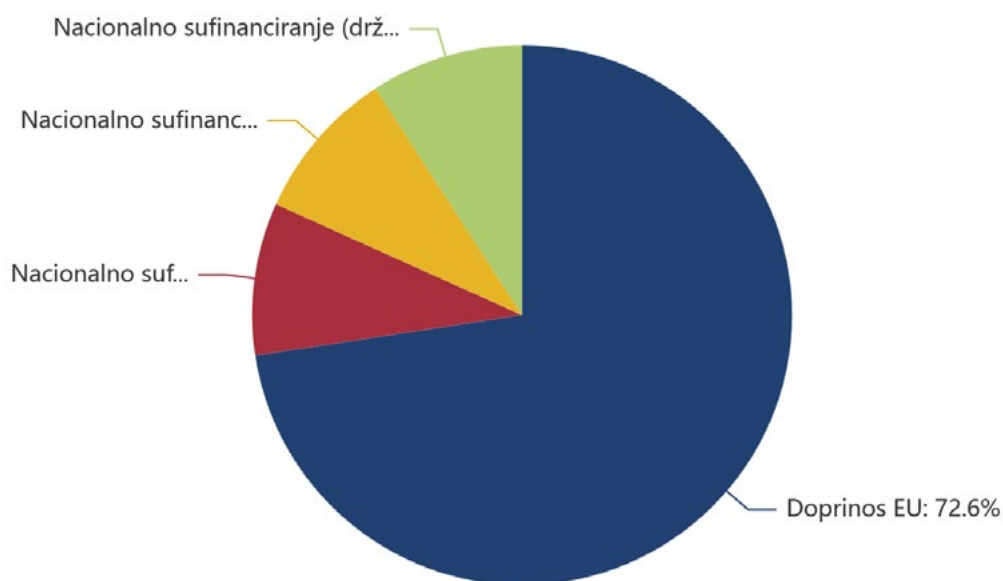
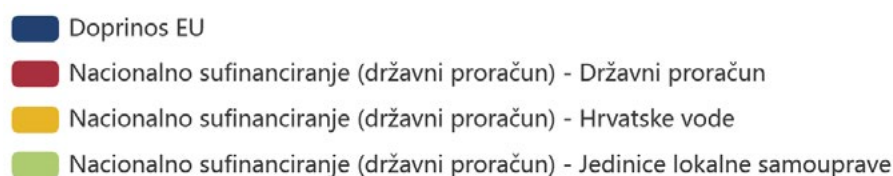
unutar širokog raspona hidrauličkih opterećenja, neovisno o tome radi li se o minimalnim ili maksimalnim dotocima otpadnih voda, pod uvjetom da su ulazni parametri unutar projektiranih graničnih vrijednosti. Membranski bioreaktor (MBR) tehnologija predstavlja sofisticirano tehnološko rješenje unutar domene zelene tehnologije (engl. *green technology*), ističući se u odnosu na konvencionalne sustave pročišćavanja otpadnih voda zbog svoje visoke učinkovitosti u pogledu kvalitete pročišćene vode, smanjenog volumena proizvedenog mulja, manjeg prostornog otiska i mogućnosti ponovne

uporabe vode, što ga čini osobito pogodnim za primjenu unutar principa održivog razvoja i kružnog gospodarstva. Autori Rahman i sur. (2023, str. 22) smatraju da se MBR etablirao kao učinkovita tehnologija zbog veće učinkovitosti obrade, male upotrebe površine i jednostavnog rukovanja.

6.2. Operativni troškovi UPOV-a Cuvi

Analiza operativnih troškova UPOV-a Cuvi temelji se na podacima iz godišnjeg izvješća za 2024. godinu kao što je prikazano na slici 8.

Slika 8. Struktura financiranja projekta izgradnje UPOV Cuvi



Izvor: <https://www.voda.hr/hr/eu/projekti/rovinj>

Ukupni OPEX postrojenja iznosi 3.945.698 €, dok jedinična cijena pročišćavanja doseže 3,43 €/m³, a godišnji trošak po ekvivalentnom stanovniku iznosi 187,89 €/ES/god kao što je prikazano u tablici

na slici 9. Tablica prikazuje usporedbu ključnih operativnih parametara UPOV-a Cuvi s tipičnim vrijednostima.

