



Sveučilište u  
Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Tomislav Slavina

**MODEL ODRŽIVE UČINKOVITOSTI I RASPOLOŽIVOSTI PROIZVODNE  
OPREME**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. Dr. Sc. Nedeljko Štefanić

Zagreb, 2024.



Sveučilište u  
Zagrebu

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE

Tomislav Slavina

**MODEL OF SUSTAINABLE AVAILABILITY AND EFFICIENCY OF  
PRODUCTION EQUIPMENT**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Prof. Nedeljko Štefanić, PhD

Zagreb, 2024.

## PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

**UDK:**

**Znanstveno područje:**

Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:**

Strojarstvo

**Institucija:**

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i  
brodogradnje

**Mentor:**

Prof. Dr. Sc. Nedeljko Štefanić

**Broj stranica:**

141

**Broj slika:**

41

**Broj tablica:**

13

**Broj literaturnih referenci:**

107

**Datum obrane doktorskog rada:**

**Sastav povjerenstva za obranu**

**doktorskog rada:**

## ZAHVALA

Iskreno zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Nedeljku Štefaniću, na stručnom vođenju i potpori tijekom cijelog doktorskog studija te tijekom mog istraživanja. Njegova stručnost i strpljivost značajno su doprinijeli mom akademskom rastu i profesionalnom razvoju. Bez njegovog mentorstva, ovaj rad ne bi bio moguć. Uvijek je bio dostupan za savjete i nesebično dijeljenje svog bogatog iskustva i znanja.

Posebnu zahvalnost dugujem članovima povjerenstva koji su izdvojili svoje dragocjeno vrijeme te svojim stručnim ocjenama pridonijeli kvaliteti ovog rada.

Zahvaljujem i članovima svoje obitelji na njihovoj kontinuiranoj podršci i strpljenju tijekom ovog procesa.

## SAŽETAK

Današnja napredna proizvodnja zahtijeva inovativnost, fleksibilnost i intuitivnost od proizvođača kako bi ostali konkurentni. Razvojem proizvodnje, u spoju s automatizacijom, informatizacijom i kvalitetom, proizvođači su prisiljeni stalno tražiti nove načine za poboljšanje i praćenje kvalitete, smanjenje gubitaka i povećanje profita. Jedna od metoda je primjena Lean principa. Lean filozofija proizvodnje poznata je diljem svijeta kao metoda koja učinkovito smanjuje gubitke u proizvodnji, povećava autonomiju zaposlenika, povećava kvalitetu proizvoda, poboljšava kontrolu proizvodnje, povećava profit, skraćuje vrijeme isporuke, povećava zadovoljstvo kupaca i tako dalje. Jednostavno rečeno, Lean proizvodnja ima za cilj eliminirati gubitke, proizvoditi samo ono što je kupac naručio i isporučiti naručeni proizvod u najkraćem mogućem roku (Just In Time, u nastavku JIT). Razvojem lean proizvodnje, potreban je i paralelni razvoj lean održavanja. Lean principi i lean radna filozofija, među ostalim, sadrže alate za učinkovito i efektivno održavanje. Kvarovi opreme tijekom proizvodnje mogu dovesti do propuštenih rokova i gubitka kupaca. Kako bi se izbjegli takvi gubici, uvedeno je i razvijeno Cijelokupno učinkovito održavanje (Total Productive Maintenance, u nastavku TPM). Jedan od ključnih aspekata Lean filozofije usmjerenih na proizvodnu opremu je upravo TPM [1].

Koncept TPM-a razvijen je u Japanu i tamo se uspješno primjenjuje više od dvadeset godina. Uspješna implementacija TPM-a u tvrtki ovisi o predanosti cijelog lanca ljudi odgovornih za održavanje (od menadžera do tehničara) – lanac je jak koliko i njegova najslabija karika. To se ne događa preko noći – potrebno je vrijeme da se uspostave najbolji postupci održavanja, sheme kvarova i visoko kvalificirani radnici s iskustvom. Stoga TPM uključuje održavanje, čišćenje, podmazivanje, zatezanje, praćenje, obuku, poboljšanje procesa i praćenje zastoja. Cilj TPM-a je osigurati optimalnu raspoloživost nabavljene i instalirane opreme u proizvodnim tvrtkama uz minimalne troškove. TPM se usredotočuje na ključne aspekte proizvodne opreme: raspoloživost, pouzdanost i učinkovitost. Glavni pokazatelj TPM-a je ukupna efektivnost proizvodne opreme (OEE) [2]. Kada se OEE izračuna, može nam pokazati koliko je naša proizvodna oprema pouzdana i učinkovita. Što je OEE veći, to je naša proizvodnja učinkovitija. Tvrtke moraju osigurati da se podaci potrebni za izračun OEE-a, ključnog pokazatelja učinkovitosti TPM-a, prikupljaju što jednostavnije i što točnije. To održava visoku motivaciju radnika što rezultira povećanjem kvalitete i pravom slikom trenutne razine učinkovitosti proizvodnje. Autori su prepoznali važnost povećanja pet

performansi koje tvrtke koriste da ostanu konkurentne i zadrže svoje tržište: brzina, cijena, pouzdanost, fleksibilnost i kvaliteta. Slažu se da je za postizanje kvalitete u svim aspektima proizvodnih operacija potrebna implementacija TPM-a.

Ova teza nudi opsežan pregled literature na temu TPM-a, daje pregled evolucije modernog održavanja, bavi se izazovima implementacije tako složene metodologije i daje novi univerzalni model za uspješnu i održivu implementaciju, s detaljnim uputama kako izračunati ključni pokazatelj učinkovitosti TPM-a, OEE.

**Ključne riječi:** Cjelokupno učinkovito održavanje, TPM, Ukupna učinkovitost opreme, OEE, Optimizacija, Održavanje, Model implementacije, Strategija implementacije, Izazovi implementacije

## **EXTENDED SUMMARY**

Due to growing competition and globalization, companies are trying new methods and techniques to produce cost effective and better-quality products. Production technology is so advanced that the question in production is no longer: „can we make a certain product “, but „how fast can we make it“. Such pressure along with the rising competition that are increasingly capable of making the product with minimum cost is pushing the manufacturers to overload their work equipment and push it to their limits. To compete in such production, companies decide on implementing new technologies and organisational philosophies. One of the mentioned philosophies is Lean Manufacturing and its tools for efficient and organised production oriented on the reduction of waste. Lean tools are one of techniques which give advantage in the production companies in terms of reducing waste, making workspace more organised and making production faster and cheaper while maintaining product quality. Some of the Lean tools are 5S (tool for cleaner and more organised workspace), Single Minute Exchange of Dies - SMED (for efficient exchange of work tools), Kanban (workflow management method) and Total Productive Maintenance or TPM. TPM is a method for improving production equipment lifetime, reliability, availability, and efficiency. By reviewing current literature done on the topic of TPM it is clear that TPM has proven its benefits for the efficient and organised production, reducing waste, reducing cost of the product and making positive impact on the environment. However, there is a gap in terms of correct methodology and strategic approach to implementation of TPM in order to ensure stability of implemented principles and to avoid possible difficulties that can have negative impact on the successful implementation and sustainability of TPM.

The extensive literature review in the start of the thesis gives deep insight into the current state of Total Productive Maintenance (TPM) in the production domain. It emphasizes TPM's positive influence across various critical areas of production. Firstly, it clarifies TPM's influence in significantly reducing equipment breakdowns, a vital aspect in maintaining uninterrupted production. Additionally, it examines the challenges and advantages gained in the implementation of TPM. TPM's substantial contribution to enhancing overall production efficiency is another key highlight, along with its compatible integration with Total Quality Management (TQM) principles. Moreover, the review explores TPM's role in motivating and engaging employees, its environmental benefits, and its compatibility with the Industry 4.0 (I4.0) paradigm.

The evolution of optimisation of maintenance in this thesis will give background to the research to get deeper understanding of evolution of maintenance practices in production enterprises and give an idea of next possible advances in the area. The evolution begins with its historical roots dating back to 1951, originating alongside the introduction of preventive maintenance in Japan, although the concept originally emerged from the USA. The pioneering efforts of Nippondenso in 1960 marked a significant milestone in plant-wide maintenance practices, transitioning from preventive to autonomous maintenance as automation increased. This shift empowered machine operators to handle routine tasks while maintenance staff focused on critical maintenance activities, ultimately laying the groundwork for what would become known as Productive Maintenance. The introduction of quality circles further solidified the evolution of TPM, leading to Nippondenso's recognition by the Japanese Institute of Plant Engineers. As modern automation advances, the significance of proactive maintenance becomes increasingly evident, as highlighted by research emphasizing the importance of contemporary maintenance practices. Gunasekaran et al. delve into TPM's impact on productivity and quality, emphasizing the role of employee motivation in reducing downtime and resource wastage. Lee explores the integration of computer-aided maintenance, focusing on fault prediction through equipment monitoring. Panagiotidou et al. propose an economic model for optimizing maintenance procedures, balancing minimal and preventive maintenance. Education and training emerge as pivotal components of TPM, fostering skills and morale among employees. Office TPM targets administrative inefficiencies, while continuous improvement and quality maintenance focus on systematic enhancements and defect prevention. Venkatesh outlines direct benefits such as increased productivity and customer satisfaction, along with indirect benefits like improved workplace morale and knowledge sharing. Despite the various approaches to TPM implementation explored in the literature, a universally sustainable model remains elusive in production enterprises.

Next chapter gives extensive insight about the possible challenges and obstacles that can arise during implementation and maintaining TPM practices. The successful introduction and sustained implementation TPM and other lean tools can be obstructed by various factors. This chapter focuses on key factors identified through survey responses, particularly emphasizing critical aspects related to internal audits, equipment selection, job security, and the prioritization of lean tasks. While audits are essential for maintaining quality and sustainability in lean practices, their significance is not universally recognized among



employees. Efforts to integrate audits into training programs and involve all levels of the hierarchy can enhance their perceived value and effectiveness. Furthermore, there is uncertainty regarding the selection of suitable equipment for TPM implementation, highlighting the need for strategic equipment choices aligned with lean principles. Job security concerns among employees may lead to resistance to change and suboptimal performance, emphasizing the importance of addressing these fears through motivational strategies and supportive work environments. Additionally, employees often perceive lean activities as less important than other tasks, particularly in companies with long-standing traditions and older workforces. It's crucial to integrate lean principles seamlessly into existing workflows and provide adequate time for these activities to prevent resistance and ensure effectiveness.

Despite these challenges, there is widespread recognition of the long-term benefits of lean tools, such as improved productivity and organizational efficiency. Educators and leaders play a vital role in fostering understanding and enthusiasm for lean practices, thereby facilitating successful implementation. By conducting survey in several production companies, the key factors that can have negative impact were emphasized and analyzed, and accompanied by recommendations aimed at preventing the occurrence of these issues.

The main part of thesis is TIPAS, new, universal TPM implementation model model for sucesful implementation of the TPM practices. The TIPAS model, serves as a universal framework for TPM implementation in production enterprises. It comprises five main phases:

1. Training the team and equipment selection: Introduces personnel to TPM methodology, forms teams, and selects equipment for TPM activities.
2. Initial inspection: Focuses on assessing current equipment status, rectifying faults, and initiating Overall Equipment Effectiveness (OEE) measurement.
3. Planned maintenance: Develops strategies for planned maintenance activities.
4. Autonomous maintenance: Defines tasks for machine operators to perform autonomously.
5. Sustainability: Ensures the ongoing sustainability of TPM practices.

Experts tasked with TPM implementation can adapt the TIPAS model to suit their specific needs and objectives. Explanations of each phase were provided, along with recommendations for proper execution. It outlines necessary actions, personnel assignments,

educational organization, equipment selection, and documentation requirements to support TPM methodology. Additionally, it offers advice for maintaining the sustainability of implemented practices. To assess the effectiveness of TPM practices, it's essential to calculate and monitor the OEE, a key performance indicator of TPM. The chapter includes a detailed procedure for OEE measurement, specifying the data to be recorded and the calculation process. Furthermore, it provides an overview of loss categories to facilitate accurate recording of losses.

The model has been successfully implemented in a large production enterprise, resulting in improved overall OEE of production equipment and ongoing monitoring of maintenance practices for sustained efficiency and reliability. The authors have continuously utilized the model in their respective fields, demonstrating its effectiveness. By following the detailed instructions provided, technical personnel in production enterprises can ensure strategic, successful, and sustainable TPM implementation.

Advances in computing technologies goes hand by hand with the TPM practices. In the last chapter was shown that TPM can coexist with the modern computational practices like heuristic approaches to data extraction and processing, Internet of Things concept (IoT) and linear programming optimisation, which are all part of the I4.0.

I4.0 addresses challenges in lean manufacturing by integrating technologies such as IoT, AI, wireless technology and big data. LA within I4.0 correlates positively with operational performance, impacting productivity, delivery, inventory, and quality. Studies emphasise I4.0's transformative effects on planning, maintenance, and employee training. Intelligent systems in I4.0 aim for self-regulating production, while data science transforms real-time data into meaningful knowledge. The transparency and availability of data offered by I4.0 streamline OEE calculations, reduce manual tasks, and boost employee satisfaction. Simulation capabilities aid in equipment selection for TPM, ensuring compatibility with lean philosophies. Adopting the principles of Industry 4.0 shows potential for overcoming challenges and ensuring the effective implementation and long-term success of lean tools and TPM practices.

By using extensive literature search, surveys done in the manufacturing sector, case studies done in manufacturing enterprises, experience and expert knowledge, this work provide step by step model for implementing TPM resulting in increasing production equipment

availability, reliability and efficiency. The maintenance model will be proposed which will ensure highest possible level of availability and efficiency of production equipment with minimum amount of risks such as failure, wear, equipment aging problems, poor implementation or worker's resistance to change.

**Key words:** Total Productive Maintenance, TPM, Overall Equipment Efficiency, OEE, Optimisation, Maintenance, Implementation model, Implementation strategy, Implementation challenges

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Hipoteza i cilj istraživanja .....	5
2. PREGLED LITERATURE .....	7
2.1. Korisnost TPM-a i OEE-a za smanjenje kvarova .....	14
2.2. Strategije implementacije i izazovi TPM-a i OEE-a.....	16
2.3. Doprinos TPM-a učinkovitosti proizvodnje .....	19
2.4. Benefiti umrežavanja TPM-a i TQM-a.....	22
2.5. Fokus na zaposlenike .....	23
2.6. Eliminacija otpada .....	24
2.7. Ekološke prednosti i Industrija 4.0. ....	26
2.8. Zaključak pregleda literature .....	28
3. RAZVOJ SUSTAVNOG ODRŽAVANJA .....	32
4. IZAZOVI IMPLEMENTACIJE TPM-a U PROIZVODNIM PODUZEĆIMA .....	42
4.1. Metoda i postupak.....	44
4.2. Analiza podataka.....	49
4.3. Rezultati .....	53
4.4. Zaključak rezultata ankete .....	63
5. TIPAS - NOVI, UNIVERZALNI MODEL ZA IMPLEMENTACIJU TPM-a.....	69
5.1.1. Trening tima i odabir opreme.....	71
5.1.2. Inicijalna inspekcija .....	73
5.1.3. Planirano održavanje.....	80
5.1.4. Autonomno održavanje .....	83
5.1.5. Stanje održivosti.....	85
5.2. IZRAČUN OEE-a.....	87
6. INTEGRACIJA SUVREMENIH TEHNOLOGIJA U TPM .....	97
6.1. TPM i integracija s paradigmom Internet stvari .....	101
6.2. Heurističke metode kao tehnike optimizacije .....	107
6.3. Model predviđanja OEE pomoću heurističke metode “Monte Carlo” .....	110

7. ZAKLJUČAK.....	126
8. LITERATURA.....	<b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1. Pregled broja objavljenih radova i citata pretraženih članaka [888] .....	8
Slika 2. Kuća TPM-a (Pačaiova et. al., 2019).....	37
Slika 3 Blok dijagram metodologije. ....	45
Slika 4 Vizualizacija prihvaćanja ili odbacivanja nulte hipoteze.....	50
Slika 5. Rezultati uspoređeni po tvrtkama. ....	56
Slika 6. Rezultati ankete grupirani prema poziciji unutar tvrtke. ....	60
Slika 7. Grafički prikaz koraka TIPAS implementacijskog modela .....	71
Slika 8. Trening tima i odabir opreme .....	73
Slika 9. Vizualna reprezentacija 5S [16].....	74
Slika 10. Inicijalna inspekcija.....	75
Slika 11. Inicijalna inspekcija .....	79
Slika 12. Planirano održavanje .....	83
Slika 13. Summary of phase 4 .....	85
Slika 14. Summary of phase 5 .....	86
Slika 15. Vizualni prikaz odnosa TEEP, EU i OEE .....	89
Slika 16. Visual representation of OEE calculation.....	92
Slika 17. Kategorije proizvodnih gubitaka prema OEE analizi.....	94
Slika 18. Ilustracija Andon sustava.....	99
Slika 19. Primjer sustava za praćenje zastoja .....	103
Slika 20. Podaci vezani uz zastoje na proizvodnom stroju ili liniji.....	104
Slika 21. Model integriranog bežičnog sustava za obavještanje.....	105
Slika 22. Uobičajene vrste distribucija .....	113
Slika 23. Histogram kategorije planirani zastoji .....	115
Slika 25. Histogram kategorije neplanirani zastoji.....	115
Slika 24. Histogram kategorije gubitaka učinkovitosti.....	116
Slika 26. Histogram kategorije gubitaka kvalitete .....	116
Slika 27. Histogram kategorije OEE.....	117
Slika 28. Histogram kategorije TEEP .....	117
Slika 29. Histogram simulirane kategorije planirano stajanje .....	118

Slika 30. Histogram simulirane kategorije planirani zastoji .....	118
Slika 31. Histogram simulirane kategorije neplanirani zastoji .....	119
Slika 32. Histogram simulirane kategorije učinkovitost.....	119
Slika 33. Histogram simulirane kategorije kvaliteta.....	119
Slika 34. Histogram simulirane kategorije OEE.....	120
Slika 35. Histogram simulirane kategorije TEEP .....	120
Slika 36. Dijagram normalne razdiobe .....	121
Slika 37. Simulacija rezultata OEE-a nakon povećanja učinkovitosti za 10 %.....	122
Slika 38. Simulacija rezultata OEE-a nakon povećanja učinkovitosti za 20 %.....	122
Slika 39. Simulacija rezultata OEE-a nakon povećanja učinkovitosti za 20 % i smanjene standardne devijacije.....	123
Slika 40. Prikaz OEE raspodjele sa zadanim granicama zahtjeva. ....	124
Slika 41. Primjer pomaka stabilnosti procesa za 1,5 $\sigma$ .....	125

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Istraživanja koja su filtrirana za izvlačenje podataka.....	9
Tablica 2. Anketna pitanja.....	47
Tablica 3. Broj iskoristivih odgovora po tvrtki i po vrsti radne skupine .....	49
Tablica 4. Vrijednosti Cronbachovog alfa i McDonaldovog omega za pojedine skupove podataka. ....	53
Tablica 5. Pregled uloga u tvrtkama i grupama u koje su kategorizirane. ....	54
Tablica 6. Pregled izjava s najnižim razinama slaganja.....	59
Tablica 7. Pregled izjava s najnižom razinom slaganja. ....	63
Tablica 8. Primjer dnevnika stroja .....	77
Tablica 9. Klasifikacija preventivnog održavanja [17] .....	80
Tablica 10. Podaci potrebni za analizu OEE-a.....	87
Tablica 11. Kategorije gubitaka. ....	92
Tablica 12. Vrijednosti aritmetičke sredine i standardne devijacije za pojedine kategorije ..	114
Tablica 13. Prikaz vrijednosti OEE-a prije i nakon poboljšanja.....	123

## POPIS OZNAKA

OZNAKA	ZNAČENJE
$L1$	Planirani gubici raspoloživosti
$L2$	Neplanirani gubici raspoloživosti
$L3$	Gubici zbog reakcije
$L4$	Gubici kvalitete
$OEE$	Ukupna efektivnost proizvodne opreme
$T$	Vrijeme rada
$\bar{x}$	Prosjek
$x_1 + \dots + x_n$	Pojedinačne vrijednosti u grupi
$n$	Broj vrijednosti
$s$	Standardna devijacija
$Cp$	Sposobnost procesa
$Cpk$	Indeks sposobnosti
$\sigma$	Standardna devijacija
$Z$	Funkcija cilja
$PA$	Prodajna cijena proizvoda A
$PB$	Prodajna cijena proizvoda B
$x$	Trošak proizvoda A
$y$	Trošak proizvoda B
$N$	Ukupna sredstva
$TA$	Vrijeme proizvodnje za proizvod A
$TB$	Vrijeme proizvodnje za proizvod B
$IA$	Trošak materijala za proizvod A
$IB$	Trošak materijala za proizvod B
$CA$	Proizvodni trošak za proizvod A
$CB$	Proizvodni trošak za proizvod B
$F_{observed}$	F omjer ANOVA-e
$S^2_{between\ groups}$	Standardna devijacija između grupa
$S^2_{within\ groups}$	Standardna devijacija unutar grupa
$\alpha$	Cronbach's alpha koeficijent
$\sigma_x^2$	Varijanca promatranih ukupnih rezultata

$\sigma_{Yi}^2$ varijanca  $i$  za osobu  $Y$ **POPIS KRATICA**

KRATICA	ZNAČENJE
TPM	Totalno produktivno održavanje (Total productive maintenance)
SMED	Jednoznamenkasta izmjena alata (Single minute exchange of dies)
5S	5S metodologija organizacije
TQM	Cjelokupno upravljanje kvalitetom (Total Quality Management)
I 4.0	Industrija 4.0 (Industry 4.0)
TIPAS	Univerzalni model implementacije TPM-a
OEE	Ukupna efektivnost proizvodne opreme (Overall Equipment Efficiency)
IoT	Internet stvari (Internet of things)
KPI	Ključni pokazatelj (Key Performance Indicator)
CNC	Računalno numeričko upravljanje (Computerized Numerical Control)
OPS	Operativni procesni list (Operation process sheet)
SME	Malo ili srednje poduzeće (Small or medium-sized enterprise)
PDCA	Planiraj-Izvrši-Provjeri-Djeluj (Plan-Do-Check-Act)
OHS	Zaštita zdravlja i sigurnost na radu (Occupational Health and Safety)
R&D	Istraživanje i razvoj (Research and Development)
CSF	Kritični faktor uspješnosti (Critical Success Factor)
JIT	Točno na vrijeme (Just-In-Time)
FMEA	Analiza načina i posljedica otkaza (Failure Modes and Effects Analysis)
LM	Vitka proizvodnja (Lean Manufacturing)



MSI	Sustav upravljanja integritetom (Integrity Management system)
JIPE	Japanski institut inženjera za postrojenja (Japanese Institute of Plant Engineers)
MM	Minimalno održavanje (Minimal Maintenance)
PM	Preventivno održavanje (Preventive Maintenance)
OPE	Ukupna učinkovitost postrojenja (Overall Plant Efficiency)
CFA	Potvrдна faktorska analiza (Confirmatory Factor Analysis)
SWOT	Snage-Slabosti-Prilike-Prijetnje (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats)
SOP	Standardni operativni postupak (Standard Operative Procedure)
TEEP	Ukupna efektivna produktivnost opreme (Total Effective Equipment Productivity)
EU	Iskorištenost opreme (Equipment Utilisation)
LA	Vitka automatizacija (Lean Automation)
DT	Digitalni blizanac (Digital Twin)
VR	Virtualna stvarnost (Virtual Reality)
M2M	Stroj-stroj komunikacija (Machine-to-Machine)
MR	Opskrbna dostava (Milk Run)
MC	Metoda "Monte Carlo"
AI	Umjetna inteligencija (Artificial Intelligence)
ENIAC	Elektronički numerički integrator i računar (Electronic Numerical Integrator And Computer)
ANOVA	Analiza varijance (Analysis of Variance)

## 1. UVOD

Zbog rastuće konkurencije i globalizacije, tvrtke iskušavaju nove metode i tehnike kako bi isplativo proizvele učinkovitije i kvalitetnije proizvode. Proizvodna tehnologija toliko je napredovala da pitanje u proizvodnji više nije: "možemo li napraviti određeni proizvod", već "koliko brzo ga možemo napraviti". Takav pritisak, zajedno s rastućom konkurencijom koja je sve sposobnija proizvesti proizvod uz minimalne troškove, tjera proizvođače da preopterećuju svoju radnu opremu i guraju je do krajnjih granica. Kako bi ostale konkurentne, proizvodne tvrtke odlučuju implementirati nove tehnologije i organizacijske filozofije. Jedna od spomenutih filozofija je vitka proizvodnja (Lean Manufacturing) i njezini alati za učinkovitu i organiziranu proizvodnju usmjerenu na smanjenje gubitaka. Lean alati su jedna od tehnika koje daju prednost proizvodnim tvrtkama u smislu smanjenja gubitaka, organiziranijeg radnog prostora i brže i jeftinije proizvodnje uz održavanje kvalitete proizvoda. Neki od Lean alata su 5S (alat za čišći i organiziraniji radni prostor), Single Minute Exchange of Dies - SMED (za učinkovitu zamjenu radnih alata), Kanban (metoda upravljanja radnim tokovima) i Total Productive Maintenance ili TPM. TPM je metoda za poboljšanje životnog vijeka, pouzdanosti, raspoloživosti i učinkovitosti proizvodne opreme. Pregledom trenutne literature na temu TPM-a jasno je da TPM donosi benefite za učinkovitu i organiziranu proizvodnju, smanjenje gubitaka, smanjenje troškova proizvoda i pozitivan utjecaj na okoliš. Međutim, postoji jaz u smislu pravilne metodologije i strateškog pristupa implementaciji TPM-a kako bi se osigurala stabilnost implementiranih principa i izbjegle moguće poteškoće koje mogu negativno utjecati na uspješnu implementaciju i održivost TPM-a.

Opsežan pregled literature na početku rada pruža dubok uvid u trenutni status Total Productive Maintenance (TPM) u proizvodnom sektoru. Naglašava pozitivni utjecaj TPM-a u različitim kritičnim područjima proizvodnje. Prvo, razjašnjava utjecaj TPM-a na značajno smanjenje kvarova opreme, vitalni aspekt u održavanju neprekinute proizvodnje. Dodatno, istražuje izazove i prednosti ostvarene implementacijom TPM-a. Značajan doprinos TPM-a poboljšanju ukupne proizvodne učinkovitosti također je ključna tema, uz kompatibilnu integraciju s principima Total Quality Managementa (TQM). Nadalje, pregled literature istražuje ulogu TPM-a u motivaciji i angažiranju zaposlenika, njegove ekološke benefite i kompatibilnost s paradigmom Industrije 4.0 (I4.0).

Evolucija optimizacije održavanja u ovom radu daje pozadinu istraživanju kako bi se dublje razumio razvoj praksi održavanja u proizvodnim poduzećima i dobila ideja o mogućim budućim napretcima u tom području. Evolucija počinje s povijesnim korijenima koji datiraju iz 1951. godine, kada je uvedeno preventivno održavanje u Japanu, iako koncept izvorno potječe iz SAD-a. Pionirski naponi Nippondensa 1960. godine označili su značajnu prekretnicu u praksama održavanja cijelog postrojenja, prelazeći s preventivnog na autonomno održavanje kako se povećavala automatizacija. Ova promjena omogućila je operaterima strojeva da se bave rutinskim zadacima, dok se osoblje za održavanje fokusiralo na kritične aktivnosti održavanja, postavljajući temelje za ono što će postati poznato kao produktivno održavanje. Uvođenje krugova kvalitete dodatno je učvrstilo evoluciju TPM-a, što je dovelo do priznanja Nippondensa od strane Japanskog instituta inženjera za postrojenja. Kako moderna automatizacija napreduje, važnost proaktivnog održavanja postaje sve očitija, kako naglašava istraživanje koje ističe važnost suvremenih praksi održavanja. Gunasekaran i dr. [3] istražuju utjecaj TPM-a na produktivnost i kvalitetu, naglašavajući ulogu motivacije zaposlenika u smanjenju zastoja i gubitka resursa. Lee [4] istražuje integraciju kompjuterski podržanog održavanja, fokusirajući se na predikciju kvarova putem praćenja opreme. Panagiotidou i dr. [5] predlažu ekonomski model za optimizaciju postupaka održavanja, balansirajući minimalno i preventivno održavanje. Edukacija i trening pojavljuju se kao ključni dijelovi TPM-a, potičući vještine i moral među zaposlenicima. Uredski TPM cilja na administrativne neučinkovitosti, dok kontinuirano poboljšanje i kvaliteta održavanja fokusiraju se na sustavna poboljšanja i prevenciju kvarova. Venkatesh [6] ističe direktne benefite poput povećane produktivnosti i zadovoljstva kupaca, zajedno s indirektnim benefitima kao što su poboljšani moral na radnom mjestu i dijeljenje znanja. Unatoč različitim pristupima implementaciji TPM-a istraženim u literaturi, i dalje ne postoji univerzalno održiv model u proizvodnim poduzećima.

Sljedeće poglavlje daje opsežan uvid u moguće izazove i prepreke koje mogu nastati tijekom implementacije i održavanja praksi TPM-a. Uspješno uvođenje i održiva implementacija TPM-a i drugih lean alata može biti ometena različitim čimbenicima. Ovo poglavlje fokusira se na ključne čimbenike identificirane kroz odgovore na anketu, posebno naglašavajući kritične aspekte vezane uz interne audite, odabir opreme, sigurnost radnih mjesta i prioritizaciju lean zadataka. Dok su auditi ključni za održavanje kvalitete i održivosti lean praksi, njihova važnost nije univerzalno prepoznata među zaposlenicima. Napori da se auditi integriraju u programe obuke i uključe sve razine hijerarhije mogu povećati njihovu

percipiranu vrijednost i učinkovitost. Nadalje, postoji nesigurnost u vezi s odabirom prikladne opreme za implementaciju TPM-a, naglašavajući potrebu za strateškim izborom opreme usklađenim s lean principima. Zabrinutost za sigurnost radnih mjesta među zaposlenicima može dovesti do otpora promjenama i suboptimalne izvedbe, naglašavajući važnost rješavanja tih strahova kroz motivacijske strategije i poticajno radno okruženje. Osim toga, zaposlenici često percipiraju lean aktivnosti kao manje važne od drugih zadataka, posebno u tvrtkama s dugogodišnjim tradicijama i starijim radnim snagama. Ključno je integrirati lean principe besprijekorno u postojeće radne tokove i osigurati dovoljno vremena za te aktivnosti kako bi se spriječio otpor i osigurala učinkovitost. Unatoč tim izazovima, postoji široko prepoznavanje dugoročnih benefita lean alata, poput poboljšane produktivnosti i organizacijske učinkovitosti. Osobe zadužene za provođenje edukacije i lideri igraju ključnu ulogu u poticanju razumijevanja i entuzijazma za lean prakse, čime se olakšava uspješna implementacija. Provođenjem anketa u nekoliko proizvodnih tvrtki naglašeni su i analizirani ključni čimbenici koji mogu imati negativan utjecaj, a prate ih preporuke usmjerene na sprječavanje pojave tih problema.

Glavni dio rada je TIPAS - novi univerzalni model implementacije TPM-a za uspješnu implementaciju praksi TPM-a. TIPAS model, razvijen kroz iskustvo, stručnost i testiranjem u praksi, služi kao univerzalni okvir za implementaciju TPM-a u proizvodnim poduzećima. Sastoji se od pet glavnih faza:

6. **Trening tima i odabir opreme:** Upoznaje osoblje s metodologijom TPM-a, formira timove i odabire opremu za TPM aktivnosti.
7. **Inicijalna inspekcija:** Fokusira se na procjenu trenutnog stanja opreme, ispravljanje kvarova i pokretanje mjerenja ukupne efektivnosti opreme (OEE).
8. **Planirano održavanje:** Faza uključuje razvoj detaljnih planova za preventivno i korektivno održavanje, dokumentiranje postojećih praksi održavanja i implementaciju planova.
9. **Autonomno održavanje:** Fokusira se na obuku operatera za osnovno održavanje opreme, razvijanje kontrolnih popisa za autonomno održavanje i praćenje zastoja opreme.
10. **Stanje održivosti:** Posljednja faza uključuje kontinuirano praćenje performansi, analizu podataka, redovite audite, trajnu obuku i stalno poboljšanje kako bi se osigurala dugoročna održivost TPM-a.

Eksperti zaduženi za implementaciju TPM-a mogu prilagoditi TIPAS model svojim specifičnim potrebama i ciljevima. Pružena su objašnjenja svake faze zajedno s preporukama za pravilno izvođenje. To uključuje potrebne radnje, raspodjelu osoblja, organizaciju edukacije, odabir opreme i dokumentacijske zahtjeve za podršku TPM metodologiji. Dodatno, pruža se savjet za održavanje održivosti implementiranih praksi. Ukupna učinkovitost proizvodne opreme ključna je za identifikaciju slabosti opreme kako bi se osigurali optimalni uvjeti rada. Istovremeno, potrebno je fokusirati se na eliminaciju faktora poput iznenadnih kvarova, gubitaka brzine i gubitaka kvalitete. Ovi gubici mogu se primijetiti u čestim promjenama proizvoda tijekom proizvodnje malih serija. Kako bi se stvorio adekvatan model održavanja podržan softverskim rješenjima, ključno je razumjeti proizvodnju i odabrati strategiju proizvodnje. Preduvjet za ispravan izbor strategije je situacijska analiza. To uključuje ispitivanje vanjskih i unutarnjih faktora kako bi se utvrdio najbolji način za postizanje željenog cilja. Sve veća dinamika tržišta tjera poduzetnike da pažljivo biraju svoj konkurentski pristup, a korištenjem različitih alata i analiza mogu se dobiti relevantni podaci za uspostavljanje odgovarajućeg modela održavanja.

Jedan od ključnih alata u ocjenjivanju učinkovitosti proizvodne opreme je analiza OEE. Ukupna učinkovitost proizvodne opreme (OEE) je alat koji se koristi za određivanje ukupne učinkovitosti proizvodne opreme. Analiza se temelji na izračunu ukupnog dostupnog vremena proizvodnje unutar određenog razdoblja i oduzimanju gubitaka od tog vremena. Razmatraju se planirani i neplanirani gubici, uključujući planirane zastoje, planirane gubitke, neplanirane gubitke, gubitke performansi i gubitke kvalitete. Rezultat analize je postotak raspoloživosti proizvodne opreme unutar zadanog razdoblja. Ovi podaci služe kao osnova za usporedbu poboljšanja ili pogoršanja ili za uspostavljanje odgovarajućeg modela održavanja. Poglavlje uključuje detaljan postupak mjerenja OEE-a, specificirajući podatke koje treba zabilježiti i postupak izračuna. Nadalje, pruža pregled kategorija gubitaka kako bi se olakšalo točno bilježenje gubitaka.

Model je uspješno implementiran u velikom proizvodnom poduzeću, što je rezultiralo poboljšanjem ukupne OEE proizvodne opreme i kontinuiranim praćenjem praksi održavanja radi održavanja učinkovitosti i pouzdanosti. Autori su kontinuirano koristili model u svojim područjima, pokazujući njegovu učinkovitost. Slijedeći detaljne upute sadržane u ovom radu, tehničko osoblje u proizvodnim poduzećima, mogu osigurati stratešku, uspješnu i održivu implementaciju TPM-a.

Napredak u računalnim tehnologijama ide ruku pod ruku s TPM praksama. U posljednjem poglavlju pokazano je da TPM može koegzistirati s modernim računalnim praksama poput heurističkih pristupa za izvlačenje i obradu podataka, koncepta Interneta stvari (IoT) i optimizacije linearnih programa, koji su svi dio Industrije 4.0. Industrija 4.0 (I4.0) adresira izazove u vitkoj proizvodnji integrirajući tehnologije poput IoT, umjetne inteligencije (AI), bežične tehnologije i velikih podataka. Studije naglašavaju transformativne učinke I4.0 na planiranje, održavanje i obuku zaposlenika. Inteligentni sustavi u I4.0 ciljaju na samoregulirajuću proizvodnju, dok znanost o podacima transformira podatke u stvarnom vremenu u smislenu znanja. Transparentnost i dostupnost podataka koje nudi I4.0 pojednostavljuju izračune OEE-a, smanjuju ručne zadatke i povećavaju zadovoljstvo zaposlenika. Simulacijske mogućnosti pomažu u odabiru opreme za TPM, osiguravajući kompatibilnost s lean filozofijama. Usvajanje principa Industrije 4.0 pokazuje potencijal za prevladavanje izazova i osiguranje učinkovite implementacije i dugoročnog uspjeha lean alata i TPM praksi.

Korištenjem opsežnog pregleda literature, anketa provedenih u proizvodnom sektoru, studija slučaja provedenih u proizvodnim poduzećima, iskustva i stručnog znanja, ovaj rad pruža smjernice za uspješnu i održivu implementaciju TPM-a, što rezultira povećanjem raspoloživosti, pouzdanosti i učinkovitosti proizvodne opreme. Predložit će se model održavanja koji će osigurati najvišu moguću razinu raspoloživosti i učinkovitosti proizvodne opreme uz minimalnu količinu rizika kao što su kvarovi, habanje, problemi sa starenjem opreme, loša implementacija ili otpor radnika prema promjenama.

Na svom trenutnom radnom mjestu kao voditelj proizvodnje, imam priliku primijeniti svoj teoretski rad i istraživanja u praksi, budući da sam odabran za koordinatora TPM-a. Ovdje mogu procijeniti valjanost modela održavanja u konkretnoj proizvodnji, provoditi ankete i dobiti povratne informacije od osoblja uključenog u održavanje proizvodne opreme.

### 1.1. Hipoteza i cilj istraživanja

U usporedbi s drugim područjima istraživanja, područje održavanja proizvodne opreme nije toliko popularno. Kao rezultat toga, postojeća istraživanja u ovom području su ograničena i nisu vrlo opsežna. Pregledom dostupne literature postoji praznina u smislu potpunog modela za uspješnu i održivu implementaciju TPM-a. Cilj je bio stvoriti model održavanja koji može učinkovito analizirati proizvodnu opremu i odrediti odgovarajuću strategiju održavanja. Ovaj

rad pruža smjernice i upute za implementaciju korak po korak kako bi se osigurala uspješna i održiva implementacija. Glavni cilj je eliminacija gubitaka u proizvodnji uzrokovanih kvarovima i nedostupnosti opreme, i zbog toga će se koristiti alati Lean i TPM u razvoju modela. Također je važno istaknuti moguće uzroke neuspjele implementacije i održivosti modela optimizacije te dati smjernice kako izbjeći moguće negativne utjecaje na implementaciju TPM-a.

Hipoteza ovog istraživanja je: Provedbom istraživanja negativnih utjecanih faktora implementacije cjelokupnog učinkovitog održavanja te formiranjem novog modela održavanja može se značajno povećati raspoloživost i učinkovitost proizvodne opreme. Kroz detaljnu analizu proizvodnje i opreme, korištenjem metoda kao što su alati za vitko održavanje, ukupna efektivnost opreme (OEE), prakse totalnog produktivnog održavanja (TPM) te korištenjem stručnog znanja i iskustva moguće je osigurati veću pouzdanost i vijek trajanja proizvodne opreme, čime se povećava proizvodni kapacitet, profit i konkurentnost na tržištu.

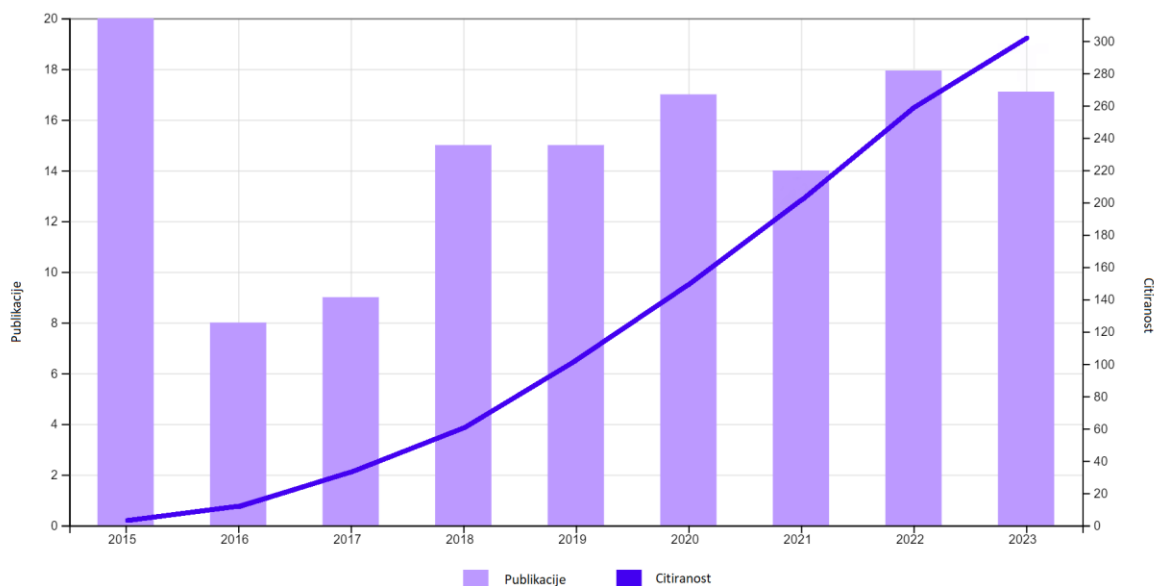
## 2. PREGLED LITERATURE

Pregled literature često se pokazuje neprocjenjivim za istraživače jer pruža čitateljima trenutačan i pomno organiziran sažetak postojeće literature unutar određenog područja, čime se povećava ukupno razumijevanje. Može se tvrditi da kvalitetan pregledni rad ima veću važnost za istraživačku zajednicu u usporedbi s visokokvalitetnim istraživačkim radom koji slijedi konvencionalniju istraživačku strukturu i fokusira se na užu temu. Pregled dodaje vrijednost istražujući postojeća istraživanja u području, a kroz taj proces često otkriva praznine i potencijalne smjerove za buduća istraživanja. Neke od dodanih vrijednosti pregleda literature uključuju stanje znanja, praznine u literaturi, slabosti korištenih metodologija, mogućnosti za nove metode i mogućnosti za buduća istraživanja.

U tipičnom pregledu literature, tradicionalni pristup započinje uvodom koji objašnjava njegovu ukupnu svrhu. Zatim se sustavno predstavlja pregledana literatura, raspravljajući o razlikama i sličnostima među citiranim materijalima. Nakon toga, istraživanje prelazi u raspravni dio i završava završnim mislima.

Baze podataka Web of Science Core Collection i Google Scholar pretražene su kako bi se dobili najcitiraniji i najrelevantniji istraživački radovi za ekstrakciju podataka. Podaci su filtrirani prema naslovu „Total Productive Management“ ili „TPM“, a korišteni su sljedeći ključni pojmovi: „Total Productive Maintenance“, „TPM“, „Overall Equipment Efficiency“, „OEE“, „Autonomous Maintenance“, „5S“ i „Kaizen“. Vremenski raspon pretraživanja postavljen je od 1. siječnja 2015. do datuma izrade ove teze. Međutim, s obzirom da je studija uključivala preglede literature, referirala se i na starije radove u tom procesu. Rezultati su rafinirani prema istraživačkim područjima: inženjerstvo, računalne znanosti, poslovna ekonomija, operacijska istraživanja i znanost o upravljanju, znanost o materijalima, mehanika, automatizacija i sustavi upravljanja, fizika, industrijsko inženjerstvo, informacijski sustavi računalne znanosti i proizvodnja. Tipovi dokumenata su rafinirani kao: članak, zbornici, konferencijski radovi, rani pristup i pregledni članci. Ukupno je filtrirano 121 dokument za dane uvjete. Iako je došlo do povećanja studija na temu TPM-a od 2018. godine, slika 1. pokazuje da postoji ubrzani rast citata na provedena istraživanja, uz praktički konstantan broj publikacija od 2018. To pokazuje povećan interes za teme TPM-a i OEE-a posljednjih godina.





*Slika 1. Pregled broja objavljenih radova i citata pretraženih članaka [7]*

Od tih 121 rada, 13 je isključeno jer kratica TPM ima različite primjene kao što su „Theory of Porous Media” ili „Trajectory Pattern Method“. Od preostalih 108 radova, pristup punom tekstu dobiven je za 75 njih. Ovaj pristup dobiven je ili putem samih baza podataka ili ljubaznim ustupanjem punih tekstova od strane autora. Evaluacija identificiranih studija za izvlačenje podataka započela je početnom procjenom na temelju njihovih sažetaka, a dodatno je rafinirana temeljitim pregledom punih tekstova tih studija. Najprikladniji istraživački radovi uzeti su u obzir za pregled literature. Studije slučaja napravljene za određenu tvrtku ili uska i specifična istraživačka područja isključena su iz izvlačenja podataka. Nakon što su svi radovi pročitani i pregledani, ukupno je 27 radova ocijenjeno kao najrelevantniji. Kritični podaci izvučeni su iz najrelevantnijih radova, grupirani i raspravljani. Tablica 1. prikazuje najrelevantnije radove, njihov cilj i ključne nalaze.

Tablica 1. Istraživanja koja su filtrirana za izvlačenje podataka.

Broj	Naslov istraživanja	Godina	Područje istraživanja	Vrsta istraživanja	Metoda	Ključni nalazi
1	Review of Total Productive Maintenance (TPM) & Overall Equipment Effectiveness (OEE) Practices in Manufacturing	2020	Pregled TPM-a	Pregledni rad	Pregled literature	Primjeri prednosti iz različitih poduzeća nakon implementacije TPM-a
2	Implementing Successful Total Productive Maintenance (TPM) in a Manufacturing Plant	2015	Implementacija TPM-a	Zbornik radova	Anketa	Studija je pokazala da se tvrtke ne bi trebale samo koncentrirati na strojeve ili opremu za postizanje viših profita i produktivnosti kroz TPM, već se moraju usredotočiti i na svoju radnu snagu.
3	A survey on factors affecting total productive maintenance (TPM) in service industries	2019	Čimbenici koji utječu na TPM	Konferencijski rad	Anketa	Odabir opreme je ključan.
4	Evaluating 8 pillars of Total Productive Maintenance (TPM) implementation and their contribution to manufacturing performance	2017	Utjecaj TPM-a na proizvodni učinak	Konferencijski rad	Anketa	Pozitivan utjecaj na kvalitetu, troškove i OEE.
5	Identification of key enablers for total productive maintenance (TPM) implementation in Indian SMEs	2017	Ključni pokretači TPM-a	Rad u časopisu	Pregled literature, anketa i mišljenje stručnjaka	Naglašeni ključni pokretači TPM-a.

6	Interpretive Structural Modelling (ISM) and its application in analysing factors inhibiting implementation of Total Productive Maintenance (TPM)	2014	Primjena interpretativnog strukturnog modeliranja (ISM) za analizu prepreka u implementaciji Total Productive Maintenance (TPM)	Rad u časopisu	Interpretive Structural Modelling	ISM se može koristiti za analizu varijabli TPM-a.
7	Problems and Barriers Affecting Total Productive Maintenance Implementation	2019	Problemi i prepreke koje utječu na implementaciju TPM-a	Rad u časopisu	Anketa	Nedostatak jasnih ciljeva, smjernica i strategija definiranih od strane menadžmenta uzrokuje preopterećenje nekih radnika.
8	Total Productive Maintenance in Automotive Industry: Issues And Effectiveness	2015	Razlika između rezultata prije i poslije implementacije TPM-a na OEE	Konferencijski rad	Analiza podataka pomoću Microsoft Excela	TPM je koristan alat za pomoć tvrtkama u postizanju optimalnog proizvodnog procesa.
9	Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: a case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line	2017	TPM filozofija kao sustavan način izbjegavanja gubitaka i povećanja produktivnosti u liniji za obradu autodijelova	Rad u časopisu	Bilježenje rezultata prije i poslije implementacije TPM stupova, Pareto analiza	Organizirano i dinamično sudjelovanje svih područja u proizvodnim procesima putem TPM-a generira solidno i održivo povećanje produktivnosti.
10	Implementing Total Productive Maintenance in a Manufacturing Small or Medium-Sized Enterprise	2020	Model implementacije TPM-a	Rad u časopisu	Pregled literature	Model za implementaciju TPM-a u tri faze.

11	Total productive maintenance, total quality management and operational performance	2016	Empirijska studija indijske farmaceutske industrije	Rad u časopisu	Anketa	Korisni uvidi za implementaciju.
12	Sustainable manufacturing: Exploring antecedents and influence of Total Productive Maintenance and lean manufacturing	2019	Utjecaj na okoliš	Rad u časopisu	Podaci iz IMSS-a	Nalazi će pomoći tvrtkama razumjeti kako šest različitih LM praksi, uključujući TPM, može pomoći poboljšanju ekološke održivosti.
13	Base Principles and Practices for Implementation of Total Productive Maintenance in Automotive Industry	2019	Prednosti TPM-a u automobilske industriji	Konceptualni rad	Analiza koraka TPM-a	Implementacija autonomnog održavanja i drugih TPM stupova, 5S zahtijeva podršku menadžmenta.
14	Digitalization of maintenance: Exploratory study on the adoption of Industry 4.0 technologies and Total Productive Maintenance practices	2022	TPM i Industrija 4.0	Rad u časopisu	Prikupljanje podataka od stručnjaka	TPM prakse koje se dosljedno usklađuju s Industrijom 4.0.
15	Implementation of Total Productive Maintenance Approach: Improving Overall Equipment Efficiency of a Metal Industry	2022	TPM u industriji obrade metala	Rad u časopisu	Pregled podataka	Implementacija TPM-a vodi do povećanja ukupne učinkovitosti opreme (OEE).
16	Effect of total productive maintenance practices on manufacturing performance	2016	Utjecaj TPM-a u tekstilnoj industriji	Rad u časopisu	Anketa	Utjecaj TPM praksi na proizvodne performanse.
17	A review on the identification of total productive maintenance critical success factors for	2021	Pregled kritičnih faktora uspjeha TPM-a	Review paper	Pregled literature	Postojeća literatura pokazuje da je vrlo malo dostupnih modela

effective implementation in the manufacturing sector

implementacije TPM-a za proizvodni sektor.

18	An assessment of key performance indicators and its relationship for implementation of total productive maintenance in manufacturing sector	2023	Procjena ključnih pokazatelja uspješnosti (KPI) ukupnog produktivnog održavanja	Rad u časopisu	Anketa	Prepoznavanje KPI-ova TPM-a.
19	OEE enhancement in SMEs through mobile maintenance: a TPM concept	2015	Mobilno održavanje	Rad u časopisu	Studija promjene OEE-a	Mobilno održavanje može biti korisno za mala i srednja poduzeća.
20	Training and practice to ensure implementation of the TPM system	2020	Obuka osoblja za TPM	Rad u časopisu	Stručno znanje	Predloženi model za obuku.
21	Potential of Using TPM to Increase the Efficiency of Production Processes	2020	Utjecaj TPM-a na zastoje	Rad u časopisu	Praćenje OEE-a	TPM pozitivno utječe na smanjenje kvarova.
22	Assessment of TPM and TQM practices on business performance: a multi-sector analysis	2018	Studija utjecaja TPM-a u tvrtkama	Rad u časopisu	Višesektorski analitički okvir	TPM×TQM pristup donosi koristi.
23	An evaluation of transfusion of TQM-TPM implementation initiative in an Indian manufacturing industry	2014	Sinergijski utjecaj TPM-a i TQM-a	Rad u časopisu	Usporedba poboljšanja poslovne izvedbe	TPM i TQM sinergija pozitivno utječe na učinkovitost proizvodnje.
24	A sequential TPM-based scheme for improving production effectiveness presented with a case study	2018	Predloženi koraci implementacije TPM-a	Rad u časopisu	TPM shema koja se sastoji od 13 proceduralnih koraka	Predložena shema bila je učinkovita u povećanju ukupne učinkovitosti opreme za 62,6% tijekom devetomjesečnog razdoblja.

25	The impact of Industry 4.0 on the relationship between TPM and maintenance performance	2022	Odnos između Industrije 4.0 i TPM-a	Rad u časopisu	Prikupljanje podataka	Postoji utjecaj Industrije 4.0 na TPM.
26	The relationships between TQM, TPM, JIT and agile manufacturing: an empirical study in industrial companies	2021	Sinergijski utjecaj TPM-a i TQM-a	Rad u časopisu	Anketa	Nalazi ukazuju da TPM pozitivno utječe na TQM i JIT.
27	A survey approach to study the influence of management factor in implementing TPM in selected SMEs	2020	Razina svijesti o TPM-u	Konferencijski rad	Anketa	Potrebno je ulaganje u obrazovanje kako bi se osigurala uspješna implementacija.

---

S obzirom na to da je ovaj rad posebno usmjeren na članke iz proteklih osam godina, ključno je analizirati preglede provedene unutar ovog vremenskog okvira. Ti pregledi obuhvaćaju sažetke radova vezanih uz temu koji su objavljeni prije pretraživačkog filtera ove studije. Nakon pregleda radova i studija, postaje očito da TPM ima značajan utjecaj na nekoliko ključnih kategorija ili područja unutar proizvodnih i održavateljskih procesa. Studije su kategorizirane u grupe temeljene na njihovom tematskom fokusu i specifičnim područjima u kojima su dale doprinos. Te kategorije uključuju:

- Korisnost TPM-a i OEE-a za smanjenje kvarova,
- Strategije implementacije i izazovi TPM-a i OEE-a,
- Doprinos TPM-a učinkovitosti proizvodnje,
- Benefiti umrežavanja TPM-a i TQM-a,
- Fokus na zaposlenike,
- Eliminacija otpada i,
- Ekološke prednosti i Industrija 4.0.

#### 2.1. Korisnost TPM-a i OEE-a za smanjenje kvarova

Istraživanje [8] bavi se pregledom literature o glavnim lean alatima za upravljanje održavanjem. TPM i OEE, njihova implementacija i učinak raspravljani su među različitim tvrtkama i studijama slučaja. Korisnost TPM-a i analize OEE-a pokazala se korisnom u smanjenju kvarova u raznim tvrtkama.

U svom istraživanju [9] Tsarouhas, kako citira Virk [8], proveo je studiju slučaja i istraživanje upravljanja proizvodnom linijom u industriji pića. Analiza podataka o kvarovima i popravcima tijekom razdoblja od 8 mjeseci na različitim strojevima na liniji provedena je kako bi se ocijenili metrički podaci ukupne učinkovitosti opreme (OEE) i identificirali najčešći kvarovi strojeva te najčešće vrste kvarova. Tri od šest strojeva na liniji doprinijela su najčešćim kvarovima, što je činilo do 80% svih kvarova. Utvrđeno je da se svakih 237 minuta događa kvar na liniji koji traje od 10 do 700 minuta. Preporuke za poboljšanje linije uključivale su implementaciju TPM programa, zamjenu strojeva koji su najčešće kvarili te obuku osoblja za održavanje i operatere.

2020 godine provedeno je istraživanje slučaja o učinkovitosti bušilica i glodalica u tvornici teške mehanizacije [10]. Nakon analize studije utvrđeno je da su povezani CNC strojevi radili znatno ispod predloženog svjetskog standarda OEE, te je zaključeno da postoji dovoljno prostora za poboljšanje. Preporuke za poboljšanje OEE rezultata CNC strojeva bile su sljedeće:

- Odlučeno je da će se održavanje stroja provoditi tijekom pauze za ručak, što bi dovoljno smanjilo kašnjenje sa 60 minuta na 50 minuta.
- Osoblje kantine treba povećati kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za distribuciju ručka, koje trenutno iznosi 30 minuta, dok je predviđeno vrijeme za pauzu samo 15 minuta.
- Tijekom promatranja utvrđeno je da odabir alata i nedostupnost umetaka alata oduzimaju puno vremena, tijekom kojeg oprema ostaje neaktivna čak 60 minuta. Ovaj problem može se riješiti zapošljavanjem iskusnog osoblja i klasifikacijom umetaka alata.
- Prije početka operacije, operateru treba pružiti radni list operacija (OPS) i crtež komponente, kako bi operater mogao lako razumjeti slijed operacija koje treba poduzeti za obradu tog određenog dijela.
- Utvrđeno je da tijekom procesa učitavanja stezaljke nisu bile pravilno postavljene, a pomoćnici operatera nisu bili dovoljno obučeni, što je dovelo do nepotrebnog povećanja vremena podešavanja. Stoga je predloženo da se unaprijed pripreme stezaljke i drugi potrebni pribor za operaciju.

Nakon implementacije gore navedenih prijedloga, utvrđeno je da je OEE rezultat CNC stroja s tablom porastao sa skromnih 62% na 75%. Međutim, to je još uvijek znatno ispod svjetskog standarda OEE, što znači da postoji prostor za daljnja poboljšanja.

Autori istraživanja [11] proveli su studiju slučaja u tvornici za sastavljanje automobila kako bi poboljšali produktivnost. Primijenili su lean alate i tehnike kako bi identificirali uzroke niske produktivnosti te su predložili lean proizvodne prakse za očekivano poboljšanje produktivnosti. Također su usporedili produktivnost prije i nakon primjene lean metoda kako bi istaknuli prednosti Total Productive Maintenance (TPM) i lean proizvodnih praksi, poput takta vremena, u tvornici za sastavljanje automobila.

Istraživanje koje ima za cilj pružiti detaljniju evaluaciju kako se 8 stupova TPM-a primjenjuje u Indoneziji i njihovog naknadnog utjecaja na proizvodne performanse dalo je



zaključiti su da je implementacija 8 stupova TPM-a u proizvodnim industrijama Indonezije općenito bila uspješna i učinkovita te je imala pozitivan utjecaj na kvalitetu proizvoda, troškove proizvoda i ukupnu učinkovitost opreme (OEE) [12].

## 2.2.Strategije implementacije i izazovi TPM-a i OEE-a

Za uspješnu i korisnu primjenu TPM-a (Total Productive Maintenance) u proizvodnom pogonu, ključno je uvesti ga s ekspertizom i na strukturiran način. Nakajima spominje da mnoge industrije pokušavaju implementirati Total Productive Maintenance, međutim, samo mali broj industrija postiže izlaz ili iskorištenost do 60-90% problema [13].

Primarni fokus istraživanja [2] bio je postizanje ravnoteže između strojeva koje koriste operateri, samih operatera i strategije ljudskih resursa koja se koristi za postizanje te ravnoteže. Središnje pitanje koje je ova studija adresirala bilo je kako učinkovito kombinirati strategiju ljudskih resursa s Total Productive Maintenance (TPM). Studija je otkrila da se tvrtke koje žele postići TPM radi povećanja profita i produktivnosti ne bi trebale isključivo koncentrirati na svoje strojeve ili opremu. Umjesto toga, moraju također dati prioritet svojoj radnoj snazi.

Autori istraživanja [14] zaključili su da su odabir i implementacija specifičnih alata za Total Productive Maintenance (TPM) ključni faktori koji doprinose uspjehu cjelokupnog TPM programa. Njihovo istraživanje naglašava važnost temeljite procjene trenutne izvedbe i stanja opreme prije početka implementacije TPM stupova. Ova početna procjena je nužna kako bi se osiguralo da se odabrani alati i metode TPM-a mogu učinkovito primijeniti i prilagoditi specifičnim potrebama proizvodnog pogona. Nadalje, Manihalla i sur. prepoznali su da je implementacija TPM-a kontinuirani i dugotrajan proces. Ne može se očekivati da će se povratni uloženi u TPM pojaviti odmah nakon implementacije. Umjesto toga, potrebno je vrijeme za postupno poboljšanje performansi opreme i proizvodnih procesa, što na kraju dovodi do povećane učinkovitosti, smanjenja zastoja i poboljšane kvalitete proizvoda. To znači da tvrtke moraju biti strpljive i ustrajne u svojim naporima za implementaciju TPM-a, razumijevajući da će se koristi i povratni ostvariti kroz dugoročnu predanost i kontinuirano poboljšanje.

U istraživačkom projektu provedbe identifikacije ključnih čimbenika za TPM, intenzitet identifikiranja čimbenika kvantificiran je kako bi se demonstrirao njihov utjecaj na

implementaciju TPM-a. Intenzitetna vrijednost čimbenika TPM-a služi kao mjera uloge ili utjecaja koji svaki pojedini čimbenik ima u implementaciji TPM-a u malim i srednjim poduzećima (SME) u Indiji. Njihovi nalazi sugeriraju da je za uspješnu implementaciju TPM-a u organizaciji nužno osigurati robusnu provedbu programa održavanja kao što su preventivno održavanje, autonomno održavanje i mobilno održavanje. Ovi programi održavanja igraju ključnu ulogu u postizanju učinkovitog TPM-a jer osiguravaju da se oprema redovito pregledava, održava i brzo popravljiva, što doprinosi smanjenju zastoja i povećanju učinkovitosti opreme. Štoviše, naglašeno je da svaki od ovih programa treba biti pravilno integriran i prilagođen specifičnim potrebama i uvjetima organizacije kako bi se maksimizirale koristi TPM-a [15].

Autori istraživanja [16] zaključili su da je iz pregleda literature evidentno da, iako postoji značajan broj radova posvećenih TPM-u i njegovim prednostima u implementaciji, postoji izrazit nedostatak naglaska na analizi izazova pri implementaciji TPM-a. Uobičajen problem koji su uočili jest da mnoge tvrtke implementiraju TPM na površinskoj razini, što dovodi do dobitaka u produktivnosti koji često ne dosežu svoj maksimalni potencijal. Drugim riječima, iako se koristi TPM metodologija, nedostatak dubljeg razumijevanja i angažmana u procesu implementacije rezultira djelomičnim uspjehom. Tvrtke često ne uspijevaju u potpunosti iskoristiti sve prednosti TPM-a zbog nedovoljne analize i adresiranja temeljnih izazova koji mogu ometati proces. Ovo uključuje neadekvatnu obuku zaposlenika, loše definirane ciljeve i nedostatak kontinuirane podrške menadžmenta. Stoga je ključno ne samo prepoznati prednosti TPM-a, već i dublje istražiti prepreke i izazove kako bi se osigurala njegova potpuna i učinkovita implementacija.

U istraživanju koje je sagledavalo ključne aspekte koji mogu negativno utjecati na implementaciju TPM-a, zaključili su da postoji mnogo ključnih čimbenika koji doprinose uspješnoj implementaciji TPM-a. Bitno je uzeti u obzir specifične uvjete i izazove svake zemlje pri implementaciji TPM-a, imajući na umu da je TPM postupni proces. Strukturirana obuka za TPM koordinatore i članove tima, uz adekvatne financijske resurse, trebala bi biti osigurana. Nadalje, važno je uspostaviti sustav za mjerenje izvedbe i ekonomskih koristi kao dio procesa implementacije. Aktivno sudjelovanje vrhovnog menadžmenta i njihova učinkovita komunikacija sa zaposlenicima na svim organizacijskim razinama neophodni su preduvjeti za uspješnu implementaciju TPM-a. Ovo uključuje jasno definirane ciljeve, redovite evaluacije i prilagodbu strategija prema potrebama organizacije. Bez ovih elemenata, implementacija TPM-a može naići na brojne prepreke koje ometaju postizanje željenih

rezultata. Stoga je presudno osigurati holistički pristup koji uključuje sve razine organizacije i prilagođava se specifičnim izazovima i uvjetima svake zemlje i industrije [17].

Autori istraživanja [18] proveli su studiju u kojoj predlažu "lagani" model implementacije TPM-a prikladan za mala i srednja poduzeća. Prednost njihovog "laganog" modela je u tome što zahtijeva relativno mali iznos kapitalnih ulaganja i resursa. Model se sastoji od tri osnovna koraka:

1. **Planiranje:** Ova faza započinje preliminarnom procjenom i usklađivanjem ciljeva. U ovoj fazi se identificiraju ključni elementi koji će biti potrebni za implementaciju TPM-a, kao što su potrebni resursi, osoblje i oprema.
2. **Poboljšanje:** Usmjerenost održavanje koje je usmjereno na poboljšanje faktora koji utječu na ukupnu učinkovitost opreme (OEE). U ovoj fazi se implementiraju konkretne mjere za povećanje učinkovitosti opreme i smanjenje zastoja, kao što su preventivno održavanje, obuka zaposlenika i optimizacija radnih procesa.
3. **Održivost:** Sustav održivosti implementira se kako bi se osiguralo da se postignuta poboljšanja održavaju, sprječavajući povratak na prethodno stanje. U ovoj fazi se kontinuirano prate i evaluiraju performanse kako bi se osiguralo da se postignuti rezultati održavaju i dalje poboljšavaju.

Zaključili su da je korištenje sustavnog i strukturiranog pristupa u implementaciji TPM-a ključno za njegov uspjeh. Provedivost modela potvrđena je njegovom uspješnom implementacijom u malim i srednjim proizvodnim poduzećima (SME).

Autori [19] predstavili su sveobuhvatan okvir za implementaciju Total Productive Maintenance (TPM) temeljen na PDCA (Plan-Do-Check-Act) ciklusu. Jedinstveni aspekt ovog članka je njegova evaluacija kako stup zaštite zdravlja i sigurnosti na radu (OHS) utječe na stabilnost TPM okvira. Metodologija korištena u istraživanju uključuje detaljnu analizu svakog koraka u implementaciji TPM-a, poboljšanu integracijom prikladnih alata za usklađivanje TPM-a s ISO 9001:2015. Nalazi istraživanja naglašavaju kritičnu ulogu podrške menadžmenta u uspješnoj implementaciji TPM stupova, uključujući autonomno održavanje. Dodatno, autori ističu da često podcijenjeni alat 5S ne samo da igra temeljnu ulogu u TPM-u, već također služi kao značajan alat za integraciju menadžerskih praksi unutar organizacije. Implementacija 5S-a pomaže u stvaranju organiziranijeg i efikasnijeg radnog okruženja, što je ključno za dugoročnu održivost TPM-a. Stoga, podrška menadžmenta, usklađenost s

međunarodnim standardima i integracija alata poput 5S-a ključni su za stabilan i uspješan TPM program.

Istraživanje [20] imalo je za cilj ispitati atribute, prepreke i kritične faktore uspjeha (CSF) unutar okvira učinkovite implementacije TPM-a. Posebno, istraživanje otkriva nedostatak modela implementacije TPM-a prilagođenih specifično za proizvodni sektor. Naglašava odsutnost velikih empirijskih istraživanja u ovom području. Kao odgovor na to, studija poziva na razvoj posvećenog modela TPM-a koji bi bio prilagođen proizvodnji i identificira ključne faktore, prikupljene iz postojeće literature, koji mogu olakšati prevladavanje izazova u implementaciji TPM-a. Identifikacija ovih ključnih faktora može pomoći tvrtkama da prepoznaju i adresiraju specifične prepreke koje mogu ometati uspješnu implementaciju TPM-a, osiguravajući tako bolje rezultate i dugoročnu održivost TPM programa.

### 2.3. Doprinos TPM-a učinkovitosti proizvodnje

Autori [21] proveli su studiju slučaja u jednoj automobilskoj tvrtki s ciljem procjene utjecaja TPM-a na proizvodnju. Ova procjena provedena je usporedbom performansi strojeva (OEE) prije i nakon implementacije TPM-a. Četiri od osam linija radile su ispod svjetskog referentnog standarda. Nakon analize, implementiran je SMED (Single Minute Exchange of Dies), jedan od alata TPM-a. Implementirane preporuke dovele su do impresivnog poboljšanja od preko 50%. U suštini, može se zaključiti da je ideja bila vrlo uspješna jer se vrijeme potrebno za promjene značajno smanjilo. U prosjeku, vrijeme promjene smanjeno je za 63,5 minuta, što je ekvivalentno izvanrednom smanjenju od 71%.

2016 godine provedeno je opsežno istraživanje o utjecaju praksi Total Productive Maintenance (TPM) i Total Quality Management (TQM) na operativnu učinkovitost u farmaceutskoj industriji. U svom istraživanju razmatrali su različite elemente i konstrukte unutar TPM-a i TQM-a te su analizirali podatke prikupljene iz 254 indijske farmaceutske tvornice. Rezultati studije jasno pokazuju da prakse TPM-a imaju značajan utjecaj na operativnu učinkovitost pogona, pri čemu se prakse TPM-a i TQM-a međusobno nadopunjuju i jačaju. Konkretno, TPM prakse imaju poseban utjecaj na područja istraživanja i razvoja (R&D), inovacije proizvoda i upravljanje tehnologijom. Ovo istraživanje pruža vrijedne uvide menadžerima, naglašavajući ključnu ulogu TPM-a u postizanju visoke kvalitete, poboljšanju operativne učinkovitosti i smanjenju troškova u farmaceutskoj industriji. Posebno

je istaknuta važnost održavanja napredne opreme kako bi se osigurala dosljedna proizvodnja visoke kvalitete. Ovi nalazi sugeriraju da integracija TPM i TQM praksi može značajno doprinijeti ukupnom uspjehu farmaceutskih tvrtki, osiguravajući bolje performanse i konkurentsku prednost na tržištu [22].

Autori [23] proveli su analizu utjecaja implementacije TPM-a u industriji oblikovanja metala. Utvrdili su da se kvarovi na opremi događaju često, znatno prelazeći prihvatljive granice. Tehničari nisu aktivno uključeni u manje popravke, preventivno održavanje ili rutinske procjene trošenja, što je identificirano kao značajan problem. Umjesto toga, mehaničari unutar industrije rješavaju sve probleme koji se pojave. Temeljitom analizom podataka postalo je jasno da implementacija Total Productive Maintenance (TPM) vodi do poboljšanja ukupne učinkovitosti opreme (OEE) na svim radnim stanicama, uključujući valjanje, savijanje, rezanje i probijanje matrica. Primarni pokretač ovog poboljšanja je smanjenje vremena postavljanja radnih stanica i smanjenje broja kratkih zastoja. Postojeći OEE značajno je porastao. Ova analiza naglašava važnost da organizacije posvete dužnu pažnju TPM-u kako bi postigle održive dobitke u produktivnosti uz niže operativne troškove. TPM se ističe kao vrijedan alat za smanjenje dugoročnih troškova opreme dok istovremeno poboljšava ukupnu operativnu učinkovitost. Stoga je ključno da organizacije implementiraju TPM kako bi osigurale kontinuirana poboljšanja i postigle veće razine učinkovitosti i produktivnosti.

U istraživačkom radu koje provedeno 2016. godine, autori se upuštaju u kritičko istraživanje utjecaja praksi Total Productive Maintenance (TPM) u sektoru proizvodnje tekstila i odjeće. Njihova metodologija uključuje pažljivo dizajniran samoupravni anketni upitnik. Rezultati otkrivaju da TPM prakse imaju snažan utjecaj na proizvodne performanse, pri čemu sve takve prakse pokazuju pozitivnu i statistički značajnu povezanost. Ove prakse se pokazuju ključnima u povećanju isplativosti, kvalitete proizvoda, točnosti isporuke i fleksibilnosti u obujmu proizvodnje. Analiza dalje naglašava da TPM ne samo da doprinosi operativnoj učinkovitosti, već također omogućava organizacijama da se bolje prilagode promjenjivim zahtjevima tržišta, čime se postiže veća konkurentska prednost. Stoga je implementacija TPM praksi u sektoru tekstila i odjeće od velike važnosti za postizanje održivih poboljšanja u proizvodnim procesima i ukupnim performansama poduzeća [24].

Autori istraživanja [25] proveli su procjenu ključnih pokazatelja uspješnosti (KPI) za TPM. Posebno su se produktivnost i poboljšanje kvalitete istaknuli kao najvažniji kriteriji,

odražavajući nalaze prethodnih istraživanja. Smanjenje troškova, performanse isporuke, poboljšanje radnog okruženja te sigurnost i zdravlje slijede po važnosti. Implikacije studije su značajne kako za znanstvenike tako i za praktičare, bacajući svjetlo na ključne komponente TPM-a i njihov utjecaj na učinkovitost proizvodnje. Ova istraživanja potvrđuju da fokus na ove ključne pokazatelje može dovesti do značajnih poboljšanja u operativnoj učinkovitosti, smanjenju troškova i povećanju ukupne kvalitete proizvoda. Stoga, razumijevanje i primjena ovih pokazatelja uspješnosti ključni su za uspješnu implementaciju TPM-a u proizvodnim procesima.

Istraživanjem [26] proučavana je praktična implementacija TPM principa kroz eksperimentalnu validaciju unutar jedne inženjerske tvrtke. Eksperimentalna studija dala je obećavajuće rezultate, ukazujući na dosljedno smanjenje tehničkih zastoja na svim nadziranom uređajima tijekom razdoblja promatranja. Posebno je jedan uređaj postigao ciljanih 40% smanjenja tijekom faze implementacije, dok su druga dva uređaja postigla ovaj cilj unutar nekoliko mjeseci. Ovi rezultati naglašavaju učinkovitost TPM-a u smanjenju tehničkih zastoja i poboljšanju operativne učinkovitosti. Studija pruža snažan dokaz da primjena TPM principa može značajno unaprijediti performanse opreme i dovesti do održivih poboljšanja u proizvodnom procesu.

Autori istraživanja [27] imali su za cilj poboljšati učinkovitost proizvodne opreme predlažući sekvencijalnu shemu temeljenu na principima Total Productive Maintenance (TPM). Shema se sastoji od 13 proceduralnih koraka koji obuhvaćaju planiranje, implementaciju, provjeru, korektivne akcije i aspekte kontrole unutar generičkog sustava poboljšanja. Studija je uspješno povećala ukupnu učinkovitost opreme za 62,6% tijekom devet mjeseci, što je dovelo do poboljšanja dostupnosti opreme, učinkovitosti i kvalitete proizvoda. Ovi rezultati naglašavaju važnost strukturiranog i sveobuhvatnog pristupa implementaciji TPM-a, pokazujući da dosljedna primjena ovih koraka može značajno unaprijediti operativne performanse i kvalitetu proizvodnje. Studija također ukazuje na važnost kontinuiranog praćenja i prilagođavanja strategija kako bi se osigurali dugoročni uspjesi u proizvodnim procesima.

Lijekovi imaju vrlo stroge zahtjeve, koji se mogu ispuniti samo ako se strojevi i oprema za testiranje nadograđuju i redovito održavaju. TPM postupci omogućili bi tvornicama poboljšanje operativne učinkovitosti kroz osiguranje kvalitete procesa.

## 2.4. Benefiti umrežavanja TPM-a i TQM-a

Sahoo [28] proveo je opsežno istraživanje koje je obuhvatilo 231 proizvodnu organizaciju iz različitih sektora, uključujući prehrambenu industriju i industriju pića, tekstilnu industriju te industriju električnih i elektroničkih uređaja. Studija sugerira da implementacija integriranog pristupa TPM-a i TQM-a donosi koristi u skoro svim navedenim sektorima industrije.

Međutim, ova hipoteza nije podržana za tvrtke u tekstilnom sektoru. To ukazuje na to da prednosti kombinacije TPM-a i TQM-a mogu varirati ovisno o specifičnim karakteristikama i zahtjevima pojedinih industrija, te da bi se strategije implementacije trebale prilagoditi kako bi se postigli optimalni rezultati u različitim sektorima.

Autori [29] istražuju status inicijativa za implementaciju TQM-a i TPM-a. Integracija TQM-a s implementacijom TPM-a rezultirala je širokim spektrom koristi za organizaciju. Te koristi uključuju poboljšano razumijevanje zahtjeva kupaca, povećano zadovoljstvo kupaca, poboljšanu unutarnju komunikaciju, učinkovitije rješavanje problema, pojačanu predanost i motivaciju zaposlenika, ojačane odnose s dobavljačima, poboljšanu kvalitetu proizvoda, optimiziranu izvedbu opreme, prošireni tržišni udio i povećanu profitabilnost. Ovaj kombinirani pristup pokazao se vrlo korisnim, utječući na razne aspekte performansi i konkurentnosti organizacije. Ovi rezultati naglašavaju važnost sinergijske primjene TPM-a i TQM-a za postizanje sveobuhvatnih poboljšanja u operativnoj učinkovitosti i tržišnom uspjehu.

2019. godine provedeno je istraživanje s ciljem ispitivanja odnosa između Total Quality Managementa (TQM), Total Productive/Preventive Maintenance (TPM), Just-in-Time (JIT) i agilne proizvodnje. Podaci su prikupljeni iz 205 industrijskih tvrtki, a za testiranje predloženih odnosa korišteno je strukturno modeliranje jednadžbi. Nalazi pokazuju da TPM pozitivno utječe na TQM i JIT, TQM ima pozitivan učinak na JIT, a JIT ima izravnu pozitivnu vezu s agilnom proizvodnjom. Ovi rezultati sugeriraju da implementacija TPM-a može poboljšati prakse TQM-a i JIT-a, što zauzvrat može olakšati prijelaz na agilnu proizvodnju. Studija ističe važnost integriranog pristupa upravljanju kvalitetom i održavanju, kao i pravovremenu proizvodnju, kako bi se postigla veća fleksibilnost i prilagodljivost u proizvodnim procesima [30].

Pregledom literature na području umrežavanja TQM-a i TPM-a može se zaključiti da TPM ima mnoge sličnosti s TQM programom. Obje inicijative koriste slične alate i principe, uključujući osnaživanje zaposlenika, benchmarking, dokumentaciju i druge, kako bi

implementirale i unaprijedile svoje procese. U oba programa, Total Productive Maintenance (TPM) i Total Quality Management (TQM), apsolutna predanost višeg menadžmenta je temeljna. Ključno je da se zaposlenicima omogući osnaživanje kako bi mogli preuzeti inicijativu u provođenju korektivnih mjera. Osim toga, potreban je zajednički dugoročni pogled jer TPM, posebno, može trajati više od godine dana tijekom svoje implementacijske faze i ostaje kontinuiran proces. Dodatno, bitan aspekt uključuje poticanje promjene u razmišljanju zaposlenika u vezi s njihovim radnim odgovornostima, što je ključno za uspjeh i TPM i TQM inicijativa. Ova promjena u načinu razmišljanja pomaže u stvaranju kulture kontinuiranog poboljšanja i povećava angažman zaposlenika, što je neophodno za postizanje održivih rezultata.

## 2.5. Fokus na zaposlenike

Munir et. al. [17] prepoznali su da uspjeh TPM-a uvelike ovisi o učinkovitosti zaposlenika. Stoga je sveobuhvatna obuka zaposlenika, s fokusom ne samo na poboljšanje tehničkih vještina već i na unaprjeđenje karaktera i ponašanja, od najveće važnosti. Pružajući odgovarajuću obuku i učinkovito iskorištavajući sposobnosti zaposlenika, organizacije mogu postići veću produktivnost i održavati visoke standarde kvalitete. To se postiže smanjenjem broja defekata i smanjenjem učestalosti kvarova. Ovaj pristup omogućava organizacijama da minimiziraju gubitke, optimiziraju radne procese i postignu održiva poboljšanja u učinkovitosti proizvodnje. Osim tehničke obuke, važno je razvijati i vještine međuljudske komunikacije, timskog rada i rješavanja problema, što doprinosi cjelokupnom uspjehu TPM inicijativa.

Necas [31] prepoznaje da obrazovanje igra ključnu ulogu u uspješnoj implementaciji procesa upravljanja održavanjem unutar okvira Total Productive Maintenance (TPM). Predloženi su različiti aspekti obrazovanja i obuke unutar TPM sustava, uključujući angažman kako internih tako i eksternih obrazovnih i trenažnih subjekata, odabir prikladnih prostora te osiguravanje dostupnosti potrebnih tehničkih i materijalnih resursa. Ključno je da se obrazovanje i obuka usmjere na sve razine zaposlenika, kako bi se osigurala sveobuhvatna razumijevanja TPM principa i metoda. Također, redovita evaluacija i ažuriranje programa obuke osigurava da se prate najnoviji trendovi i tehnologije u održavanju, čime se povećava učinkovitost i pouzdanost proizvodne opreme. Razvoj kontinuiranog obrazovanja i



osposobljavanja zaposlenika doprinosi dugoročnom uspjehu TPM-a i održavanju visokih standarda kvalitete i učinkovitosti u proizvodnim procesima.

Autori u svojoj tezi [32] ističu ključnu važnost ulaganja u obuku zaposlenika na različitim razinama menadžmenta tijekom procesa implementacije TPM-a u malim i srednjim poduzećima (SME). Obuka zaposlenika identificirana je kao najznačajniji faktor koji utječe na implementaciju TPM-a u ovim SME-ovima. Kako bi se potaknulo usvajanje TPM strategija i iskoristile njihove dugoročne koristi, ključno je provoditi programe podizanja svijesti, edukativne kampanje i obuke s ciljem motiviranja menadžmenta SME-ova da prihvate TPM prakse. Ovi napori mogu igrati ključnu ulogu u poboljšanju ukupnog uspjeha implementacije TPM-a u SME-ovima. Uz pravilnu edukaciju i obuku, menadžment i zaposlenici bolje razumiju prednosti TPM-a, što vodi do povećanja angažmana i predanosti, te na kraju do većeg uspjeha u ostvarivanju operativne učinkovitosti i poboljšanja kvalitete proizvodnje.

Zanimljivu studiju proveli su Yingkai et. al. [33], koji su se usredotočili na temu koliko ljudski faktor, posebno ljudska pogreška, može utjecati na održavanje opreme, što je također jedan od ključnih problema u održavanju. Ova studija ponovno naglašava koliko je važno da ulaganje u radnu snagu proporcionalno prati ulaganje u održavanje. Istraživanje pokazuje da ljudske pogreške mogu značajno utjecati na učinkovitost i pouzdanost održavanja opreme, što može dovesti do neočekivanih zastoja i povećanja troškova. Stoga, ulaganje u obrazovanje, obuku i razvoj zaposlenika ključno je za smanjenje ljudskih pogrešaka i povećanje ukupne učinkovitosti održavanja. Studija također sugerira da bi organizacije trebale usvojiti holistički pristup koji uključuje kontinuiranu edukaciju i osposobljavanje radne snage kako bi se osiguralo uspješno i učinkovito održavanje opreme.

## 2.6. Eliminacija otpada

Jedno od područja gdje se TPM pokazuje korisnim je u nastojanjima da se eliminira otpad u smislu uklanjanja vremena koje ne dodaje vrijednost, smanjenja troškova i skraćivanja vremena kvarova. Khan [34], kako citira Virk [8], proveo je preliminarnu studiju o praksama lean proizvodnje u tekstilnoj industriji. Autor je naveo da je koristio gemba, matricu odnosa otpada, analizu uzroka i posljedica, rangiranje i statističke tehnike kako bi identificirao i analizirao otpad u lean proizvodnji. Istraženo je sedam smrtnih otpadaka lean proizvodnje, a

defekt je identificiran kao najznačajniji otpad u tekstilnoj industriji. Autor je predložio najrelevantnije lean prakse za eliminaciju/smanjenje najznačajnijeg defektnog otpada u lean proizvodnji, uključujući i Total Productive Maintenance (TPM).

Nisbantoro et al. [35], kako citira Virk [8], proveli su studiju slučaja u industriji proizvodnje injekcijskih kalupa. Pristup istraživanju bio je promatranje i prikupljanje podataka kako bi se izračunao OEE za šest postrojenja za injekcijsko prešanje. Rezultati studije pokazuju da su dvije od četiri postrojenja za injekcijsko prešanje imale učinkovitost opreme manju za do 10% u usporedbi sa svjetskim klasom OEE-a, dok su preostala dva postrojenja radila optimalno i premašila predloženi OEE standard od 85%. Ova studija pokazala je korisnost izračuna OEE-a u prepoznavanju i određivanju učinkovitosti proizvodne opreme. Rezultati istraživanja ističu važnost redovitog praćenja i analize OEE-a kako bi se identificirale slabosti u proizvodnim procesima i omogućilo donošenje informiranih odluka za poboljšanje učinkovitosti opreme. Također, studija naglašava potrebu za kontinuiranim poboljšanjima i prilagodbama u upravljanju proizvodnjom kako bi se postigla i održala visoka razina operativne učinkovitosti. Prepoznavanje područja s niskom učinkovitošću omogućava ciljane intervencije i optimizaciju resursa, što je ključno za postizanje konkurentne prednosti u proizvodnoj industriji.

Saleem & Nisar [36], kako citira Virk [8], usmjerili su cilj svog rada na izradu smjernica za povećanje proizvodne stope strojeva za vulkanizaciju guma, uz smanjenje vremena zastoja i troškova održavanja tih strojeva, uz pomoć strategije upravljanja održavanjem usmjerene na ukupnu učinkovitost opreme (OEE). Nakon otklanjanja ponavljajućih kvarova korištenjem tehnike Analize načina i posljedica kvarova (FMEA), uočeno je značajno poboljšanje vrijednosti OEE-a. Stoga je zaključeno da OEE i FMEA pomažu u povećanju industrijske učinkovitosti i konkurentnosti proizvodnih pogona koji su bili predmet istraživanja.

Sahito et. al. [37], kako citira Virk [8], proveli su studiju slučaja u farmaceutskoj tvornici s ciljem identifikacije, analize i eliminacije otpada iz lean proizvodnje kroz primjenu lean proizvodnih praksi. Autori su identificirali otpad iz lean proizvodnje u farmaceutskoj tvornici prema lean standardima, a zatim su proveli analizu koristeći statističke alate i tehnike. Predložili su najprikladnije lean i Total Productive Maintenance (TPM) prakse za eliminaciju/smanjenje najznačajnijeg otpada u farmaceutskoj tvornici te su usporedili situaciju prije i poslije studije. Usporedba situacije prije i poslije primjene lean i TPM praksi pokazala je značajno smanjenje zastoja, povećanje učinkovitosti opreme te poboljšanje

kvalitete proizvoda. Ovi rezultati naglašavaju važnost kontinuirane analize i prilagodbe proizvodnih procesa kako bi se postigla maksimalna operativna učinkovitost i održivost u farmaceutskoj industriji. Također, primjena ovih praksi može pomoći u postizanju boljeg upravljanja resursima i smanjenju troškova proizvodnje.

Autori [38] proveli su studiju u automobilskoj tvrtki kako bi evaluirali OEE prije i nakon implementacije TPM-a. Nakon pokretanja TPM strategije, podaci su prikupljeni i analizirani tijekom šest mjeseci. Uočeno je značajno smanjenje sati dodijeljenih neplaniranom održavanju, kao i njegov postotni utjecaj na ukupni broj operativnih prekida tijekom tog razdoblja. Zaključili su da organizirano i dinamično uključivanje svih područja u proizvodne procese putem TPM-a generira čvrste i održive povećanja produktivnosti. Metodologija 5S je ključna za uspostavljanje temelja za implementaciju TPM-a jer uvodi red, čistoću i disciplinu među operaterima strojeva.

## 2.7. Ekološke prednosti i Industrija 4.0.

Chen et. al. [39] proveli su opsežnu studiju s ciljem istraživanja okolišnih faktora koji utječu na šest uobičajenih praksi Lean Manufacturinga (LM), uključujući Total Productive Maintenance (TPM). Studija je adresirala dva glavna istraživačka pitanja: koji su izvori pritiska koji potiču primjenu LM praksi i TPM-a te kako te prakse utječu na varijable ekološke održivosti. Ključni nalazi studije uključuju da je ekološka certifikacija bila čest pokretač za primjenu LM praksi i TPM-a, iako je i ekološki pritisak igrao značajnu ulogu. Predanost proizvodnih tvrtki održivom razvoju pokazala je korelaciju sa specifičnim LM praksama i odgovarajućim ekološkim mjerama. Percipirali su da su LM prakse i TPM pozitivno utjecali na poboljšanje performansi u posljednje tri godine, naglašavajući značaj ovih praksi u postizanju ekološke održivosti i ukupnog poboljšanja proizvodnih performansi. Ovi nalazi ukazuju na to da su inicijative za ekološku certifikaciju i pritisci vezani uz održivost važni čimbenici koji potiču tvrtke na usvajanje LM praksi i TPM-a, što rezultira poboljšanjima ne samo u ekološkom smislu, već i u operativnoj učinkovitosti.

Tortorella et. al. u svojem istraživanju [40] identificiraju određene TPM prakse koje se dosljedno usklađuju s tehnologijama Industrije 4.0, bez obzira na specifičan kontekst tvrtke. Ove prakse, kao što su optimizacija uvjeta strojeva, ljudi i materijala, aktivno traženje najnovijih tehnoloških napredaka, poticanje uključivanja operatera i standardizacija provjera

opreme, usko su povezane s TPM stupovima kao što su "edukacija i obuka zaposlenika" i "autonomno održavanje." Za tvrtke koje započinju svoj put digitalne transformacije, ove prakse trebaju imati prioritet, jer je vjerojatnije da će donijeti značajne koristi od integracije I4.0 tehnologija. Ova usklađenost omogućuje tvrtkama da iskoriste prednosti napredne analitike, automatizacije i povezivanja, što dovodi do poboljšane operativne učinkovitosti, smanjenja zastoja i povećanja ukupne produktivnosti. Također, naglasak na edukaciji i osposobljavanju zaposlenika osigurava da ljudski kapital ostane ključna komponenta uspješne digitalne transformacije, osposobljavajući osoblje da učinkovito upravlja i održava nove tehnologije.

Jain et. al. u svojem istraživanju [41] uvode koncept mobilnog održavanja kao nov pristup implementaciji Total Productive Maintenance (TPM), posebno u malim i srednjim poduzećima (SME) s fokusom na poboljšanje ukupne učinkovitosti opreme (OEE). Razlika između preventivnog održavanja i mobilnog održavanja leži u njihovom pristupu održavanju opreme. Preventivno održavanje slijedi unaprijed određeni raspored za svaki stroj, dok mobilno održavanje ne ovisi o fiksnom rasporedu. Umjesto toga, osoblje za održavanje opremljeno alatima i rezervnim dijelovima slobodno se kreće po proizvodnom pogonu, pregledavajući strojeve u bilo kojem trenutku kako bi identificirali i otklonili nedostatke ili kvarove čim se pojave. Ova fleksibilnost omogućava brže reakcije na probleme i smanjenje vremena zastoja, što rezultira većom operativnom učinkovitošću. Studija naglašava važnost prilagodljivosti i proaktivnog pristupa u održavanju opreme, posebno u dinamičnim proizvodnim okruženjima. Mobilno održavanje pruža SME-ovima mogućnost da bolje upravljaju svojim resursima, povećaju produktivnost i smanje troškove povezane s neplaniranim kvarovima, doprinoseći boljoj iskorištenosti opreme i dugoročnom poboljšanju operativnih performansi.

Autori istraživanja [42] identificirali su probleme s modernim praksama održavanja: nepravilni obrasci kvarova opreme, loše prepoznavanje i razlikovanje osnovnog održavanja od drugih kategorija te oslanjanje na zastarjele empirijske matematičke modele za održavanje. Postoji nedostatak identifikacije i klasifikacije kritične opreme kako bi se učinkovito dodijelili resursi za održavanje. Pouzdanost, dostupnost i sigurnost opreme su parametri koje je teško kontrolirati i pouzdano procijeniti zbog različitih nedostataka, prekomjernog održavanja, potencijalnih opasnosti i neočekivanih nesreća. Kako bi osigurali stabilnu proizvodnju, autori su predložili održavanje opreme temeljeno na sustavu upravljanja integritetom opreme temeljenom na sigurnosti (MSI). MSI može pružiti dinamičke podatke o

riziku, predvidjeti kvarove i ponuditi odluke i radnje koje se mogu poduzeti kao odgovor na situaciju, s ciljem maksimaliziranja iskorištenosti opreme. MSI se pokazao kao alat koji može osigurati proizvodnu opremu s većom pouzdanošću, dostupnošću i učinkovitosti. Ovaj pristup uključuje kontinuirano praćenje i analizu rizika, omogućujući tvrtkama da proaktivno upravljaju održavanjem i smanjuju vjerojatnost kvarova. Ovo je još jedan primjer pozitivnog utjecaja modernih softverskih rješenja na održavanje opreme, naglašavajući važnost integracije naprednih tehnologija i metoda za postizanje boljih rezultata u održavanju i ukupnoj operativnoj učinkovitosti. Korištenjem MSI sustava, tvrtke mogu optimizirati svoje resurse, smanjiti neočekivane zastoje i poboljšati sigurnost rada, što doprinosi dugoročnom uspjehu i konkurentnosti na tržištu.

## 2.8. Zaključak pregleda literature

Iako je TPM (Total Productive Maintenance) dokazano koristan u mnogim područjima, još uvijek postoje aspekti koje je potrebno dodatno istražiti kako bi se postigli optimalni rezultati. Tsarouhas i suradnici [43] su proveli istraživanje usmjereno na razumijevanje odnosa između upravljanja proizvodnjom i upravljanja pojedinačnom proizvodnom linijom. U okviru tog istraživanja, proveli su detaljnu analizu podataka o kvarovima i popravcima prikupljenih tijekom proteklih 26 mjeseci. Na temelju tih podataka izračunali su ključne parametre koji čine OEE (Overall Equipment Effectiveness), uključujući faktor dostupnosti, učinkovitost i stopu kvalitete. Rezultati su pokazali da je OEE proizvodne linije bio razočaravajuće nizak, iznosio je 76,47%, što je znatno ispod ciljane vrijednosti od 85%. Istraživači su identificirali glavne uzroke ovakvog rezultata, a to su bili gubici uzrokovani smanjenjem brzine proizvodnje i različitim vrstama zastoja, koji su svi bili posljedica lošeg održavanja. Detaljnijom analizom otkrili su da je vrijeme zastoja linije bilo prekomjerno dugo i da je hitno potrebno optimizirati ga kroz primjenu kvalitetnog modela održavanja. Tijekom istraživanja utvrđeno je da se zastoj na liniji događao u prosjeku svakih 8,5 sati, pri čemu su trajanja zastoja varirala od nekoliko minuta do čak 1885 minuta. Zanimljivo je napomenuti da su neki kvarovi bili toliko učestali da se novi kvar javljao odmah nakon rješavanja prethodnog, što znači da je linija gotovo kontinuirano bila izložena problemima. Prosječno vrijeme potrebno za otklanjanje kvara iznosilo je 67 minuta, što dodatno ukazuje na neefikasnost trenutnog modela održavanja.

Na temelju ovih nalaza, istraživači su zaključili da je nužno što prije implementirati odgovarajući model održavanja za ovu proizvodnu liniju. Takva intervencija je ključna kako bi se smanjili potencijalni gubici proizvodnog vremena i postigla bolja ukupna učinkovitost opreme. Ova studija jasno pokazuje potrebu za sustavnim pristupom održavanju kako bi se poboljšala produktivnost i pouzdanost proizvodnih procesa. Potrebnom za pouzdanim modelom implementacije bavili su se i Chen i suradnici u svom članku objavljenom te godine [44]. Oni su istaknuli važnost kontinuiranog i neprekidnog rada kako bi se osigurala stabilna proizvodnja. Kao rezultat toga, nužno je stvoriti model koji kombinira raspored proizvodnje dijelova s rasporedom održavanja, čime bi se smanjili troškovi održavanja. Naglasili su da je neophodno integrirati planiranje proizvodnje i planiranje održavanja u jedinstveni model kako bi se postigla optimalna učinkovitost. Takav pristup omogućuje bolje predviđanje i pravovremeno obavljanje održavanja, čime se smanjuju neočekivani kvarovi i produžava vijek trajanja opreme. Kontinuirano praćenje i prilagodba ovog modela ključno je za održavanje stabilnosti proizvodnog procesa i minimiziranje zastoja.