Slika 9. Tablica operativnih troškova

Parametar	UPOV Cui (MBR)	Konvencionalni sustav (prosjeak EU)
Kapacitet (ES) ¹	21.000	20.000–25.000
OPEX (€/god)	3.945.698	2.000.000–3.000.000
Trošak po m ³ (€/m ³)	3,43 €/m ³	0,5–2,0
Trošak po ES/god (€/ES/god)	187,89	80–150
Potrošnja energije (kWh/m ³)	0,6–1,0 kWh/m ³	0,3–0,6
Amortizacija (€/god)	1.600.000	800.000–1.200.000

Izvor: Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (bez. dat.)

Pretpostavljeno je da sustav radi pri kapacitetu od 21.000 ES, s prosječnom potrošnjom od 150 L/d po ES.

6.3. Analiza ključnih čimbenika

- Kapacitet i ekonomija razmjera** UPOV Cui spada u kategoriju malih do srednje velikih postrojenja, kod kojih fiksni troškovi značajno utječu na jediničnu cijenu pročišćavanja, što je tipično za MBR tehnologiju u odnosu na konvencionalne sustave.
- Amortizacija i investicijski troškovi:** Visoka amortizacija (≈1,6 mil. € godišnje) rezultat je relativno velike početne investicije (≈17,8 mil. €) i kratkog vremena od puštanja postrojenja u rad. Konvencionalni sustavi obično imaju niže početne investicije i dulje razdoblje amortizacije, što doprinosi nižim jediničnim troškovima.

3. Potrošnja energije i održavanje: MBR tehnologija zahtijeva veće energetske resurse (≈0,6–1,0 kWh/m³) i specifične troškove održavanja membrana, dok konvencionalni sustavi obično troše manje energije (≈0,3–0,6 kWh/m³) i imaju niže troškove servisiranja.

4. Kadrovski resursi: Troškovi ljudskih resursa za MBR postrojenja su značajni, osobito u prvim godinama rada, zbog pojačanog nadzora i optimizacije procesa. U konvencionalnim postrojenjima potreba za specijaliziranim osobljem je manja.

U usporedbi s konvencionalnim tehnologijama, MBR sustav UPOV-a Cui pokazuje veće operativne troškove po m³ i po ES, prvenstveno zbog visoke amortizacije, povećane potrošnje energije, specifičnih zahtjeva za održavanjem membrana, kadrovskih potreba. Međutim, MBR tehnologija omogućuje znatno bolju kvalitetu pročišćavanja, kompaktiju instalaciju i veću fleksibilnost u radu s promjenjivim opterećenjima.

Slika 10. Grafički dijagram razlike između MBR-a i konvencionalnih sustava u obradi mulja


Izvor: Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (30. travnja 2018).

¹ Mjerna jedinica za kapacitet sustava odvodnje i obrade komunalnih otpadnih voda, izražena kao "ekvivalent stanovnika" (ES), definira se kao volumen otpadne vode u kubičnim metrima po danu (m³/dan) koji odgovara prosječnom dnevnom opterećenju što ga stvara jedan stanovnik. Ova jedinica obuhvaća kako hidrauličko opterećenje (protok otpadne vode), tako i organsko opterećenje, pri čemu se potonje najčešće izražava putem biokemijske potrošnje kisika u razdoblju od pet dana (BPK₅).

Srednjoročno, povećanjem volumetrijskog iskorištenja kapaciteta, optimizacijom potrošnje resursa i produženjem životnog vijeka membrana, jedinični troškovi po m³ i po ES mogu se smanjiti i približiti vrijednostima konvencionalnih sustava u EU kao što je prikazano na slici 10.

Zaključak

Tehnologija membranskih bioreaktora (MBR), primijenjena u sklopu novog i nadograđenog UPOV-a Cuvi, predstavlja naprednije rješenje za obradu otpadnih voda u odnosu na ranije korištene tehnologije u Istarskoj županiji. Ključne prednosti uključuju visoku učinkovitost pročišćavanja, ekonomičnost te visok stupanj automatizacije, što rezultira minimalnom ovisnošću o ljudskom faktoru. Kompaktnost sustava i mali prostorni zahtjevi omogućuju smještaj postrojenja uz znatno smanjenu potrebu za prostorom te minimalnu intervenciju u krajobraz u odnosu na konvencionalne tehnologije. Središnja komponenta sustava jest membranski bioreaktor (MBR), koji integrira biološku obradu s aktivnim muljem i membransku filtraciju, uz minimalne emisije neugodnih mirisa i buke u propisanim granicama.