Chaurey i suradnici [20] također su prepoznali potrebu za modelom implementacije. Njihova studija imala je za cilj istražiti karakteristike TPM-a (Total Productive Maintenance), prepreke i ključne faktore uspjeha (CSF-ove) unutar okvira učinkovite implementacije. Značajno je da istraživanje otkriva manjak TPM modela implementacije prilagođenih specifično za sektor proizvodnje. Naglašava i nedostatak opsežnih empirijskih istraživanja u ovom području. Kao odgovor na ove izazove, studija poziva na razvoj posebnog TPM modela prilagođenog proizvodnji te identificira ključne faktore, prikupljene iz postojeće literature, koji mogu olakšati prevladavanje izazova u implementaciji TPM-a. Chaurey i suradnici ističu da je, unatoč brojnim dokazima o prednostima TPM-a, implementacija u proizvodnom sektoru često otežana zbog specifičnih prepreka. Te prepreke uključuju nedostatak resursa, otpor prema promjenama unutar organizacije i nedostatak jasnih smjernica za implementaciju. Istraživači su naglasili potrebu za modelom koji ne samo da uzima u obzir ove prepreke, već i pruža jasne korake i strategije za njihovo prevladavanje. Ključni faktori uspjeha koji su identificirani u studiji uključuju predanost višeg menadžmenta, kontinuiranu obuku zaposlenika, učinkovitu komunikaciju i praćenje izvedbe kroz jasne metrike. Ovi faktori su ključni za stvaranje kulture koja podržava TPM i omogućava njegovu održivu implementaciju. Razvijanjem modela koji integrira ove ključne faktore, moguće je postići ne samo uspješnu implementaciju TPM-a, već i dugoročne prednosti u smislu povećane produktivnosti, smanjenih zastoja i poboljšane kvalitete

proizvodnje. Studija Chaurey i suradnika pruža važan doprinos razumijevanju kako prevladati izazove u TPM implementaciji i postavlja temelje za buduća istraživanja i razvoj specifičnih modela za proizvodni sektor.

Analiza podataka uključivala je konferencijske radove, članke iz časopisa i prethodne preglede literature, te je provedena opsežna analiza literature o glavnim područjima primjene TPM-a (Total Productive Maintenance) i OEE-a (Overall Equipment Effectiveness). Na mnogim primjerima, TPM se pokazao vrijednim u smanjenju kvarova, smanjenju troškova upravljanja, poboljšanju učinkovitosti proizvodnje, prepoznavanju i eliminaciji otpada, pozitivnom utjecaju na okoliš, prepoznavanju važnosti obuke radne snage te kompatibilnosti s konceptom Industrije 4.0. Vrijednost TPM-a posebno je vidljiva u farmaceutskoj industriji, gdje je ključna konzistentnost u operacijama zbog visokih standarda kvalitete u toj industriji.

Međutim, još uvijek postoje različita mišljenja o tome kako bi se OEE trebao izračunavati, te je taj pristup i dalje otvoren za modifikacije ovisno o primjeni i vrsti proizvodnog okruženja. Mnogi autori se slažu da, kako bi TPM bio pravilno uveden, zaposlenici moraju biti educirani o TPM-u i OEE-u na strukturiran i organiziran način, uz pomoć iskusnog osoblja, te mora postojati podrška za implementaciju na svim razinama hijerarhije, posebno od strane menadžmenta.

Rezultati također pokazuju da su neke tvrtke još uvijek nevoljke implementirati TPM zbog nedostatka svijesti o učinkovitosti i utjecaju ovih lean alata za upravljanje održavanjem, iako je TPM potvrđeni lean alat za optimizaciju. Također, iako je TPM dokazano koristan u mnogim proizvodnim područjima, još uvijek ne postoji potpuni i učinkoviti model za održivu i stratešku implementaciju.

Opsežna analiza literature pokazala je da TPM donosi značajne koristi, kao što su smanjenje kvarova i troškova, poboljšanje učinkovitosti proizvodnje, prepoznavanje i eliminacija otpada, pozitivni utjecaji na okoliš, važnost obuke radne snage te kompatibilnost s Industrijom 4.0. Posebno se ističe njegova vrijednost u farmaceutskoj industriji, gdje su konzistentnost i kvaliteta operacija od iznimne važnosti.

Iako razne studije naglašavaju važnost faktora poput usklađivanja strategije ljudskih resursa i odabira TPM alata, primjetan je nedostatak naglaska na analizi izazova implementacije. Ključni nalazi ističu potrebu za prilagođenim modelima implementacije TPM-a i sveobuhvatnim okvirima za učinkovito rješavanje prepreka. Unatoč postojećim naporima, još uvijek ne postoji univerzalni, "step-by-step", model za implementaciju TPM-a u proizvodnim

poduzećima svih veličina. Ovo naglašava potrebu za strukturiranim pristupom koji obuhvaća edukaciju, obuku, implementaciju i održive prakse kako bi se maksimizirale koristi TPM-a. Ipak, različita mišljenja o načinu izračuna OEE-a ukazuju na potrebu za daljnjim istraživanjima i prilagodbama ovisno o specifičnim uvjetima proizvodnje. Kako bi TPM bio uspješno implementiran, ključna je edukacija zaposlenika i podrška menadžmenta na svim razinama organizacije. Unatoč dokazanoj učinkovitosti, mnoge tvrtke još uvijek oklijevaju s implementacijom TPM-a zbog nedostatka svijesti o njegovim prednostima. Stoga, iako je TPM koristan alat, potreban je cjelovit i učinkovit model za održivu implementaciju kako bi se postigli najbolji mogući rezultati u različitim proizvodnim okruženjima.

Uvođenje ovakvog modela zahtijeva pažljivo planiranje i implementaciju, uzimajući u obzir specifične potrebe i uvjete proizvodnog okruženja. Također, uključuje stalnu obuku i edukaciju osoblja kako bi se osiguralo pravilno provođenje i održavanje sustava. Samo kroz sustavni i integrirani pristup moguće je postići dugoročne ciljeve u pogledu učinkovitosti, pouzdanosti i troškovne učinkovitosti proizvodnje.



### 3. RAZVOJ SUSTAVNOG ODRŽAVANJA

Podrijetlo koncepta TPM-a (Total Productive Maintenance) seže sve do 1951. godine, kada je preventivno održavanje uvedeno u Japanu, premda ideja preventivnog održavanja potječe iz SAD-a. Kako su prepoznali Virk i suradnici [8], Nippondenso je zaslužan kao pionirska tvrtka koja je 1960. godine uvela sveobuhvatno održavanje postrojenja. Ideja preventivnog održavanja temeljila se na tome da radnici proizvode robu putem strojeva, dok je specijalizirana skupina za održavanje bila zadužena za održavanje tih strojeva. Međutim, s rastućom automatizacijom u postrojenju Nippondenso, troškovi održavanja su značajno porasli jer je bilo potrebno sve više radnika za održavanje sve složenijih strojeva. Kako bi se nosili s ovim izazovom, uprava je donijela stratešku odluku da rutinsko održavanje strojeva preuzmu sami operateri strojeva, umjesto da se oslanjaju isključivo na timove za održavanje. Ova praksa postala je poznata kao autonomno održavanje, što je jedna od ključnih ideja TPM-a. Ovim pristupom, operateri su postali odgovorni za svakodnevno održavanje i osnovne popravke, dok bi osoblje za održavanje preuzimalo samo složenije i ključne zadatke održavanja. Na taj način, Nippondenso je uspio smanjiti troškove održavanja, povećati učinkovitost proizvodnje i poboljšati ukupnu pouzdanost opreme, postavljajući temelje za suvremene prakse TPM-a koje se danas primjenjuju širom svijeta.

Na taj način Nippondenso je postao pionir uvođenja preventivnog održavanja i autonomnog održavanja. Osim toga, osoblje za održavanje provodilo je modifikacije kako bi povećalo pouzdanost strojeva i počelo ih implementirati u nove strojeve. Tako su, uz preventivno i autonomno održavanje, stvorili koncept produktivnog održavanja. Uvođenjem ovih inovacija, Nippondenso je uspio ne samo smanjiti troškove i poboljšati učinkovitost proizvodnje, već i značajno unaprijediti pouzdanost opreme. Preventivno održavanje uključivalo je redovite preglede i servisiranje kako bi se spriječili kvarovi, dok je autonomno održavanje osposobilo operatere strojeva za svakodnevno održavanje i manje popravke, čime su se oslobodili resursi za složenije zadatke. Produktivno održavanje, kao rezultat kombinacije ovih pristupa, omogućilo je kontinuirano poboljšanje proizvodnih procesa i osiguralo dugoročnu održivost i pouzdanost strojeva. Ova integracija održavanja postala je temelj za suvremene prakse TPM-a, naglašavajući važnost sveobuhvatnog pristupa koji uključuje sve razine organizacije u cilju postizanja maksimalne učinkovitosti i minimalnih zastoja.

Nippondenso je dodatno uveo ideju krugova kvalitete, uključujući sudjelovanje svih zaposlenika, što je rezultiralo time da su svi zaposlenici aktivno pridonosili implementaciji

produktivnog održavanja. Ovi razvojni koraci i doprinosi omogućili su Nippondensu da dobije prestižnu nagradu od Japanskog instituta inženjera postrojenja (JIPE). Time je Nippondenso postao prva organizacija povezana s Toyota grupom koja je dobila TPM certifikat. Uvođenjem krugova kvalitete, Nippondenso je osigurao da svaki zaposlenik bude uključen u procese poboljšanja, čime se dodatno povećala učinkovitost i pouzdanost proizvodnih procesa. Ova kolektivna angažiranost radne snage omogućila je kontinuirano unapređenje i održavanje visoke razine produktivnosti i kvalitete, čime su postavili standard za buduće prakse u industriji. Rezultati su pokazali da je participativni pristup ključan za uspješnu implementaciju TPM-a, potvrđujući Nippondenso kao lidera u ovom području.

Kako tvrtke progresivno prihvaćaju automatizaciju, moraju usvojiti proaktivan i strateški pristup održavanju kako bi zadržale svoju konkurentnost na tržištu, kako su otkrili Quinn i suradnici u svom istraživanju [45]. U svom radu, obuhvatili su osnove suvremenog održavanja za moderne proizvodne procese i donijeli nekoliko zanimljivih zaključaka proučavajući proizvodne podatke. Naravno, mnoge godine su prošle od tada, proizvodnja se dodatno razvila i automatizirala, a sustav održavanja proporcionalno se razvijao u skladu s tim promjenama. Quinn i suradnici su naglasili važnost prilagodbe održavanja kako bi se učinkovito odgovorilo na izazove koje donosi povećana automatizacija. Suvremeni pristupi održavanju, uključujući preventivno i autonomno održavanje, kao i upotrebu naprednih tehnologija poput IoT-a i analitike podataka, omogućili su tvrtkama da održavaju visoku razinu operativne učinkovitosti i minimiziraju zastoje. Ovaj evolucijski put pokazuje koliko je ključno kontinuirano prilagođavanje i inovacija u praksama održavanja kako bi se iskoristile prednosti automatizacije i održala konkurentnost na dinamičnom tržištu.

Utjecaj implementacije TPM-a na produktivnost i razinu kvalitete u organizaciji proučavali su Gunasekaran i suradnici [3]. Također su istražili aspekt ljudskih resursa kako bi procijenili motivaciju operatera (kroz obuku) za smanjenje vremena postavljanja, zastoja zbog promjena, stopa defekata i otpada resursa na proizvodnom katu. Potrebno je naglasiti da moral i zdravo te optimistično radno okruženje značajno povećavaju šanse za uspješnu implementaciju TPM-a. Gunasekaran i suradnici su otkrili da obuka operatera ne samo da poboljšava njihove tehničke vještine, već i povećava njihovu angažiranost i motivaciju za održavanje visoke razine performansi. Ova sveobuhvatna obuka dovodi do smanjenja vremena potrebnog za postavljanje i promjene, smanjenja zastoja, smanjenja stopa defekata i otpada resursa, čime se direktno povećavaju produktivnost i kvaliteta proizvodnih procesa. Osim toga, stvaranje pozitivnog radnog okruženja gdje su zaposlenici motivirani i osjećaju se

cijenjenima doprinosi održivom uspjehu TPM inicijativa. Ovi nalazi potvrđuju važnost integracije ljudskih resursa u strategije održavanja kako bi se postigla optimalna učinkovitost i kvaliteta.

Uvođenje računalnih tehnologija dovelo je do nastojanja da se procesi održavanja digitaliziraju. Lee [4] je proučavao različite implementacije računalno potpomognutog održavanja, uključujući nadzor, detekciju anomalija i dijagnostiku kvarova. Predstavio je i ilustrirao perspektivu proaktivnog održavanja putem praćenja degradacije proizvodne opreme i sustava održavanja. Zaključio je da se, ako se ponašanje proizvodne opreme promatra i mjeri adaptivno, može uspostaviti model koji predviđa kvarove prije nego što se dogode. Na taj način, osoblje za održavanje moglo bi predvidjeti potencijalne kvarove i reagirati preventivno. Lee vjeruje da su nadzor i analiza pojave kvarova ključni faktori za uspjeh proizvodne opreme. Praćenjem stanja opreme i analizom podataka o kvarovima, moguće je identificirati obrasce i trendove koji upućuju na buduće probleme, čime se omogućava pravovremeno poduzimanje preventivnih mjera. Ovaj pristup ne samo da smanjuje vrijeme zastoja i troškove održavanja, već i poboljšava ukupnu učinkovitost i pouzdanost proizvodnih sustava. Lee-jevi nalazi naglašavaju važnost digitalizacije i uporabe naprednih tehnologija u modernim praksama održavanja kako bi se postigli optimalni rezultati u proizvodnji.

Kasnije su razvijeni optimizacijski modeli održavanja. Panagiotidou i suradnici [5] razvili su ekonomski model za optimizaciju procedura održavanja u proizvodnom procesu. S očekivanim padom kvalitete opreme zbog starenja, može doći do naglog pada kvalitete, karakteriziranog nižim stopama proizvodnje, nižim profitima i većom vjerojatnošću kvarova. Pretpostavili su dva tipa održavanja: Minimalno Održavanje (MM), koje poboljšava razinu kvalitete opreme bez utjecaja na njenu starost, i Preventivno Održavanje (PM), koje potpuno poboljšava proizvodnu opremu na razinu gotovo ekvivalentnu novoj opremi. Istražujući veliki uzorak numeričkih primjera, istražili su optimalan omjer jednog tipa održavanja u odnosu na drugi. Zaključili su da je u praksi najbolje koristiti ili jedan ili drugi tip održavanja s malim udjelom onog drugog: ili proizvodnja ovisi o opremi, dopuštajući samo minimalno održavanje, ili taj dio opreme može biti izvan pogona dovoljno dugo da se obavi preventivno održavanje. Drugim riječima, ako oprema mora kontinuirano raditi, minimalno održavanje je prikladnije jer smanjuje zastoje. S druge strane, ako je moguće planirati duže zastoje, preventivno održavanje može značajno poboljšati dugoročnu pouzdanost i performanse opreme. Ovaj model omogućuje donošenje informiranih odluka o strategijama održavanja

koje balansiraju između trenutnih potreba za proizvodnjom i dugoročnih ciljeva u smislu učinkovitosti i pouzdanosti opreme.

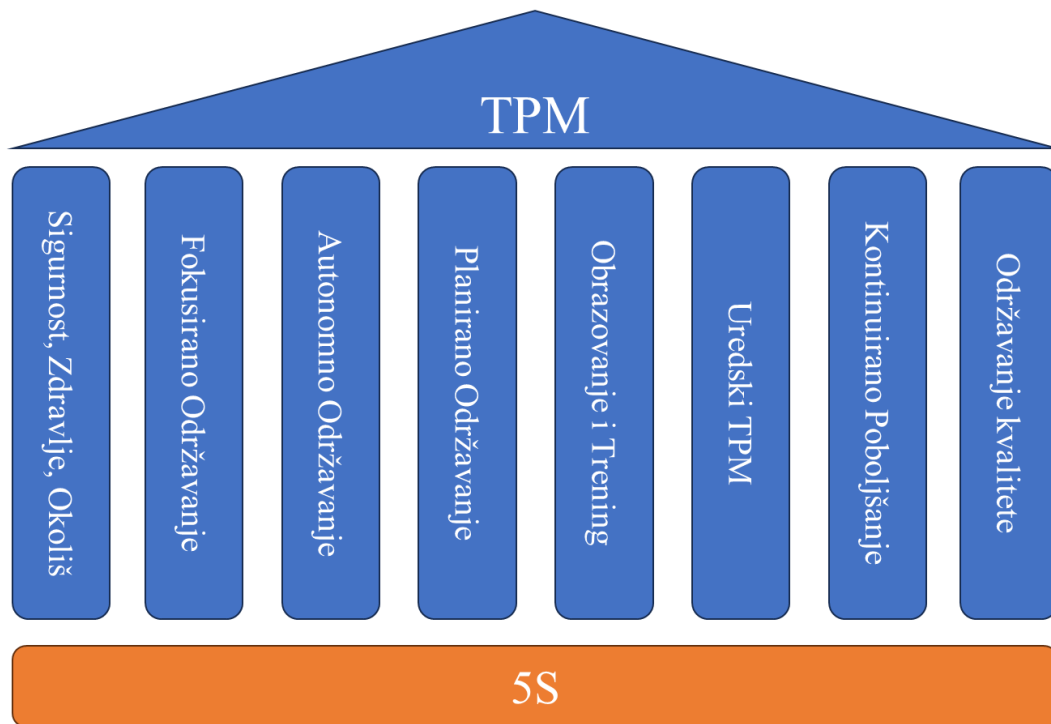
Odjeli za održavanje imaju vlastite ciljeve i potrebu za strateškim planiranjem održavanja. Glavni cilj je održavati proizvodnju bez povećanja troškova ili smanjenja kvalitete konačnog proizvoda. TPM (Total Productive Maintenance) je tek nedavno stekao veću pažnju jer su proizvođači usmjerili svoju pažnju na podizanje razine održavanja proizvodne opreme. Suvremeni TPM se razvio kao dio Lean filozofije, obuhvaćajući sve aspekte održavanja koji su ranije uspostavljeni, uključujući produktivno održavanje, preventivno održavanje, autonomno održavanje, krugove kvalitete, praćenje opreme, računalno potpomognuto održavanje i optimizacijske modele. Cilj TPM-a je značajno poboljšati proizvodni output dok istovremeno povećava moral zaposlenika i njihovo zadovoljstvo poslom. Ključni ciljevi TPM-a su:

- **Smanjenje gubitaka:** Identifikacija i eliminacija svih oblika gubitaka kako bi se postigla maksimalna učinkovitost.
- **Proizvodnja bez pada kvalitete:** Održavanje visoke kvalitete proizvoda kroz dosljedno i učinkovito održavanje.
- **Smanjenje troškova:** Optimizacija troškova održavanja kroz učinkovite strategije i planiranje, smanjujući nepotrebne troškove.
- **Fleksibilna proizvodnja:** Osiguravanje proizvodnje koja nije podložna čestim promjenama proizvoda i serija, omogućavajući brzu prilagodbu promjenama na tržištu.
- **Nula kvarova:** Postizanje proizvodnje bez zastoja i nesreća povezanih s održavanjem putem cjelovitog pristupa za povećanje ukupne učinkovitosti opreme.
- **Povećanje učinkovitosti, pouzdanosti i dostupnosti proizvodne opreme:** Stalno poboljšavanje performansi opreme kako bi se osigurala visoka razina operativne učinkovitosti.
- **Kontinuirana poboljšanja:** Stalna unapređenja procesa i praksi održavanja kako bi se postigli dugoročni ciljevi u pogledu učinkovitosti i kvalitete.

Tradicionalni pristup TPM-u temelji se na osam stupova TPM-a. Osnovni elementi postavljaju temeljni pristup 5S i osam stupova napora povezanih s održavanjem. Ovi stupovi uključuju sigurnosne, zdravstvene i ekološke aspekte, usmjereno održavanje, autonomno održavanje, planirano održavanje, edukaciju i obuku, uredski TPM, kontinuirana poboljšanja

i održavanje kvalitete. Međutim, nije moguće implementirati sve stupove u svakoj organizaciji. U nekim slučajevima uključena je samo jedan ili nekoliko odabranih stupova, kao što je diskutirano kod Xiang i suradnika [18]. U nekim slučajevima, poduzeća se odlučuju za implementaciju samo jednog ili nekoliko odabranih stupova, ovisno o specifičnim potrebama i uvjetima njihovog poslovanja. Ovaj selektivni pristup omogućuje organizacijama da se fokusiraju na najkritičnija područja i postupno proširuju primjenu TPM-a kako bi postigli optimalne rezultate. Stupovi kuće TPM-a su:

1. **Sigurnost, zdravlje i zaštita okoliša:** Osiguravanje sigurnih radnih uvjeta, promicanje zdravlja zaposlenika i minimiziranje negativnog utjecaja na okoliš.
2. **Usmjereno održavanje:** Fokusiranje na specifične probleme i područja za poboljšanje kako bi se postigla maksimalna učinkovitost.
3. **Autonomno održavanje:** Osposobljavanje operatera strojeva za svakodnevno održavanje i manje popravke kako bi se smanjili zastoji i kvarovi.
4. **Planirano održavanje:** Razvijanje i provođenje planiranih programa održavanja za prevenciju kvarova i produženje vijeka trajanja opreme.
5. **Edukacija i obuka:** Kontinuirana obuka zaposlenika kako bi se osigurale potrebne vještine i znanja za učinkovito održavanje.
6. **Uredski TPM:** Primjena TPM principa u administrativnim i uredskim procesima kako bi se poboljšala ukupna učinkovitost organizacije.
7. **Kontinuirana poboljšanja (Kaizen):** Stalno unapređenje svih aspekata poslovanja kroz male, postupne promjene.
8. **Održavanje kvalitete:** Osiguravanje visoke razine kvalitete proizvoda kroz dosljedno i učinkovito održavanje opreme.



*Slika 2. Kuća TPM-a [19]*

Filozofija 5S ima za cilj smanjiti otpad, poboljšati sigurnost na radnom mjestu, povećati produktivnost te stvoriti organiziranije i učinkovitije radno okruženje. Može se primijeniti u raznim industrijama i postavkama, uključujući proizvodnju, zdravstvo, urede i uslužne sektore, kako bi se optimizirali procesi i eliminirali nepotrebni zadaci ili materijali.

Stup sigurnosti, zdravlja i okoliša primarno se fokusira na identifikaciju i eliminaciju povezanih incidenata, s ciljem postizanja idealnog radnog okruženja. Ovaj stup naglašava uspostavljanje odbora za sigurnost, koji se sastoji od poslovnih lidera i predstavnika radnika. Odbor je odgovoran za dosljedno organiziranje inicijativa povezanih sa sigurnošću, kao što su slogani za sigurnost, natjecanja u sigurnosti i plakati za sigurnost, s ciljem povećanja svijesti zaposlenika o sigurnosti. Nadalje, redovito provođenje događaja koji promoviraju sigurnost, poput mjeseci sigurnosti, tjednih proslava i natjecanja u poeziji, igra značajnu ulogu u poboljšanju sigurnosti na radnom mjestu.

"Usmjereno održavanje," također poznato kao "Kobetsu Kaizen," naglašava implementaciju Kaizen projekata usmjerenih na identifikaciju i eliminaciju značajnih gubitaka u proizvodnom procesu. Ovaj pristup je uspješno primijenjen u različitim industrijama kako bi se poboljšala pouzdanost opreme i smanjilo vrijeme zastoja.

Autonomno održavanje predstavlja paradigmatiku promjenu u održavanju opreme, gdje se operaterima opreme povjeravaju odgovornosti i ovlasti za svakodnevne aktivnosti

održavanja, uključujući primjenu 5S principa [46]. Ovaj pristup ne samo da poboljšava vještine operatera u upravljanju i poboljšanju opreme, već također zahtijeva značajnu kulturološku promjenu u načinu na koji se tradicionalno provodi održavanje.

Planirano održavanje je sustavni pristup usmjeren na upravljanje pouzdanošću opreme procjenom stope kvarova i izradom odgovarajućeg plana održavanja. PM obuhvaća različite metode, uključujući preventivno održavanje, održavanje nakon kvara, korektivno održavanje i prevenciju održavanja [47]. U kratkom pregledu, preventivno održavanje uključuje održavanje opreme prije nego što dođe do kvarova ili abnormalnih incidenata tijekom rada. Strategije prevencije održavanja provode se tijekom faze dizajna opreme kako bi se osigurali viši nivoi održavanja i pouzdanosti, s primarnim ciljem sprječavanja kvarova opreme [48].

Manzini i suradnici [49] objasnili su kako je raspored preventivnih akcija održavanja ključni faktor za održavanje pouzdanih sustava. Mnoge studije pokazale su da je preventivno održavanje jedan od ključnih aspekata stabilne proizvodnje [50]. Složeni entitet poput proizvodnog stroja sastoji se od stotina dijelova koji se troše tijekom rada i koje je potrebno zamijeniti u pravom trenutku. Autori su ilustrirali model linearnog programiranja koji može pomoći u kreiranju rasporeda preventivnog održavanja. Model stvara raspored na način da minimizira troškove zamjenskih dijelova i korektivnih akcija [51].

Edukacija i obuka igraju ključnu ulogu u kontekstu TPM-a (Total Productive Maintenance). Njihov primarni cilj je poboljšati moral zaposlenika, njihove vještine i tehničku stručnost te adresirati sve postojeće praznine u znanju. Ovaj stup TPM-a vodi zaposlenike kroz različite faze razvoja vještina kako bi se osigurala kompetencija i osposobljenost za izvršavanje zadataka održavanja na visokoj razini. Učinkoviti programi obuke unutar ovog okvira zahtijevaju stalnu procjenu obrazovnih i obučnih potreba zaposlenika kako bi se odredili odgovarajući moduli i rasporedi obuke.

Proces obuke može poprimiti različite oblike. Na primjer, operateri opreme dobivaju specijaliziranu obuku o prepoznavanju i prijavljivanju abnormalnosti tijekom svojih rutinskih i periodičnih pregleda. Oni također uče kako pravilno održavati opremu, što uključuje osnovne popravke i preventivne mjere. S druge strane, osoblje za održavanje opreme stječe dublju stručnost u načelima održavanja, tehnikama te specijaliziranim vještinama održavanja koje su potrebne za rješavanje složenijih problema i osiguravanje dugoročne pouzdanosti opreme. Efektivni programi obuke zahtijevaju kontinuiranu evaluaciju i prilagodbu kako bi se osiguralo da su svi zaposlenici opremljeni najnovijim znanjima i vještinama. To uključuje

periodične provjere kompetencija, povratne informacije od zaposlenika te prilagodbu trening programa na temelju identificiranih potreba. Autori istraživanja [52] naglašavaju da edukacija i obuka nisu jednokratni procesi, već kontinuirani naponi koji zahtijevaju predanost i ulaganje od strane organizacije. Dobro obučeni zaposlenici ne samo da doprinose poboljšanju operativne učinkovitosti i smanjenju zastoja, već također pridonose stvaranju kulture kontinuiranog poboljšanja i visokog morala unutar organizacije. Ovaj pristup osigurava da svi članovi tima razumiju i pridržavaju se najboljih praksi održavanja, što je ključno za dugoročni uspjeh TPM inicijative.

Cilj uredskog TPM-a (Office TPM) je otkriti i eliminirati neučinkovitosti u administrativnim operacijama. Ovaj pristup fokusira se na rješavanje dvanaest značajnih područja gubitaka [53], uključujući neučinkovitosti u obradi, probleme u komunikaciji, vremena neaktivnosti, nesklad u točnosti, kvarove uredske opreme, pritužbe kupaca, neočekivane troškove i ostalo.

Stup kontinuiranog poboljšanja TPM-a nudi dobro organiziranu, timski orijentiranu strategiju za sustavno rješavanje i eliminaciju identificiranih neučinkovitosti unutar bilo kojeg procesa. Pod ovim stupom, zaposlenici su potaknuti da poboljšaju svoju sposobnost učinkovitog reagiranja na probleme održavanja. Radnici bi također trebali steći vještine u analizi temeljnih uzroka kvarova, koristeći alate kao što su analiza “Pet zašto<sup>1</sup>”, “Ishikawa dijagram<sup>2</sup>” i analiza mjerenja performansi. Ovo predstavlja odstupanje od tradicionalnog pristupa inženjerskom održavanju, gdje posvećeni tim stručnjaka za inženjersko održavanje obično provodi analizu i utvrđuje uzroke kvarova održavanja.

Stup održavanja kvalitete naglašava uspostavljanje kulture usmjerene na filozofiju nula defekata i optimalno korištenje svih resursa, uključujući opremu, kako bi se postigla stalna poboljšanja u kvaliteti. Ovaj pristup obuhvaća sveobuhvatno razumijevanje i upravljanje procesnim interakcijama među ključnim elementima proizvodnje: ljudima, materijalima, strojevima i metodama. Cilj je identificirati i otkloniti potencijalne izvore defekata prije nego što do njih dođe. Primarni fokus je na preventivnim mjerama kako bi se spriječilo nastajanje defekata već u početnim fazama proizvodnog procesa. Ovaj pristup je u suprotnosti s tradicionalnim metodama koje se oslanjaju na stroge inspekcijske sustave za otkrivanje defekata nakon što su već proizvedeni. Kultura nula defekata također zahtijeva promjenu

---

<sup>1</sup> Pet zašto je metoda kojom se pokušava doći do uzroka problema ispitujući radnika nakon svakog odgovora “zašto”, tako pokušavajući doći do početnog problema ili uzroka.

<sup>2</sup> Ishikawa dijagram je analitička metoda gdje se vizualno razvrstaju mogući uzroci nastalog problema po kategorijama metode, materijala, uređaja ili opreme i ljudskog faktora



načina razmišljanja unutar organizacije, gdje se naglasak stavlja na kvalitetu na izvoru, odnosno na svakom koraku proizvodnog procesa. To podrazumijeva da svi zaposlenici, od operatera na proizvodnoj liniji do menadžmenta, dijele zajedničku odgovornost za održavanje i poboljšanje kvalitete. Optimalno korištenje resursa uključuje ne samo efikasno korištenje opreme, već i pravilno upravljanje ljudskim resursima, materijalima i metodama rada. Svi ovi elementi moraju biti usklađeni kako bi se postigli najbolji mogući rezultati u pogledu kvalitete proizvoda. Implementacijom stupa održavanja kvalitete, organizacije mogu postići značajna poboljšanja u kvaliteti svojih proizvoda, smanjenje troškova povezanih s defektima i reklamacijama te povećanje zadovoljstva kupaca. Ovaj pristup, usmjeren na prevenciju i kontinuirano poboljšanje, ključan je za postizanje dugoročne konkurentnosti na tržištu.

Slijedeći strukturalnu implementaciju i postavljajući 5S filozofiju kao temelj, TPM može donijeti izravne i neizravne koristi. Prema Venkateshu [6], izravne koristi TPM-a su:

1. **Povećana produktivnost i ukupna učinkovitost postrojenja (OPE):** Smanjenje zastoja i kvarova opreme dovodi do veće dostupnosti i učinkovitosti proizvodnje.
2. **Rješavanje pritužbi kupaca:** Brza i učinkovita reakcija na pritužbe poboljšava zadovoljstvo kupaca.
3. **Smanjenje troškova proizvodnje:** Redovno i preventivno održavanje smanjuje potrebu za skupim popravcima i zamjenom dijelova.
4. **Potpuno zadovoljavanje potreba kupaca:** Isporuka prave količine u pravo vrijeme i uz traženu kvalitetu.
5. **Smanjenje nezgoda:** Poboljšana sigurnost na radnom mjestu smanjuje broj nezgoda i ozljeda.
6. **Ekološki prihvatljivija proizvodnja:** Održavanje opreme i procesa na način koji smanjuje negativan utjecaj na okoliš.

Neke od neizravnih koristi TPM-a su:

1. **Viša razina povjerenja među zaposlenicima:** Zaposlenici postaju sigurniji u svoje vještine i sposobnosti.
2. **Održavanje radnog mjesta čistim, urednim i privlačnim:** Poboljšava se radno okruženje, što pozitivno utječe na produktivnost.
3. **Pozitivna promjena u stavovima operatera:** Zaposlenici postaju angažiraniji i motiviraniji za rad.

4. **Postizanje ciljeva radom u timu:** Poboljšava se suradnja i timski rad, što dovodi do boljih rezultata.
5. **Horizontalna primjena novog koncepta u svim područjima organizacije:** Noviteti i poboljšanja se šire kroz cijelu organizaciju.
6. **Dijeljenje znanja i iskustava:** Potiče se razmjena informacija i kontinuirano učenje među zaposlenicima.
7. **Radnici stječu osjećaj vlasništva nad strojem:** Povećava se odgovornost i briga za opremu, što vodi do boljeg održavanja i manje kvarova.

Optimizacija održavanja prošla je kroz značajne promjene i razvoj tijekom vremena, kako bi se prilagodila sve složenijim potrebama modernih proizvodnih sustava. Evolucija optimizacije održavanja od reaktivnog pristupa do suvremenih, prediktivnih i proaktivnih metoda pokazuje kako su se tehnike i alati razvijali kako bi zadovoljili potrebe modernih proizvodnih sustava. Integracija naprednih tehnologija, kontinuirana obuka i strateško planiranje ključni su elementi za postizanje optimalne učinkovitosti i pouzdanosti u održavanju. Pretraživanjem dostupnih istraživanja na temu praksi održavanja, iako postoji mnogo različitih pristupa implementaciji TPM-a, još uvijek ne postoji potpuni i univerzalni model za održivu implementaciju TPM-a u proizvodnim poduzećima.

#### 4. IZAZOVI IMPLEMENTACIJE TPM-a U PROIZVODNIM PODUZEĆIMA

Total productive maintenance (TPM), kao aspekt lean principa za optimizaciju proizvodnje, vrijedan je i konstruktivan alat za poboljšanje ukupne kvalitete održavanja, čime se povećava vijek trajanja, pouzdanost i učinkovitost proizvodne opreme. Organizacija radnog mjesta, postupci i vremena održavanja također se mogu značajno poboljšati [54]. Drugim riječima, TPM je metodologija za poboljšanje postrojenja koja omogućava kontinuirana i brza poboljšanja proizvodnih procesa kroz uključenost zaposlenika, osnaživanje zaposlenika i zatvoreno mjerenje rezultata, a uključena je u koncept preventivnog održavanja [55]. Implementacija TPM-a znači težnju ka viziji idealne proizvodne situacije, viziji koja obuhvaća nula kvarova, nula defekata, nula abnormalnosti i nula nesreća [56].

Međutim, ako se TPM pogrešno implementira ili održava, može negativno utjecati na postupke održavanja, motivaciju radnika i pouzdanost proizvodne opreme, kao i povećati radno opterećenje. Da bi se TPM pravilno uveo u tvrtku, ne samo da se moraju poštovati koraci za njegovu implementaciju, već i mentalni aspekti povezani s radnicima koji su uključeni u cijeli proces [17]. Uz uspješnu implementaciju TPM-a, povećat će se dostupnost, učinkovitost i pouzdanost proizvodne opreme, što su tri glavna pokazatelja performansi opreme. Dostupnost je omjer vremena kada se oprema može koristiti za svoju namjenu. Pouzdanost opisuje koliko često oprema ne ispunjava svoju namjenu. Učinkovitost je omjer stvarnog outputa stroja (tj. proizvoda željene kvalitete) u odnosu na njegov nominalni output tijekom vremena kada je operativan [57]. Cilj je povećati te karakteristike bez povećanja radnog opterećenja, odnosno reorganizacijom napora na učinkovitiji način. Uz današnje zahtjeve za naprednom proizvodnjom s minimalnim otpadom i s obzirom na sve veću konkurenciju, proizvođači moraju imati kvalitetnu i pouzdanu opremu. Uvođenje lean principa može trajati do dvije godine, a potreban je planiran i strukturiran pristup, budući da je TPM jedan od složenijih lean alata.

Proizvođači širom svijeta suočavaju se s izazovom povećanja produktivnosti, a istovremeno zadržavajući ljude uključenima u proizvodne procese. Ovaj zadatak postaje još teži kako roboti postaju sve važniji u proizvodnom procesu zahvaljujući novim tehnologijama, kao što su sučelja mozak–stroj i napredak u umjetnoj inteligenciji. Ove izazove može riješiti sljedeća industrijska revolucija, poznata kao Industrija 5.0. Ukratko, koncept Industrije 5.0 odnosi se na ljude i robote koji rade kao suradnici, a ne kao konkurenti [58]. Lean pristup upravljanju inovacijama omogućava glatku implementaciju aplikacija Industrije 5.0. Primjena lean

principa na razvoj proizvoda/usluga može igrati značajnu ulogu u poticanju inovacija i dugoročnom organizacijskom učenju. Važno je pronaći pravi balans između definiranja normi kao smjernica i davanja inženjerima slobode da slijede nekonvencionalna rješenja [59].

Lean alati moraju se implementirati strateški, profesionalno i s pravim pristupom prema radnicima kako bi se postigle najveće koristi od njihove primjene, posebno ako tvrtka još nije uvela slične filozofije. Bez pravilnog pristupa, postoji rizik da implementacija lean alata neće postići željene rezultate, a može čak i izazvati otpor među zaposlenicima. Stoga je pripremljena detaljna anketa s ciljem identificiranja ključnih faktora koji ometaju implementaciju i uspjeh TPM-a i lean alata općenito. Anketa je distribuirana u nekoliko tvrtki koje su imale različit broj zaposlenika i bile uključene u različita područja proizvodnje, uključujući automobilski sektor, prehrambenu industriju, kemijsku industriju i druge. Tvrtke su odabrane tako da predstavljaju širok spektar proizvodnih okruženja, kako bi rezultati bili što reprezentativniji. Cilj istraživanja bio je identificirati ključne faktore koji mogu negativno utjecati na uvođenje lean principa i TPM-a te dovesti do neuspjeha njihove implementacije.

Kao što je zaključeno u pregledu literature, stručnost i strukturirana metodologija ključni su za uspješno uvođenje i korisnu primjenu lean alata i TPM (Total Productive Maintenance) alata u proizvodnom pogonu. Uspješna implementacija ovih alata zahtijeva pažljivu planifikaciju i primjenu kako bi se postigle željene koristi. Jedan od ključnih elemenata je balansiranje pažnje između strojeva i radne snage, čime se osigurava da oba aspekta dobivaju odgovarajuću pažnju i resurse.

Ključni nalazi iz literature ističu važnost pažljivog odabira i primjene TPM alata koji odgovaraju specifičnim potrebama proizvodnog pogona, redovite procjene performansi opreme za identifikaciju potencijalnih problema i pravodobno djelovanje te kontinuirane evaluacije i prilagodbe strategija održavanja kako bi se osiguralo da se TPM alati koriste na najefikasniji način. Osiguranje podrške menadžmenta ključno je za uspjeh implementacije TPM-a. Visoki menadžment mora biti aktivno uključen i podržavati implementaciju kako bi osigurao potrebne resurse i motivaciju za cijelu organizaciju. Edukacija i obuka zaposlenika također su ključni elementi, jer zaposlenici moraju razumjeti prednosti i metodologiju TPM-a kako bi bili motivirani i sposobni učinkovito ga koristiti. Stvaranje kulture promjena unutar organizacije dodatno potiče prihvaćanje novih metodologija i inovacija, što uključuje poticanje zaposlenika na sudjelovanje u procesima poboljšanja i nagrađivanje njihovih doprinosa. Efektivna komunikacija o ciljevima, prednostima i napretku implementacije TPM-

a ključna je za prevladavanje otpora i osiguranje suradnje svih zaposlenika. Pravilno planiranje resursa, uključujući vrijeme, novac i osoblje, također je važno za uspješnu implementaciju.

Značajan nedostatak u postojećoj literaturi je nedostatak naglaska na analizi izazova u usvajanju TPM-a. Mnogi izvori ne pružaju dovoljno informacija o praktičnim izazovima s kojima se organizacije suočavaju tijekom implementacije ovih alata. U ovom odjeljku bit će pružene smjernice kako bi se pomoglo trenerima i menadžerima u prevladavanju potencijalnih izazova i prepreka s kojima se susreću tijekom implementacije TPM-a i lean alata u okruženju koje nema prethodno iskustvo s tim metodologijama. Neuspjeh u pravilnoj implementaciji ili održavanju TPM-a može negativno utjecati na postupke održavanja, smanjiti motivaciju radnika i ugroziti pouzdanost proizvodne opreme zbog povećanog radnog opterećenja. Pravilnim pristupom i pažljivim planiranjem moguće je izbjeći ove probleme i postići značajna poboljšanja u učinkovitosti i pouzdanosti proizvodnje.

#### 4.1. Metoda i postupak

Nakon temeljitog pregleda literature, dizajniran je sveobuhvatan upitnik kako bi pokrio sve aspekte koji mogu negativno utjecati na implementaciju lean alata i TPM-a (Total Productive Maintenance). Cilj upitnika bio je identificirati ključne prepreke i izazove koji se mogu pojaviti tijekom implementacije ovih metodologija u različitim proizvodnim okruženjima.

Upitnik je poslan tvrtkama različitih veličina, od malih poduzeća s nekoliko zaposlenika do velikih korporacija s tisućama radnika. Na taj način osigurano je da rezultati ankete budu reprezentativni za širok spektar proizvodnih organizacija. Prikupljanje podataka uključivalo je odgovore od zaposlenika na različitim hijerarhijskim razinama, uključujući operatere na proizvodnim linijama, srednji menadžment i visoke rukovoditelje. Odgovori koji su ukazivali na nedostatak poznavanja teme ili nisu pružali dovoljno relevantnih informacija bili su odbačeni kako bi se osigurala kvaliteta i vjerodostojnost podataka. Nakon prikupljanja odgovora, provedena je detaljna provjera vjerodostojnosti podataka, uključujući provjeru konzistentnosti i točnosti dostavljenih informacija. Analiza podataka provedena je s obzirom na veličinu tvrtke, što je omogućilo uvid u specifične izazove s kojima se suočavaju male, srednje i velike organizacije. Također, podaci su analizirani prema hijerarhiji pozicija unutar

tvrtke kako bi se razumjelo kako različite razine zaposlenika percipiraju i doživljavaju implementaciju lean alata i TPM-a.

Blok dijagram metodologije korištene u istraživanju prikazan je na slici 3, što omogućuje vizualni pregled koraka i procesa uključenih u dizajn, distribuciju, prikupljanje i analizu podataka iz ankete. Ovaj dijagram pruža jasan i strukturiran prikaz metodološkog pristupa koji je korišten za osiguranje sveobuhvatnosti i preciznosti istraživanja. Konačni rezultati analize pružit će vrijedne uvide i smjernice za tvrtke koje planiraju implementirati lean alate i TPM, pomažući im da prepoznaju i prevladaju potencijalne prepreke i postignu uspješnu implementaciju ovih metodologija.



*Slika 3 Blok dijagram metodologije.*

Prilikom pripreme ankete za prikupljanje vrijednih znanstvenih podataka, važno je imati na umu da postoje pravila koja se moraju slijediti kako bi anketa bila vjerodostojna. Da bi anketa bila korisnija, potrebno ju je pripremiti u skladu s utvrđenim smjernicama. S razvojem informacijsko-komunikacijskih tehnologija i sve većim brojem korisnika koji uspješno primjenjuju te tehnologije u svom svakodnevnom radu, web ankete postale su najučinkovitiji način prikupljanja informacija od velikog broja tvrtki. Pitanja ili izjave u anketi moraju biti jasne, vrijeme potrebno za popunjavanje ankete ne smije biti predugo, a istraživanje mora imati jasno definiran rok. Anketa mora započeti kratkim uvodom koji objašnjava zašto se provodi. Na kraju, ako se anketa provodi i online, mora se uzeti u obzir digitalni format kako bi bila dostupna svim mogućim sudionicima [60].

Sljedeći koraci su provedeni prilikom kreiranja ankete: određivanje istraživačkog problema, izjava i potrebnih podataka, te procjena je li web anketa prikladna za provođenje istraživanja; procjena mogućeg obuhvata i uzorkovanja, zaključujući može li web anketa dosegnuti ciljanu populaciju; određivanje ljestvica koje će se koristiti; izrada nacrt ankete na temelju kojeg će biti kreirana web anketa; određivanje rasporeda istraživanja; određivanje dizajna uzorka; priprema poruka za ispitanike; programiranje web ankete i potrebne promjene u dizajnu; prethodno testiranje ankete i, ako je potrebno, ispravci; pokretanje web ankete i kontaktiranje sudionika; praćenje provedbe istraživanja; te zatvaranje ankete [61].

Anketa se sastojala od dvadeset sedam izjava grupiranih u tri kategorije: poznavanje lean alata, uvođenje TPM-a i održavanje ili održivost TPM-a. Utvrđivanje razine poznavanja lean alata kod sudionika važno je za dobivanje njihovog stupnja razumijevanja teme, što pomaže u ocjeni koliko su dobro upoznati s osnovnim konceptima i principima lean metodologija. Kategorija uvođenja TPM-a obuhvaćala je izjave povezane s različitim aspektima njihove primjene, uključujući edukaciju zaposlenika, upotrebu strojeva, metode rada i angažman osoblja. Ove izjave su bile usmjerene na prikupljanje podataka o tome kako se lean alati implementiraju u različitim proizvodnim okruženjima, te koje su prepreke ili izazovi prisutni tijekom implementacije. Konačno, anketa je uključivala skup izjava o održivosti TPM-a i lean alata kako bi se dobio uvid u to koje se akcije poduzimaju za očuvanje kvalitete uvedenih TPM-a i lean alata. Ova kategorija izjava odnosila se na dugoročne strategije i prakse koje se koriste za održavanje učinkovitosti i kontinuirano poboljšanje implementiranih lean metodologija. Cilj je bio utvrditi koliko su te akcije učinkovite i koje dodatne mjere bi se mogle poduzeti kako bi se osigurala održivost.

Sudionici su procjenjivali izjave pomoću ljestvice od jedan do pet, pri čemu je jedan značio potpuno neslaganje, a pet potpuno slaganje s danom izjavom. Ova ljestvica omogućila je detaljnu kvantitativnu analizu razine slaganja sudionika s različitim izjavama, što je pomoglo u identifikaciji ključnih faktora koji utječu na uspješnost uvođenja i održivosti TPM-a. Razina slaganja sudionika s određenim izjavama određivala je koji aspekti najviše utječu na uvođenje ili održivost TPM-a i lean filozofija. Na temelju tih podataka, mogli su se identificirati ključni izazovi i prepreke, kao i najbolje prakse koje bi mogle poslužiti kao smjernice za buduće implementacije. Izjave korištene u anketi prikazane su u Tablici 2, pružajući detaljan pregled pitanja koja su bila ključna za prikupljanje relevantnih podataka i informacija.

Tablica 2. Anketna pitanja.

Kategorija 1 Izjava br.	Poznavanje lean alata
1	Upoznat sam sa sustavom vitke proizvodnje
2	Upoznat sam s 5S metodologijom
3	Upoznat sam s TPM metodologijom
4	Upoznat sam s Kanban sustavom
Kategorija 2 Izjava br.	Uvođenje TPM-a
5	Alati su uvedeni stručno, svrsishodno i pravilno
6	Cjelokupno znanje stručnih osoba je dovoljno
7	Iskustvo stručnih osoba zaduženih za uvođenje je dovoljno
8	Postoji dovoljna potpora Direktora/ Uprave
9	Organizacijska struktura je odgovarajuća
10	Implementacija je izvedena u razumnom roku
11	Svjestan sam da implementacija može biti skupa
12	Uvođenje je izvedeno na opremi koja je prikladna
13	Edukacija je bila dovoljno kvalitetna
Kategorija 3 Izjava br.	Održivost TPM-a
14	Timski rad je zadovoljavajuć
15	Komunikacija je zadovoljavajuća
16	Uobičajeni radni zadaci su dobro usklađeni sa aktivnostima vitkih alata
17	Ima dovoljno vremena za sve aktivnosti
18	Tvrtka raspolaže sa dovoljno kvalificiranih osoba
19	Smatraju da im sigurnost posla nije ugrožena zbog vitkih alata
20	Otpor ka promjenama ne postoji
21	Smatram se važnim dijelom
22	Nadređeni imaju dovoljno razumijevanja za usklađivanje redovnih zadaća i zadaća vitkih alata
23	Vitki alati smatraju se jednako bitnima kao i ostali poslovi
24	Aktivnosti vitkih alata i TPM-a, ne izvode se samo prije audita
25	Audit je potreban utrošak vremena
26	Smatram da poduzeće ima koristi od vitkih alata
27	Utrošeno vrijeme u TPM aktivnosti je dobra investicija



Izjave su formulirane kako bi pokrile sve aspekte koji mogu utjecati na kvalitetu implementacije lean alata. Izjave su napisali autori s ekspertizom u tom području i iskustvom u implementaciji u stvarnim proizvodnim tvrtkama. Autori su uključili područja koja smatraju ključnima za uspostavljanje lean filozofija. Stoga su autori podijelili pitanja u tri kategorije. Prva kategorija odnosi se na razumijevanje razine znanja ispitanika o zadanoj temi. Cilj ove kategorije je procijeniti koliko su ispitanici upoznati s osnovnim konceptima i principima lean alata i TPM-a, što je važno za ocjenu njihove spremnosti za implementaciju. Druga kategorija pokriva faktore vezane uz pripremu, edukaciju, odabir tima i implementaciju. Ova kategorija obuhvaća izjave koje se tiču različitih aspekata pripreme za uvođenje lean alata, uključujući trening zaposlenika, odabir i formiranje timova, kao i konkretne korake potrebne za uspješnu implementaciju. Treća kategorija fokusira se na aspekte kao što su kontinuitet izvršavanja zadataka, komunikacija i revizije. Ova kategorija ispituje održivost lean alata i TPM-a nakon njihove početne implementacije, uključujući načine na koje se osigurava kontinuirano poboljšanje i praćenje performansi.

Kako bi se dobile različite perspektive, anketa je od sudionika tražila da navedu koju poziciju zauzimaju u tvrtki kako bi se podaci mogli analizirati na hijerarhijskoj razini. Ova informacija omogućuje uvid u to kako različite razine zaposlenika percipiraju i doživljavaju implementaciju lean alata i TPM-a, što može pomoći u identifikaciji specifičnih izazova i potreba na svakoj razini organizacije. Izjave korištene u anketi oblikovane su kako bi osigurale sveobuhvatno prikupljanje relevantnih podataka, omogućujući analizu ključnih faktora koji utječu na uspješnost implementacije i održivost lean filozofija. Ovaj pristup osigurava da anketa obuhvaća sve važne aspekte potrebne za stvaranje jasne slike o stanju i izazovima u implementaciji lean alata u proizvodnim tvrtkama.

Kao što je spomenuto, svrha prve kategorije ankete bila je utvrditi razinu znanja ispitanika o toj temi. Ako nije bila dovoljna, anketa se nije koristila jer podaci ne bi bili korisni za istraživanje. Anketa je poslana u četiri različite tvrtke. Zbog anonimnosti, tvrtke su imenovane kao Tvrtka 1, Tvrtka 2, Tvrtka 3 i Tvrtka 4. Ukupno su primljena 36 korisna odgovora. Tvrtka 1 ima 50 zaposlenika, a njihov rad fokusira se na inovativna rješenja u automatizaciji i robotskoj tehnologiji. Oni izrađuju automatske linije za razne primjene pakiranja i montaže, pružajući prilagođena rješenja prema zahtjevima kupaca. Lean alati su bili u uporabi 12 mjeseci. Neki od alata koje su implementirali uključuju 5S, Kaizen i TPM.

Tvrtka 2 ima 150 zaposlenika i bavi se pružanjem inženjerskih rješenja. Njihovi zaposlenici su uglavnom inženjeri koji dizajniraju proizvode, a imaju i mali proizvodni pogon za izradu prototipova. Lean alate prakticiraju već dvije godine. Imali su posebno educiran tim za uvođenje vitkih alata u poduzeće.

Tvrtka 3 ima 500 zaposlenika, a njihovo područje stručnosti je razvoj, dizajn, proizvodnja, testiranje i servisiranje energetskih transformatora. Počeli su uvoditi lean alate prije sedam godina i bili su među prvim velikim tvrtkama u Hrvatskoj koje su implementirale opsežan lean program. Koriste 5S, Kaizen, TPM, SMED (single minute exchange of dies) i vizualno upravljanje. Konačno, Tvrtka 4 ima 800 zaposlenika i proizvodi polugotove elektro-mehaničke proizvode. Lean program su započeli prije pet godina. Osnovani su poseban odjel za uvođenje lean alata i prakticiraju 5S, Kaizen, TPM, SMED, vizualno upravljanje, Six Sigma i zero waste.

Sve tvrtke imaju iskustva s lean filozofijom, neka manje, a neka više. Odgovore su dali zaposlenici na raznim pozicijama unutar tvrtki, uključujući rukovodioce, voditelje timova, tehnologe te direktne operatere u proizvodnji. Tablica 3 prikazuje broj korisnih odgovora po tvrtki i po vrsti radne skupine.

*Tablica 3. Broj iskoristivih odgovora po tvrtki i po vrsti radne skupine*

Tvrtka	Broj iskoristivih odgovora	Vrsta radne skupine	Broj anketa
Tvrtka 1	9	Rukovodioc	6
Tvrtka 2	13	Voditelj	10
Tvrtka 3	8	Tehnolog	13
Tvrtka 4	6	Operater	7

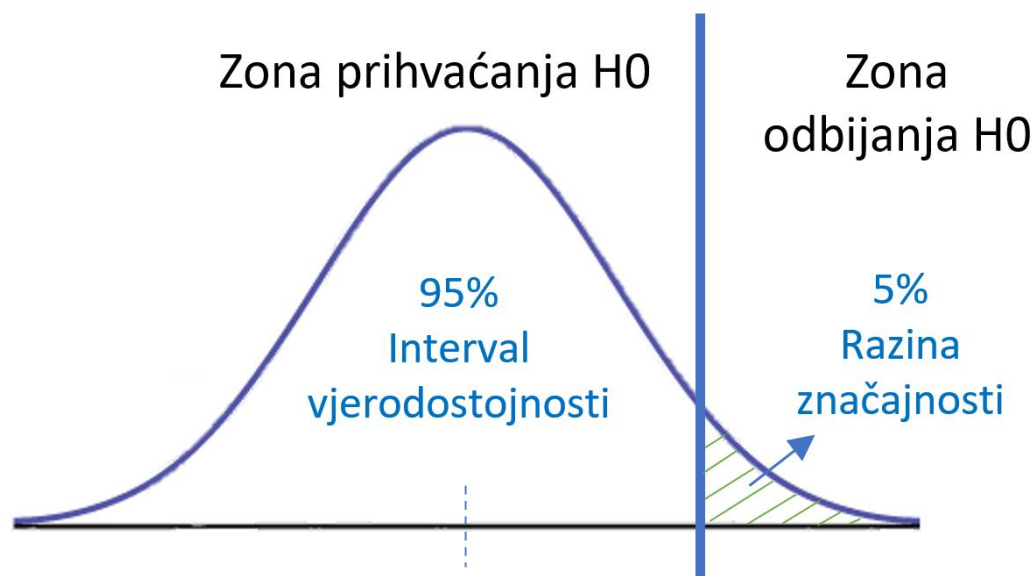
#### 4.2. Analiza podataka

Prije predstavljanja rezultata ankete, potrebno je utvrditi njihovu vjerodostojnost i provesti analizu samih podataka. Stoga su na primljene odgovore primijenjeni analiza varijance (ANOVA) i Cronbachov alfa. ANOVA je jedna od najčešće korištenih statističkih tehnika s primjenama u područjima koja uključuju biologiju, medicinu, industriju i financije [62]. ANOVA test već dugo je vrijedan alat za istraživače koji provode studije na više eksperimentalnih skupina i jednoj ili više kontrolnih skupina [63]. Glavni cilj ANOVA

testiranja je utvrditi prihvaća li se ili odbacuje nulta hipoteza. Nulta hipoteza je pretpostavka da rezultati studije neće pokazati učinak kada se podvrgnu znanstvenom eksperimentu. Ako je nulta hipoteza istinita, neće biti razlika između intervencijskih i kontrolnih skupina na kraju studije [64].

ANOVA koristi F-test za statističku evaluaciju jednakosti sredina. F-vrijednost je omjer varijacije između skupina i varijacije unutar skupina. Dobivena F-vrijednost uspoređuje se s kritičnom vrijednošću F omjera iz tablice za zadanu razinu značajnosti. Razina značajnosti određuje rizik donošenja zaključka da razlika postoji gdje zapravo ne postoji. Najčešće korištena razina značajnosti je 0,05. Ako je dobivena F-vrijednost veća od F omjera dobivenog iz tablica, možemo odbaciti nultu hipotezu s 95% razinom povjerenja, kao što je prikazano na slici 4.

- F dobiveno > F omjer ko 0.05 razine značajnosti: odbiti null hipotezu sa intervalom vjerodostojnosti od 95%;
- F dobiveno < F omjer: prihvatiti null hipotezu



Slika 4 Vizualizacija prihvaćanja ili odbacivanja nulte hipoteze.

Jednadžba (1) opisuje kako izračunati F dobiveno:

$$F_{dobiveno} = \frac{s^2_{između\ grupa}}{s^2_{unutar\ grupa}} \quad (1)$$

gdje je:

$S^2_{između\ grupa}$  = standardna devijacija između grupa;

$S^2_{unutar\ grupa}$  = standardna devijacija unutar grupa [65].

Jednadžba (2) opisuje kako izračunati standardnu devijaciju:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2)$$

gdje je:

$n$  = broj varijabli,

$x_i$  = pojedinačni rezultat,

$\bar{x}$  = aritmetička sredina rezultata skupine,

$n - 1$  = stupnjevi slobode [65].

U ovom slučaju,  $n$  predstavlja broj pitanja,  $x_i$  predstavlja odgovor jednog ispitanika na jedno od pitanja,  $\bar{x}$  predstavlja aritmetičku sredinu ukupnog broja odgovora na svako pitanje za određenu tvrtku, a stupnjevi slobode su broj varijabli (pitanja) minus jedan. Nakon što je F-vrijednost izračunata za svaku od tvrtki u studiji, dobivene vrijednosti su uspoređene s kritičnom vrijednošću  $F_0$  dobivenom iz tablice kritičnih vrijednosti za F distribuciju za zadane stupnjeve slobode. Vrijednosti su bile sljedeće:

$$F_{dobiveno\ 1} = 2.0837 > F_{0\ omjer\ 1} = 1.4591.$$

$$F_{dobiveno\ 2} = 4.1361 > F_{0\ omjer\ 2} = 1.4591.$$

$$F_{dobiveno\ 3} = 3.7868 > F_{0\ omjer\ 3} = 1.5543.$$

$$F_{dobiveno\ 4} = 5.8746 > F_{0\ omjer\ 4} = 1.4591.$$

Zaključeno je da se nulta hipoteza odbacuje, rezultati studije su vjerodostojni te postoji razlika među populacijama.

Drugi pristup verifikaciji podataka je korištenje Cronbach's alfa ( $\alpha$ ) i McDonald's omega ( $\omega$ ) koeficijenta. Cronbachov alfa je najčešća procjena unutarnje konzistentnosti odgovora na višestavčanim bipolarnim skalama [66]. Može se definirati kao mjerenje stupnja u kojem su odgovori na stavke (tj. odgovori na tvrdnje iz ankete) međusobno povezani. Drugim riječima, Cronbachov alfa procjenjuje udio varijance koja je sustavna ili konzistentna u skupu odgovora na anketu. Često, kada su prisutne asimetrične stavke, poželjno je koristiti omega

koeficijent jer je robusniji od alfa koeficijenta. Stoga su izračunata oba koeficijenta. Rezultati ovih koeficijenata pružaju dublji uvid u pouzdanost i konzistentnost podataka prikupljenih u istraživanju. Visoke vrijednosti Cronbachovog alfa i McDonaldovog omega koeficijenta ukazuju na visoku unutarnju konzistentnost i pouzdanost mjernih instrumenata korištenih u studiji. Ovo osigurava da su dobiveni rezultati vjerodostojni i da se mogu koristiti za daljnju analizu i donošenje zaključaka.

Jednadžba (3) opisuje kako izračunati koeficijent Cronbach alfa:

$$\alpha = \frac{N}{N-1} \left( \frac{\sigma_x^2 - \sum_{i=1}^N \sigma_{Y_i}^2}{\sigma_x^2} \right) \quad (3)$$

gdje je:

$N$  = broj anketnih stavaka,

$\sigma_x^2$  = varijanca promatranih ukupnih rezultata,

$\sigma_{Y_i}^2$  = varijanca stavke  $i$  za osobu  $Y$  [67].

Vrijednost Cronbachovog alfa obično se izražava kao broj između 0 i 1. Vrijednost od 0 znači da nema konzistentnosti u mjerenjima. Što je Cronbachov alfa koeficijent bliži 1.0, to je veća unutarnja konzistentnost stavki na skali. Prihvatljiv raspon je između 0.70 i 0.90 ili više [67]. Ova metrika omogućava istraživačima da procijene pouzdanost svojih mjernih instrumenata. Vrijednosti unutar prihvatljivog raspona ukazuju na to da stavke koje čine skalu dobro mjere istu latentnu konstrukciju, dok niže vrijednosti sugeriraju potrebu za revizijom ili zamjenom nekih stavki kako bi se postigla veća konzistentnost. U praksi, visoke vrijednosti Cronbachovog alfa pomažu osigurati da su rezultati ankete ili upitnika pouzdani i mogu se koristiti za daljnju analizu s povjerenjem.

Procjene omega koeficijenta temelje se na konfirmatornoj faktorskoj analizi (CFA). Prvo se model CFA prilagođava podacima, a zatim se omega izračunava na temelju faktorskih opterećenja i varijanci pogrešaka [68]. Jednadžba (4) opisuje kako izračunati McDonaldov omega:

$$\omega = \frac{(\sum \lambda_i)^2}{(\sum \lambda_i)^2 + \sum \theta_i} \quad (4)$$

gdje je:

$\lambda_i$  = opterećenja faktora za stavku  $i$ ,

$\theta_i$  = varijanca pogreške stavke i [68].

Koeficijenti su izračunati korištenjem besplatnog softvera "JASP 0.18.3.0." Analiza je provedena za svaku pojedinačnu grupu sudionika (tj. za svaku tvrtku). Rezultati analize prikazani su u Tablici 4.

*Tablica 4. Vrijednosti Cronbachovog alfa i McDonaldovog omega za pojedine skupove podataka.*

Skup podataka	Cronbach's Alpha ( $\alpha$ )	McDonald's Omega ( $\omega$ )
Tvrtka 1	0.875	0.882
Tvrtka 2	0.865	0.875
Tvrtka 3	0.746	0.755
Tvrtka 4	0.716	0.720

Granična vrijednost za oba koeficijenta je 0.7. Sve gore navedene vrijednosti smatraju se pouzdanima. Budući da su svi Cronbachovi alfa i McDonaldovi omega koeficijenti veći od 0.70, može se zaključiti da su podaci iz anketa konzistentni.

#### 4.3. Rezultati

Za bolje razumijevanje danih podataka, rezultati su grupirani po tvrtkama i po hijerarhijskoj poziciji unutar tvrtke. Na taj način se može uočiti jesu li veličina tvrtke i hijerarhijska pozicija imali utjecaja na percepciju izazova tijekom implementacije i održavanja TPM-a i lean filozofija općenito. Prvo su rezultati filtrirani prema tvrtki. Tvrtka 1 je malo poduzeće koje se fokusira na inovativna rješenja u automatizaciji i robotskoj tehnologiji. Tvrtka 2 je srednje poduzeće koje pruža usluge inženjerskih rješenja. Tvrtke 3 i 4 su velika poduzeća s više od petsto zaposlenih. Analiza je provedena kako bi se utvrdilo postoji li veza između veličine poduzeća i percepcije potencijalnih problema i izazova vezanih uz implementaciju lean alata i TPM-a. Rezultati su također grupirani prema hijerarhijskoj poziciji unutar svake tvrtke kako bi se vidjelo kako različite razine menadžmenta i operativnog osoblja percipiraju ove izazove. Na primjer, visoki menadžment može imati drugačiji pogled na implementaciju TPM-a i lean alata u usporedbi s operativnim osobljem koje svakodnevno koristi ove alate. Ova detaljna analiza omogućava bolje razumijevanje utjecaja organizacijske strukture i veličine tvrtke na uspješnost implementacije TPM-a i lean filozofije, te može pomoći u prilagodbi strategija za

bolje suočavanje s izazovima i maksimiziranje koristi od ovih metoda. Cilj je bio pružiti uvid u to kako različiti faktori, poput veličine poduzeća i hijerarhijske pozicije, mogu oblikovati percepcije i stavove prema izazovima i problemima koji se javljaju tijekom implementacije TPM-a i lean alata, što može biti ključno za postizanje dugoročne operativne učinkovitosti i konkurentske prednosti.

Sudionici ankete također su zamoljeni da navedu informacije o svojoj ulozi u tvrtki, pa su u drugom dijelu analize podaci grupirani prema radnoj funkciji unutar tvrtke. Korisno je vidjeti potencijalne nedostatke iz različitih perspektiva. Kao što je prikazano u Tablici 5, podaci su grupirani u četiri kategorije na temelju uloga (tj. hijerarhijskih razina): operateri, tehnolozi, voditelji i menadžeri. Ova kategorizacija omogućava dublji uvid u to kako različite razine zaposlenika percipiraju izazove i probleme vezane uz implementaciju TPM-a i lean alata. Operateri, koji su izravno uključeni u svakodnevne operacije, mogu imati jedinstvenu perspektivu na praktične aspekte i operativne prepreke. Tehnolozi mogu pružiti uvid u tehničke izazove i inovativna rješenja. Voditelji, koji koordiniraju rad između različitih timova, mogu se fokusirati na organizacijske izazove i učinkovitost komunikacije. Menadžeri, s druge strane, mogu se usredotočiti na strateške aspekte i dugoročne ciljeve tvrtke. Grupiranje podataka prema radnim funkcijama pomaže identificirati specifične potrebe i prioritete svake hijerarhijske razine, što može biti ključno za razvoj ciljanih strategija za poboljšanje implementacije TPM-a i lean alata. Na taj način, tvrtke mogu osigurati da se sve perspektive uzimaju u obzir prilikom donošenja odluka, što može dovesti do učinkovitije i sveobuhvatnije implementacije ovih metoda.

*Tablica 5. Pregled uloga u tvrtkama i grupama u koje su kategorizirane.*

Radno mjesto	Ista kategorija grupe
Operater	Operater, radnik, manipulant, proizvodni djelatnik.
Tehnolog	Tehnolog, projektant, operativni inženjer, inženjer.
Voditelj	Voditelj, šef odjela.
Rukovodioc	Menadžer, direktor, nadzornik, izvršni direktor.

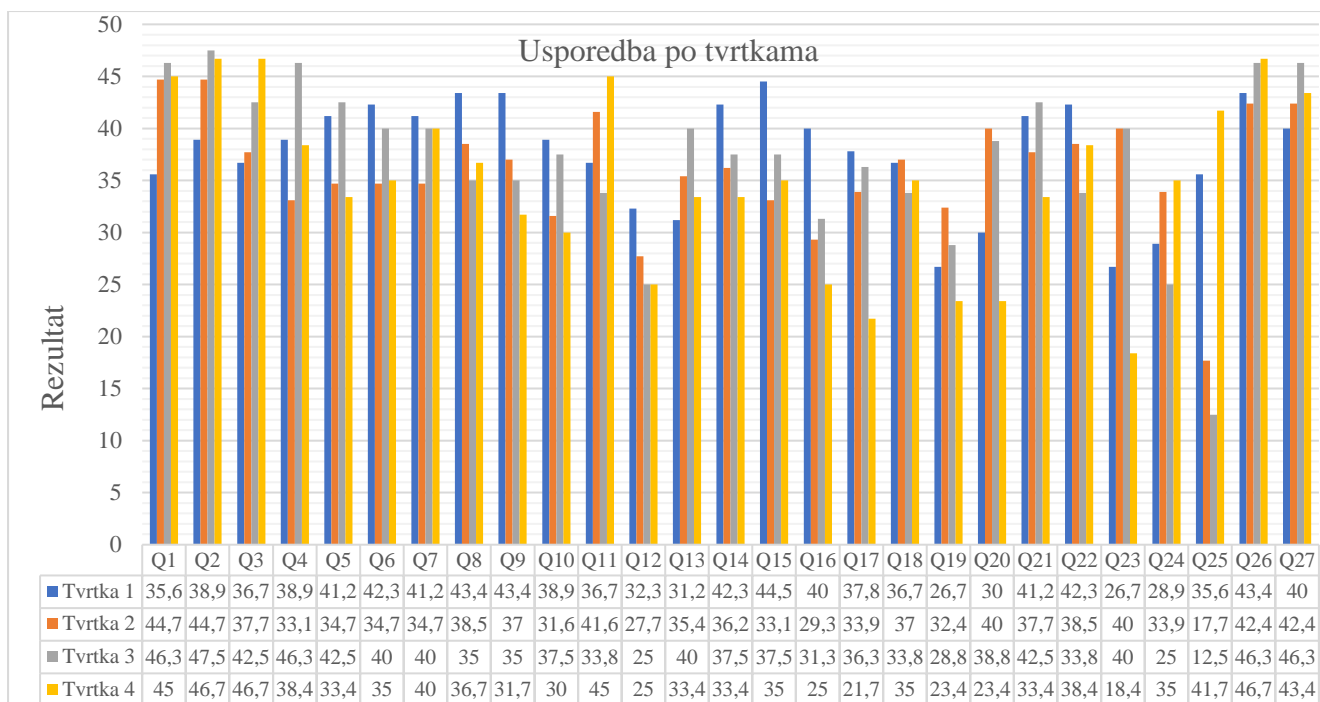
Za bolje rezultate analize podataka, odgovori poput operater, radnik, manipulator i proizvodni zaposlenik grupirani su u kategoriju "operateri." Pogledi operatera ključni su za razumijevanje izazova implementacije, jer najčešće ova razina izvršava vremenski zahtjevne lean zadatke, kao što su prikupljanje podataka, organizacija, čišćenje i autonomno

održavanje. Uloge poput tehnologa, dizajnera i operativnog inženjera grupirane su pod kategoriju "tehnolozi." Pojedinci u ovoj grupi često su visoko obrazovani i među prvima pomažu operaterima razumjeti principe. Voditelji i šefovi odjela grupirani su pod hijerarhijsku razinu "voditelji." Oni su donositelji odluka u odjelu, često također obrazovani zajedno s tehnolozima, ili odlučuju tko će dobiti obuku. Voditelji koordiniraju zadatke s voditeljima drugih odjela. Na kraju, menadžeri, direktori, nadzornici i izvršni direktori grupirani su u kategoriju "menadžeri," što je najviša razina upravljanja u poduzeću. Oni donose strateške odluke i očekuju izvještaje o rezultatima implementacije lean alata i TPM-a. Obično su upoznati s lean filozofijom u obliku vizije i ciljeva vezanih uz lean alate i TPM.

Ovo grupiranje omogućuje da se bolje razumiju različite perspektive i izazovi s kojima se suočavaju različite hijerarhijske razine unutar poduzeća. Operateri, koji su na prvoj liniji rada, mogu pružiti ključne uvide u praktične prepreke i operativne izazove. Tehnolozi nude tehničke i inovativne perspektive, dok voditelji pružaju organizacijske uvide i koordiniraju aktivnosti između timova. Menadžeri, kao strateški lideri, fokusiraju se na dugoročne ciljeve i uspjeh implementacije lean alata i TPM-a. Ova sveobuhvatna analiza pomaže u prilagodbi strategija za poboljšanje implementacije i postizanje boljih rezultata u cijelom poduzeću.

Brojevi ispod x-osi (koji predstavljaju izjave) prikazuju zbrojeve svih ukupnih odgovora (svaki na ljestvici od jedan do pet) za odabranu grupu. Budući da je iz svake tvrtke primljen različit broj upitnika, vrijednosti su normalizirane kako bi se omogućila usporedba između različitih grupa. Što je broj veći, to je viša razina slaganja s pojedinom izjavom, što sugerira da se odabrana grupa snažno slaže s datom izjavom. Suprotno tome, što je broj niži, to je niža razina slaganja s izjavom, što sugerira da se odabrana grupa manje slaže s datom izjavom. Normalizacija podataka omogućava da se razlike u broju pristiglih upitnika iz različitih tvrtki ne odražavaju na konačne rezultate, čime se osigurava pravedna i točna usporedba. Najniži kumulativni odgovori pojedinačnih grupa naglašeni su kako bi se istaknule izjave s kojima se grupe najmanje slažu. Ovo može ukazivati na područja koja zahtijevaju dodatnu pažnju ili poboljšanja unutar implementacije lean i TPM metodologija. Rezultati ove analize prikazani su na Slici 5, gdje se jasno vidi razina slaganja različitih grupa s pojedinim izjavama. Vizualni prikaz omogućava jednostavnije prepoznavanje obrazaca i razilaženje u percepcijama između različitih grupa, što može pomoći u daljnjem istraživanju i prilagodbi strategija implementacije lean i TPM alata. Ovi podaci pružaju vrijedne uvide koji se mogu koristiti za poboljšanje pristupa implementaciji, educiranje osoblja i unapređenje ukupne učinkovitosti proizvodnih procesa.





*Slika 5. Rezultati uspoređeni po tvrtkama.*

Za tvrtku 1, to su bile tvrdnje Q19 (sigurnost posla nije ugrožena leanom), Q23 (lean alati su smatrani jednako važnima kao i druge aktivnosti), Q24 (lean aktivnosti se ne provode samo prije audita) i Q20 (ne postoji otpor prema promjenama). Zaposlenici u tvrtki 1 (malom poduzeću) izrazili su zabrinutost za sigurnost posla prilikom obavljanja lean zadataka. To može rezultirati slabom radnom učinkovitosti, prikrivanjem stvarnih problema, skrivanjem pravih rezultata i provođenjem lean zadataka samo prije audita, što su sami radnici prepoznali. Menadžment mora uvjeriti zaposlenike da njihov posao nije ugrožen lean procesima. Naprotiv, cilj lean aktivnosti je olakšati radno opterećenje. Činjenica da zaposlenici male tvrtke nisu prepoznali važnost lean alata ukazuje na neuspjeh programa obuke. Zaposlenici tvrtke 1 također su smatrali da postoji određena količina otpora prema promjenama, što je uobičajeno prilikom implementacije novih praksi, ali se može smanjiti korištenjem ispravnih metoda implementacije. Ovi nalazi naglašavaju potrebu za boljim komunikacijskim strategijama i učinkovitijim programima obuke kako bi se smanjila nesigurnost i otpor među zaposlenicima. Menadžment bi trebao aktivno raditi na informiranju i educiranju zaposlenika o prednostima lean alata i procesima, te osigurati da svi razumiju kako lean aktivnosti mogu pozitivno utjecati na njihovu svakodnevnu radnu praksu. Uvođenje kontinuirane podrške i povratnih informacija može također pomoći u prevladavanju otpora i osiguravanju uspješne implementacije lean praksi.

Tvrtka 2 je srednje poduzeće s otprilike 150 zaposlenih. Njihova primarna djelatnost je pružanje inženjerskih rješenja. Zaposlenici u tvrtki 2 imali su najnižu razinu slaganja s tvrdnjama Q25 (audit je dobro iskorištenje vremena), Q12 (provodi se na odgovarajućoj opremi) i Q16 (lean aktivnosti su dobro usklađene s drugim zadacima). Zaposlenici ovog srednje velikog poduzeća nisu prepoznali audite kao važan dio TPM-a i lean praksi općenito. Može se činiti da nakon što je sustav uspostavljen, nema potrebe za redovitim pregledima i provjerama. Međutim, auditiranje bilo kojeg sustava ključno je za osiguranje stabilnosti, kontinuiteta i kvalitete implementiranih praksi. Uobičajena posljedica nedostatka audita je da zaposlenici postaju samozadovoljni u obavljanju svojih zadataka, što neizbježno dovodi do značajnog pada kvalitete. Osim toga, zaposlenici tvrtke 2 smatrali su da se TPM ne provodi na odgovarajućoj opremi. To može ukazivati na nedostatak strateškog odabira opreme prikladne za implementaciju TPM-a. Obično se na početku aktivnosti razvija pilot projekt kako bi se demonstrirali principi TPM-a na prikladnom i kompatibilnom sustavu. Ovaj pristup omogućuje da se filozofija TPM-a lakše i razumljivije shvati koristeći prikladnu opremu kao primjer. Treća glavna zabrinutost koju su istaknuli zaposlenici srednje velikog poduzeća bila je ta da lean aktivnosti nisu usklađene s njihovim redovnim radnim opterećenjem. Ovaj problem može se pojaviti u srednjim i velikim poduzećima, osobito kada je uključeno više trenera i odjela. U takvim slučajevima postaje ključno uskladiti aktivnosti kako bi se osigurala koordinacija među svim radnicima uključenima u proces. Ovi nalazi ukazuju na potrebu za poboljšanjem komunikacijskih strategija i učinkovitijim planiranjem aktivnosti unutar tvrtke. Redoviti auditi trebali bi biti naglašeni kao ključni dio održavanja kvalitete i dosljednosti TPM i lean praksi. Također, strateški odabir odgovarajuće opreme za TPM implementaciju može pomoći u demonstriranju učinkovitosti tih praksi. Konačno, koordinacija između različitih odjela i trenera osigurava da lean aktivnosti budu integrirane s redovnim radnim zadacima zaposlenika, što može smanjiti stres i povećati produktivnost.

Zaposlenici u tvrtki 3 imali su najnižu razinu slaganja s tvrdnjama Q25 (audit je dobro iskorištenje vremena), Q12 (provodi se na odgovarajućoj opremi), Q24 (lean aktivnosti se ne provode samo prije audita) i Q19 (sigurnost posla nije ugrožena leanom). Kao i zaposlenici srednje velikog poduzeća, zaposlenici ovog velikog poduzeća izrazili su najveću zabrinutost oko lean audita i njihovih koristi. Ovo je još jedan primjer zašto je naglasak na praksama auditiranja tijekom obuke ključan. Edukatori moraju odvojiti vrijeme za objašnjenje uloge audita u održivosti implementiranih praksi. Zaposlenici moraju biti uključeni u proces audita kako bi svi uključeni u lean aktivnosti bili auditirani barem jednom i kako bi sami bili

auditori. Važno je tijekom obuke razjasniti da audit nije sredstvo za "hvatanje" nekoga tko ne provodi planirane aktivnosti, već alat za povećanje uspjeha uspostavljenih procesa. U vezi s pitanjem važnosti audita, zaposlenici ovog velikog poduzeća smatrali su da se lean i TPM aktivnosti provode samo prije audita. Ovo je razlog za zabrinutost. Lean aktivnosti ne bi trebale biti provedene samo radi prolaska audita. Ako je to slučaj, voditelji tih procesa moraju biti podsjećeni na pravu svrhu lean aktivnosti i, ako je potrebno, ponovno obučeni.

Zanimljivo je da, iako zaposlenici u tvrtki 3 nisu smatrali lean i TPM aktivnosti važnima, što je naznačeno tvrdnjom da se većina aktivnosti provodi samo prije audita, ipak su ih doživljavali kao prijetnju sigurnosti svog posla ako se u njih ne uključe. Ovo je neuspjeh implementacije i njegov učinak je suprotan od namjere. Ovi nalazi naglašavaju potrebu za poboljšanjem edukacijskih strategija koje objašnjavaju važnost audita u održavanju kvalitete i kontinuiteta lean i TPM praksi. Uključivanje zaposlenika u auditni proces može pomoći u demistifikaciji audita i smanjenju straha od istih. Voditelji procesa moraju osigurati da lean aktivnosti budu kontinuirane i integrirane u svakodnevne operacije, a ne samo ad-hoc prije audita. Osim toga, jasno komuniciranje ciljeva i koristi lean i TPM praksi može pomoći u smanjenju percepcije prijetnje među zaposlenicima, što je ključno za uspješnu implementaciju.

Tvrtka 4 je također veliko poduzeće s 800 zaposlenika. Oni su imali najmanje slaganja s izjavama Q23 (lean alati su važni kao i druge aktivnosti), Q17 (ima dovoljno vremena), Q19 (sigurnost posla nije ugrožena leanom) i Q20 (ne postoji otpor prema promjenama). Ljudi u ovoj velikoj tvrtki nisu smatrali lean alate jednako važnima za tvrtku kao druge svakodnevne zadatke i aktivnosti. Također, smatrali su da nije osigurano dovoljno vremena za ove aktivnosti. Često se događa da se lean aktivnosti dodaju na vrh dnevnih zadataka radnika, što može dovesti do preopterećenja i stresa među zaposlenicima. U procesu planiranja implementacije, važno je uključiti vrijeme za dodatne aktivnosti kako bi se osiguralo da zaposlenici imaju dovoljno vremena za njihovu provedbu bez osjećaja pritiska. Lideri u tvrtki moraju uzeti u obzir količinu vremena potrebnog za ove aktivnosti i prilagoditi radno opterećenje u skladu s tim. Pravilno upravljanje vremenom i resursima ključni su za uspješnu implementaciju lean alata. Sigurnost posla također je bila problem u ovoj tvrtki, a ljudi su smatrali da postoji veliki otpor prema promjenama. To je često slučaj u tvrtkama s višom prosječnom dobi zaposlenika i radnicima koji su u tvrtki već nekoliko desetljeća. Neki od njih obavljaju svoje zadatke godinama na isti način i navikli su na ustaljene rutine. Prirodno je osjećati otpor prema promjenama, posebno kada se radi o novim metodologijama i alatima

koji zahtijevaju prilagodbu i učenje novih vještina. Odgovornost je edukatora i menadžmenta da temeljito objasne prednosti lean i TPM praksi, naglašavajući kako ove promjene mogu dovesti do poboljšanja u učinkovitosti, smanjenju otpada i povećanju sigurnosti na radnom mjestu. Transparentna komunikacija i uključivanje zaposlenika u proces promjena mogu pomoći u smanjenju otpora i povećanju prihvaćanja novih metoda. Kroz edukaciju i obuku, zaposlenici mogu steći potrebne vještine i znanja kako bi se uspješno prilagodili novim zahtjevima, što će u konačnici dovesti do boljih rezultata za tvrtku.

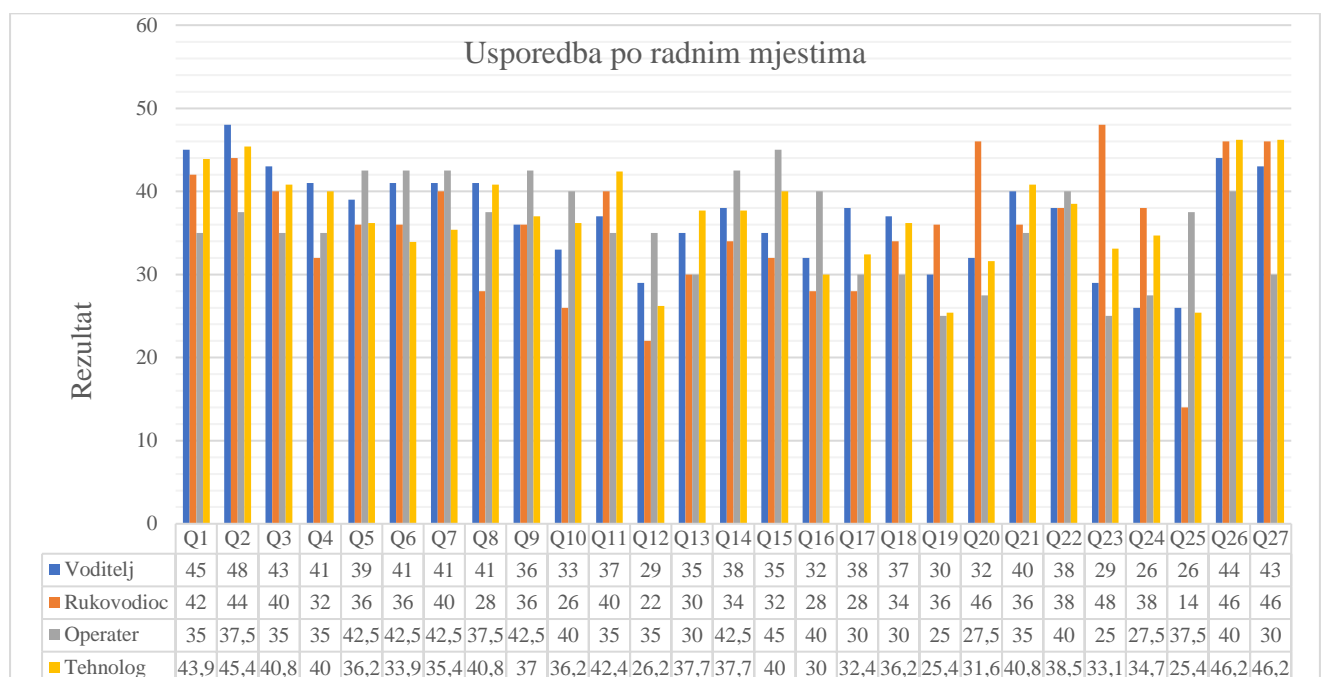
Kada su rezultati prikupljeni za sve tvrtke, izjave s kojima su se sudionici najmanje slagali bile su Q19 (sigurnost posla nije ugrožena leanom), Q23 (lean alati su važni kao i druge aktivnosti) i Q25 (audit je dobro iskorišteno vrijeme). Pregled izjava s najnižim razinama slaganja među tvrtkama prikazan je u Tablici 6.

*Tablica 6. Pregled izjava s najnižim razinama slaganja*

Tvrtka	Najniže slaganje	Drugo najniže	Treće najniže
Tvrtka 1	Q19, Q23	Q24	Q20
Tvrtka 2	Q25	Q12	Q16
Tvrtka 3	Q25	Q12, Q24	Q19
Tvrtka 4	Q23	Q17	Q19, Q20

Drugi pristup ispitivanju rezultata je filtriranje podataka prema radnom mjestu unutar tvrtke. Na taj način mogu se ispitati različita mišljenja i stajališta s obzirom na hijerarhijsku razinu. Ovaj pristup omogućuje dublje razumijevanje percepcije lean alata i TPM-a među različitim radnim skupinama unutar organizacije, što može pomoći u identifikaciji specifičnih izazova i potreba na svakoj razini. Stoga su podaci evaluirani prema operaterima, tehnolozima, voditeljima timova i menadžerima. Operateri su često direktno uključeni u proizvodni proces i imaju jedinstven uvid u praktične aspekte implementacije lean alata. Tehnolozi se fokusiraju na tehničke aspekte i mogu pružiti stručnu perspektivu o učinkovitosti i tehničkoj izvedivosti alata. Voditelji timova igraju ključnu ulogu u koordinaciji i nadzoru implementacije, dok menadžeri pružaju stratešku podršku i osiguravaju resurse potrebne za uspješnu implementaciju. Kao i kod usporedbe po tvrtkama, ovi podaci su također normalizirani kako bi se usporedili rezultati među grupama. Normalizacija podataka omogućuje ravnopravnu usporedbu između grupa s različitim brojem članova, osiguravajući da rezultati budu reprezentativni za svaku grupu. Rezultati su vizualno prikazani na slici 6, pružajući jasan

pregled razina slaganja s izjavama među različitim hijerarhijskim razinama unutar tvrtki. Ovaj vizualni prikaz pomaže identificirati razlike u percepciji i prihvaćanju lean alata i TPM-a među različitim skupinama zaposlenika. Na primjer, operateri mogu imati različita mišljenja u usporedbi s menadžerima zbog njihove neposredne uključenosti u proizvodni proces. Voditelji timova i tehnolozi također mogu imati jedinstvene perspektive koje su oblikovane njihovim specifičnim odgovornostima i svakodnevним zadacima. Ovakva detaljna analiza omogućuje tvrtkama da prilagode svoje strategije implementacije lean alata i TPM-a kako bi bolje adresirale specifične potrebe i izazove na svakoj hijerarhijskoj razini, čime se povećava ukupna učinkovitost i uspjeh implementacije.



*Slika 6. Rezultati ankete grupirani prema poziciji unutar tvrtke.*

Operateri su iskazali manje slaganje s izjavama Q19 (sigurnost posla nije ugrožena leanom), Q23 (lean alati su jednako bitni kao i druge aktivnosti) i Q24 (lean aktivnosti se ne obavljaju samo prije audita). Prirodno je da su operateri najviše zabrinuti za sigurnost posla jer to nije pod njihovom kontrolom. Njihova izvedba ovisi o ocjeni njihovih voditelja i menadžera, što može dodatno povećati njihovu nesigurnost. Međutim, kada je riječ o lean aktivnostima i zadacima, operateri često ne prepoznaju njihovu važnost i obično ih obavljaju samo prije provjera i revizija. Ovo sugerira da lean aktivnosti nisu potpuno integrirane u svakodnevne rutine operatera, već se doživljavaju kao dodatni teret koji treba riješiti prije nadzora. To može ukazivati na nedostatak razumijevanja ili podrške za lean principe na operativnoj razini. Odgovornost je tehnologa i voditelja da tijekom procesa obuke i implementacije jasno

komuniciraju važnost lean alata i aktivnosti. Oni trebaju educirati operatere o dugoročnim prednostima tih aktivnosti, kao što su poboljšana učinkovitost, smanjenje otpada i povećana sigurnost na radnom mjestu. Uvođenjem kontinuirane obuke i stvaranjem okruženja koje potiče aktivno sudjelovanje u lean procesima, tehnolozi i voditelji mogu pomoći operaterima da bolje razumiju i prihvate lean filozofiju. Kao dio ovog pristupa, važno je integrirati lean aktivnosti u svakodnevne zadatke operatera, čime se smanjuje percepcija da su te aktivnosti samo dodatno opterećenje prije revizija. Voditelji timova trebaju osigurati da operateri imaju dovoljno vremena i resursa za obavljanje lean aktivnosti te da su te aktivnosti prepoznate i vrednovane kao sastavni dio njihovog posla. Na taj način, operateri će biti motiviraniji da redovito provode lean prakse, što će dugoročno dovesti do održivijih poboljšanja u proizvodnom procesu.

Tehnolozi su pokazali manje slaganje s izjavama Q19 (sigurnost posla nije ugrožena leanom), Q25 (audit je dobro iskorišteno vrijeme), Q12 (lean alati se primjenjuju na odgovarajućoj opremi) i Q16 (lean aktivnosti su dobro usklađene s drugim zadacima). Rezultati pokazuju da tehnozi dijele zabrinutost za sigurnost posla i smatraju da revizije nisu korisno iskorišteno vrijeme. Ova kontradikcija je značajna jer su tehnozi obično najviše upoznati s lean alatima i filozofijama. Moguće je da je njihovo mišljenje povezano s trećom najniže ocijenjenom izjavom, što sugerira da se implementacija tih praksi ne provodi na odgovarajućoj opremi. Ova situacija može nastati ako tehnozi nisu odgovorni za odabir opreme na kojoj se pilot projekt izvodi. Iako se čini očiglednim, odabir opreme ili dijela proizvodne linije za pilot projekt uvijek mora obaviti osoblje koje je najviše educirano o alatu koji će biti uveden. Postoje primjeri gdje to nije bio slučaj, što može dovesti do problema u implementaciji. Tehnolozi koji su uključeni u implementaciju lean alata trebaju biti uključeni u sve faze procesa, od odabira odgovarajuće opreme do praćenja i evaluacije rezultata. Na taj način, osigurava se da se alati koriste na optimalan način i na odgovarajućoj opremi, što povećava šanse za uspjeh projekta. Osim toga, važno je da tehnozi imaju priliku izražavati svoje mišljenje i zabrinutosti tijekom implementacije. Njihove povratne informacije mogu pomoći u prilagodbi i poboljšanju procesa, osiguravajući da lean aktivnosti budu dobro usklađene s drugim zadacima i ciljevima organizacije. Također, edukacija i komunikacija ključne su za smanjenje zabrinutosti vezanih uz sigurnost posla i vrijednost revizija, jer jasno razumijevanje ciljeva i koristi lean alata može povećati njihovu prihvaćenost i učinkovitost.

Voditelji su pokazali manje slaganje s izjavama Q24 (lean aktivnosti se ne obavljaju samo prije audita), Q25 (audit je dobro iskorišteno vrijeme), Q12 (lean alati se primjenjuju na

odgovarajućoj opremi) i Q23 (lean alati su jednako bitni kao i druge aktivnosti).

Zabrinjavajuće je što i voditelji prepoznaju da se lean aktivnosti intenzivnije provode uglavnom prije audita. Budući da su interni auditi prijateljske prirode, što znači da im je cilj održati dobre prakse, uvijek se najavljuju. Stoga bi bilo korisno provoditi nenajavljene interne audite. To bi pružilo bolju sliku o stvarnom stanju izvedbe lean alata. Druga zabrinutost voditelja je da sam audit nije dobro iskorišteno vrijeme. Često se lean alati nameću voditeljima od strane menadžmenta, koji očekuje rezultate. Budući da voditelji nisu uvijek oni koji obavljaju zadatke, lako im je podcijeniti ove aktivnosti, što je prepoznato u anketi. Voditelji igraju ključnu ulogu u provedbi lean aktivnosti i njihov stav prema ovim alatima može značajno utjecati na njihov uspjeh. Ako voditelji ne vide vrijednost u auditima ili lean alatima, to može dovesti do nedostatka podrške i angažmana, što može ometati uspješnu implementaciju. Kako bi se riješili ovi problemi, važno je da se voditeljima pruži adekvatna obuka i resursi kako bi bolje razumjeli ciljeve i koristi lean alata. Uključivanje voditelja u proces planiranja i implementacije može pomoći u povećanju njihove posvećenosti i prepoznavanju važnosti ovih aktivnosti. Također, omogućavanje voditeljima da daju povratne informacije i prijedloge za poboljšanje može povećati njihovu angažiranost i posvećenost lean filozofiji. Nenajavljeni interni auditi mogu pružiti realniju sliku stanja implementacije lean alata i pomoći u identificiranju područja koja zahtijevaju poboljšanja. Osiguravanje da voditelji razumiju i cijene važnost lean alata i audita može doprinijeti njihovoj učinkovitijoj provedbi i dugoročnom uspjehu.

Menadžeri su pokazali niže razine slaganja s izjavama Q25 (audit je dobro iskorišteno vrijeme), Q12 (lean alati se primjenjuju na odgovarajućoj opremi) i Q10 (implementacija lean alata je provedena u razumnom vremenskom okviru). Za rukovoditelje su obično najvažniji rezultati njihove investicije, stopa ušteda i povrat investicije. Visoki menadžment često razumije filozofiju lean alata samo površno, dovoljno da donese odluku o investiranju. Menadžment je također smatrao da vrijeme provedeno na auditima nije korisno i da se auditi ne provode na odgovarajućoj opremi. Zanimljivo je primijetiti da je njihova treća najniža razina slaganja bila s izjavom koja se odnosi na implementaciju lean i TPM alata unutar razumnog vremenskog okvira. Često, implementacija lean alata može trajati do dvije godine (ovisno o veličini poduzeća, broju uključenog osoblja, opsegu implementacije i broju lean alata koji se implementiraju). Dakle, menadžment je u ovom slučaju pokazao zabrinutost za vremenski raspon implementacije. Stoga je, prilikom planiranja uvođenja lean alata, ključno pripremiti i predstaviti vremenski okvir, vremensku traku ili Ganttov grafik on investitorima.