Citirani izvori

Direktiva (EU) 2024/3019 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 27. studenoga 2024. o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda.

Elaborat zaštite okoliša o postupku i potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš (travanj, 2022), Zagreb, revizija B.

EU projekt-aktivnost i KUVI-CUVI prezentacija (travanj, 2020). Interni dokument.

Godišnje izvješće UPOV Cuvi društva 'Odvodnja Rovinj Rovigno d.o.o.' za 2024. godinu (lipanj, 2025). Preuzeto s: https://odvodnjarovinj.hr/media/filer_public/bf/de/bfde1c63-2ef0-437d-8f60-a41c4078feca/giu_2024_.pdf

<https://www.voda.hr/hr/eu/projekti/rovinj>

Nakić, Z., Balaž, B. (2024). Prilog razumijevanju problematike ispuštanja pročišćenih otpadnih voda u podzemlje. Hrvatske vode, Vol. 32, No. 130, str. 303-324.

Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (30. travnja 2018). Preuzeto s: <https://odvodnjarovinj.eu/prezentacija-mbr-membranski-bio-reaktor-tehnologije-prociscavanja-otpadnih-voda/>

Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (29. rujan 2022).

Odvodnja Rovinj-Rovigno d.o.o. (bez dat.).

Osjetljivost područja djelovanja Plana intervencije kod iznenadnog onečišćenja mora u Istarskoj županiji, Pula (listopad 2013). Dostupno na: www.istra-istria.hr

Rahman, U. T., Roy, H., Reazul, I., Tahmid, M., Fariha, A., Mazumder, A., ... Islam, S. (2023). The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management, Membranes, 13, 181; <https://doi.org/10.3390/membranes13020181>

Ramm, K., & Wojciechowska, M. (April 2025). Closing local water cycles based on MBR treatment plants in tourist resorts - microbiological risk assessment, Desalination and Water Treatment, Volume 322, 101204; <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101204>

Strategija prostornog uređenja Republike Hrvatske (2017), NN 106/2017, Zagreb.

Struktura financiranja projekta izgradnje UPOV Cuvi (Izvor: <https://www.voda.hr/hr/eu/projekti/rovinj>)

Studija o utjecaju na okoliš sustava javne odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda Poreč-jug (Debeli rt), Zagreb, (listopad, 2010).

www.istra-istria.hr

Collection, drainage and purification of waste water in the agglomeration of Rovinj as part of the EU project UPOV Cui

Summary

This paper examines the wastewater collection, drainage, and treatment system implemented in the agglomeration of Rovinj, with a particular focus on the Cui Wastewater Treatment Plant (WWTP Cui), developed as part of an EU co-financed infrastructure project. The system addresses growing pressures on water infrastructure in tourist destinations and aligns with the objectives of Directive (EU) 2024/3019 on urban wastewater treatment.

The study provides a technical overview of the project, a detailed description of the applied treatment technology—specifically the use of Membrane Bioreactor (MBR) systems—and a comparative analysis with conventional wastewater treatment technologies. Special attention is given to the environmental impact, improvement of municipal standards, and the protection of coastal water quality. The evaluation demonstrates that the project significantly contributes to environmental sustainability, resource protection, and the development of preconditions for year-round tourism and improved quality of life for local residents.

The WWTP Cui project may serve as a reference model for similar-sized urban areas facing the challenge of aligning local water infrastructure with European environmental protection standards.

Keywords: wastewater, WWTP Cui (Wastewater treatment plant at the Cui location), Rovinj, MBR technology, environmental protection, EU directives, sustainable development



**Istarsko
veleučilište**
Università
Istriana
di scienze
applicate

Istarsko veleučilište
Università Istriana di scienze applicate

Preradovićeva 9D, 52100 Pula
Hrvatska

www.iv.hr