Uspostavljanje jasnih prekretnica i ciljeva vezanih uz vrijeme je bitno za održavanje transparentnog prikaza aktivnosti. Ovaj pristup pomaže u sprječavanju problema povezanih s rokovima izvršenja za specifične aktivnosti ili cijeli projekt. Transparentna komunikacija o vremenskom okviru i ciljevima također može pomoći u smanjenju zabrinutosti menadžmenta i osigurati njihovu podršku tijekom cijelog procesa implementacije. Također, važno je uključiti menadžment u redovite revizije napretka kako bi se osiguralo da su svjesni postignuća i prepreka te da mogu pružiti potrebnu podršku za prevladavanje tih prepreka. Na taj način, menadžment će biti bolje informiran i angažiran, što može doprinijeti uspješnoj i pravovremenoj implementaciji lean alata. Tablica 7 prikazuje pregled izjava s najnižom razinom slaganja prema radnom mjestu unutar tvrtke.

*Tablica 7. Pregled izjava s najnižom razinom slaganja.*

Radno mjesto	Lowest Agreement	Second Lowest	Third Lowest
Operater	Q19, Q23	Q20, Q24	Q13, Q17, Q18, Q27
Tehnolog	Q19, Q25	Q12	Q16
Voditelj	Q24, Q25	Q12, Q23	Q19
Rukovodioc	Q25	Q12	Q10

#### 4.4. Zaključak rezultata ankete

Postoji mnogo faktora koji mogu negativno utjecati na uvođenje i održivost TPM-a i drugih lean alata. Međutim, ovdje su naglašeni samo neki od najkritičnijih temeljenih na danim odgovorima. Izjava s najmanjim stupnjem slaganja odnosila se na audite kao dobro iskorišteno vrijeme. Interni audit definira se kao aktivnost osmišljena da dodaje vrijednost i poboljšava poslovanje organizacije [69]. Druga definicija lean audita je da je to pristup upravljanju procesom audita i organizacijom (onom koja pruža auditne usluge) koji podržava koncept kontinuiranog poboljšanja, dugoročnog pristupa radu usmjerenog na sustavno postizanje promjena i poboljšanje kvalitete audita, uključujući učinkovitost, djelotvornost i transparentnost [70].

Iako je audit ključni alat za održavanje kvalitete lean alata i osiguranje održivosti implementiranih filozofija, to nije prepoznato od zaposlenika na svim razinama. Auditi, koji osiguravaju stalan nivo kvalitete u lean filozofiji, jednako su važni kao i svi prethodni koraci u njenoj implementaciji. Važno je tijekom faze obuke pojasniti zašto se audit provodi i



osigurati da sve razine hijerarhije sudjeluju u njegovoj pripremi i izvedbi, tako da svi uključeni u lean aktivnosti barem jednom budu auditori ili budu auditirani. S obzirom na to da su mnogi odgovori u ovom istraživanju pokazali da se lean i TPM aktivnosti provode samo prije audita, može biti korisno provoditi i nenajavljene audite. Za uspješan interni audit važno je imati podržavajuće kontrolno okruženje, jer su autori [71] pokazali statistički značajnu pozitivnu korelaciju između percipirane korisnosti internog audita i višeg nivoa podržavajućeg kontrolnog okruženja. U takvim uvjetima, menadžeri i odbor za audit vide interne audite kao učinkovitije, a percipirana korisnost očekivana od internog audita je viša. Za uspješno provođenje audita potrebno je slijediti utvrđene korake. Dobrowolski, Sulkowski i Adamisin [70] razvili su skup uputa: odrediti vrijednost audita, identificirati tok vrijednosti, identificirati protok i princip povlačenja (pull princip).

Još jedan aspekt oko kojeg se zaposlenici nisu složili jest da se TPM provodi na odgovarajućoj opremi. Na svim razinama postojala je nesigurnost u vezi s time je li optimizacija provedena na pravom skupu strojeva. Važno je odabrati proizvodnu opremu i infrastrukturu u skladu sa zahtjevima lean proizvodnog sustava. Prilikom odabira prvih komada opreme za demonstraciju lean principa, važno je analizirati je li oprema jednostavna za rukovanje i održavanje. Također, treba uzeti u obzir faktore kao što su otkrivanje grešaka, pouzdano održavanje, sigurnost operatera i podrška [72]. Jedan od načina za početak je razvoj pilot projekta korištenjem komada opreme ili stroja koji je najkompatibilniji s TPM optimizacijom. Na taj način zaposlenici mogu jasno vidjeti prednosti TPM-a i lean aktivnosti, posebno ako se tek uvode u ove filozofije, što kasnije mogu primijeniti na složenije strojeve. Činjenica da studija pokazuje da postoje značajne zabrinutosti oko toga je li odabrana prava oprema za implementaciju TPM-a može ukazivati na nedostatak strateškog odabira odgovarajuće opreme. Ovo se može dogoditi ako tehnolozi nisu odgovorni za odabir opreme na kojoj se izvodi pilot projekt. Iako se čini očiglednim, odabir opreme ili dijela proizvodne linije za pilot projekt uvijek mora obaviti osoblje koje je najviše educirano o alatu koji se uvodi, a postoje primjeri gdje to nije uvijek slučaj. Uključivanje tehničkih stručnjaka u proces odabira osigurava da se odabere najprikladnija oprema koja će omogućiti učinkovitu implementaciju TPM-a i lean principa. Također, važno je osigurati kontinuiranu podršku i obuku za zaposlenike kako bi se osiguralo da razumiju i mogu maksimalno iskoristiti prednosti optimizacije na odgovarajućoj opremi.

Sigurnost posla prepoznata je kao sljedeći ključni faktor koji može negativno utjecati na uvođenje i održivost lean aktivnosti. Sudionici su uglavnom izrazili zabrinutost da bi im

poslovi mogli biti ugroženi ako ne sudjeluju u lean aktivnostima. To može dovesti do rutinskog rada niske kvalitete ili do stanja u kojem radnici obavljaju samo nužni minimum kako bi preživjeli. Lean također može utjecati na strahove vezane uz transformaciju radnog mjesta i posljedice na zaposlenost [73]. Maslowova hijerarhija potreba grupira osnovne ljudske potrebe u hijerarhiju. One uključuju fiziološke potrebe (tj. hrana i odjeća), sigurnosne potrebe (tj. sigurnost posla), potrebe za ljubavlju i pripadanjem (tj. prijateljstvo), poštovanje i samorealizaciju [74]. Nije čudno da je jedna od najvećih briga zaposlenika bila sigurnost posla, budući da je, prema Maslowu, to druga ljudska potreba u hijerarhiji. Stoga je važno da lean alati ne ugrožavaju zaposlenike na taj način. Osobe zadužene za edukaciju moraju pronaći način kako motivirati zaposlenike da koriste lean alate koji se temelje na njihovoj osobnoj koristi, a ne na strahu. Osobe zadužene za edukaciju mogu proučavati McClellandov model potreba i teoriju motivacije, koji pokušava objasniti kako potrebe za postignućem, moći (autoritetom) i pripadanjem utječu na djelovanje ljudi u kontekstu upravljanja [75]. Motivatori su unutarnji faktori koji povećavaju zadovoljstvo zaposlenika na poslu, dok su higijenski faktori vanjski faktori koji sprječavaju nezadovoljstvo zaposlenika [76]. Ključ za uspješno uvođenje lean alata je osigurati da zaposlenici vide osobne i profesionalne koristi od njihove primjene. Kroz jasnu komunikaciju, obuku i uključivanje zaposlenika u proces donošenja odluka, moguće je smanjiti strahove vezane uz sigurnost posla i potaknuti pozitivnu promjenu. Ovo će ne samo povećati kvalitetu rada, već i dugoročno doprinijeti održivosti lean aktivnosti u organizaciji.

Još jedan aspekt koji treba istaknuti je osjećaj zaposlenika da lean aktivnosti nisu jednako važne kao i drugi radni zadaci. To je često slučaj u tvrtkama s višom prosječnom dobi zaposlenika i radnicima koji su u tvrtki već nekoliko desetljeća. Neki od njih obavljaju svoje zadatke godinama na isti način. Prirodno je osjećati otpor prema promjenama. Lean aktivnosti ne bi se trebale smatrati odvojenim poslovima, već integriranim sustavima postojećih zadataka s ciljem optimizacije protoka materijala i informacija. Međutim, vođe trebaju uzeti u obzir količinu vremena potrebnu za ove aktivnosti i prilagoditi radno opterećenje u skladu s tim. Važno je naglasiti da lean aktivnosti ne bi trebale biti dodatno opterećenje za zaposlenike, već dio njihovog svakodnevnog rada koji doprinosi ukupnoj učinkovitosti i produktivnosti. Osobe zadužene za edukaciju i menadžment trebaju jasno komunicirati prednosti lean alata i pokazati kako oni mogu olakšati radne zadatke i poboljšati radne procese. Kroz odgovarajuću obuku i podršku, zaposlenici mogu vidjeti vrijednost lean aktivnosti i biti motivirani za njihovu provedbu. Uključivanjem zaposlenika u proces

planiranja i donošenja odluka, moguće je smanjiti otpor prema promjenama i osigurati uspješnu integraciju lean alata u svakodnevne radne zadatke.

S druge strane, najpozitivniji odgovori su dani za izjave da će poduzeće imati koristi od korištenja lean alata i da je vrijeme provedeno na lean aktivnostima u proizvodnji dobra investicija. To pokazuje da, iako zaposlenici mogu imati neke sumnje, prepoznaju da će to na kraju biti korisno za poduzeće na duge staze. Anketa je također pokazala da je jedan od najprepoznatljivijih lean alata 5S. To može biti dobar početak za uvođenje lean filozofije općenito jer je to jednostavna i isplativa metoda za organizaciju, optimizaciju i standardizaciju radnog mjesta. Pozitivni odgovori na ove izjave pokazuju da zaposlenici razumiju dugoročne prednosti lean alata i TPM-a, čak i ako imaju određene rezervacije ili nesigurnosti u vezi s njihovom implementacijom. Prepoznavanje koristi lean alata od strane zaposlenika može pomoći u stvaranju pozitivne kulture unutar organizacije koja podržava kontinuirano poboljšanje i inovacije. Implementacija 5S metodologije, koja uključuje sortiranje, organiziranje, čišćenje, standardizaciju i održavanje discipline, može pružiti vidljive i opipljive koristi u kratkom vremenskom razdoblju. Ovo može pomoći u izgradnji povjerenja među zaposlenicima i stvoriti temelj za uvođenje složenijih lean alata i praksi. Kroz edukaciju i demonstraciju prednosti 5S metodologije, zaposlenici mogu brzo vidjeti kako male promjene mogu dovesti do značajnih poboljšanja u radnom okruženju, što može povećati njihovu motivaciju i angažiranost za daljnje lean aktivnosti. Na taj način, 5S može poslužiti kao katalizator za širu implementaciju lean filozofije i kontinuirano poboljšanje unutar poduzeća.

Kada su podaci analizirani prema veličini tvrtke, bilo je očito da su radnici u malom poduzeću bili zabrinuti za sigurnost posla dok su obavljali lean zadatke. Ova zabrinutost može dovesti do suboptimalne radne izvedbe, prikrivanja stvarnih problema, skrivanje pravih rezultata i provođenja lean zadataka neposredno prije audita, kao što su sami zaposlenici priznali.

Zaposlenici srednjeg poduzeća nisu prepoznali audite kao važan dio TPM-a i lean praksi općenito. Može se činiti da nakon što se sustav uspostavi, nema potrebe za redovitim pregledima i provjerama. Međutim, auditiranje bilo kojeg sustava ključno je za osiguranje stabilnosti, kontinuiteta i kvalitete implementiranih praksi. Uobičajena posljedica nedostatka audita je da zaposlenici postaju samozadovoljni u obavljanju svojih zadataka, što neizbježno dovodi do značajnog pada kvalitete. Dodatno, zaposlenici u Tvrtki 2 vjerovali su da TPM nije

proveden na odgovarajućoj opremi. To može ukazivati na nedostatak strateškog odabira opreme prikladne za implementaciju TPM-a. Slično zaposlenicima u srednjim poduzećima, zaposlenici u velikim poduzećima također su izrazili zabrinutost vezanu uz lean audite i njihove koristi. Ovo je još jedan primjer zašto je naglasak na praksama audita tijekom obuke od vitalnog značaja. Osobe koje educiraju moraju uzeti vremena da objasne ulogu audita u održivosti implementiranih praksi. Zaposlenici u drugom velikom poduzeću nisu percipirali lean alate kao ključne za tvrtku u usporedbi s drugim rutinskim zadacima i aktivnostima. Osim toga, smatrali su da nije osigurano dovoljno vremena za ove aktivnosti. Česta je pojava da se lean aktivnosti doživljavaju kao dodatno opterećenje uz dnevne odgovornosti radnika. Tijekom faze planiranja implementacije, potrebno je uključiti dovoljno vremena za ove dodatne aktivnosti. Za uspješnu implementaciju lean alata i TPM-a, ključno je osigurati adekvatnu obuku i resurse, kao i jasno komunicirati prednosti ovih praksi. Potrebno je integrirati lean aktivnosti u svakodnevne zadatke zaposlenika i osigurati da svi sudionici razumiju važnost kontinuiranih pregleda i auditiranja kako bi se održala visoka razina kvalitete i učinkovitosti.

Podaci su također promatrani na razini pozicija unutar tvrtke. Operateri često nisu prepoznali značaj lean i TPM zadataka te su ih obično izvršavali neposredno prije provjera i audita. Odgovornost je tehnologa i voditelja da to spriječe naglašavanjem važnosti ovih zadataka tijekom edukacije i procesa implementacije. Tehnolozi su izrazili zabrinutost za sigurnost posla i smatrali su da auditu nisu korisno iskorišteno vrijeme. Ovo je značajno jer tehnolozi obično posjeduju najviše znanja o željenim lean alatima i filozofijama. Moguće je da je njihov stav povezan s trećim najmanje prihvaćenim aspektom, što ukazuje na to da se implementacija ovih praksi ne provodi na odgovarajućoj opremi. Ova situacija može nastati ako tehnolozi nisu uključeni u odabir opreme za izvođenje pilot projekta. Voditelji su prepoznali da se lean aktivnosti provode aktivnije, uglavnom prije audita. Često menadžment nameće lean aktivnosti voditeljima, očekujući rezultate. Budući da voditelji često nisu ti koji obavljaju zadatke, lako im je podcijeniti ove aktivnosti, što je prepoznato u anketi. Menadžment nije smatrao da je vrijeme provedeno na auditima osobito korisno, niti da su lean i TPM alati implementirani unutar razumnog vremenskog okvira. Implementacija lean alata često može trajati do dvije godine, ovisno o veličini poduzeća, broju uključenog osoblja, opsegu implementacije i broju lean alata koji se implementiraju. Stoga je menadžment u ovom slučaju izrazio zabrinutost za vremenski raspon implementacije. Za uspostavljanje jasnih prekretnica i ciljeva vezanih uz vrijeme ključno je održavati transparentan prikaz

aktivnosti. Ovo pomaže u praćenju napretka i osigurava da su svi sudionici svjesni postignuća i prepreka tijekom implementacije. Na taj način, menadžment može bolje razumjeti procese i pružiti potrebnu podršku za uspjeh implementacije lean alata i TPM-a.

Svaki faktor identificiran ovim istraživanjem treba pažljivo razmotriti prije implementacije TPM alata, a odgovarajuće mjere moraju se poduzeti kako bi se spriječili potencijalni nedostaci u uvođenju ili održivosti implementiranih praksi.

Nalazi u ovom poglavlju pomogli su u oblikovanju TIPAS-a, novog univerzalnog modela za implementaciju TPM-a u proizvodnim poduzećima. Ovi vrijedni uvidi u moguće prepreke koje se mogu pojaviti tijekom implementacije omogućili su bolje razumijevanje i planiranje kako bi se izbjegle poteškoće tijekom procesa. Na taj način, moguće je smanjiti vrijeme potrebno za uspješnu implementaciju TPM-a, osiguravajući da se sve ključne faze provode učinkovito i bez nepotrebnih zastoja. Osim toga, identificirani faktori pružaju smjernice za prilagodbu i poboljšanje pristupa uvođenju TPM-a, čime se povećava šansa za dugoročnu održivost i učinkovitost implementiranih praksi. Također, omogućuju bolje planiranje resursa, obuku zaposlenika i postavljanje jasnih ciljeva, što sve doprinosi uspješnijoj implementaciji. Korištenjem TIPAS modela, proizvodna poduzeća mogu lakše prepoznati i prevladati izazove, čime se povećava ukupna produktivnost i konkurentnost na tržištu.

## 5. TIPAS - NOVI, UNIVERZALNI MODEL ZA IMPLEMENTACIJU TPM-a

Kao što je spomenuto, ključni pokazatelj uspješnosti TPM-a je OEE (ukupna učinkovitost opreme). Kada se izračuna OEE, može nam pokazati koliko je naša proizvodna oprema pouzdana i učinkovita. Izračun OEE predstavlja početnu informaciju na temelju koje se poduzimaju akcije za povećanje njegove vrijednosti. Strateškim i pravilnim uvođenjem TPM-a, uz educirano osoblje, može se povećati izlaz proizvoda iz proizvodnje, pozitivno utjecati na zadovoljstvo zaposlenika te značajno smanjiti troškove i gubitke. Lean alati trebaju se implementirati strateški, profesionalno i s pravim pristupom prema radnicima kako bi se postigle najveće koristi od njihove primjene, posebno ako tvrtka još nije uvela slične filozofije.

Za uspješnu i korisnu primjenu TPM-a (Total Productive Maintenance) u proizvodnom pogonu, ključno je uvesti ga s ekspertizom i na strukturiran način. Ako se TPM implementira nepravilno, može imati negativan utjecaj na održavanje, motivaciju radnika te povećati radno opterećenje bez značajnih poboljšanja u postupcima održavanja. Kako bi se TPM pravilno uveo u tvrtku, ne samo da se moraju poštivati koraci za njegovu implementaciju, već se moraju uzeti u obzir i mentalni aspekti vezani uz radnike koji su uključeni u cijeli proces [17].

Uspješnom implementacijom TPM-a, tri glavna pokazatelja izvedbe opreme - dostupnost, pouzdanost i učinkovitost - će se povećati. Dostupnost predstavlja razdoblje tijekom kojeg se oprema može koristiti za proizvodnju. Pouzdanost opisuje koliko često oprema nije bila u stanju obavljati namijenjeni rad. Učinkovitost, najvažniji pokazatelj izvedbe opreme, je omjer stvarnog izlaza stroja prema njegovom nominalnom izlazu tijekom vremena kada je operativan [57].

Slavina i Štefanić [77] u svojoj studiji o suočavanju s izazovima i poteškoćama implementacije lean i TPM u proizvodnim poduzećima obradili su glavne aspekte koji mogu negativno utjecati na implementaciju spomenutih filozofija. Nakon analize i izdvajanja ključnih aspekata zaključili su da još uvijek ne postoji univerzalni model ili metodologija dostupna za proizvodna poduzeća koja bi služila kao vodič za implementaciju TPM-a.

U ovom poglavlju bit će predstavljen univerzalni TIPAS model za stratešku i uspješnu implementaciju TPM-a u proizvodnim poduzećima svih veličina. TIPAS model obuhvaća inicijaciju projekta, faze edukacije, odabir opreme i zadatke potrebne za osiguranje pravilne

implementacije. Također pruža smjernice i prakse za održavanje TPM-a nakon završetka faze implementacije. Model je razvijen na temelju pretrage opsežne literature, istraživanju postojećih modela i njihovih nedostataka, konzultacija s industrijskim stručnjacima te vlastitim iskustvom autora. Istraživanje opisano u prethodnom poglavlju pružilo je ključne informacije o aspektima na koje treba obratiti pažnju tijekom implementacije te izazovima koji se mogu pojaviti pri uspostavljanju TPM metodologije. Ovaj model osmišljen je kako bi osigurao strateški, isplativ i održiv pristup implementaciji TPM-a u proizvodnim poduzećima. Predloženi model može se koristiti za svako proizvodno poduzeće, bez obzira na njegove kapacitete i svrhu, uz smjernice stručnjaka za upravljanje održavanjem.

Model je jednostavan za praćenje i sastoji se od pet glavnih faza koje su grafički prikazane na slici 7:

1. **Trening tima i odabir opreme:** Upoznaje osoblje s metodologijom TPM-a, formira timove i odabire opremu za TPM aktivnosti.
2. **Inicijalna inspekcija:** Fokusira se na procjenu trenutnog stanja opreme, ispravljanje kvarova i pokretanje mjerenja ukupne efektivnosti opreme (OEE).
3. **Planirano održavanje:** Faza uključuje razvoj detaljnih planova za preventivno i korektivno održavanje, dokumentiranje postojećih praksi održavanja i implementaciju planova.
4. **Autonomno održavanje:** Fokusira se na obuku operatera za osnovno održavanje opreme, razvijanje kontrolnih popisa za autonomno održavanje i praćenje zastoja opreme.
5. **Stanje održivosti:** Posljednja faza uključuje kontinuirano praćenje performansi, analizu podataka, redovite audite, trajnu obuku i stalno poboljšanje kako bi se osigurala dugoročna održivost TPM-a.



*Slika 7. Grafički prikaz koraka TIPAS implementacijskog modela*

#### 5.1.1. Trening tima i odabir opreme

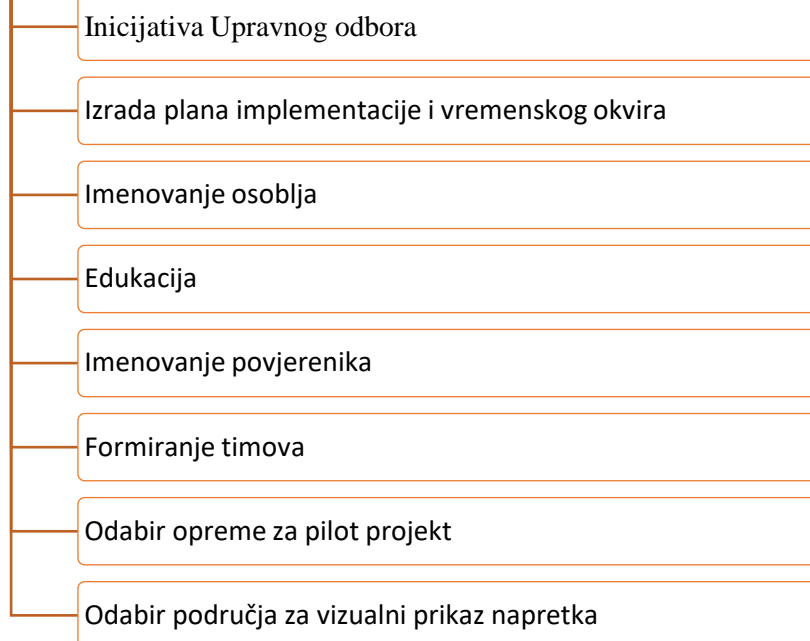
Prvi korak odnosi se na pripremu. Prije pokretanja implementacije TPM-a, osoblje zaduženo za vođenje procesa treba proći obuku, bilo interno ili eksterno, kako bi se osiguralo da posjeduju potrebna znanja i vještine, a također mora biti imenovan i vođa. Inicijacija implementacije TPM praksi mora započeti s Upravnim odborom, koji tijekom cijelog procesa implementacije mora pružati kontinuiranu podršku i osigurati potrebne resurse. Mora postojati jasan plan implementacije dostupan svim zaposlenicima, koji opisuje kako će se provoditi proces edukacije i implementacije, uključujući vremenske okvire i druge relevantne detalje. Mora postojati pisana i odobrena odluka Upravnog odbora o odobrenju TPM projekta koja mora biti vidljiva i dostupna svim zaposlenicima. Ako tvrtka ima više odjela, a implementacija TPM-a će se provoditi istovremeno u različitim odjelima, treba imenovati povjerenike za svaki odjel koji će nadzirati proces. Imenovanje povjerenika mora biti dokumentirano i transparentno. Povjerenik za TPM također treba proći TPM edukaciju prije implementacije. Povjerenik igra ključnu ulogu kao desna ruka vođe, osiguravajući da sve u odjelu napreduje prema planu. Razdoblje za implementaciju mora biti pažljivo odabrano jer proces zahtijeva vrijeme. Uobičajena greška je postavljanje prekratkog roka, što može dovesti do žurbe kroz neke zadatke i kompromitirati kvalitetu. Pravilna i potpuna implementacija TPM-a na svu opremu u proizvodnom poduzeću, ovisno o veličini, može potrajati nekoliko



godina. Sljedeći korak je odabir tima (ili timova za različite odjele). Tim treba uključivati najmanje jednu educiranu osobu, radnika za održavanje, operatera i tehnologa. Dobar dodatak timu bio bi i radnik za kontrolu kvalitete. U nekim slučajevima, jedna osoba može ispuniti i educiranu i funkcionalnu ulogu. Tim odabire opremu za implementaciju TPM-a. Ako se implementacija provodi prvi put, oprema za pilot projekt mora biti pažljivo odabrana. Važno je odabrati proizvodnu opremu i infrastrukturu u skladu sa zahtjevima lean proizvodnog sustava. Za prvu opremu koja će biti primjer lean prakse važno je analizirati je li oprema jednostavna za rukovanje i održavanje. Osim toga, faktori kao što su zaštita od grešaka, pouzdano održavanje, sigurnost operatera i podrška za jednoprolazni tok važni su lean dizajnerski faktori, kako su prepoznali Mohammadi i suradnici [72].

Jedan od načina za početak je izrada pilot projekta na dijelu opreme ili stroju koji je najkompatibilniji za provedbu TPM optimizacije. Odabirom opreme koja je jednostavna za rukovanje i održavanje te koja može jasno pokazati prednosti TPM-a, zaposlenici mogu dobiti jasan uvid u koristi TPM-a i lean filozofije. Ovo je posebno važno za zaposlenike koji su tek upoznati s tim konceptima, jer im omogućuje da vide stvarne rezultate i koristi koje kasnije mogu primijeniti na složenijim strojevima i procesima. Pilot projekt omogućuje zaposlenicima da prođu kroz cijeli proces implementacije TPM-a na manjem, kontroliranom uzorku, što smanjuje rizik od većih pogrešaka i pruža vrijedne povratne informacije koje se mogu koristiti za optimizaciju daljnjih implementacija. Na taj način, tim može testirati i prilagoditi TPM prakse prije nego što ih proširi na ostatak proizvodne linije ili tvrtke. Osim toga, važno je osigurati područje u odjelu gdje će se prikazivati vizualni prikazi napretka, kao što su grafikoni, tablice i fotografije prije i poslije implementacije. Ovo područje može služiti kao središnje mjesto za informiranje i motiviranje zaposlenika, kao i za praćenje napretka i identificiranje područja koja zahtijevaju dodatnu pažnju. Također, tim treba imati redovite sastanke na ovom mjestu kako bi raspravljao o različitim izazovima i problemima s kojima se susreću tijekom procesa implementacije. Ovi sastanci pružaju priliku za zajedničko rješavanje problema, dijeljenje iskustava i ideja te osiguranje da svi članovi tima budu informirani i uključeni u proces. Sažetak faze obuke tima i odabira opreme prikazan je na Slici 8, koja ilustrira ključne korake i aktivnosti potrebne za uspješnu pripremu i početak implementacije TPM-a.

## Trening tima i odabir opreme



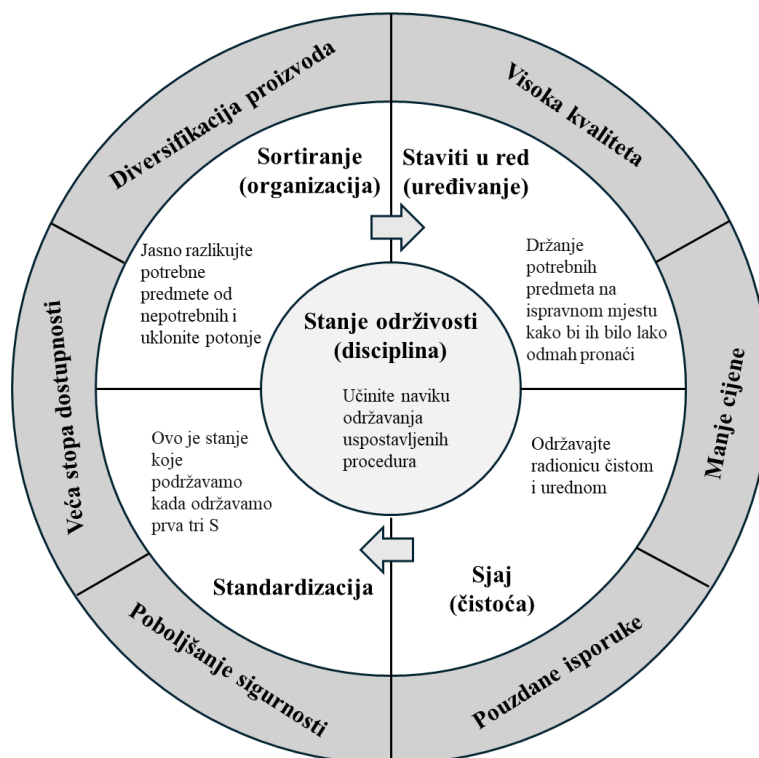
*Slika 8. Trening tima i odabir opreme*

### 5.1.2. Inicijalna inspekcija

Kao što je ranije prepoznato kroz pregled literature, osnova TPM-a je 5S filozofija. 5S filozofija je metodologija za organizaciju radnog mjesta i poboljšanje produktivnosti koja potječe iz Japana. Često se povezuje s lean proizvodnjom i naširoko se koristi u proizvodnim industrijama, ali se može primijeniti na različita radna okruženja. 5S okvir sastoji se od pet japanskih riječi, od kojih svaka počinje slovom "S", a koje predstavljaju principe za organizaciju i održavanje produktivnog i učinkovitog radnog prostora. Tih 5 "S" označuju:

1. Seiri (Sortiranje/Organizacija): Prvi korak je "sortiranje" ili "organizacija." To uključuje prolazak kroz sve predmete i alate u radnom prostoru i kategorizaciju istih kao potrebne ili nepotrebne. Nepotrebni predmeti se uklanjaju iz radnog prostora, ostavljajući samo bitne predmete. Ovo pomaže u smanjenju nereda i poboljšanju učinkovitosti.

2. Seiton (Staviti u red): Nakon sortiranja, sljedeći korak je "stavljanje u red" ili "uređivanje." To uključuje organiziranje i raspoređivanje preostalih predmeta na logičan i učinkovit način. Sve ima svoje određeno mjesto, što olakšava pronalaženje i korištenje. Često se koriste vizualni pokazatelji poput naljepnica i oznaka kako bi se označilo gdje predmeti pripadaju.
3. Seiso (Sjaj/Čistoća): Treći korak je "sjaj" ili "čišćenje." To uključuje temeljito čišćenje radnog prostora i sve opreme. Redovito čišćenje ne samo da održava sigurno i ugodno radno okruženje, već također pomaže u prepoznavanju i rješavanju potencijalnih problema ili nedostataka.
4. Seiketsu (Standardizacija): Četvrti korak je "standardizacija." To uključuje stvaranje standardiziranih procedura i smjernica za održavanje prva tri S-a. Standardizacija osigurava da svi slijede iste prakse i pomaže u održavanju postignutih poboljšanja.
5. Shitsuke (Stanje održivosti/Disciplina): Posljednji korak je "stanje održivosti" ili "samodisciplina." Ovaj korak se odnosi na održavanje postignutih poboljšanja kroz prva četiri S-a. Zahtijeva stalnu predanost, disciplinu i kontinuirane napore za poboljšanje kako bi radno mjesto ostalo organizirano i učinkovito [78].



Slika 9. Vizualna reprezentacija 5S [79]

5S filozofija ima za cilj smanjenje gubitaka, poboljšanje sigurnosti na radnom mjestu, povećanje produktivnosti i stvaranje organiziranijeg i učinkovitijeg radnog okruženja. Može se primijeniti u raznim industrijama i okruženjima, uključujući proizvodnju, zdravstvo, urede i uslužne sektore, kako bi se optimizirali procesi i eliminirali nepotrebni zadaci ili materijali. 5S filozofija služi kao temelj za implementaciju TPM-a.

Sljedeći korak je provođenje početne inspekcije opreme kako bi se utvrdilo njezino trenutno stanje. Ovaj dio implementacije TPM-a je najviše vremenski zahtjevan i igra ključnu ulogu u uspostavljanju ključnih aspekata stanja proizvodne opreme, što će biti temelj za izradu planova održavanja. Početna inspekcija treba biti dokumentirana. Ovaj model predlaže format za provođenje početne inspekcije u osam točaka. Koraci inicijalne inspekcije vizualno su prikazani na slici 10.



*Slika 10. Inicijalna inspekcija*

Prva točka uključuje detaljno utvrđivanje funkcionalnih jedinica stroja. Ako se stroj ili proizvodna linija sastoji od nekoliko neovisnih jedinica, te informacije moraju biti precizno

dokumentirane. To podrazumijeva bilježenje imena jedinice, proizvođača, serijskog broja, godine proizvodnje i interne oznake, obično inventurnog broja. Ovaj korak je ključan za razumijevanje strukture i komponenti stroja, što će kasnije olakšati održavanje i optimizaciju. Druga točka odnosi se na utvrđivanje tehničkih aspekata jedinica ili stroja. To uključuje detaljno bilježenje svih tehničkih karakteristika kao što su ciklus rada, brzina, dimenzije, zahtjevi za napajanjem, te bilo koje druge relevantne karakteristike specifične za određenu opremu. Ovi podaci su bitni za procjenu performansi i identifikaciju potencijalnih poboljšanja. Treća točka obuhvaća dokumentiranje trenutnih vremena postavljanja. To uključuje bilježenje vremena potrebnog za pokretanje proizvodnje, promjenu na drugi proizvod ili utovar sirovina. Ovi podaci pomažu u razumijevanju koliko vremena se gubi tijekom ovih operacija i gdje se mogu napraviti poboljšanja za povećanje učinkovitosti. Četvrta točka fokusira se na dokumentiranje svih izvora energije koji se koriste u proizvodnom procesu, kao što su električna energija, komprimirani zrak i rashladna voda. Precizna dokumentacija ovih izvora energije može pomoći u identifikaciji bilo kakvih gubitaka energije tijekom procesa, što može dovesti do smanjenja troškova i poboljšanja energetske učinkovitosti. Ove četiri točke predstavljaju temeljne korake u početnoj inspekciji opreme, pružajući ključne informacije potrebne za daljnju analizu i optimizaciju kroz TPM. Peta točka preporučuje provjeru postojeće dokumentacije, točnije:

- **Protokol za primopredaju:** Detaljni postupci za primopredaju opreme između smjena ili timova.
- **Funkcionalni dijagram:** Dijagram koji prikazuje funkcionalne jedinice i njihov međusobni odnos.
- **Tehnički zahtjevi:** Specifikacije i zahtjevi koji se odnose na performanse opreme.
- **Dijagram električne instalacije:** Shema električnih instalacija stroja ili uređaja.
- **Upute za rad:** Detaljne upute za korištenje opreme.
- **Dijagram hidraulike:** Shema hidrauličkog sustava opreme.
- **Tehnički opis stroja/uređaja:** Detaljni tehnički podaci o stroju ili uređaju.
- **Dijagram pneumatike:** Shema pneumatskog sustava opreme.
- **Upute za transport i montažu:** Upute za pravilno transportiranje i sastavljanje opreme.
- **Dijagram kontrole:** Shema kontrolnog sustava opreme.
- **Upute za održavanje:** Detaljne upute za održavanje i servisiranje opreme.
- **Dnevnik održavanja:** Evidencija svih održavanja i popravaka na opremi.

- **Popis potrošnih dijelova:** Popis dijelova koji se redovito troše i trebaju zamjenu.
- **Popis rezervnih dijelova:** Popis dijelova koji su dostupni za zamjenu u slučaju kvara.
- **Evidencija zastoja i gubitaka:** Evidencija svih zastoja i gubitaka u proizvodnom procesu.
- **Točke podmazivanja:** Mjesta na opremi koja zahtijevaju redovito podmazivanje.
- **Dokumentacija o ukupnoj učinkovitosti opreme (OEE):** Dokumenti koji prate i analiziraju učinkovitost opreme.

Šesta točka početnog inspekcijskog protokola uključuje sveobuhvatan pregled i dokumentaciju postojećih praksi održavanja. To obuhvaća temeljitu analizu postupaka čišćenja, rutine podmazivanja, procesa popravaka, zadataka preventivnog održavanja i planiranih aktivnosti održavanja vezanih uz strojeve i opremu. Također uključuje identifikaciju pojedinaca ili timova odgovornih za provođenje tih aktivnosti održavanja i određivanje učestalosti ili vremenskih intervala u kojima se ti zadaci obavljaju. Tijekom ovog koraka, dokumentiraju se sve postojeće standardne operativne procedure (SOP) za održavanje. Ova sveobuhvatna procjena pomaže u pružanju jasnog razumijevanja trenutnog stanja praksi održavanja unutar organizacije i služi kao temelj za poboljšanja kao dio TPM inicijative.

Za procjenu trenutnog stanja, kao sljedeća točka početne inspekcije, može se koristiti dnevnik stroja. Dnevnik stroja je temeljni element dokumentacije opreme. On pruža uvid u zaustavljanja i prekide rada koje stroj doživljava. Ako ne postoji dostupan dnevnik stroja, on se mora kreirati. Primjer dnevnika stroja prikazan je na tablici 8.

Tablica 8. Primjer dnevnika stroja

Br.	Aktivnost					(Oznaka stroja/ opreme)				
	Podeša- vanje	Popra- vak	Preventivno održavanje	U radu	Drugo	Proi- zvod	Radni nalog	Smjena	Vrijeme	Potpis
1		x						2nd	1 h	
2	x							2nd	30 min	
3			x					2nd	2 h	
4				x		C 32	1-4.23	1st	8 h	

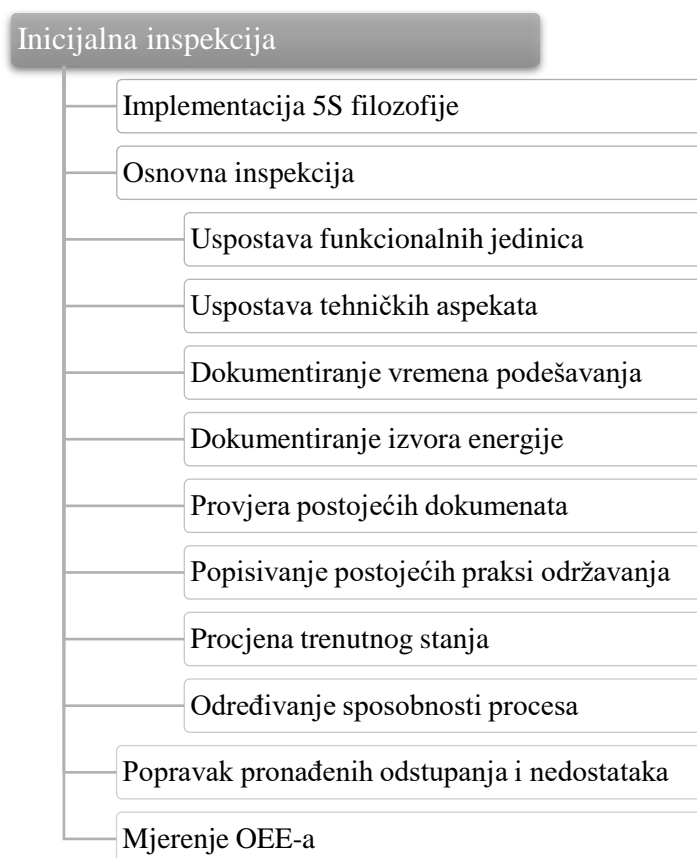
Primjer prikazan u tablici 8 služi samo kao smjernica kako bi osnovni dnevnik stroja trebao izgledati. Dnevnici strojeva trebaju sadržavati podatke o zaustavljanjima i vremenima čekanja. Svaki stroj treba imati svoj vlastiti dnevnik. To je početna točka za procjenu stanja stroja i pružit će osnovu za izračun OEE-a (ukupne učinkovitosti opreme), o čemu će biti

riječi kasnije. Oprema također mora proći temeljit pregled kako bi se identificirali svi trenutni kvarovi, a trebala bi se i očistiti kao dio procesa održavanja. Pregled uključuje provjeru različitih faktora kao što su curenje medija, prisutnost nečistoća, srhovi od mehaničke obrade, nakupljanje prašine, labavi dijelovi, prekomjerna buka, vibracije, neželjeno grijanje, znakovi istrošenih dijelova, privremena rješenja za popravke, potencijalni izvori zagađenja, nepristupačna područja za održavanje, sve izmjene napravljene na opremi i poznati razlozi za zaustavljanje. Dokumentiranje ovih aspekata pruža vrijedne uvide u postojeće stanje opreme i pomaže u identificiranju područja koja zahtijevaju poboljšanja ili posebnu pažnju u održavanju kao dio TPM programa.

Osma i posljednja točka u procesu početne inspekcije za implementaciju TPM-a usredotočuje se na aspekt kvalitete opreme. Ovo uključuje utvrđivanje sposobnosti procesa, način na koji se mjeri, izračunavanje postotka otpada, identificiranje glavnih odstupanja od standarda kvalitete te utvrđivanje primarnih razloga za ta odstupanja. Dokumentiranje ovih aspekata pruža vrijedne uvide u postojeće stanje kvalitete opreme i pomaže u prepoznavanju područja koja zahtijevaju poboljšanje ili posebnu pažnju u održavanju kao dio TPM programa. To je ključno za postizanje visokih standarda kvalitete i osiguranje da oprema radi učinkovito i pouzdano.

Za provođenje početne inspekcije, preporučuje se izraditi obrazac koji pokriva ovih osam točaka ili ga prilagoditi specifičnim potrebama opreme. TPM tim treba koristiti ovaj obrazac kao temeljni korak u svojim naporima za poboljšanje učinkovitosti, pouzdanosti i ukupne učinkovitosti odabrane opreme kao dio TPM programa. Upotrebom ovog obrasca, TPM tim može sustavno pristupiti analizi i poboljšanju stanja opreme, što je ključno za uspješnu implementaciju TPM programa. Ovaj strukturirani pristup osigurava da svi aspekti koji utječu na performanse i pouzdanost opreme budu temeljito pregledani i dokumentirani, što omogućuje učinkovito planiranje i provođenje poboljšanja. Popis početne inspekcije služi kao temelj za izradu popisa nedostataka i plana intervencija. Koristeći ove informacije, TPM tim može identificirati sve kvarove ili probleme s opremom i zatim razviti plan intervencija za njihovo rješavanje. Kao dio ovog plana, ključno je utvrditi rokove za ispravljanje tih kvarova (korekcija odstupanja, privremeni plan čišćenja, eliminacija izvora onečišćenja itd.) i za prikupljanje ili generiranje potrebne dokumentacije. Ovi rokovi pomažu osigurati da se korektivne mjere poduzmu pravovremeno i da implementacija TPM-a ostane na pravom putu. Faza inicijalne inspekcije u implementaciji TPM-a, nakon što se izvrše potrebne korekcije i poboljšanja na opremi, uključuje mjerenje ukupne učinkovitosti opreme (OEE) tijekom

najmanje dva tjedna. Ovo mjerenje OEE-a pomaže u procjeni učinkovitosti implementiranih promjena i pruža vrijedne uvide u performanse i pouzdanost opreme. OEE mjerenje omogućuje praćenje stvarne produktivnosti opreme u odnosu na njezine maksimalne kapacitete, identificirajući područja gdje se još uvijek mogu postići poboljšanja. Na temelju prikupljenih podataka, TPM tim može analizirati sve zastoje, brzinske gubitke i kvalitativne probleme kako bi precizno odredio uzroke smanjenja učinkovitosti. Ovi podaci omogućuju bolje razumijevanje kako se implementirane promjene odražavaju na svakodnevni rad opreme i koliko su učinkovite korektivne mjere koje su poduzete. Mjerenje OEE-a također služi kao temelj za kontinuirano poboljšanje, omogućujući timu da prati napredak tijekom vremena i prilagođava strategije održavanja prema potrebi. Proces mjerenja OEE-a bit će detaljnije objašnjen kasnije u ovom istraživanju, kako bi se osigurala točna i sveobuhvatna evaluacija. To uključuje specifične metode prikupljanja podataka, analitičke alate za interpretaciju rezultata i smjernice za primjenu tih rezultata u praksi. Precizno mjerenje OEE-a je ključno za osiguranje da TPM inicijativa dovede do stvarnih poboljšanja u učinkovitosti i pouzdanosti proizvodne opreme. Sažetak aktivnosti koje uključuje inicijalna inspekcija prikazan je na slici 11.



Slika 11. Inicijalna inspekcija



### 5.1.3. Planirano održavanje

Faza planiranog održavanja obuhvaća temeljitu analizu zabilježenih prekida i zastoja, što se prati kroz mjerenje učinkovitosti opreme, poznato kao OEE (Overall Equipment Effectiveness). Tijekom ove faze, analizira se niz faktora: razlozi zbog kojih su se prekidi dogodili, vremenski okvir događanja prekida te identificiranje primarnih uzroka. Bitno je precizno pratiti trenutke kada do zaustavljanja dolazi jer na to mogu utjecati različiti čimbenici, uključujući vrstu smjene koja je bila na dužnosti, identitet operatera koji je upravljao opremom, te je li zaustavljanje bilo tijekom dana ili noći. Nakon detaljne analize, formulira se adekvatna strategija održavanja te se postavljaju ključni pokazatelji uspješnosti, poznati kao KPI (Key Performance Indicators), kako bi se osiguralo optimalno funkcioniranje opreme. Postoje dvije strategije planiranog održavanja:

- Korektivno održavanje
- Preventivno održavanje

Korektivno održavanje obično se provodi na neplaniran i hitan način, intervenirajući samo kada se pojavi neposredni problem s opremom. Takvo održavanje znači intervenciju na opremi isključivo nakon što se već dogodi kvar ili neki drugi oblik neuspjeha. Iako je ovaj pristup održavanju najrašireniji, on nosi sa sobom nekoliko negativnih aspekata, uključujući moguće duže vrijeme zastoja i veće troškove popravka. Često se opisuje izrazom "ne diraj dok se ne pokvari", što implicira da se oprema ne održava dok ne prestane raditi, što može rezultirati ozbiljnim zastojima i nenadanim prekidima u radu.

Preventivno održavanje je vrsta održavanja gdje se oprema održava prije nego što dođe do kvara. Ovaj pristup eliminira negativne aspekte korektivnog održavanja, ali uvodi i druge negativne karakteristike (kao što je veći trošak zbog potrebe prijevremene zamijene dijelova). Preventivno održavanje može se provoditi na nekoliko načina. Općenito, preventivno održavanje može se izvoditi koristeći različite strategije prikazane u tablici 9.

Tablica 9. Klasifikacija preventivnog održavanja [80]

<b>Klasični preventivni pristup (održavanje bazirano na vremenu/upotrebi)</b>	Odluke o održavanju donose se na temelju vremena korištenja opreme (npr. 1000 radnih sati, određeni broj proizvedenih predmeta itd.) ili kalendarskog vremena (npr. generalni remont svake 2 godine).
<b>Intuitivno (održavanje bazirano na stanju)</b>	Odluke o održavanju temelje se na očekivanom stanju opreme, određujući kada i kako će se održavanje provesti.

<b>Pasivno (održavanje bazirano na prilikama)</b>	Održavanje se provodi kada se za to ukaže prilika. To je uobičajeno u proizvodnji i distribuciji električne energije, gdje se manje kritični radovi na održavanju obavljaju tijekom zaustavljanja opreme.
<b>Proaktivno (održavanje usmjereno na projektiranje)</b>	Za implementaciju ovog tipa održavanja potrebno je uvesti tehničke modifikacije ili projektirati opremu tako da uključuje značajke koje omogućavaju aktivno praćenje tijekom rada. Odluke o održavanju temelje se na informacijama prikupljenim tijekom rada. Primjer ovakvog tipa održavanja su povezani uređaji u zgradama koji su integrirani s sustavom za upravljanje zgradom (Building Management System).

Tijekom održavanja opreme koriste se oba pristupa. Vitalni dijelovi uglavnom se održavaju proaktivnim pristupom, odnosno preventivno, dok se manje kritični dijelovi održavaju pasivno, odnosno korektivno.

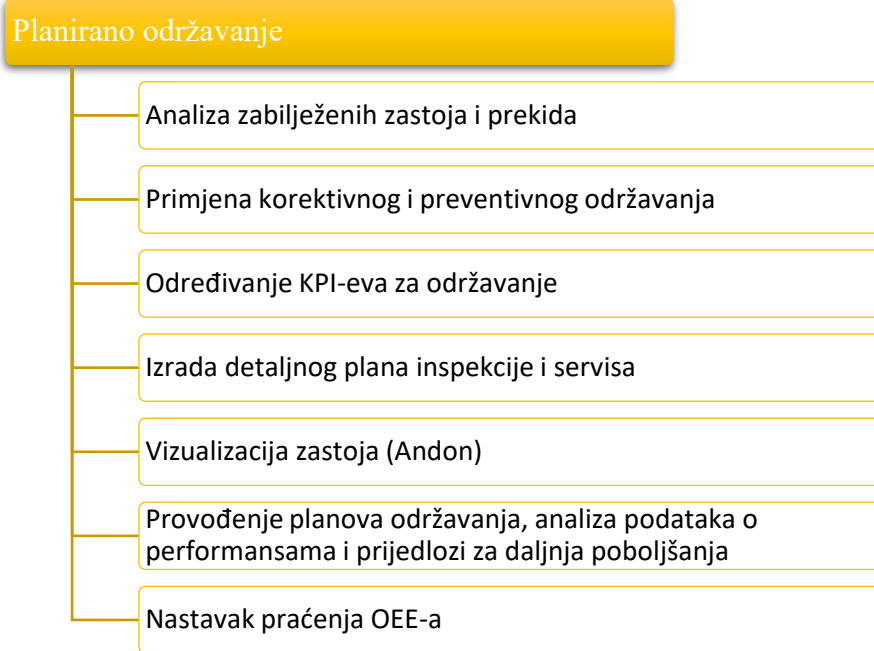
Ključni pokazatelji uspješnosti (KPI) su kvantificirane i mjerljive metrike koje organizacije koriste kako bi procijenile svoje performanse u ostvarivanju specifičnih ciljeva. Oni omogućavaju dublji uvid u uspješnost organizacije, služeći kao ključni alat za procjenu učinkovitosti, nadzor nad napretkom i donošenje strateških odluka utemeljenih na podacima. U kontekstu održavanja, različiti KPI-ovi pomažu u identifikaciji područja koja zahtijevaju poboljšanja ili hitne intervencije. Među takvim KPI-ovima nalaze se neplanirani gubici, koji se izračunavaju oduzimanjem radnog vremena i vremena zabilježenih prekida od ukupno dostupnog vremena, gubitak zbog neaktivnosti koji može nastati zbog nedostatka radnih naloga, nedostupnosti sirovina ili operatera, kvalitetni gubici kao što su materijali koji se moraju odbaciti (otpis) te postotak efikasnosti opreme (OEE), koji mjeri stupanj u kojem je oprema produktivno iskorištena u odnosu na njezin puni potencijal. Ovi pokazatelji omogućuju menadžmentu da razvije precizne strategije za optimizaciju procesa i smanjenje operativnih troškova.

Izrada detaljnog plana inspekcije i održavanja za svaku pojedinu jedinicu stroja ili proizvodne linije je neophodan korak u učinkovitoj implementaciji Total Productive Maintenance (TPM) programa. Uključuje niz važnih elemenata: od identifikacije pojedinačnih jedinica opreme, određivanja odgovornih osoba, do postavljanja intervala za redovite inspekcije. Plan treba sadržavati i detaljne kontrolne liste za svaku operaciju, područja kojima je potrebna posebna pažnja, kao i jasno definirane procedure za dokumentiranje i izvještavanje. Također, bitno je uspostaviti procedure za eskalaciju problema kako bi se brzo reagiralo na svaku nepravilnost. Osim toga, ključne komponente koje se održavaju moraju biti jasno prepoznate, precizno

zabilježene i kontinuirano praćene kako bi se osigurala njihova ispravnost i efikasnost u radu, čime se maksimizira produktivnost i smanjuju zastoji u proizvodnji.

Vizualizacija vremena zastoja predstavlja vrlo korisnu praksu u proizvodnim i proizvodnim okruženjima, posebno kada je jedan operater odgovoran za više radnih stanica ili kada želite jasno razumjeti razloge za zastoje. Za praćenje zastoja mogu se koristiti ploče za praćenje zastoja, digitalne nadzorne ploče, Pareto dijagrami ili Andon sustav. Alat Andon, koji se koristi u lean proizvodnji, vizualni je uređaj za kontrolu koji se koristi u okruženjima lean proizvodnje kako bi signalizirao probleme, abnormalnosti ili uska grla u procesu proizvodnje. Izraz "Andon" potječe od japanske riječi za "lanternu" ili "lampu", a u lean proizvodnji često se prikazuje kao vizualni signalni sustav poput semafora.

U posljednjoj fazi planiranog održavanja pri implementaciji TPM-a, fokus se prebacuje na izvršavanje planova održavanja, analizu podataka o učinku i predlaganje prijedloga za daljnja poboljšanja. Tijekom ove faze provode se zadaci planiranog održavanja, prate rasporedi podmazivanja i rutine inspekcija. Istodobno, kontinuirano promatranje i prikupljanje podataka ostaju prioritet, s naglaskom na ključne pokazatelje učinka poput OEE, vremena rada stroja i razloga za zastoje. Analiza OEE pruža uvide u učinkovitost opreme i identificira područja koja zahtijevaju poboljšanje. Kontinuirano praćenje osigurava da provedene promjene daju očekivane rezultate i održavaju poboljšanja. Redovite povratne informacije Upravnom odboru preporučuju se kako bi se osigurala konzistentnost i efikasnost održavanja. Sažetak aktivnosti koje uključuje faza planiranog održavanja prikazan je na slici 12.



*Slika 12. Planirano održavanje*

#### 5.1.4. Autonomno održavanje

Tijekom faze autonomnog održavanja pri implementaciji TPM-a (Total Productive Maintenance), potrebno je odrediti nekoliko ključnih aktivnosti i odgovornosti kako bi se osiguralo učinkovito održavanje opreme i njena pouzdanost. Prvo, temeljna jasna komunikacija i jasno definirane odgovornosti unutar TPM (Total Productive Maintenance) tima su ključni za učinkovitu koordinaciju i razmjenu informacija među članovima tima. Bitno je uspostaviti preciznu komunikacijsku liniju kako bi se izbjegli problemi s nedostatkom informacija ili pogrešnim informacijama, što može znatno ometati procese održavanja. Također, potrebno je razviti opsežan plan podmazivanja koji će osigurati da se maziva pravilno rukuju i primjenjuju, čime se produžava životni vijek opreme. Plan podmazivanja treba detaljno opisati dnevne, tjedne i mjesečne aktivnosti podmazivanja i biti lako dostupan svim operaterima.

Za autonomno održavanje, neophodno je izraditi kontrolne liste koje će operaterima pružiti jasne upute za obavljanje standardnih zadataka održavanja. Ove liste mogu poslužiti kao vodiči koji pomažu u održavanju dosljednosti i efikasnosti u radu. Implementacija

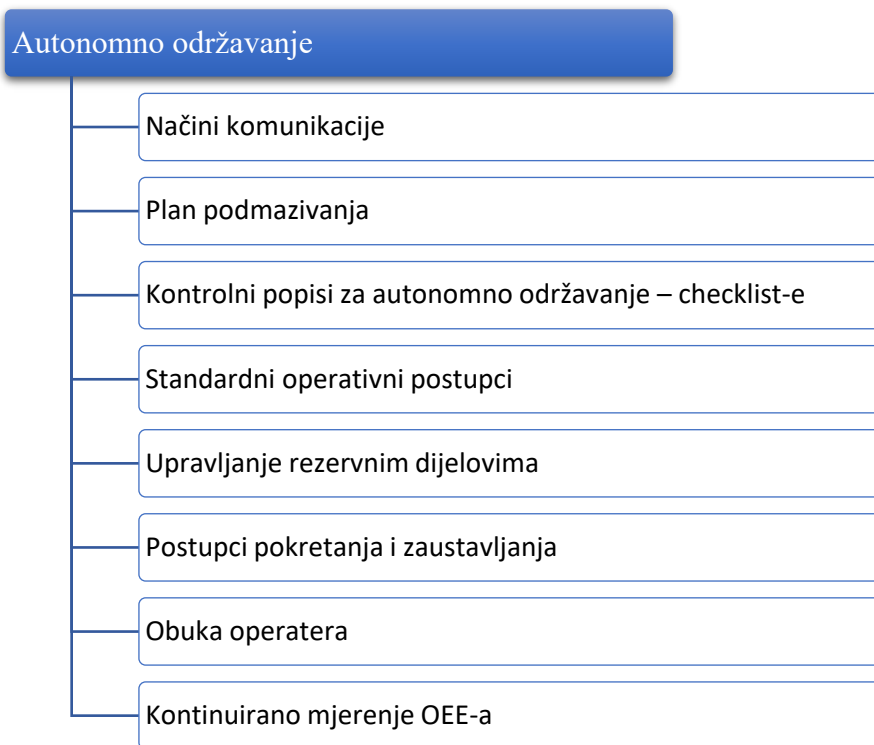
standardnih obrazaca za svakodnevno bilježenje obavljenih zadataka održavanja pomaže u stvaranju rutine i olakšava praćenje napretka u autonomnom održavanju.

Standardne operativne procedure (SOP) moraju biti uspostavljene za svaku akciju održavanja kako bi se osigurala konzistentnost, točnost i sigurnost operacija. Ove procedure su posebno važne za brzu integraciju novih zaposlenika u sustav održavanja, pružajući im jasne smjernice i smanjujući vrijeme potrebno za obuku.

Učinkovito upravljanje rezervnim dijelovima ključno je za neprekidan rad opreme, uključujući precizno praćenje zaliha rezervnih dijelova i pravovremeno naručivanje novih kako bi se izbjegli nepotrebni zastoji. Važno je imati jasno definirane procedure za pokretanje i zaustavljanje opreme, dostupne svim zaposlenicima, kako bi se osiguralo da se oprema uvijek koristi na siguran i efikasan način.

Obuka operatera treba obuhvaćati kako rutinske zadatke održavanja tako i odgovore na nepredviđene situacije kako bi operateri mogli brzo i efikasno reagirati na bilo kakve zastoje. Kontinuirano mjerenje ukupne efikasnosti opreme (OEE) ne samo da pomaže u ocjenjivanju učinka TPM implementacije, već i pruža uvid u to kako poboljšanja u održavanju utječu na produktivnost i kvalitetu rada.

Ove aktivnosti doprinose ukupnom uspjehu TPM-a (Total Productive Maintenance) promicanjem kulture proaktivnog održavanja i osiguravanjem da je oprema dobro održavana i učinkovita. Kultura proaktivnog održavanja potiče sve zaposlenike da kontinuirano nadgledaju i poboljšavaju stanje opreme, što dovodi do smanjenja zastoja, povećanja produktivnosti i optimizacije radnih procesa. Ovim pristupom, održavanje postaje ključni element strategije organizacije, a ne samo rutinska ili reaktivna funkcija. Proaktivno održavanje također omogućava ranu identifikaciju problema prije nego što eskaliraju u ozbiljnije kvarove, čime se štedi vrijeme i resursi. Na taj način, TPM doprinosi ne samo održavanju zdravlja opreme, već i općoj operativnoj izvrsnosti i konkurentnosti organizacije. Sažetak aktivnosti koje su uključene u fazu autonomnog održavanja prikazan je na slici 13.



*Slika 13. Autonomno održavanje*

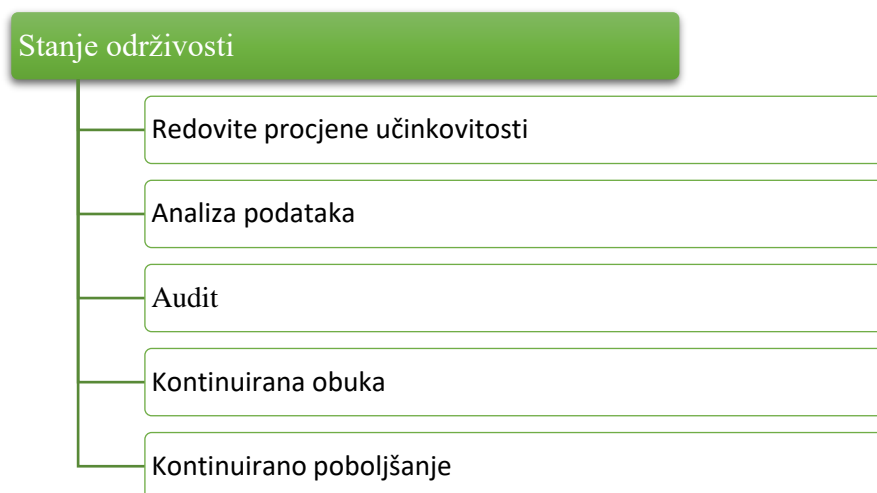
#### 5.1.5. Stanje održivosti

Faza održivosti u procesu implementacije TPM-a (Total Productive Maintenance) usmjerena je na osiguranje dugoročne održivosti novouvedenih praksi. Nakon što su provedena početna poboljšanja i organizacija je doživjela pozitivne promjene u pouzdanosti opreme, učinkovitosti i ukupnim performansama, ključno je uspostaviti sustav za nadzor i održavanje tih poboljšanja na dugi rok. TPM nije jednokratna inicijativa već neprekidan napor prema izvrsnosti u upravljanju i održavanju opreme. Tijekom ove faze, organizacija uspostavlja mehanizme za praćenje trajne učinkovitosti implementiranih praksi TPM-a. To uključuje redovite procjene učinka, analizu podataka i recenzije kako bi se osiguralo da se postignuta poboljšanja održavaju. Može uključivati i periodične revizije i inspekcije kako bi se potvrdilo da se standardi održavanja poštuju i da se oprema upravlja u skladu s uspostavljenim najboljim praksama.

Za uspješnu održivost, programi obuke i edukacije i dalje igraju ključnu ulogu. Zaposlenici, uključujući operatere, osoblje za održavanje i ostale relevantne djelatnike, trebaju nastaviti

primati obuku kako bi se pojačale njihove vještine i znanje vezano za principe i prakse TPM-a. Kontinuirana edukacija osigurava da timovi ostaju ažurirani s najnovijim tehnikama i metodama održavanja, jačajući kulturu kontinuiranog poboljšanja unutar organizacije i pomažući u održavanju visokog standarda operativne izvrsnosti.

Osim toga, kanali komunikacije i povratne informacije održavaju se ili poboljšavaju kako bi se promicalo kontinuirano unapređenje. Operateri i timovi za održavanje trebali bi se osjećati osnaženima da prijavljuju probleme, predlažu poboljšanja i sudjeluju u naporima rješavanja problema. To zahtijeva stalnu posvećenost svih razina organizacije, od vrhovnog menadžmenta do radnika na prvoj liniji, kako bi se osiguralo da TPM postane integralni dio tvrtke. Uspostava kulture otvorenosti i uzajamnog poštovanja ključna je za osnaživanje zaposlenika da aktivno sudjeluju u TPM aktivnostima. Omogućavanje stalnog dijaloga između različitih timova i rukovodstva pomaže u identifikaciji problema u ranim fazama i potiče inovativna rješenja. Kroz redovite sastanke, radionice i treninge, zaposlenici mogu dijeliti svoja iskustva, učiti jedni od drugih i razvijati nove vještine koje doprinose ukupnom uspjehu TPM inicijative. Također, menadžment mora kontinuirano pokazivati svoju podršku za TPM pristup, pružajući potrebne resurse i priznanje zaposlenicima koji doprinose poboljšanjima. Ovaj sustavni pristup ne samo da povećava učinkovitost i pouzdanost opreme, već i gradi snažniju organizacijsku kulturu usmjerenu na stalno poboljšanje i izvrsnost. Sažetak faze održivosti implementacijskog modela prikazan je na slici 14.



*Slika 14. Stanje održivosti*

## 5.2. IZRAČUN OEE-a

Ključni alat ili ključni pokazatelj učinkovitosti opreme i produktivnosti u kontekstu TPM-a (Total Productive Maintenance) je Ukupna učinkovitost opreme (OEE - Overall Equipment Efficiency). Izračunavanjem OEE-a može se odrediti koliko je proizvodna oprema učinkovita i dostupna, temeljeno na ukupnom dostupnom proizvodnom vremenu [81]. OEE je sveobuhvatna metrika koja kombinira tri važna faktora: učinkovitost, dostupnost i kvalitetu. Učinkovitost mjeri brzinu proizvodnje kada oprema radi, dostupnost ocjenjuje vrijeme tijekom kojeg je oprema sposobna za rad u odnosu na planirano vrijeme, dok kvaliteta uzima u obzir količinu proizvoda koji zadovoljavaju standarde u odnosu na ukupnu proizvedenu količinu. Ovaj indikator omogućava organizacijama da precizno identificiraju područja gdje se može poboljšati produktivnost opreme i ukupna učinkovitost proizvodnje, te tako usmjeravaju svoje napore održavanja na način koji neposredno utječe na poboljšanje performansi.

Za dobivanje rezultata iz analize OEE-a potrebno je obaviti prikupljanje podataka. Uobičajena praksa je ručno prikupljanje podataka. Jednom kada se uspostavi metodologija, može se preći na digitalno prikupljanje podataka (za manje vremenski zahtjevno i točnije prikupljanje podataka). Za uspješnu analizu OEE-a obavezno je prikupiti informacije, bilo ručno ili digitalno, kako je prikazano u tablici 10.

*Tablica 10. Podaci potrebni za analizu OEE-a.*

Br.	Vrsta podataka	Opis
1.	OEE vremenski period	Ovo je razdoblje u kojem se provodi prikupljanje podataka, obično od 3 do 8 tjedana. Što je razdoblje duže, podaci su točniji.
2.	Informacije o radnom mjestu	Provodi li se analiza na jednoj ili više mašina ili proizvodnih linija? Ako proizvodna linija ima nekoliko nezavisnih jedinica, analiza se mora provesti na svakoj od njih.
3.	Informacije o proizvodu	Hoće li se praćenje i prikupljanje podataka vršiti samo na jednoj vrsti radnih komada ili će se radni komadi mijenjati?

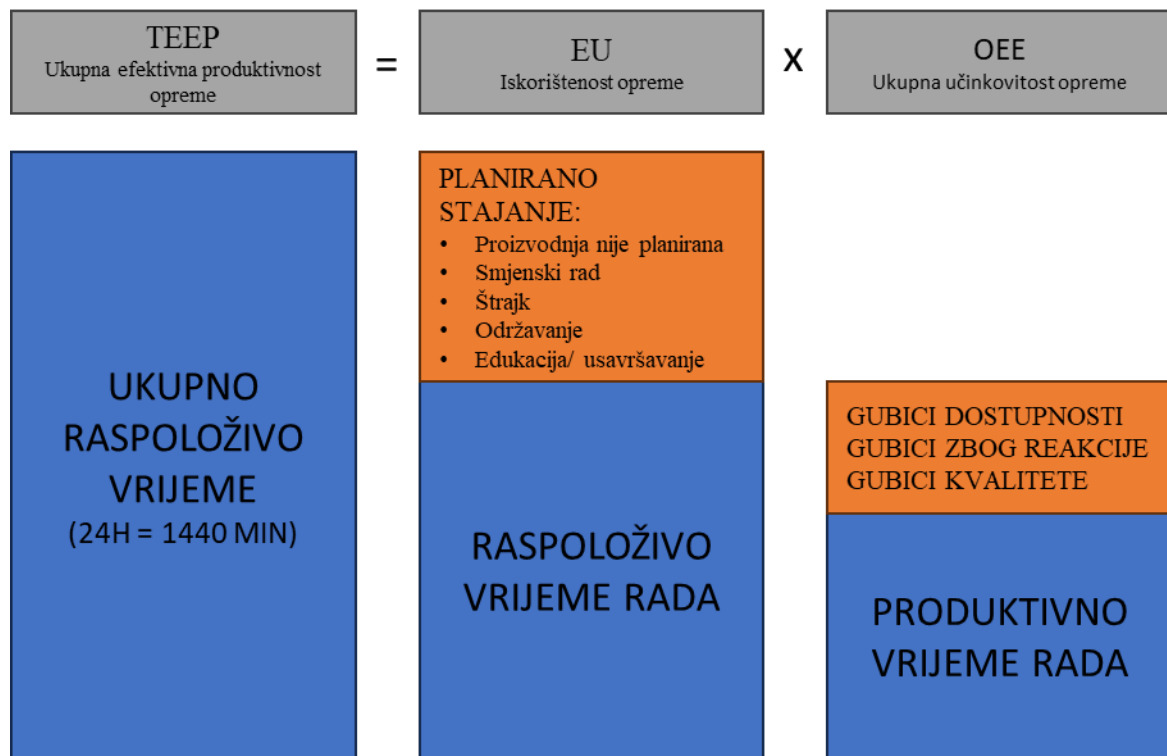


4.	Broj smjena (smjenski rad)	Značajno utječe na izračun ako broj smjena nije uzet u obzir u izračunu.
5.	Radni sati po smjeni	Neke tvrtke preferiraju šest-satne radne smjene, a neke desetosatne, stoga je potrebno točno unijeti tu informaciju.
6.	Takt stroja ili proizvodne linije	To je ključna informacija za analizu s obzirom na to da se izračun temelji na proizvodnom taktu. Vrlo je važno da se takt mjeri pažljivo i točno, jer čak i najmanje odstupanje od stvarne situacije može rezultirati lažnim informacijama. Takt je srž analize OEE-a. Ovo su ključni podaci.
7.	Zastoji	Popis zastoja: gdje su se dogodili (koja stanica proizvodne linije), kada su se dogodili (dan, smjena, sati, minute), duljina zastoja, priroda zastoja (koji je bio problem - električni, mehanički, hidraulički, itd.), koji je dio proizveden kada je došlo do zastoja, vrsta zastoja (planirani ili neplanirani). Vrsta zastoja također je vrlo važna informacija jer izravno utječe na OEE rezultat.
8.	Količine	Koliko je dijelova proizvedeno u svakoj smjeni (pazeći na to je li više od jedne vrste proizvoda proizvedeno u istoj smjeni) i koliko je od toga bilo otpada, ako ga je bilo?

Za prikupljanje podataka u proizvodnji može se stvoriti i koristiti predložak u koji bi operateri bilježili zastoje. Da bi se OEE detaljnije objasnio, potrebno je pojasniti pojmove ukupne efektivne produktivnosti opreme (Total Effective Equipment Productivity -TEEP) i iskorištenosti opreme (Equipment Utilisation -EU). TEEP je početna metrika koja procjenjuje ukupnu učinkovitost proizvodnog procesa ili proizvodne linije. TEEP se izražava kao postotak, pri čemu viši postotak ukazuje na bolju učinkovitost opreme. Pruža sveobuhvatan pregled koliko dobro se koristi proizvodna oprema, uzimajući u obzir operativnu učinkovitost i kvalitetu proizvoda.

Praćenjem TEEP-a, organizacije mogu identificirati prilike za poboljšanje i donositi informirane odluke kako bi optimizirale svoje proizvodne procese. TEEP pomaže u razumijevanju ukupne učinkovitosti proizvodne opreme, omogućujući menadžmentu da

prepoznata područja koja zahtijevaju pažnju i poboljšanje. EU, također poznata kao stopa iskorištenosti opreme ili učinkovitost iskorištenosti opreme, metrika je koja se koristi za procjenu koliko učinkovito i efikasno se koristi određena oprema ili strojevi unutar određenog razdoblja. Ova metrika mjeri do koje mjere je oprema aktivno angažirana u produktivnim zadacima u odnosu na ukupno dostupno vrijeme, uključujući i vrijeme kada je oprema dostupna, ali ne radi zbog raznih razloga kao što su održavanje, zastoje ili nedostatak radnih naloga. Iskorištenost opreme ključna je u raznim industrijama, kao što su proizvodnja, građevinarstvo, logistika i zdravstvena skrb, gdje učinkovita uporaba opreme izravno utječe na produktivnost, troškove i ukupne performanse. Visoka stopa iskorištenosti opreme znači da se resursi maksimalno koriste, što vodi ka smanjenju operativnih troškova i povećanju profitabilnosti. S druge strane, niska iskorištenost može ukazivati na potrebu za poboljšanjem procesa ili boljim upravljanjem resursima. Redovitim praćenjem i analizom EU, organizacije mogu osigurati optimalnu upotrebu svoje opreme, maksimizirajući njezinu učinkovitost i doprinos ukupnom poslovnom uspjehu. Međusobna povezanost TEEP-a, EU-a i OEE-a prikazana je na slici 15.



Slika 15. Vizualni prikaz odnosa TEEP, EU i OEE

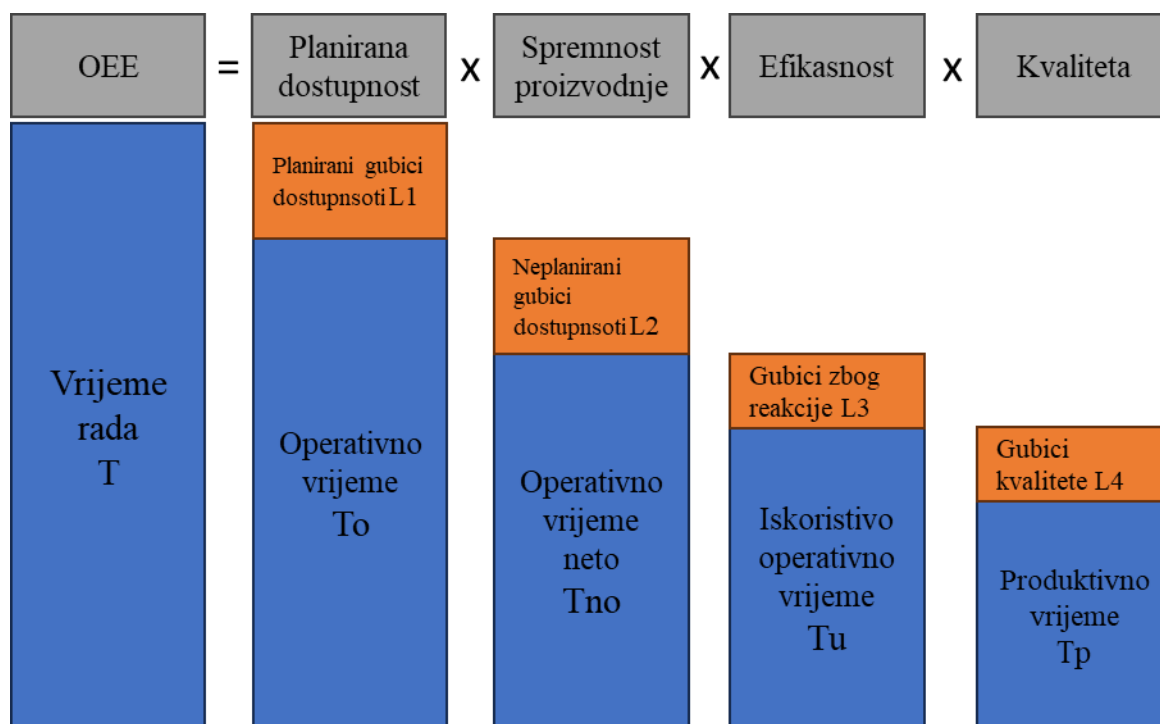
Ukupno raspoloživo vrijeme predstavlja cjelokupno vrijeme unutar dana, tjedna ili mjeseca tijekom kojeg oprema teoretski može raditi, bez ikakvih ograničenja. To je maksimalno moguće operativno vrijeme, koje ne uzima u obzir nikakve faktore poput pauza ili

održavanja. Ovo je idealizirano vrijeme rada, gdje oprema ima potencijal za maksimalnu produktivnost bez ikakvih prekida. S druge strane, raspoloživo vrijeme rada predstavlja realnije razdoblje tijekom kojeg oprema može zaista raditi, uzimajući u obzir praktične faktore poput vikenda, planiranih pauza, redovitog održavanja, treninga zaposlenika i drugih neoperativnih perioda. Ovo je vrijeme koje je realno na raspolaganju za rad opreme, nakon što su uzeti u obzir svi predvidljivi faktori koji mogu smanjiti maksimalno operativno vrijeme. Produktivno vrijeme rada odnosi se na vrijeme koje je stvarno dostupno za rad, nakon što se odbiju svi neplanirani prekidi. Ovi neplanirani prekidi mogu uključivati kvarove na opremi, kašnjenja u postavljanju opreme, nedostatak materijala, nedostatak radnih naloga i proizvodnju otpada. Produktivno vrijeme rada predstavlja vrijeme koje bi trebalo biti potpuno iskorišteno za produktivne aktivnosti bez ikakvih gubitaka. Idealno, ovo je vrijeme koje organizacija želi maksimizirati kako bi povećala svoju ukupnu učinkovitost i produktivnost.

Kombinacija ovih pojmova pomaže u sveobuhvatnom razumijevanju učinkovitosti opreme i proizvodnog procesa. Praćenjem i analizom ukupnog raspoloživog vremena, raspoloživog vremena rada i produktivnog vremena, organizacije mogu precizno identificirati područja za poboljšanje i implementirati strategije za optimizaciju svojih operacija. To uključuje smanjenje neplaniranih prekida, poboljšanje rasporeda održavanja i povećanje operativne učinkovitosti kroz bolje upravljanje resursima i procesima.

Postaje očito da TEEP predstavlja rezultat kombinacije iskorištenosti opreme (EU) i ukupne učinkovitosti opreme (OEE). TEEP se određuje množenjem raspoloživog vremena prilagođenog za planirane zastoje i produktivnog vremena rada uzimajući u obzir neplanirane gubitke. Ova sveobuhvatna metrika nudi uvid u performanse opreme, uzimajući u obzir i namjeravane i neočekivane faktore koji utječu na iskorištenost i učinkovitost. Neki menadžeri smatraju TEEP statistiku posebno vrijednom zbog njezine sveobuhvatne procjene učinkovitosti opreme. Kada je TEEP na niskoj razini i zahtijeva poboljšanje, jedan jednostavan pristup za povećanje ove metrike je uvođenje dodatnih radnih smjena ili produženje radnog tjedna. Ova strateška prilagodba učinkovito povećava raspoloživo radno vrijeme, što doprinosi poboljšanju TEEP rezultata. Povećanjem broja radnih sati, organizacija može bolje iskoristiti svoje resurse i smanjiti neiskorišteno vrijeme, što izravno utječe na povećanje ukupne produktivnosti i učinkovitosti proizvodnog procesa. Ova taktika pomaže u maksimiziranju upotrebe opreme i smanjenju gubitaka, čime se postiže viša razina operativne izvrsnosti.

S druge strane, za bolje razumijevanje rada pojedine opreme, potrebno je pogledati OEE (Overall Equipment Effectiveness) metriku. OEE metrika ne uzima u obzir koliko smjena ili koliko dana određeni komad opreme radi. To znači da broj smjena ili radnih dana neće utjecati na stopu učinkovitosti OEE-a. OEE je posebno prikladan za usporedbu dva ili više komada proizvodne opreme koji imaju različite radne sate. Statistika OEE-a započinje od raspoloživog radnog vremena, a ne od ukupno raspoloživog vremena, čime se eliminira utjecaj planiranih zastoja na konačni rezultat. OEE se fokusira na ocjenjivanje koliko učinkovito pojedini komad opreme radi tijekom svog raspoloživog radnog vremena, pružajući vrijednu mjeru njegove operativne učinkovitosti. Ova metrika omogućava detaljnu analizu performansi opreme kroz tri ključna faktora: dostupnost, učinkovitost i kvalitetu. Dostupnost mjeri vrijeme kada je oprema stvarno u funkciji u odnosu na planirano radno vrijeme, učinkovitost mjeri stvarnu proizvodnu brzinu u odnosu na maksimalnu moguću brzinu, a kvaliteta mjeri broj ispravnih proizvoda u odnosu na ukupnu proizvodnju. OEE je vrlo korisna metrika za prepoznavanje područja koja zahtijevaju poboljšanje. Na primjer, ako je OEE niska zbog niske dostupnosti, to može ukazivati na česte kvarove ili produženo vrijeme postavljanja. Ako je niska zbog niske učinkovitosti, to može značiti da oprema ne radi punom brzinom. Ako je niska zbog loše kvalitete, to može ukazivati na visoku stopu defektnih proizvoda. Osim toga, OEE omogućava organizacijama da usporede performanse različitih komada opreme, čak i ako imaju različite rasporede rada. Ovo je posebno korisno za identificiranje najbolje prakse i standardizaciju operacija diljem proizvodnog pogona. Fokusiranjem na raspoloživo radno vrijeme i eliminiranjem utjecaja planiranih zastoja, OEE pruža preciznu sliku operativne učinkovitosti, omogućavajući menadžmentu da donosi informirane odluke za poboljšanje proizvodnih procesa i optimizaciju resursa.



*Slika 16. Vizualni prikaz kalkulacije OEE-a*

Prikaz poznat kao "vodopadni dijagram" može se vidjeti na Slici 16. Dostupno vrijeme rada za proizvodnju postupno se smanjuje specifičnim kategorijama gubitaka. Ovo smanjenje odvija se korak po korak, pri čemu se preostalo vrijeme prenosi na sljedeću kategoriju i dalje smanjuje gubicima specifičnim za tu kategoriju. Ovaj proces se nastavlja sve dok se ne uzmu u obzir sve kategorije. OEE (Ukupna učinkovitost opreme) može se odrediti množenjem pojedinih kategorija, pri čemu svaka kategorija predstavlja preostalo vrijeme umanjeno za gubitke pripisane određenoj kategoriji. Ove kategorije obično se nazivaju Planirana dostupnost, Spremnost za proizvodnju, Učinkovitost i Kvaliteta. Vodopadni dijagram omogućava vizualni prikaz smanjenja dostupnog vremena rada kroz različite faze i pomaže u prepoznavanju područja gdje se mogu napraviti poboljšanja za povećanje ukupne učinkovitosti opreme. Svaka od ovih komponenti doprinosi ukupnom izračunu OEE-a. Gubici povezani s svakom kategorijom detaljno su prikazani u Tablici 11.

*Tablica 11. Kategorije gubitaka.*

Kategorija	Vrste gubitaka
<b>Planirani gubici dostupnosti L1</b> (svi zastoji zbrojeni)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Podešavanje</li> <li>• Kalibracija</li> <li>• Testiranje</li> <li>• Modifikacije</li> <li>• Proizvodnja uzoraka</li> <li>• Pauze</li> </ul>

<b>Neplanirani gubici dostupnosti L2</b> (svi zastoji zbrojeni)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zastoji (&gt; 10 min)</li> <li>• Nedostatak materijala</li> <li>• Nedostatak osoblja</li> <li>• Nedostatak radnog naloga</li> <li>• Nedostatak izvora energije</li> </ul>
<b>Gubici zbog reakcije L3</b> (Preostalo izgubljeno vrijeme kada se izračuna teoretski broj proizvoda)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kratki, nedokumentirani zastoji.</li> <li>• Prazan hod</li> <li>• Smanjena brzina proizvodnje</li> </ul>
<b>Gubici kvalitete L4</b> (neispravni proizvodi pomnoženi taktom stroja)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nesukladni proizvodi</li> <li>• Dorada</li> </ul>

Kada se vrši izračun, ključno je pravilno postaviti takt stroja. Takt je vrijeme koje je stroju potrebno da izradi jedan proizvod, sastavi ili drugi mjerljivi radni element. Precizan izračun OEE-a ovisi o pravilnom vremenu takta. Izračunavanje gubitaka odvija se preko jednadžbi 5-8:

$$L1 = \text{vrijeme podešavanja (min)} + \text{testiranje (min)} + \text{pauze (min)} + \dots \quad (5)$$

$$L2 = \text{zastoji (min)} + \text{nedostatak materijala (min)} + \text{kvarovi (min)} + \dots \quad (6)$$

$$L3 = \left( \frac{\text{Vrijeme rada (min)} - L1 - L2 - L4}{\text{takt (min)}} - \text{dobri proizvodi (kom)} \right) * \text{takt (min)} \quad (7)$$

$$L4 = \text{takt (min)} * \text{nesukladni proizvodi (kom)} \quad (8)$$

Svaka kategorija gubitaka je definirana, objašnjiva i mjerljiva. No, u kategoriji gubitaka zbog performansi može se samo navesti koliko je vremena izgubljeno zbog loših performansi. Na primjer, u neplaniranim gubicima dostupnosti može se sastaviti popis prekida koji objašnjavaju zašto je vrijeme izgubljeno. U gubicima kvalitete može se točno prebrojati broj neispravnih komada koji se pretvaraju u izgubljeno proizvodno vrijeme. Međutim, u kategoriji gubitaka zbog performansi teško je objasniti zašto je izgubljeno vrijeme izgubljeno. To su svi mali zastoji koji nisu dokumentirani na bilo koji način. To uključuje kasni odgovor radnika na zaustavljanje stroja zbog ponavljajućih radnji kao što su: punjenje sirovina, pakiranje, inspekcija ili zamjena spremnika proizvoda, kao i druge kratke smetnje. Izračunava se poznavanjem takta stroja i dostupnog neto operativnog vremena. Svi proizvodi koji nisu proizvedeni, a trebali su biti u određenom razdoblju (koristeći takt stroja) izravna su posljedica gubitaka zbog performansi. Kada je izračun izgubljenog vremena napravljen, konačni izračun OEE-a je prikazan jednadžbama 9-12:

$$OEE = \frac{\text{Operativno vrijeme}}{\text{Vrijeme rada}} * \frac{\text{Operativno vrijeme neto}}{\text{Operativno vrijeme}} * \frac{\text{Iskoristivo operativno vrijeme}}{\text{Operativno vrijeme neto}} * \frac{\text{Produktivno vrijeme}}{\text{Iskoristivo operativno vrijeme}} \quad (9)$$

ili skraćeno:

$$OEE = \frac{T_o}{T} * \frac{T_{no}}{T_o} * \frac{T_u}{T_{no}} * \frac{T_p}{T_u} \quad (10)$$

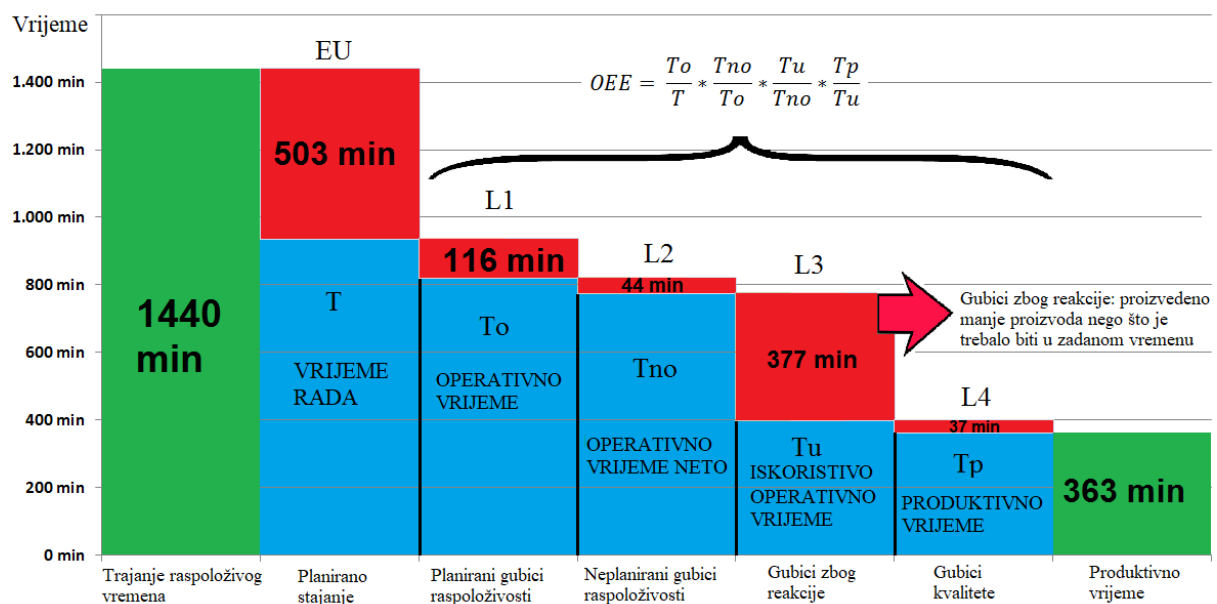
Pojednostavljanjem jednadžbe, OEE je:

$$OEE = \frac{T_p}{T} * \frac{T_{no}}{T_o} * \frac{T_u}{T_{no}} * \frac{T_p}{T_u} = \frac{T_p}{T} \quad (11)$$

Budući da je količina produktivnog vremena izravna posljedica gubitaka, konačni izračun OEE-a je sljedeći:

$$OEE = \frac{\text{Produktivno vrijeme}}{\text{Vrijeme rada}} = \frac{T_p}{T} = \frac{T - L_1 - L_2 - L_3 - L_4}{T} = \frac{T - \sum L_n}{T} = 1 - \frac{\sum L_n}{T} \quad (12)$$

Primjer vodopadnog dijagrama OEE-a s stvarnim brojevima zabilježenih gubitaka prikazan je na Slici 17. Kategorije gubitaka prikazane su za razdoblje od 24 sata. OEE analiza provedena je u velikoj proizvodnoj tvrtki tijekom razdoblja od 24 sata u kojem su dvije smjene radnog vremena. Mjerenje zastoja obavljeno je na stroju za štancanje koji proizvodi metalne dijelove od sirovog metalnog traka. Ovo je primjer stvarne OEE analize. U jednom danu postoji 1440 minuta ukupno raspoloživog vremena za proizvodnju.



Slika 17. Kategorije proizvodnih gubitaka prema OEE analizi

Kao što je ranije spomenuto, OEE analiza ne uzima u obzir vrijeme planiranih prekida kako bi se dobili objektivni podaci za usporedbu između proizvodnih linija ili strojeva. Ključno je, prilikom bilježenja gubitaka i izračuna OEE-a, dodijeliti svaki gubitak odgovarajućoj kategoriji. To omogućuje precizno praćenje različitih vrsta gubitaka i identificiranje područja za poboljšanje. Za dobivanje potrebnih podataka može se generirati jednostavan obrazac za operatore kako bi lako i brzo zabilježili događaje zastoja. Ovaj obrazac treba biti jednostavan za upotrebu kako bi se osiguralo da operateri redovito i točno unose podatke. Obrazac treba sadržavati sljedeće podatke za izračun OEE-a: datum, smjena, operater, proizvod koji je bio na stroju tijekom zastoja, kratki opis zastoja (više od 10 minuta) i trajanje zastoja. Gubici koji traju manje od 10 minuta utjecat će na kategoriju iskoristivog operativnog vremena u smislu izgubljenih proizvoda koji su teoretski trebali biti proizvedeni u zadanom vremenu. Iako su ti kratki zastoji često zanemareni, oni mogu značajno utjecati na ukupnu učinkovitost opreme. Stoga je važno i njih uzeti u obzir prilikom analize podataka. Korištenjem ovih obrazaca, organizacije mogu preciznije pratiti sve vrste zastoja i gubitaka, te tako bolje razumjeti kako različiti čimbenici utječu na operativnu učinkovitost. Na temelju prikupljenih podataka, mogu se poduzeti konkretne mjere za smanjenje zastoja i povećanje produktivnosti. Redovito praćenje i analiza ovih podataka pomažu u stalnom poboljšanju proizvodnih procesa i optimizaciji korištenja opreme.

Implementacija TPM-a za veliku proizvodnu tvrtku provodila se prema ovom modelu implementacije. Nakon šest mjeseci, prosječni OEE rezultat na strojevima i opremi koja je uključena u TPM metodologiju porastao je za 12%.

Poboljšanje OEE rezultata rezultat je nekoliko ključnih faktora. Prvo, reakcije na održavanje su sada puno brže zahvaljujući dostupnosti ključnih rezervnih dijelova. To znači da, u slučaju kvara, potrebni dijelovi su odmah dostupni, što znatno smanjuje vrijeme zastoja. Operateri su obučeni da prepoznaju i prijavljuju probleme čim se pojave, omogućavajući timovima za održavanje da brzo reagiraju i poprave kvarove prije nego što eskaliraju u veće probleme. Drugo, strojevi se redovito održavaju i čiste od strane operatera. Ova redovita rutina čišćenja i osnovnog održavanja ne samo da poboljšava performanse strojeva, već i produžava njihov vijek trajanja. Operateri su odgovorni za dnevne inspekcije, podmazivanje i osnovne popravke, što smanjuje potrebu za intervencijama od strane specijaliziranih tehničara. Kontinuirano praćenje OEE rezultata omogućava menadžmentu da identificira trendove i područja koja zahtijevaju dodatnu pažnju. Redovito praćenje također pomaže u procjeni učinkovitosti implementiranih poboljšanja i prilagodbi strategija prema potrebi. Na temelju



ovih podataka, mogu se poduzeti ciljane akcije za daljnje smanjenje zastoja i povećanje produktivnosti. Preventivno održavanje je još jedan ključni element uspjeha TPM-a. Planirano i pravovremeno održavanje sprječava velike, skupe i neočekivane kvarove, čime se povećava dostupnost opreme. Redovito održavanje uključuje zamjenu dijelova koji su podložni habanju prije nego što dođe do kvara, što pomaže u održavanju visoke razine operativne učinkovitosti. Sve ove mjere zajedno doprinose značajnom poboljšanju ukupne produktivnosti i učinkovitosti proizvodnih procesa. Tvrtka ne samo da bilježi povećanje OEE rezultata, već i smanjenje troškova održavanja i povećanje zadovoljstva zaposlenika, koji sada rade u učinkovitijem i predvidljivijem radnom okruženju. Ove pozitivne promjene također mogu dovesti do povećanja konkurentnosti tvrtke na tržištu.

## 6. INTEGRACIJA SUVREMENIH TEHNOLOGIJA U TPM

Uz automatizaciju, rast ušteda vidljiv je i na ljudskim resursima. Radna mjesta često su optimizirana na način da jedan radnik opslužuje više radnih stanica. Radna stanica podrazumijeva prostor kojim upravlja jedan radnik. Sve češće je slučaj da jedan radnik opslužuje nekoliko strojeva. U takvoj proizvodnji, prekidi su česti zbog potrebe radnika da postavi stroj u ispravno radno stanje. Iako izračuni o organizaciji rada pokazuju da je određeni broj radnika dovoljan za određeni broj radnih stanica, u praksi je teško postići idealnu raspodjelu rada. Jedan od razloga za to je slaba svijest radnika o zastojsima na radnim stanicama. Svaki trenutak radnik mora imati potpuni i točan pregled stanja radnih stanica kako bi mogao najučinkovitije rasporediti svoje vrijeme. Strojevi mogu biti nedostupni zbog planiranih aktivnosti održavanja ili neočekivanih kvarova. Za uspješnu tvrtku koja želi održavati svoje visoke radne standarde, strojevi moraju uvijek raditi na optimalnim razinama [44]. To se može postići implementacijom modernih rješenja temeljenih na konceptu Industrije 4.0.

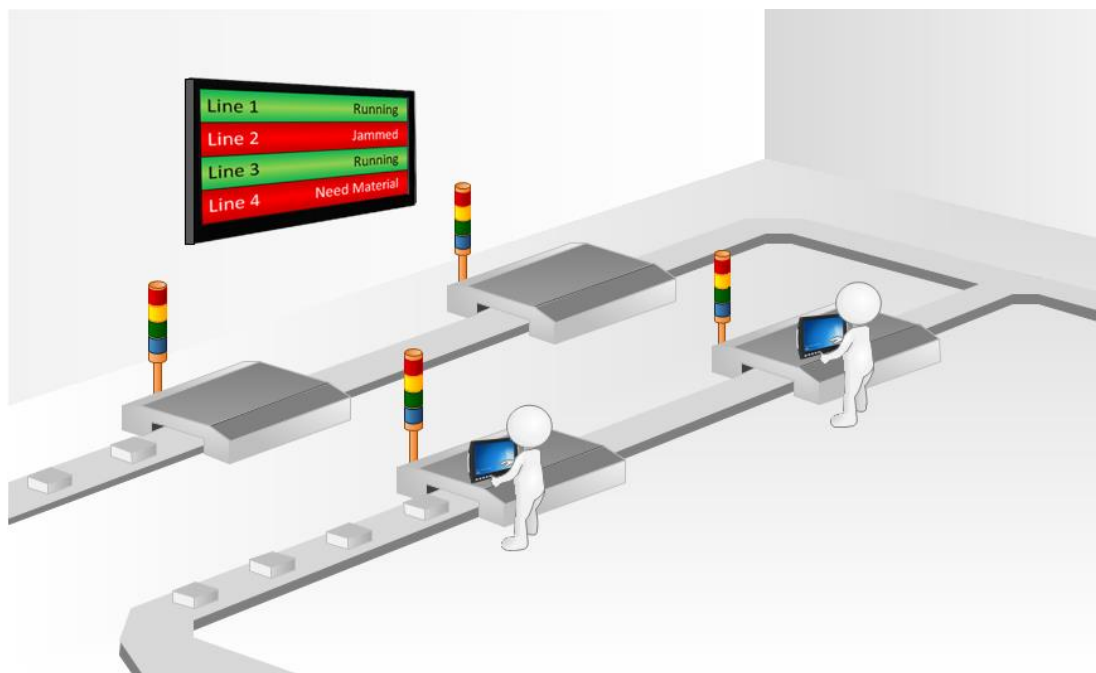
Prepoznato je da paradigma Industrije 4.0 (I4.0) može pomoći u smanjenju negativnog utjecaja nekih od aspekata spomenutih u studiji. I4.0 odnosi se na četvrtu industrijsku revoluciju, karakteriziranu integracijom digitalnih tehnologija, automatizacije i razmjene podataka u proizvodne procese. I4.0 uključuje korištenje tehnologija poput Interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije i tehnologiju velikih podataka za stvaranje „pametnih tvornica“ zbog učinkovitije i međusobno povezane industrijske proizvodnje. Postoji pozitivna korelacija između lean automatizacije (LA) i operativne izvedbe unutar okruženja Industrije 4.0. Integracija LA tehnologija pozitivno utječe na produktivnost, isporuku, upravljanje inventarom i kvalitetu—sve ključne pokazatelje izvedbe [82]. Autori studije [83] naglašavaju transformativni učinak I4.0 na proizvodnu dinamiku, zamjenjujući konvencionalno planiranje temeljeno na prognozama stvarnim planiranjem i dinamičkom samooptimizacijom u stvarnom vremenu. Studija ističe važnost IoT uređaja u prikupljanju podataka za prediktivno održavanje i naglašava osnažujući učinak digitalnih blizanaca (Digital Twin -DT) na TPM. Studija [84] sugerira da virtualna stvarnost (Virtual Reality -VR), kao dio I4.0, može poslužiti kao zamjena za fizičke ploče u vođenju operatera i njihovoj obuci za ciljeve održavanja. Ovo ima potencijal za poboljšanje obrazovnih i obučnih rezultata. Osnovni koncept u studiji [85] usmjeren je na uvođenje mrežno povezanih inteligentnih sustava unutar I4.0, s ciljem postizanja samoregulirajućih proizvodnih procesa. Autori [86] naglašavaju ulogu podatkovne

znanosti u I4.0, pretvarajući podatke u stvarnom vremenu u značajno znanje. Ovo uključuje aktivnosti poput prikupljanja, provjere, transformacije i restrukturiranja podataka, ističući važnost donošenja odluka temeljenih na podacima.

Transparentnost podataka i njihova spremna dostupnost ključne su prednosti koje nudi Industrija 4.0. Jednostavan pristup podacima u stvarnom vremenu putem integriranih sustava smanjuje mukotrpan zadatak ručnog popunjavanja obrazaca za izračune ukupne učinkovitosti opreme (OEE). Ova značajka može značajno povećati motivaciju i zadovoljstvo zaposlenika, jer im omogućava da se usmjere na produktivnije zadatke umjesto na administrativne poslove. Ova pojednostavljena dostupnost podataka čini donošenje odluka točnijim i pravovremenijim, omogućujući brze reakcije na operativne izazove. Simulacijske sposobnosti koje donosi Industrija 4.0 igraju ključnu ulogu u dobivanju uvida u prikladnost izbora opreme za implementaciju TPM-a. Korištenjem simulacija, proizvođači mogu procijeniti kompatibilnost opreme s lean filozofijama, što doprinosi informiranom donošenju odluka tijekom procesa implementacije. Ove simulacije omogućuju testiranje različitih scenarija bez ometanja stvarne proizvodnje, što rezultira optimalnim odlukama vezanim uz opremu i proizvodne procese. Internet stvari (IoT), integralna komponenta Industrije 4.0, omogućava dohvat podataka u stvarnom vremenu koji su ključni za praćenje performansi opreme. Ovi podaci su ključni za osiguravanje kontinuiranog poboljšanja učinkovitosti opreme i usklađivanje s principima TPM-a. Korištenjem IoT tehnologija, moguće je pratiti stanje opreme, predvidjeti kvarove i planirati održavanje prije nego što dođe do ozbiljnih problema. Ova prediktivna održavanja pomažu u smanjenju neplaniranih zastoja i povećavaju raspoloživost opreme. Integrirane funkcije, simulacije i prikupljanje podataka u stvarnom vremenu unutar Industrije 4.0 pozitivno utječu na zadovoljstvo zaposlenika. Eliminacija potrebe za ručnim prikupljanjem podataka povećava učinkovitost radnih procesa, doprinoseći zadovoljnijem i produktivnijem radnom okruženju. Zaposlenici se mogu više fokusirati na analizu podataka i donošenje strateških odluka, umjesto na administrativne zadatke. Integracija tehnologija Industrije 4.0 nudi obećavajuća rješenja za izazove identificirane u lean proizvodnji. Od poboljšanja operativnih performansi putem automatizacije, do planiranja u stvarnom vremenu, primjene virtualne stvarnosti (VR), samoregulirajuće proizvodnje i korištenja podatkovne znanosti, ove tehnologije otvaraju put za učinkovitije i prilagodljivije proizvodno okruženje. VR može poslužiti kao zamjena za fizičke ploče u vođenju operatera i njihovoj obuci za ciljeve održavanja, poboljšavajući obrazovne i obučne rezultate. Usvajanje principa Industrije 4.0 može doprinijeti prevladavanju prepreka i osigurati uspješnu

implementaciju i održivost lean alata i TPM praksi. Korištenje stvarnih podataka za donošenje odluka, automatsko prikupljanje podataka i prediktivno održavanje ključni su elementi za postizanje visoke razine operativne izvrsnosti. Primjena naprednih tehnologija omogućuje tvrtkama da ostanu konkurentne i prilagodljive u brzo mijenjajućem poslovnom okruženju.

Bežična tehnologija već se koristi u proizvodnji, posebno s alatom Andon (aspekt lean proizvodnje) za otkrivanje zastoja. Andon je dio lean proizvodne filozofije čiji je cilj upozoriti ili obavijestiti kada dođe do kvara ili neuspjeha u proizvodnji. Njegov cilj je obavijestiti menadžment, održavanje ili druge radnike da proces ima problem s kvalitetom ili da je proces zaustavljen. Andon se može implementirati kao svjetlosni panel koji označava stanje proizvodnje, zaslon s informacijama o proizvodnim linijama ili na neki drugi način. Moderni Andon sustavi mogu uključivati tekst, grafiku ili audio elemente. Audio upozorenja mogu se vršiti pomoću kodiranih tonova, glazbe s različitim melodijama koje odgovaraju raznim upozorenjima ili unaprijed snimljenih verbalnih poruka. Autori istraživanja [87] razvili su analitičke modele za proučavanje performansi prijenosne proizvodne linije koristeći Andon. Također su istražili uvjete pod kojima bi Andon trebao biti uveden i implementiran. Autori su pokazali da, kada su prosječna vremena popravka kratka, uvođenje Andona za zaustavljanje linije i popravak svih nedostataka na liniji učinkovit je način za postizanje visokog stupnja propusnosti bez grešaka. Ilustracija Andon sustava prikazana je na slici 18.



*Slika 18. Ilustracija Andon sustava*

Andon se može prilagoditi za bilo koju proizvodnju, uključujući specijalne proizvodne linije s funkcijama koje uključuju nadzor. Ovaj sustav može učinkovito riješiti probleme fleksibilnosti tradicionalnog Andon sustava u promjenjivim i specijalnim linijama [88].

Uzimajući u obzir stalni rast proizvodnih tvrtki širom svijeta, poduzeća moraju usvojiti nove metode upravljanja, poboljšati konkurentnost na tržištu i smanjiti troškove proizvodnje. Autori [89] predložili su inteligentni sustav upravljanja informacijama u proizvodnji koji može digitalizirati proizvodni proces. Njihovom implementacijom, točnost procesa se poboljšala, troškovi rada su smanjeni, a učinkovitost upravljanja se povećala.

Prikupljanje podataka za analizu OEE-a je mukotrpan i vremenski zahtjevan zadatak. Također, ručno popunjavanje obrazaca nosi veliki rizik od ljudske pogreške i netočnih podataka. Suvremene tehnologije nude razna rješenja u smislu automatskog bilježenja podataka. Autori istraživanja [90] navode da je cilj njihove istraživanja utvrditi ključne faktore i moguće nedostatke u automatskom izračunu OEE-a. To je postignuto analizom sirovih podataka dobivenih iz širokog prikupljanja podataka korištenih za evaluaciju OEE-a; 23 zasebne tvrtke i 884 uređaja. Prosječni OEE procijenjen je na 65%. Budući da su kategorije gubitaka bile ili nepotpune ili su imale neadekvatne definicije, gotovo polovica prijavljenih OEE gubitaka nije mogla biti kategorizirana. Štoviše, 90% identificiranih zastoja moglo se specifično pripisati podršci koju su provodili radnici, a ne samom automatiziranom procesu. Kako bi se u potpunosti istražio kapacitet sustava za automatsko prikupljanje podataka i dobile pouzdane OEE mjere koje se mogu koristiti za poboljšanje proizvodne učinkovitosti, rezultati i preporuke ovog istraživanja mogu se implementirati.

Održavanje proizvodne opreme i pouzdanost proizvodnog sustava ključni su faktori koji utječu na sposobnost organizacije da dosljedno isporučuje kvalitetne proizvode na vrijeme [91]. Iako je održavanje kritična funkcija za proizvodnju, tek nedavno je kvantificiran utjecaj održavanja na proizvodne kapacitete opreme. U svom istraživanju, autori su nastojali uspostaviti vezu između održavanja i performansi održavane opreme koristeći simulacijsko modeliranje. Pristup temeljen na modeliranju uključivao je definiranje probabilističkih modela i pretpostavki koje utječu na svojstva sustava. Neki od modela koje su predložili uključuju probabilistički model za identifikaciju početnog uzroka problema, probabilistički model za prepoznavanje kvarova zbog starenja opreme i model koji određuje koji pristup održavanju, korektivni ili preventivni, je najbolji za korištenje na temelju parametara danog

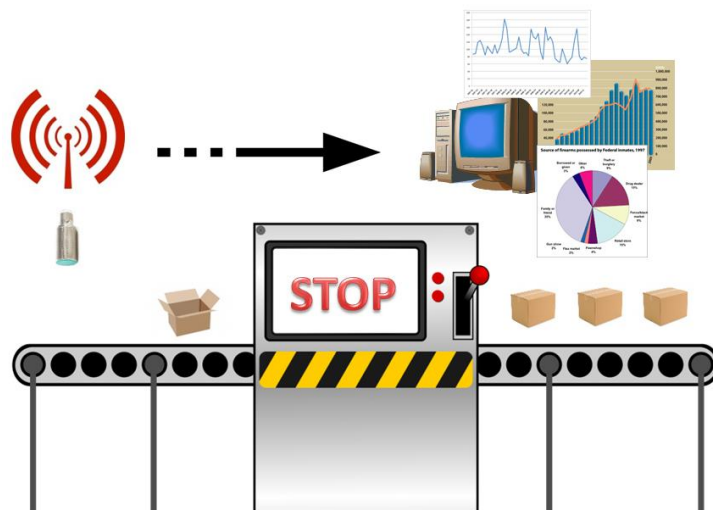
sustava. Utvrđeno je da ovi modeli pružaju osnovu za uspostavljanje strategije održavanja i mogu služiti kao alati za podršku odlučivanju.

### 6.1. TPM i integracija s paradigmom Internet stvari

Sama činjenica da tablica potrebnih podataka za izračun OEE-a izgleda složeno sugerira da je prikupljanje podataka za analizu OEE-a mukotrpan i vremenski zahtjevan proces. Ne treba spominjati mogućnost pogrešaka. Često nema osposobljene osobe koja prikuplja podatke, pa taj posao pada na radnike na proizvodnoj liniji. Zbog svakodnevnih rutina aktivnosti, radnici koji su zaduženi za prikupljanje podataka često imaju tendenciju da površno ispunjavaju obrasce za podatke. Osim toga, prikupljanje podataka je također vremenski zahtjevan proces za administrativnog radnika koji interpretira podatke s listova i prevodi ih u složene tablice kako bi dobio smisleni broj. Ovaj zadatak zahtijeva mnogo ručnog rada, uključujući unos podataka, provjeru točnosti i izračunavanje konačnih vrijednosti. Svaka pogreška u ovom procesu može dovesti do netočnih rezultata i loših odluka temeljenih na tim rezultatima. Ručni proces prikupljanja podataka također stvara dodatno opterećenje za radnike, koji uz svoje redovne zadatke moraju pratiti i bilježiti različite podatke. To može dovesti do stresa i smanjenja produktivnosti, jer radnici možda neće imati dovoljno vremena ili motivacije da precizno prikupe i zabilježe sve potrebne informacije. Osim toga, prikupljanje podataka na ovaj način može biti nepraktično za velike tvrtke s mnogo strojeva i proizvodnih linija. Administrativni radnici moraju ručno unositi i analizirati velike količine podataka, što može biti vrlo naporno i dugotrajno. Ovaj proces ne samo da troši vrijeme i resurse, već i povećava rizik od pogrešaka koje mogu utjecati na točnost OEE izračuna. Korištenje modernih tehnologija za automatsko prikupljanje podataka može značajno smanjiti ove probleme. Automatski sustavi za prikupljanje podataka mogu kontinuirano i precizno pratiti performanse strojeva, bilježiti sve potrebne podatke i automatski generirati izvješća. To ne samo da smanjuje opterećenje radnika, već i povećava točnost i pouzdanost prikupljenih podataka. Implementacija ovih tehnologija može također poboljšati transparentnost i vidljivost operativnih performansi, omogućujući menadžerima da brzo identificiraju probleme i donose informirane odluke za poboljšanje proizvodnog procesa. Na taj način, tvrtke mogu postići bolje rezultate i povećati svoju konkurentnost na tržištu.

Relativno novi koncept Internet of Things (IoT) predstavlja mrežni sustav povezivanja fizičkih uređaja, vozila, zgrada i drugih predmeta na način koji im omogućuje prikupljanje i razmjenu podataka. Ovi uređaji su ugrađeni u elektroniku, softver, senzore i aktuator. Također se nazivaju "povezani" ili "pametni uređaji". U osnovi, to je povezivanje stvari na mrežu kako bi se dobili podaci ili pratili ulazi fizičkih uređaja ili predmeta. IoT nadilazi komunikacije između strojeva (M2M) i obuhvaća različite protokole, domene i primjene [92]

Nedavno je ovaj koncept postao vruća tema u znanosti i industriji koja definitivno može imati koristi od njega. Prema IoT-u, jedinstveno identificirani objekti mogu neizravno ili izravno prikupljati, obrađivati ili razmjenjivati podatke putem širokopojasne mreže - Interneta. Istraživanje ovog koncepta rezultiralo je razvojem više novih tehnologija [93]. Godine 2011. Yang je proveo analizu i dizajn sustava upravljanja mehaničkom proizvodnjom na temelju stvarnog poslovnog procesa temeljenog na IoT-u. Njihov rad analizira funkcionalne zahtjeve sustava kombinirajući karakteristike proizvodne linije [94]. Chen [95] je prepoznao da je IoT trenutno rastuća i popularna tehnologija kako u zemlji tako i u inozemstvu, donoseći značajne promjene u proizvodnji. IoT također donosi bez presedana izazove za softver, pa čak i za cijelo područje informacijske tehnologije. S brzim razvojem koncepta i tehnologija računalstva u oblaku, sve više poslovnih modela temeljenih na oblaku i praktičnih primjena pojavljuje se u industrijskim okruženjima, uključujući proizvodnju i logistiku u oblaku. U okviru IoT okruženja, moguće je kreirati i primijeniti logistiku proizvodnje temeljenu na oblaku [96]. IoT može pronaći svoju primjenu u mnogim područjima proizvodnje. Na primjer, može se koristiti za Just In Time (JIT) Milk Run (MR) koji omogućava iterativno planiranje ruta na temelju dinamike izvršavanja u stvarnom vremenu kako bi se ostvarila adaptivna kontrola MR dinamike [97]. Za potrebe prikupljanja podataka za analizu OEE-a može se koristiti sličan koncept. Primjer koncepta prikazan je na slici 19.



*Slika 19. Primjer sustava za praćenje zastoja*

Ako se na stroj postavi senzor koji signalizira kada stroj radi, a kada ne, to se može koristiti kao ulazni signal za softver koji prati zastoje. Dostupni su različiti softverski sustavi sposobni za obavljanje takvih zadataka. Naravno, može se napraviti i prilagođeni softver kako bi se zadovoljile specifične potrebe praćenja proizvodnje. Može se izraditi sučelje koje će imati sve nepromjenjive podatke potrebne za analizu OEE-a povezane s određenim strojem ili proizvodnom linijom: informacije o radnom mjestu, informacije o radnom komadu, broj smjena, broj radnih sati i takt proizvodne linije. Zastoji bi se pratili na način da, kada dođe do kvara, softver započne brojanje i zabilježi točno vrijeme i datum kada se kvar dogodio. Nakon što je kvar otklonjen, radnik bi jednostavno odabrao jednu od unaprijed definiranih mogućnosti kvara kao što su: potreba za sirovinom, pakiranje, inspekcija, zamjena spremnika proizvoda, održavanje, pauza za ručak, elektronika, hidraulika, mehanika, stanica 1, stanica 2 i tako dalje. Svaki od kvarova bio bi povezan s jednom od kategorija gubitaka i automatski dodijeljen toj kategoriji, budući da analiza ukupne učinkovitosti opreme zahtijeva kategorizaciju gubitaka. Prednost ovakvog sustava je u tome što omogućuje automatsko i točno prikupljanje podataka bez potrebe za ručnim unosom, što smanjuje mogućnost ljudskih pogrešaka i povećava točnost podataka. Automatsko bilježenje vremena zastoja i njegovih uzroka omogućuje brzu analizu i identifikaciju glavnih uzroka zastoja, što može pomoći u donošenju informiranih odluka o poboljšanjima u proizvodnom procesu. Kada se analiza OEE-a treba napraviti, to se može obaviti u nekoliko minuta. Više ne bi bilo potrebno nekoliko tjedana za dovršetak statistike. Sve što bi bilo potrebno je odabrati vremenski period koji se želi uzeti u obzir za analizu i unijeti količine. Softver bi automatski generirao izvještaje i proračune temeljene na prikupljenim podacima. Podaci iz programa bili bi slični onima na slici 20.



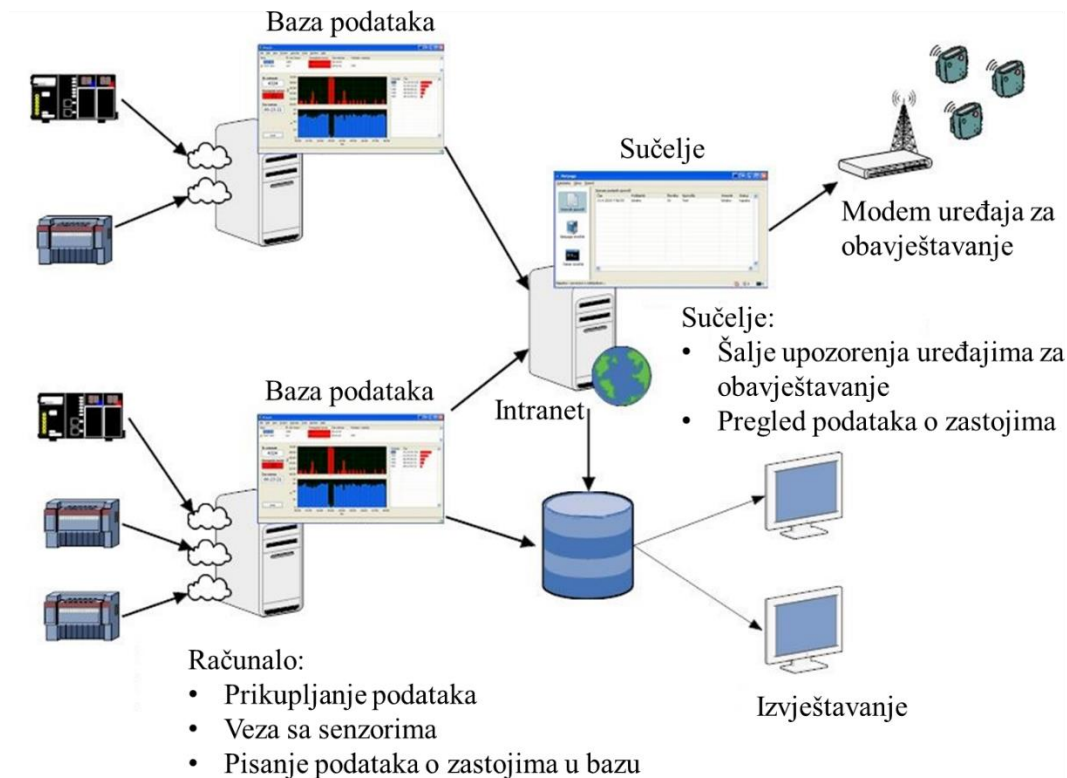
Ovakav pristup omogućuje kontinuirano praćenje i analizu učinkovitosti proizvodnog procesa, što može dovesti do značajnih poboljšanja u produktivnosti i smanjenju vremena zastoja. Također, omogućuje bolje planiranje i optimizaciju resursa, jer menadžeri mogu imati točne i pravovremene informacije o stanju opreme i proizvodnih linija. U konačnici, integracija ovakvih tehnologija može dovesti do većeg zadovoljstva zaposlenika, jer se smanjuje njihovo opterećenje administrativnim zadacima i omogućuje im se da se usmjere na produktivnije aktivnosti.

Stroj	Proizvod	Takt[s]	Smjena	Datum	Start	Kraj	Razlog	Trajanje	Napomena
M1	A	4.1	3	03/09/2023	13:30:55	13:38:02	Punilo	00:07:07	Zamjena sirovine
M1	A	4.1	3	03/09/2023	18:52:43	19:07:45	Održavanje	00:15:02	Podmazivanje
M1	A	4.1	3	04/09/2023	10:20:23	12:03:33	Hidraulika	01:43:10	Zamjena hidrauličkog ventila
M1	A	4.1	3	04/09/2023	14:05:22	14:08:03	Proizvod	00:02:41	Zamjena kutije s proizvodom
M4	B	8.5	2	05/09/2023	09:06:56	09:45:22	Pneumatika	00:38:26	Zamjena zračnog filtera
M1	A	4.1	3	05/09/2023	11:02:07	12:01:45	Trening	00:59:38	Edukacija djelatnika
M3	C	12.8	1	06/09/2023	10:00:59	10:31:02	Pauza	00:30:03	Pauza za ručak
M1	A	4.1	3	06/09/2023	12:05:52	13:55:06	Inspekcija	01:49:14	Planirano održavanje
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

*Slika 20. Podaci vezani uz zastoje na proizvodnom stroju ili liniji*

Praćenje zastoja može se obaviti ručno, ali podaci često nisu točni i obično su prestari da bi se uzeli u obzir i ne mogu se učinkovito koristiti. Softver za praćenje podataka OEE može automatski prikupljati podatke o zastojima i sastavljati ih na način koji je jednostavan za korištenje. Na kraju, ova procedura može uštedjeti mnogo vremena i eliminirati moguće pogreške u interpretaciji podataka. Često nije krivica radnika ako odmah ne primijeti zastoj u proizvodnji jer, kao što je ranije spomenuto, oni su pod stalnim pritiskom jer često rade na nekoliko strojeva ili proizvodnih linija istovremeno, opskrbljujući ih svježim materijalom i pružajući druge oblike pomoći. Kako bi se smanjili gubici performansi, predlaže se integrirani bežični sustav za obavještanje. Integrirani sustav za obavještanje, prikazan na slici 21, upozorio bi radnika na zastoj. Ovaj sustav obavještanja omogućuje radnicima da brzo reagiraju na zastoje, čime se smanjuje vrijeme neproduktivnosti i povećava ukupna učinkovitost. Kada se dogodi zastoj, sustav automatski šalje obavijest radniku, koji može odmah poduzeti potrebne mjere za otklanjanje problema. Time se smanjuje rizik od dugotrajnih zastoja i omogućuje kontinuirani rad proizvodne linije. Prednosti korištenja ovakvih sustava su brojne. Prvo, automatizacija prikupljanja podataka smanjuje opterećenje radnika i omogućuje im da se usmjere na ključne zadatke. Drugo, točnost prikupljenih podataka je znatno veća, što omogućuje precizniju analizu i donošenje informiranih odluka. Treće, brza obavijest o zastojima omogućuje trenutnu reakciju, smanjujući gubitke i povećavajući produktivnost.

Implementacija bežičnog sustava za obavještanje također poboljšava radno okruženje, jer radnici mogu raditi sigurnije i učinkovitije, znajući da će biti odmah obavješteni o bilo kakvim problemima. U konačnici, ovakvi sustavi pridonose postizanju većeg stupnja operativne izvrsnosti i konkurentnosti na tržištu, jer omogućuju optimizaciju proizvodnih procesa i smanjenje vremena neproduktivnosti.



*Slika 21. Model integriranog bežičnog sustava za obavještanje*

Osnovni sustav za obavještanje sastojao bi se od senzora povezanih na strojeve, industrijskog računala s bazom podataka za prikupljanje podataka o radu strojeva, intranet sučelja, modema za obavještanje i uređaja za obavještanje. Senzori šalju informacije računalima na strojevima koja prikupljaju podatke u bazu podataka, čineći podatke spremnima za analizu u bilo kojem trenutku. Intranet sučelje prima podatke s računalnih strojeva i šalje ih na modem za obavještanje. Modem za obavještanje zatim šalje podatke bežičnim personaliziranim uređajima za obavještanje, ovisno o tome koji je stroj u zastoju.

Ako je radnik odgovoran za grupu strojeva, imat će personalizirani uređaj za obavještanje koji ga upozorava kada se jedan od strojeva iz njegove grupe zaustavi. Kada se stroj ili proizvodna linija zaustavi iz bilo kojeg razloga, radnik odgovoran za tu grupu strojeva može brzo odlučiti može li se odmah usredotočiti na taj stroj, riješiti problem i zatim se vratiti na svoj

prethodni zadatak. Na primjer, recimo da ima pola sata posla na stroju 1 (popravak, održavanje ili podešavanje). Stroj 2 se zaustavlja zbog nedostatka sirovine. Punjenje sirovine, na primjer, traje 5 minuta. On može odlučiti napuniti stroj 2 sirovinom i zatim se vratiti na stroj 1. U prvom slučaju, bez sustava za obavještanje, oba stroja bi bila potpuno zaustavljena na 30 minuta. Tako bi oba stroja imala ukupno sat vremena zastoja tijekom jednog dana. U drugom slučaju, ako se radnik prvo koncentrira na stroj 2 i zatim se vrati na stroj 1, to bi rezultiralo zaustavljanjem stroja 1 na 35 minuta i stroja 2 na 5 minuta. Dakle, ukupni zastoj bi bio 40 minuta za oba stroja umjesto 60 minuta. Razlika bi bila zabilježena u kategoriji gubitaka performansi. To je prednost integriranog sustava za obavještanje, redistribucija rada u slučaju više kvarova na strojevima i informiranost o zaustavljanju strojeva.

Na ovaj način se fokusiramo na gubitke performansi gdje nije sigurno zašto je vrijeme izgubljeno. U primjeru na slici 6, gubici performansi čine veliki dio ukupno izgubljenog proizvodnog vremena. Često nema objašnjenja za gubitke performansi. Jednostavno nema dovoljno proizvoda proizvedenih u zadanom vremenu. Vrlo je teško, kao što je već spomenuto, odrediti točno vrijeme i razlog kada je vrijeme izgubljeno jer su to mali i česti zastoji, obično uzrokovani kasnim reakcijama radnika zbog nedostatka informacija o zastojima ili zastojima koji nisu zabilježeni. Implementacija integriranog sustava za obavještanje imala bi učinak na smanjenje gubitaka performansi, smanjujući izgubljeno vrijeme uzrokovano kasnim reakcijama radnika. Time bi se poboljšala ukupna učinkovitost i dostupnost opreme, što izravno utječe na količinu proizvedenih proizvoda u zadanom vremenskom razdoblju.

Korištenjem IoT-a za praćenje gubitaka u održavanju, vrijeme prikupljanja podataka je kraće, a podaci su točniji i potpuniji. IoT može pronaći svoju praktičnu primjenu u gotovo svakoj proizvodnji gdje postoji potreba za praćenjem stanja i produktivnosti proizvodne opreme. Predloženi integrirani sustav za obavještanje izravno je povezan sa zastojima proizvodne opreme i učinkovitosti mjerenoj analizom OEE-a. Implementacijom takvog rješenja postiže se bolje razumijevanje i pregled proizvodne opreme.

Radnici odgovorni za grupu opreme imaju bolji uvid u stanje proizvodne opreme u stvarnom vremenu. Kada dođe do zastoja, radnici su odmah obaviješteni putem personaliziranih uređaja za obavještanje, što im omogućuje brzu reakciju i smanjenje vremena neproduktivnosti. Ovaj sustav omogućuje radnicima da učinkovito rasporede svoje vrijeme i resurse, jer su u svakom trenutku informirani o stanju svih strojeva u njihovoj odgovornosti. Analize se također mogu retrospektivno provoditi jer su svi zastoji zabilježeni u bazi podataka i pohranjeni za daljnje ispitivanje i izvlačenje podataka. To omogućuje detaljnu

analizu performansi opreme tijekom određenog vremenskog razdoblja, identifikaciju obrazaca i glavnih uzroka zastoja te donošenje informiranih odluka za optimizaciju proizvodnih procesa. Primjena IoT-a i integriranih sustava za obavještanje omogućuje sveobuhvatan pristup praćenju i upravljanju proizvodnom opremom, čime se postiže veća razina operativne izvrsnosti. Tvrtke mogu smanjiti gubitke u performansama, povećati ukupnu učinkovitost opreme i poboljšati produktivnost. Osim toga, ovakvi sustavi omogućuju bolju koordinaciju i komunikaciju među radnicima, što doprinosi ukupnom poboljšanju radnog okruženja i zadovoljstva zaposlenika. Konačno, integracija naprednih tehnologija poput IoT-a u proizvodne procese predstavlja značajan korak prema modernizaciji i digitalizaciji industrijskih operacija, omogućujući tvrtkama da ostanu konkurentne u dinamičnom i brzo mijenjajućem tržištu.

## 6.2. Heurističke metode kao tehnike optimizacije

Heurističke metode su evoluirale kako bi poboljšale procesne kapacitete računala. Pojava računala označila je značajnu prekretnicu u razvoju čovječanstva, usporedivu po važnosti čak i s pojavom pisanja. Računala uvelike povećavaju ljudske sposobnosti, kako u smislu vremena tako i kapaciteta. Korištenjem računala, osoba može u kratkom vremenu provesti veliki broj iteracija kroz algoritme, zadatak koji bi ručno trajao mjesecima ili godinama, što dovodi do relativno brzih zaključaka. S evolucijom računala, razvile su se i metode za brže otkrivanje matematičkih, organizacijskih, tehničkih i praktičnih rješenja. Jedna od grana koja je evoluirala su heurističke metode i metode "umjetne inteligencije." Općenito, heurističke metode i metode umjetne inteligencije posebno su pogodne za rješavanje problema koji se ne mogu precizno definirati i matematički formulirati. Također su prikladne za dobro definirane probleme koje bi se moglo riješiti matematičkim metodama, ali zbog nedostatka podataka, matematičke metode se napuštaju. Heurističke metode koriste se čak i kada je poznat točan matematički algoritam, ali bi samo broj nepoznanica učinio vrijeme rješavanja problema iznimno dugim. Ove metode imaju za cilj eliminirati pretraživanja za koja se, putem približnog rezoniranja, može zaključiti da vjerojatno ne sadrže optimalno rješenje. To rezultira rješenjima unutar prihvatljivog vremenskog okvira, iako se ne može dokazati da su "apsolutno" najbolja. Može se samo tvrditi da su rješenja dobivena na ovaj način, s vrlo velikom vjerojatnošću, mnogo bolja od rješenja koja bi se mogla postići bez primjene ovih metoda [98].

Heuristike posjeduju dvije značajne karakteristike povezane s matematičkim modelom:

- Heuristike često potječu iz točnijeg modela problema nego egzaktne metode jer ne zahtijevaju strogi matematički model,
- Budući da su heuristike temeljene na empirijskom znanju, prostor pretraživanja za rješenja je značajno smanjen.

Visokokvalitetni heuristički algoritam mora posjedovati nekoliko bitnih karakteristika. Da bi metoda bila praktična, ključno je dobiti željeno rješenje unutar razumnog vremenskog okvira. Budući da heuristike uključuju "žrtvovanje" nekih rješenja i njihovo odbacivanje kao malo vjerojatnih, dodatni nedostatak koji bi rezultirao značajnim trošenjem vremena ne bi bio povoljan. Prihvatanje rješenja kao dovoljno dobrog u mnogim slučajevima štedi vrijeme. Ovo prihvaćanje rješenja kao "dovoljno dobrog" ključna je osobina heuristike.

Heuristike jamče da će rješenje biti dovoljno blizu globalnom optimumu (ako ne i sam globalni optimum) da bude prihvatljivo. Nasuprot tome, vjerojatnost pronalaska lošeg rješenja mora biti vrlo niska. Da bi algoritam pronašao rješenje blizu globalnog optimuma, mora zadovoljiti uvjet stabilnosti (ostajanje u globalnom optimumu) i uvjet izbjegavanja lokalnog optimuma. Heurističke metode primjenjuju se u slučajevima kada je poznata točna metoda za rješavanje problema, ali ne postoji tehničko rješenje za primjenu te metode. Heurističke metode također nude fleksibilnost u usporedbi s točnim metodama. One su visoko primjenjive kada postoje elementi nesigurnosti, nejasnoće i subjektivne prosudbe, te kada su uključeni nelinearni elementi i višestruki kriteriji [99].

Nekoliko primarnih heurističkih metoda dostupno je za primjenu u raznim područjima: metoda "Monte Carlo", ekspertni sustavi, neuronske mreže, neizrazita logika ili evolucijsko programiranje. U metodi "Monte Carlo" (MC) umjesto sustavnog pretraživanja cijelog prostora definicije problema, istražuju se samo "nasumično" odabrane točke unutar tog prostora, a cilj je pronaći optimum među tim točkama. "Nasumično" u kontekstu računalstva često znači pseudo-nasumično, postignuto korištenjem determinističkih algoritama nazvanih "generatori slučajnih brojeva". Termin "Monte Carlo" povezan je s kockanjem, otuda i ime. Često se te odabrane točke koriste kao početni uvjeti za lokalnu matematičku optimizaciju. Postoji mnogo varijacija MC metoda. Neke od njih temelje se na nasumičnim perturbacijama postignutih lokalnih optima tijekom prethodnog pretraživanja. Zapravo, velik broj metoda umjetne inteligencije koristi metodu Monte Carlo pri donošenju odluka.

Do 1970. godine, AI hype je potpuno nestao, što je navelo mnoge vlade da smanje financiranje razvoja umjetne inteligencije. U to vrijeme, tehnologija se uglavnom koristila za igre i slične primjene, a bilo je malo ozbiljnih praktičnih primjena na vidiku. Glavni problem u razvoju AI-a bio je taj što su znanstvenici razmišljali preširoko. Vjerovali su da je moguće osmisliti jedan inteligentni algoritam koji bi mogao rješavati složene probleme iz mnogih znanstvenih područja. Kada su konačno shvatili da je postizanje toga vrlo izazovno, odlučili su primijeniti AI mogućnosti na uska znanstvena područja s ograničenom količinom podataka. Ovaj pristup doveo je do razvoja ekspertnih sustava [100].

Neuronske mreže sastoje se od sustava čvorova i veza među njima, pokušavajući simulirati funkcioniranje ljudskog mozga. U većini slučajeva, one se implementiraju u softveru, a ne u hardveru. To su posebni softverski paketi. Neuronske mreže se ne programiraju, već uče iz primjera. Primjeri i rješenja tih primjera im se "pokazuju", omogućujući računalu da automatski generira empirijska pravila. Prije upotrebe, takvi programi moraju proći "trening". Područja učinkovite primjene neuronskih mreža otprilike su ekvivalentna područjima primjene ekspertnih sustava: medicinska dijagnostika, geološka predviđanja, prepoznavanje objekata itd.

Postoje sustavi s takozvanom "neizrazitom" logikom. U klasičnoj logici, smisljena izjava može biti ili istinita ili lažna. Prema neizrazitoj logici, izjava nije potpuno istinita ili potpuno lažna; umjesto toga, može joj se dodijeliti "stupanj istinitosti". Na primjer, objekt nije potpuno svijetao ili potpuno taman, već može biti 40% svijetao i 60% taman. Uvedena su pravila za rukovanje ovom logikom koja predstavljaju generalizaciju normalne Booleove algebre. Neki se problemi rješavaju mnogo brže i lakše korištenjem ove formulacije nego korištenjem klasične logike. Ova metoda pokazala se vrlo uspješnom, posebno za probleme automatskog upravljanja u stvarnom vremenu, gdje su potrebna vrlo brza približna rješenja. Primjeri uključuju određivanje potrebne ekspozicije filma u kameri kada je jedan dio slike u mraku, a drugi dobro osvijetljen, ili prilagođavanje rada semafora na temelju trenutnih uvjeta u prometu. Kada se primjenjuje na optimizaciju, neizrazita logika često se koristi u kombinaciji s drugim determinističkim i probabilističkim algoritmima.

Genetski algoritmi inspirirani su Darwinovom teorijom prirodne selekcije: U "nultom koraku" generira se "populacija" potencijalnih rješenja korištenjem generatora slučajnih brojeva, koja zadovoljavaju propisane uvjete i nazivaju se "genomi". Među njima se odabire podskup najboljih rješenja. Najbolja rješenja su ona s najnižom vrijednošću ciljne funkcije.

Svako od tih rješenja definirano je odabranim brojem "gena". U sljedećim koracima, generiraju se "potomci" koji nasljeđuju dio genetskog koda od svakog roditelja. U ovom procesu nije nužno strogo oponašati prirodu, pa tako svaki "potomak" može imati više od dva "roditelja". Za razliku od prirode, rješenja koja su dovoljno dobra ne stare i ne umiru, već mogu "živjeti" zauvijek. Unija skupa "roditelja" i skupa "potomaka" stvara novi zajednički skup iz kojeg se ponovno odabire podskup najboljih. Osim "ukrštanja", dopuštene su i "mutacije" - nasumične promjene vrijednosti gena. Ovo je uvedeno kako bi se omogućila pojava gena koji nisu prisutni ni u jednom od roditelja, ali mogu dovesti do boljih rješenja u konačnom rješenju. Kako bi se povećala raznolikost, mogu se uključiti i novi nasumični genomi koji nisu dobiveni modifikacijom starih. Oni se nazivaju "imigranti". Algoritam nema definiran kraj i proces može uvijek nastaviti. Međutim, nakon određenog broja koraka, daljnja poboljšanja postaju vrlo rijetka i numerički mala, pa se proces obično prekida na temelju nekih kriterija. Genetski algoritmi uspješno se primjenjuju na mnoge vrste problema, posebno na kombinatornu optimizaciju, pa čak i na probleme diskretizirane kontinuirane optimizacije.

Kao i kod drugih metoda umjetne inteligencije, još brži i bolji rezultati mogu se postići putem "hibridnog" pristupa u kojem se genetski algoritam kombinira s jednom od klasičnih tehnika optimizacije: svako rješenje dobiveno tijekom genetskog algoritma postaje početni uvjet za lokalnu klasičnu matematičku proceduru optimizacije, kao što je gradientni spust. Lokalni optimi dobiveni ovim procesom ponovno ulaze u novi korak genetskog algoritma. Tako se "potomci" generiraju putem "ukrštanja" "roditelja" i optimizacije.

### 6.3. Model predviđanja OEE pomoću heurističke metode "Monte Carlo"

Metodu "Monte Carlo" (MC) razvio je Stanislaw Ulam dok je radio na razvoju nuklearnog oružja 1946. godine. Metoda je dobila ime po kasinima Monte Carla gdje je Ulamov ujak kockao. Potencijal metode brzo je prepoznao John von Neumann, koji je napisao program za prvo elektroničko računalo, ENIAC. Korištenjem MC metode, ENIAC je rješavao probleme vezane uz difuziju neutrona [101].

Metoda Monte Carlo može se koristiti na različite načine, ali njezina najčešća primjena je u optimizaciji sustava. Ova se metoda često koristi kada su granice ulaznih varijabli sustava poznate, ali ne postoji točan matematički model koji odlučno pokazuje koje ulazne

vrijednosti dovode do izlaza najbližeg željenoj vrijednosti. Optimizacija sustava ili matematičko programiranje je matematička disciplina koja traži točku u vektorskom prostoru koja zadovoljava određene uvjete. U toj točki, tražena funkcija (ciljna funkcija) postiže ekstremnu vrijednost, bilo minimum ili maksimum. Ova se disciplina primjenjuje u različitim područjima, uključujući transport, planiranje radne snage, proizvodnju, planiranje proizvodnje, odabir projekata i upravljanje financijskim resursima u bankama i drugdje.

Optimizacija se koristi za rješavanje raznih problema gdje je potrebno donijeti odluke, kao što su:

- Rješavanje problema transporta,
- Optimizacija rasporeda radne snage,
- Problemi vezani uz proizvodnju i pakiranje,
- Planiranje proizvodnje,
- Odabir projekata,
- Upravljanje vremenskim okvirom financijskih transakcija u banci i mnoge druge situacije [102].

Vrijednost metode Monte Carlo leži u njezinoj sposobnosti da pruži veliki broj mogućih ishoda za problem ponavljanjem i uključivanjem nasumično odabranih vrijednosti za zadane varijable. Da bi se metoda koristila, potrebno je osnovno razumijevanje problema kako bi se odredile granice uzorkovanja određenih varijabli. Osim toga, MC metoda se može koristiti za procjenu vjerojatnosti određenih ishoda. Analiza osjetljivosti također se može provesti na rezultatima MC simulacija kako bi se identificirali parametri koji imaju najveći utjecaj na konačni rezultat ili ishod procesa kada se promijene. Budući da MC metoda uzima u obzir vjerojatnost događaja, prikladna je za donošenje odluka u uvjetima rizika.

Logično je zapitati se može li se metoda Monte Carlo koristiti za bolje planiranje i iskorištavanje proizvodnih kapaciteta. Za dublju analizu podataka iz OEE analize korištena je metoda Monte Carlo. Ideja je bila stvoriti model OEE analize temeljen na stvarnim proizvodnim podacima i simulirati ponašanje stroja ili uređaja kroz tisuće iteracija. Stvarni proizvodni podaci prikupljeni su tijekom razdoblja od 2 mjeseca. Da bi se stvorila visokokvalitetna MC analiza i simulirani parametri učinili što realističnijima, svaki parametar OEE analize dobiven iz stvarnih primjera morao se analizirati.



Da bismo razumjeli kako su stvarni podaci analizirani za primjenu metode Monte Carlo, potrebno je ukratko objasniti pojmove srednje vrijednosti i standardne devijacije. Srednja vrijednost, ili aritmetička sredina, vrijednost je koja se koristi u statistici i izračunava se za skup brojeva (više ponovljenih mjerenja itd.). Srednja vrijednost se dobiva dijeljenjem ukupnog zbroja vrijednosti u promatranoj skupini s brojem pojedinačnih vrijednosti.

Matematički je izražena kao:

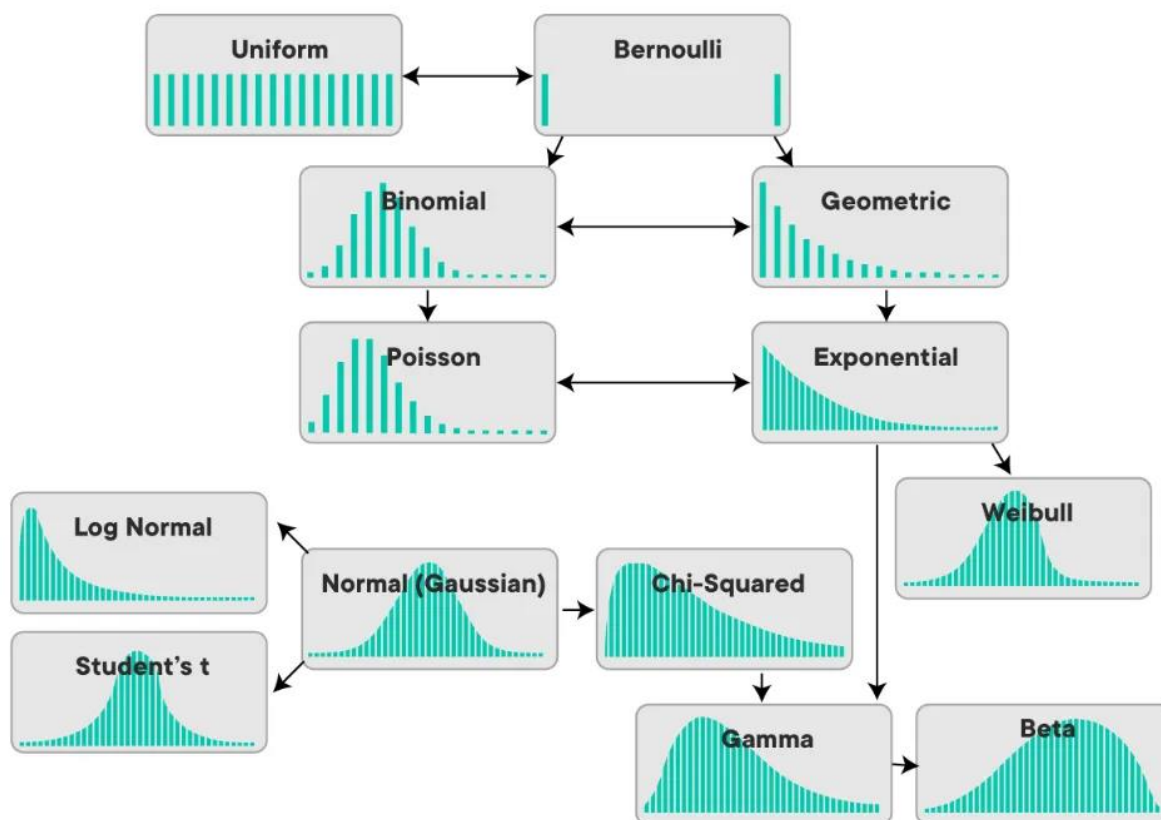
$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \quad (13)$$

Gdje je  $\bar{x}$  is aritmetička sredina,  $x_1 + \dots + x_n$  su pojedinačne vrijednosti skupine, a  $n$  je broj pojedinačnih vrijednosti u promatranoj skupini..

In Uz izračun srednje vrijednosti, budući da sama srednja vrijednost skupa podataka ne pruža cjelovito razumijevanje, potrebno je izračunati i standardnu devijaciju  $s$ . Standardna devijacija, ili standardna pogreška srednje vrijednosti, ukazuje na to koliko se točke podataka odstupaju od ili su raspršene oko srednje vrijednosti. Na neki način, može se smatrati mjerom stabilnosti procesa. Matematički se može izraziti kao:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (14)$$

Vrsta i oblik distribucije podataka također su važni za analizu skupa podataka. Distribucija podataka u statistici odnosi se na raspodjelu rezultata ili učestalost s kojom se pojedinačni rezultati pojavljuju u skupu podataka, poredani po veličini [103].



Slika 22. Uobičajene vrste distribucija [104]

Normalna ili Gaussova distribucija je najčešća distribucija koja se pojavljuje u prirodnim, tehničkim i društvenim fenomenima. Normalna distribucija ima veću učestalost podataka u središtu tolerancije mjenenog koncepta, a učestalost opada kako se udaljavamo od središta distribucije u bilo kojem smjeru. U prirodi se primjer normalne distribucije može vidjeti u visini ljudi. Ako je prosječna visina ljudi 180 cm, većina ljudi u svijetu će spadati u tu kategoriju. Kako se udaljavamo od tog broja (koji se uzima kao prosjek), broj ljudi, odnosno učestalost te kategorije, opada (rijetko je pronaći osobu visoku 210 cm, baš kao što je rijetko pronaći nekoga visine 150 cm). Varijabla  $x$  ima uniformnu distribuciju ako je skup njezinih vrijednosti jednako vjerojatan da se pojavi na početku, sredini ili kraju ukupne vrijednosti. U prirodi je koncept uniformne distribucije najbolje objašnjen primjerom kocke koja se koristi u igrama. Kocka ima brojeve od jedan do šest na svakoj od svojih šest strana. Vjerojatnost dobivanja bilo kojeg broja prilikom bacanja kocke je  $1/6$  ili 16,67%. Dakle, uniformna distribucija jamči da skup varijabli može preuzeti svaku vrijednost s istom vjerojatnošću.

Eksponencijalna distribucija je jedna od prvih korištenih u analizi i još uvijek je široko korištena danas. Ova distribucija modelira kvarove koji su potpuno nasumični.

Eksponecijalni model ne uzima u obzir trošenje ili starenje. Prema eksponecijalnom modelu, vjerojatnost da će komponenta raditi bez kvara određeno vrijeme ne ovisi o tome kada to razdoblje počinje. Takvo ponašanje je karakteristično za kvarove koji prvenstveno ne ovise o trošenju, već o izvanrednim vanjskim opterećenjima.

OEE analiza i MC simulacija provedene su na proizvodnoj liniji za cinčanje metalnih proizvoda u tvrtki za proizvodnju elektromehaničkih komponenti. Neki metalni dijelovi proizvedeni u tvrtki zahtijevaju cinčanje nakon strojne obrade i odmašćivanja kako bi se zaštitili od vanjskih utjecaja putem galvanizacijskog procesa, osiguravajući njihovu funkcionalnost i trajnost. Metalni dijelovi se stavljaju u polimerni bubanj sa zidovima dizajniranim poput mreže kako bi dijelovi došli u kontakt s određenim kemikalijama i reagensima koji se koriste u procesu. Bubljevi se uranjaju u različite spremnike određenim redoslijedom, a na kraju linije cinčani proizvodi se uklanjaju iz bubnja.

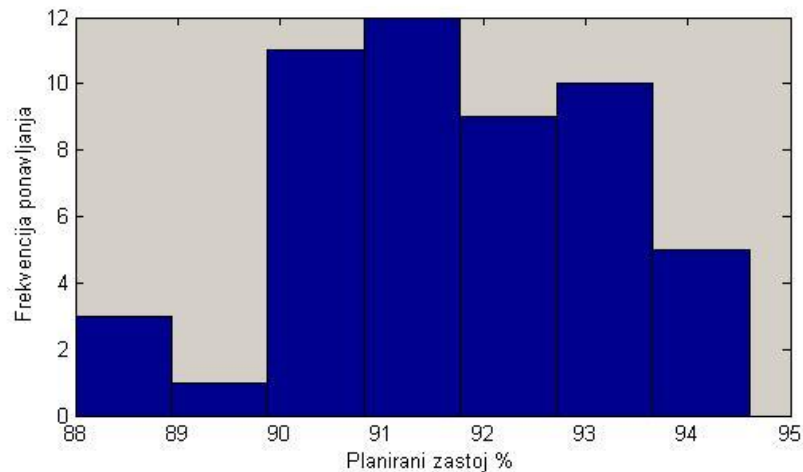
Korištenjem programskog jezika Matlab kreirani su histogrami pojedinačnih kategorija gubitaka na proizvodnoj liniji koristeći stvarne izmjerene podatke kako bi se odredila distribucija podataka za pojedine kategorije. Tablica 6 prikazuje dobivene vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih devijacija za pojedine kategorije. Budući da su planirani zastojevi unaprijed određeni i periodično se izmjenjuju unutar dva mjeseca prikupljanja podataka (vikendi, smjene, itd.), te budući da se ne mijenjaju i radnici nemaju utjecaj na ovu kategoriju, nije kreiran histogram jer možemo predvidjeti ponašanje vrijednosti unutar te kategorije.

Tablica 12. Vrijednosti aritmetičke sredine i standardne devijacije za pojedine kategorije

Kategorija	$\bar{x}$	s
Planirano stajanje	87,3%	12,5%
Planirani zastojevi	91,7%	1,6%
Neplanirani zastojevi	93,9%	5,4%
Učinkovitost	60,4%	22,1%
Kvaliteta	98,5%	1,1%
OEE	51,6%	22,2%
TEEP	44,0%	18,1%

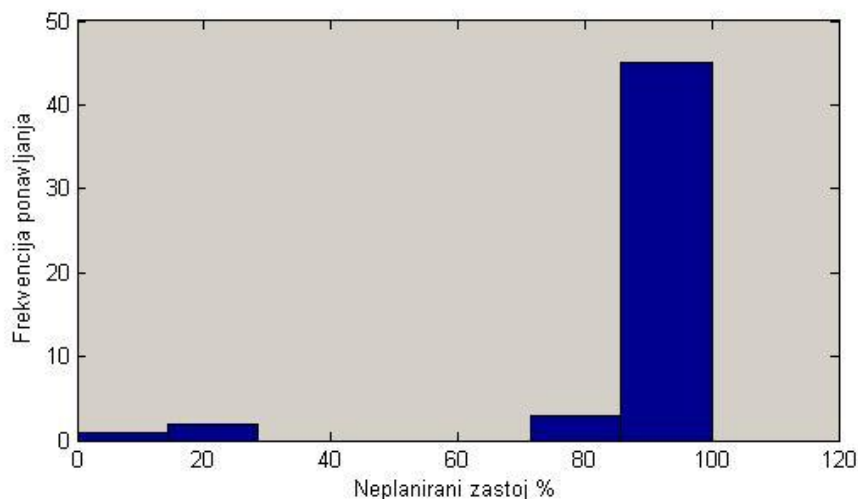
Postotci izraženi u tablicama predstavljaju prosječni gubitak vremena za svaku kategoriju nakon odbitka vremena izgubljenog u toj kategoriji. Na primjer, 93,9% u kategoriji

"neplanirani zastoji" označava da nakon oduzimanja vremena izgubljenog zbog neplaniranih zastoja, još uvijek ostaje 93,9% vremena dostupnog za rad. Kreiranje histograma za svaku kategoriju pomoću podataka prikupljenih tijekom dvomjesečnog razdoblja omogućuje nam prepoznavanje tipa distribucije koja je uključena, kako je prikazano na slikama 23-28.



Slika 23. Histogram kategorije planirani zastoj

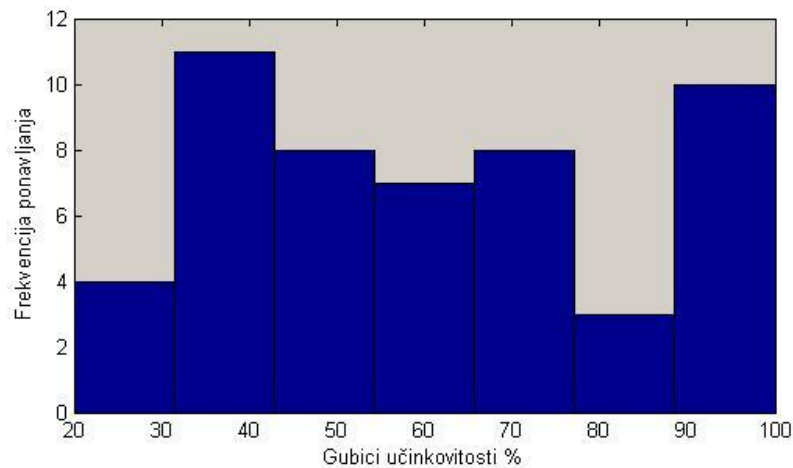
Prema histogramima dobivenim korištenjem programskog jezika Matlab, može se zaključiti vrsta distribucije pojedine kategorije. Kategorija planiranih zastoja ima normalnu distribuciju. To znači da su planirani zastoji simetrično raspoređeni oko srednje vrijednosti, s većinom vrijednosti blizu te sredine i manje vrijednosti na krajevima distribucije.



Slika 24. Histogram kategorije neplanirani zastoji

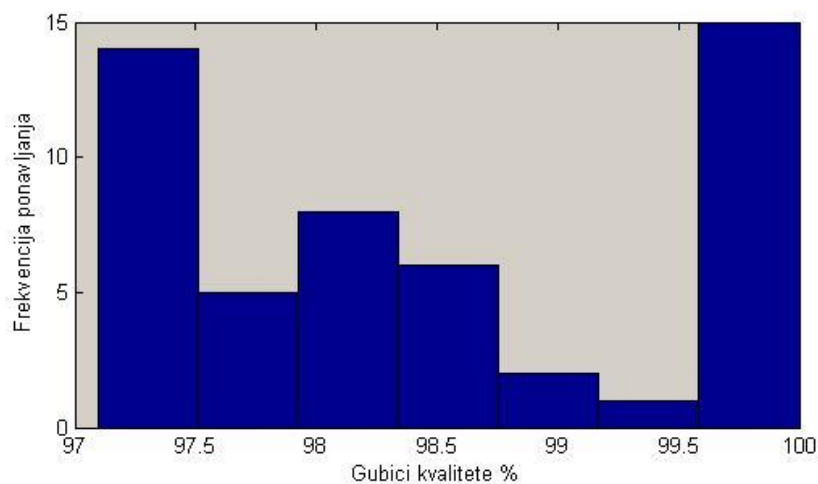
Kategorija neplaniranih zastoja ima eksponencijalnu distribuciju. Eksponencijalna distribucija ukazuje na to da su neplanirani zastoji nasumični događaji koji se javljaju s

konstantnom stopom kroz vrijeme, pri čemu je većina zastoja kratkotrajna, a duži zastoji su rjeđi.



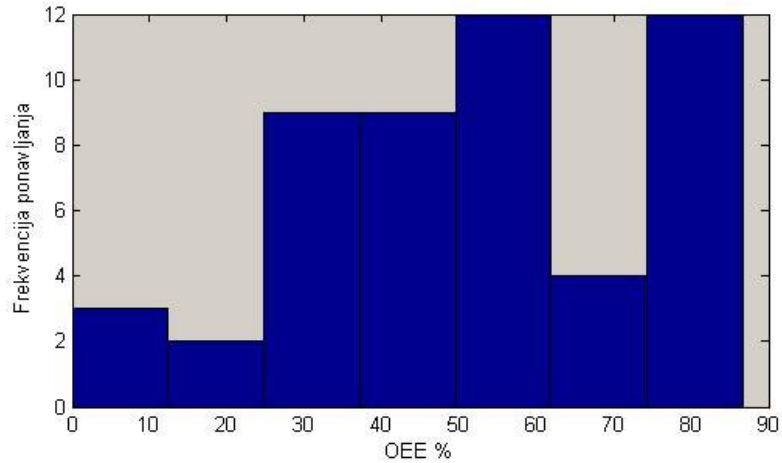
Slika 25. Histogram kategorije gubitaka učinkovitosti

Kategorija učinkovitosti ima normalnu distribuciju, što sugerira da su odstupanja u učinkovitosti strojeva simetrično raspoređena oko srednje vrijednosti, s većinom vrijednosti blizu prosječne učinkovitosti.



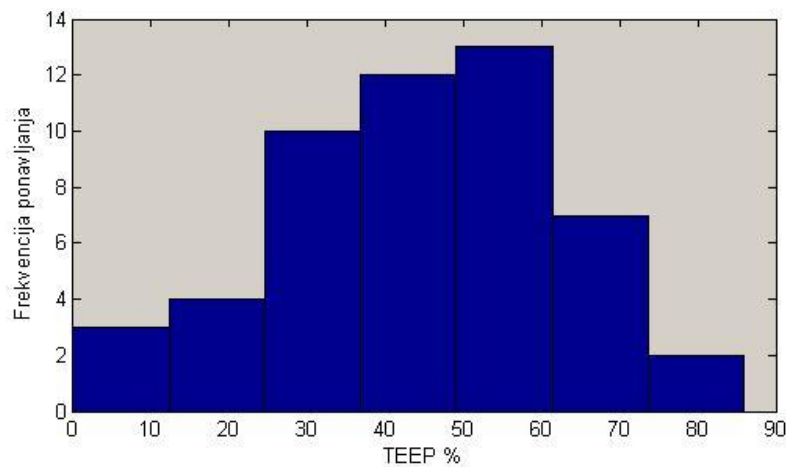
Slika 26. Histogram kategorije gubitaka kvalitete

Kategorija kvalitete ima uniformnu distribuciju, što znači da su svi mogući ishodi jednako vjerojatni. U kontekstu proizvodnje, to može značiti da je kvaliteta proizvoda ravnomjerno raspoređena unutar određenog raspona.



Slika 27. Histogram kategorije OEE

Distribucija ključnog parametra učinkovitosti opreme, OEE (Overall Equipment Effectiveness), nije mogla biti identificirana iz dobivenih podataka. Ovo može biti zbog složenosti faktora koji utječu na OEE ili nedostatka dovoljno podataka za jasnu identifikaciju distribucije. Daljnje istraživanje i prikupljanje podataka može biti potrebno kako bi se precizno odredila distribucija OEE-a.



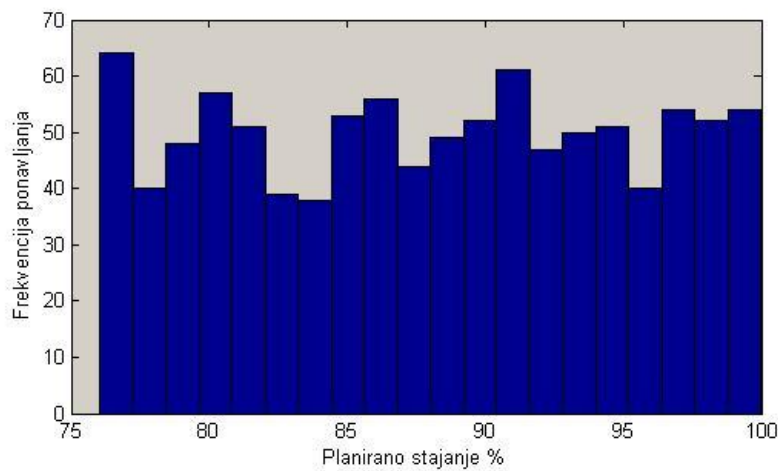
Slika 28. Histogram kategorije TEEP

TEEP (Total Effective Equipment Performance), kao jedan od ključnih parametara učinkovitosti opreme, također ima normalnu distribuciju. To znači da su mjerenja TEEP-a simetrično raspoređena oko prosječne vrijednosti, s većinom vrijednosti koncentriranih oko sredine.

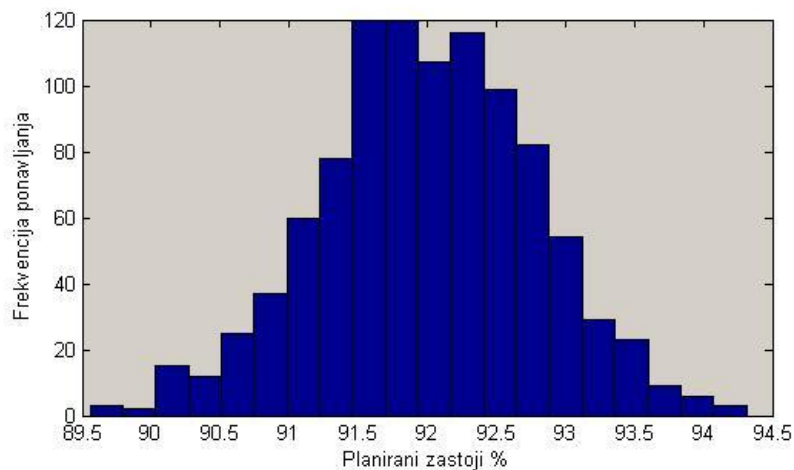
Razumijevanje ovih distribucija ključno je za daljnju analizu i optimizaciju proizvodnog procesa. Korištenjem odgovarajućih statističkih modela za svaku kategoriju, moguće je

točnije predvidjeti performanse i identificirati područja koja zahtijevaju poboljšanja. Ove informacije mogu biti korisne za donošenje informiranih odluka u cilju povećanja učinkovitosti i smanjenja gubitaka u proizvodnom procesu.

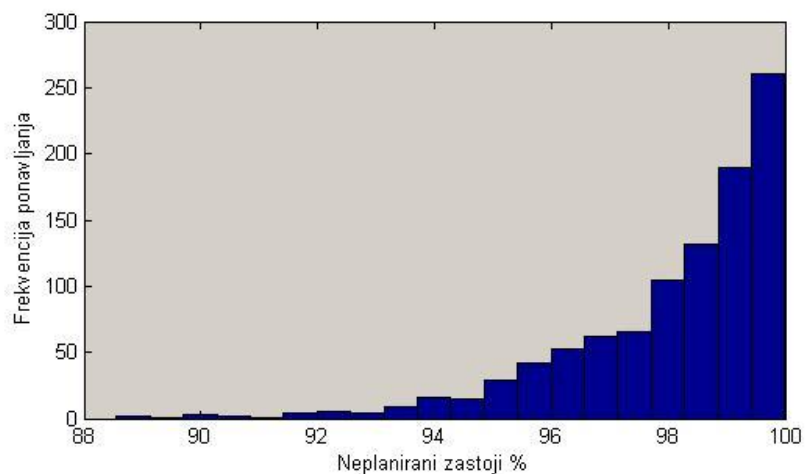
Kako bi se simulirala veća količina podataka i analiziralo kako svaka kategorija utječe na ishod ključnih parametara učinkovitosti, provedena je "Monte Carlo" simulacija. Ulazni podaci za MC simulaciju sastojat će se od kategorija gubitaka, uzimajući u obzir vrijednosti srednje vrijednosti, varijance i tip distribucije. Simuliranjem 1000 podataka, distribucija podataka može biti vizualno jasnije predstavljena (Slike 29-35).



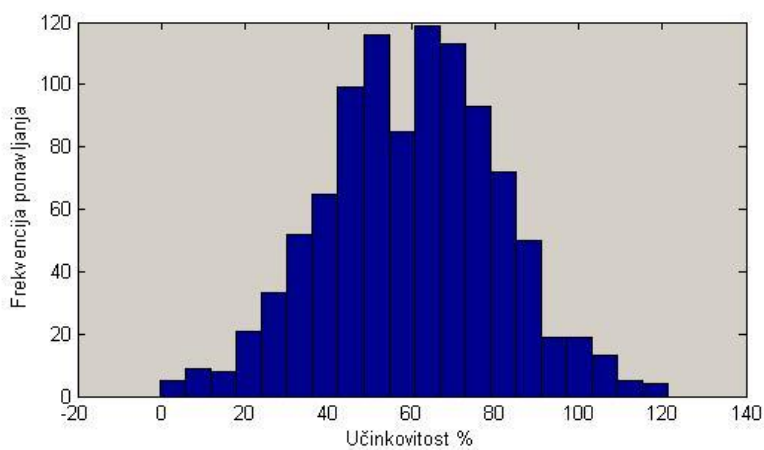
Slika 29. Histogram simulirane kategorije planirano stajanje



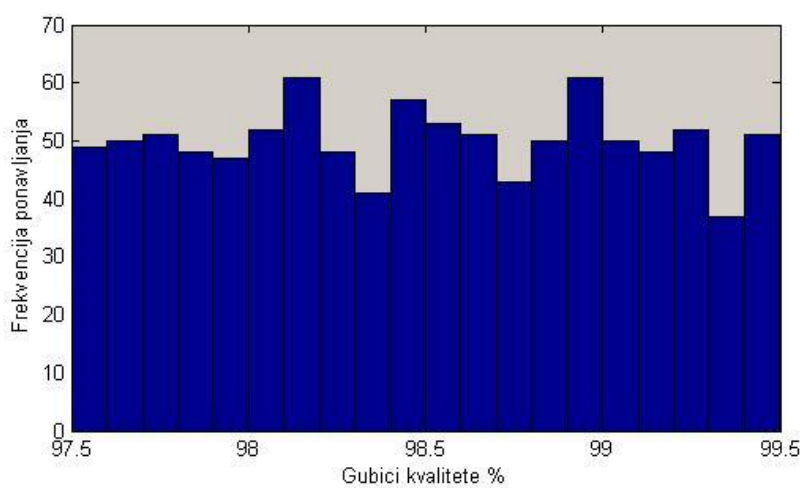
Slika 30. Histogram simulirane kategorije planirani zastoji



Slika 31. Histogram simulirane kategorije neplanirani zastoji

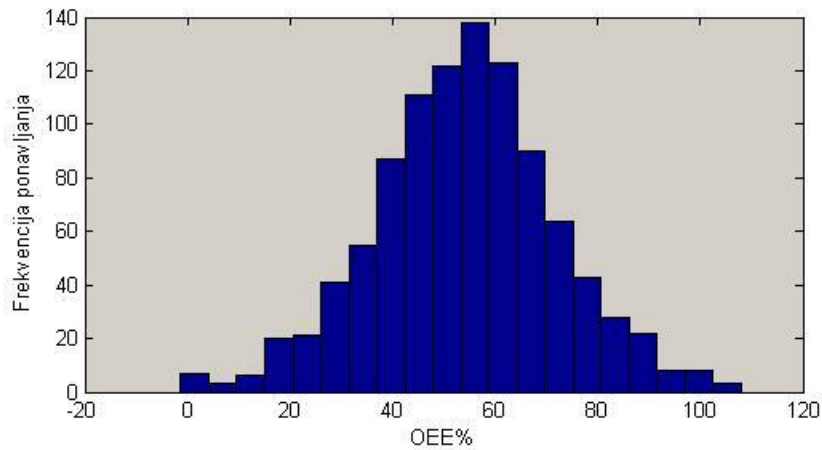


Slika 32. Histogram simulirane kategorije učinkovitost

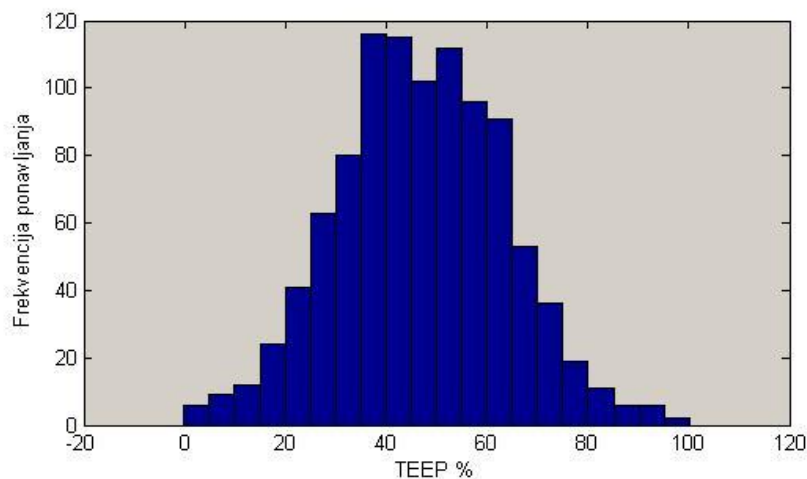


Slika 33. Histogram simulirane kategorije kvaliteta



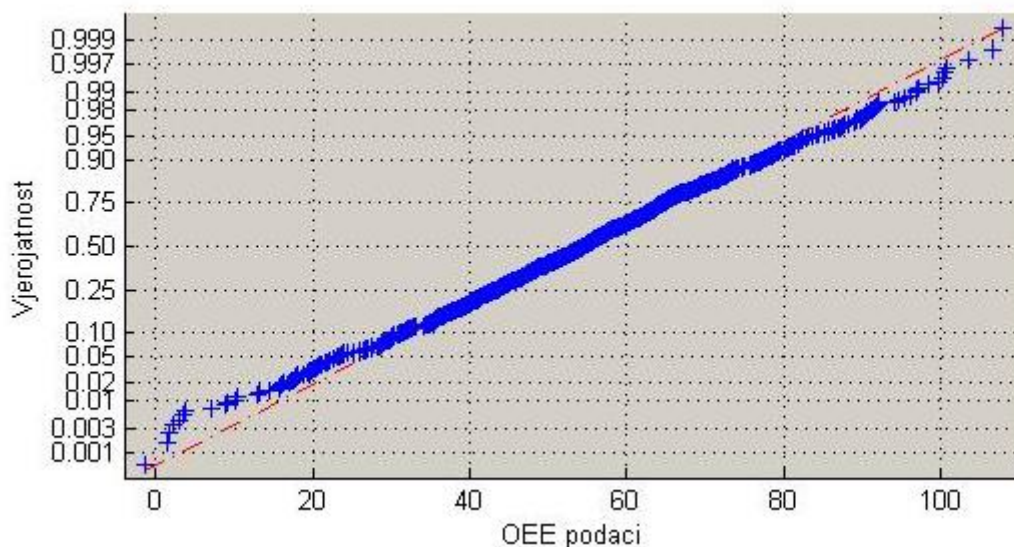


*Slika 34. Histogram simulirane kategorije OEE*



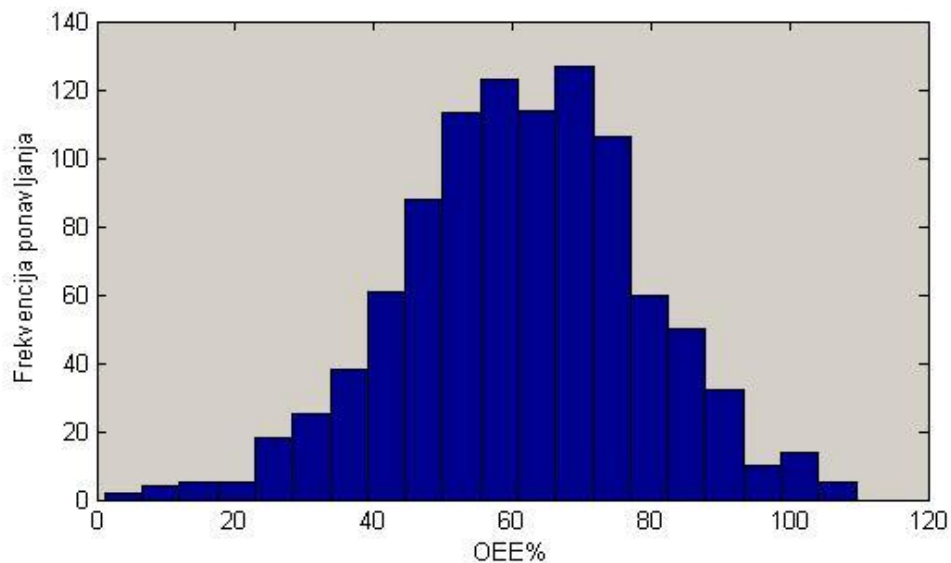
*Slika 35. Histogram simulirane kategorije TEEP*

Prema simuliranim podacima iz MC analize moguće je pretpostaviti da OEE ima normalnu razdiobu što se prema stvarnim podacima, zbog smanjene količine, nije dalo zaključiti. Za potpunu sigurnost i zaključak da OEE ima normalnu razdiobu potrebno je izraditi dijagram normalne razdiobe. Dijagram normalne razdiobe je vizualna metoda zaključivanja o vrsti distribucije tj. ima li promatrani set podataka normalnu razdiobu. Na slici 36. može se vidjeti dijagram normalne razdiobe za set podataka OEE simulirane analize.



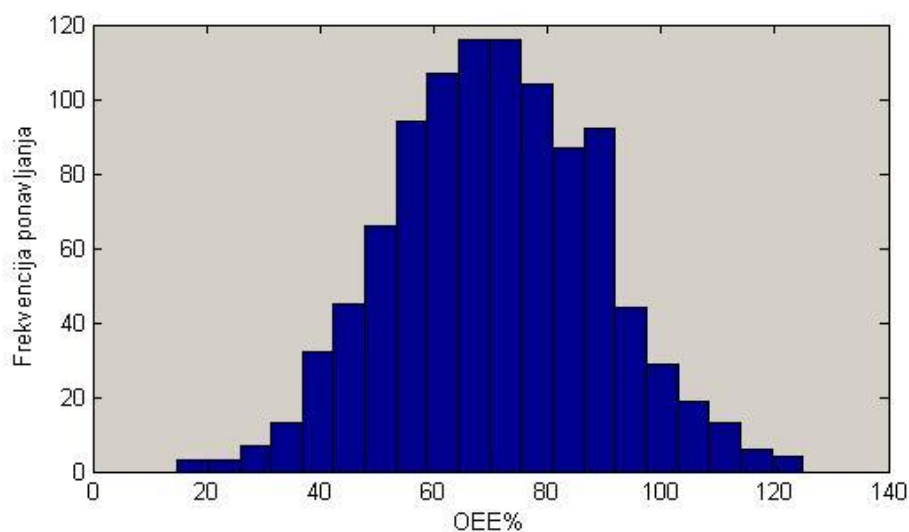
*Slika 36. Dijagram normalne razdiobe*

Ukoliko podaci prate zamišljenu linearnu liniju (crveno na dijagramu) tada je razdioba normalna. Aritmetička sredina simuliranog OEE-a je 54,2 %, a standardna devijacija 17,7%. Aritmetička sredina simuliranog TEEP-a je 47,6 %, a standardna devijacija 16,1%. Prema rezultatima iz MC simulacije vidljivo je da se oni podudaraju sa stvarnim zabilježenim rezultatima. Prednost MC analize je simulacija velikog broja uzoraka te mogućnost predviđanja trenda ponašanja vrijednosti varijabli. Druga prednost je mogućnost simulacije raznih mogućih varijanti vrijednosti parametara koje se mogu poprimiti u stvarnom mjerenju te promatranje promjena krajnjeg rezultata u odnosu na promjenu u pojedinačnoj varijabli. OEE je umnožak postotaka pojedinih kategorija. Dovoljno je da je jedna kategorija smanjenog postotka da rezultat OEE-a bude bitno smanjen i ne veći od samog postotka te kategorije. Budući da kategorija učinkovitosti ima daleko najslabiji postotak i najveće rasipanje vrijednosti od aritmetičke sredine, za potrebe analize ponašanja OEE-a, simulirani su uvjeti u kojima je kategorija učinkovitosti poboljšana u odnosu na stvarne rezultate. U prvom slučaju povećana je aritmetička sredina učinkovitosti za 10 % te je simulacija ponovljena. U takvom slučaju OEE je narasao na 61,8% dok se rasipanje nije bitno mjenjalo (slika 37).



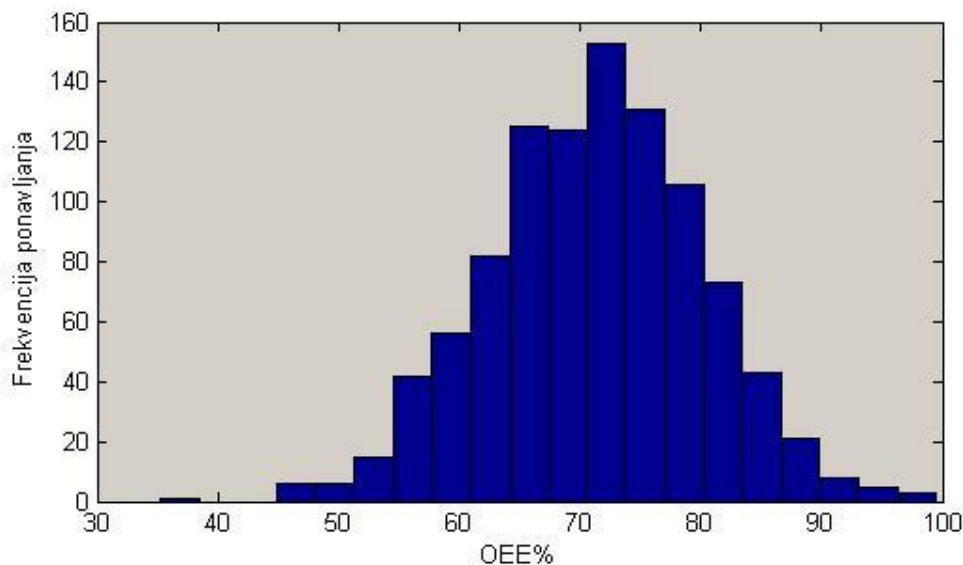
*Slika 37. Simulacija rezultata OEE-a nakon povećanja učinkovitosti za 10 %*

Simulacija se ponovila još dva puta, prvi puta učinkovitost je povećana za 20%, a drugi puta uz povećanje kategorije učinkovitosti od 20% smanjilo se i rasipanje (slike 38 i 39).



*Slika 38. Simulacija rezultata OEE-a nakon povećanja učinkovitosti za 20 %*

Iz prve i druge simulacije, nakon poboljšanja kategorije učinkovitosti, vidljivo je da ta kategorija sa malim poboljšanjima bitno utječe na krajnji rezultat i samim time na učinkovitost cijelokupne linije.



Slika 39. Simulacija rezultata OEE-a nakon povećanja učinkovitosti za 20 % i smanjene standardne devijacije

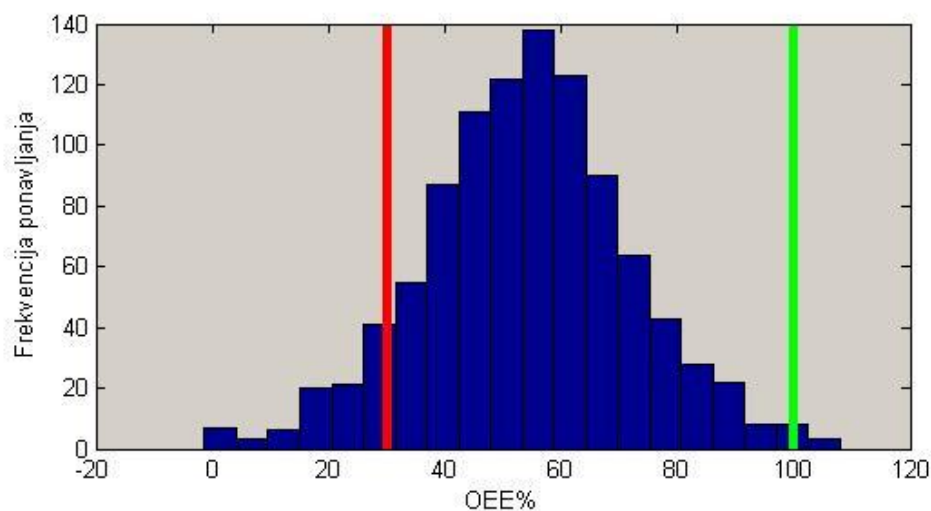
U slučajevima kada se povećala srednja vrijednost povećao se i rezultat učinkovitosti. Dodatno poboljšanje dobilo bi se kada bi se učinkovitost „izoštrila“ tj. kada bi varijacije gubitaka u proizvodnji uslijed učinkovitosti manje varirale. U tom slučaju OEE bi imao i manju standardnu devijaciju. U slučaju povećanja učinkovitosti za 20% OEE je narasao na 71,1%, a smanjenjem standardne devijacije dobije se na stabilnosti rezultata te je rasipanje rezultata OEE-a smanjeno na 3,8 % (tablica 13).

Tablica 13. Prikaz vrijednosti OEE-a prije i nakon poboljšanja

Parametar	Vrijednosti prije	Povećanje sr. vr. učinkovitosti za 10	Vrijednosti nakon
OEE	$\bar{x} = 53,5\%$ ; $s = 18,9\%$		$\bar{x} = 61,8\%$ ; $s = 22,2\%$
		Povećanje sr. vr. učinkovitosti za 20	
OEE	$\bar{x} = 53,5\%$ ; $s = 18,9\%$		$\bar{x} = 71,1\%$ ; $s = 22,2\%$
		Povećanje sr. vrijednosti učinkovitosti za 20 i smanjenje rasipanja	
OEE	$\bar{x} = 53,5\%$ ; $s = 18,9\%$		$\bar{x} = 71,1\%$ ; $s = 3,8\%$

U sklopu ovog rada, izrađena je i stabilnost procesa. Proces je sposoban ako je raspon zahtjeva veći ili jednak od raspona procesa. Raspon zahtjeva (tolerancijsko područje) T je područje između gornje (USL) i donje granice zahtjeva (LSL). Raspon procesa podrazumijeva područje unutar  $\pm 3$  standardna odstupanja ( $6\sigma$ ) u odnosu na sredinu procesa (99,73% površine ispod krivulje normalne raspodjele kojom se aproksimira proces). Imajući u vidu da se kod normalne razdiobe praktično svi podaci (99,73%) nalaze unutar granica od  $\pm 3\sigma$ , a može se reći da proces čija se širina rasipanja poklapa sa širinom zadane tolerancije ima potencijalnu sposobnost procesa jednaku 1 [105].

Koristeći naredbu „capability“ u programskom paketu Matlab moguće je dobiti parametre stabilnosti procesa kao što su Cp i Cpk. Cp je indeks potencijalne sposobnosti procesa, a Cpk demonstrirana izvrsnost odnosno koliko je raspodjela usmjerena prema središtu dvaju zadanih granica zahtjeva [106]. U ovom primjeru kao donja i gornja granica zahtjeva postavljene su vrijednosti 30% odnosno 100%. Što su vrijednosti Cp i Cpk veće to je i proces stabilniji.



Slika 40. Prikaz OEE raspodjele sa zadanim granicama zahtjeva.

U ovom slučaju parametri stabilnosti procesa su:

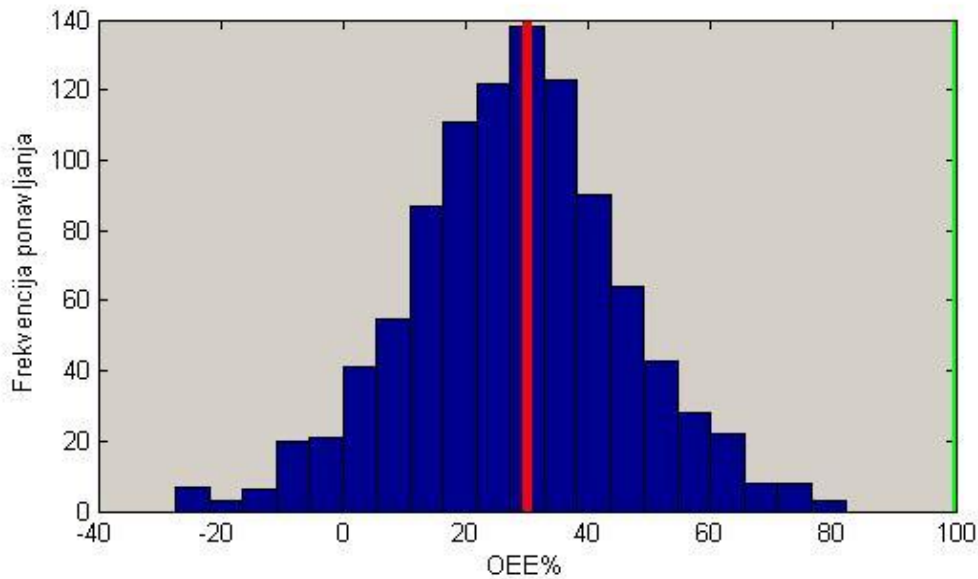
$$Cp = 0,65$$

$$Cpk = 0,43$$

Tijekom analize stabilnosti procesa, uvijek se može očekivati varijacija procesa od  $\pm 1,5\sigma$ .

Budući da, ako se standardna devijacija poveća u pozitivnom smjeru, to je korisno za proces,

analiza stabilnosti procesa provedena je uz pretpostavku da će se odstupanje dogoditi u negativnom smjeru za  $1,5 \sigma$ .



Slika 41. Primjer pomaka stabilnosti procesa za  $1,5 \sigma$

Vrijednosti parametara za slučaj sa slike 41 su:

$$Cp = 0,65$$

$$Cpk = -0,05$$

Budući da je otpočetak sami OEE nezadovoljavajući i proces nije vrlo stabilan, bilo je za očekivati da će pomakom u negativnom smjeru on biti još nestabilniji. Negativna vrijednost parametra  $Cpk$  znači da je srednja vrijednost promatranog seta podataka manja od donje granice zahtjeva [107].

Ovo su podaci koji su korisni voditelju proizvodnje ili tehnologu kada treba odlučiti koje radnje poduzeti kako bi se povećala efikasnost linije i same proizvodnje. U ovom slučaju najveću korist bi imali povećanjem učinkovitosti radnika, smanjiti kasne reakcije na zastoje u liniji te ih upozoriti na česte i kratke prekide u proizvodnji. Dodatna poboljšanja mogla bi se dobiti uvođenjem određenog sustava nadzora linije te eventualnom ugradnjom senzora za registraciju prekida rada, popraćeno uputama i standardima za radnike.

## 7. ZAKLJUČAK

Pregled literature, kao dio ovog rada, dao je vrijedan uvid u trenutni status i primjenu TPM (Total Productive Maintenance) koncepta u industriji. Pregled se temelji na sekundarnim podacima iz prethodno provedenih istraživanja. Analiza podataka uključivala je konferencijske radove, članke iz časopisa i prethodne preglede literature, a provedeno je i opsežno pregledavanje literature o glavnim područjima primjene TPM-a i OEE-a (Overall Equipment Effectiveness). U mnogim primjerima TPM je dokazao svoju vrijednost u smanjenju kvarova, smanjenju troškova upravljanja, poboljšanju proizvodne učinkovitosti, prepoznavanju i eliminaciji otpada, pozitivnom utjecaju na okoliš, prepoznavanju važnosti obuke radne snage i kompatibilnosti s Industrijom 4.0. Vrijednost TPM-a posebno je vidljiva u farmaceutskoj industriji, gdje je ključ postizanje dosljednosti u operacijama zbog visokih standarda kvalitete u takvoj industriji. Međutim, još uvijek postoje razlike u mišljenjima o tome kako bi se OEE trebao izračunavati, te je još uvijek otvoren za modifikacije ovisno o primjeni i vrsti proizvodnog okruženja. Mnogi autori se slažu da, kako bi se TPM pravilno uveo, zaposlenici moraju biti educirani o TPM-u i OEE-u na strukturiran i organiziran način, uz podršku iskusnog osoblja, te mora postojati podrška za implementaciju na svim razinama hijerarhije, posebno od strane menadžmenta. Rezultati su također pokazali da su neke tvrtke još uvijek nesklone implementaciji TPM-a zbog nedostatka svijesti o učinkovitosti i utjecaju ovih lean alata za upravljanje održavanjem, iako je TPM potvrđen lean alat za optimizaciju. Također, iako je TPM dokazano koristan u mnogim proizvodnim područjima, još uvijek ne postoji cjelovit i učinkovit model za održivu i stratešku implementaciju.

Prikazana je povijest i evolucija optimizacije održavanja. Od ranih ideja o bavljenju održavanjem isključivo korektivno, preko planiranog i autonomnog održavanja, pa sve do suvremenih praksi optimizacije održavanja, ovo područje istraživanja daje pregled i trenutno stanje u suvremenoj optimizaciji održavanja te pruža polazišnu točku za sljedeći mogući smjer istraživanja.

Dio rada je i istraživanje koje istražuje koji su ključni čimbenici koji mogu negativno utjecati na uvođenje i održivost TPM-a i lean alata općenito. Da bi se to postiglo, izrađena je anketa koja se sastojala od dvadeset i sedam izjava podijeljenih u tri glavne kategorije: poznavanje lean alata, proces implementacije lean alata i održivost lean alata. Anketa je provedena u četiri tvrtke različitih veličina, od pedeset do osamsto zaposlenika. Zaposlenici su mogli izraziti svoje slaganje ili neslaganje s izjavom koristeći ljestvicu od jedan do pet, pri čemu je

jedan značilo da se ne slažu, a pet da se potpuno slažu s pojedinom izjavom. Kako bi se osigurala vjerodostojnost prikupljenih podataka, provedene su analiza varijance i Cronbachova alfa. Odgovori su analizirani po pojedinačnim skupinama (tj. tvrtkama) i prema položaju u hijerarhiji tvrtke (tj. operateri, tehnolozi, voditelji i menadžeri). Za bolju analizu podataka, funkcije su grupirane u četiri kategorije: operateri, tehnolozi, voditelji i menadžeri. Anketa je omogućila dubinski uvid u percepciju i stavove zaposlenika prema TPM-u i lean alatima, kao i identifikaciju potencijalnih prepreka i izazova u njihovoj implementaciji i održivosti. Analiza podataka pokazala je da, kako bi se TPM pravilno uveo, zaposlenici moraju biti educirani o TPM-u i OEE-u na strukturiran i organiziran način, uz podršku iskusnog osoblja i podršku implementaciji na svim razinama hijerarhije, posebno od strane menadžmenta. Rezultati su također pokazali da su neke tvrtke još uvijek nesklone implementaciji TPM-a zbog nedostatka svijesti o učinkovitosti i utjecaju ovih lean alata za upravljanje održavanjem, unatoč tome što je TPM potvrđen kao učinkovit alat za optimizaciju. Iako je TPM dokazano koristan u mnogim proizvodnim područjima, još uvijek ne postoji cjelovit i učinkovit model za održivu i stratešku implementaciju. Ova studija može pružiti budućim istraživačima vrijedan izvor informacija o TPM filozofiji održavanja i nalazima OEE-a do danas, na jasan i sveobuhvatan način, te pomoći u razvoju strategija za učinkovitije uvođenje i održavanje TPM-a i lean alata prilagođenih specifičnim potrebama i uvjetima svake tvrtke.

Nakon analize odgovora, prepoznata su četiri ključna čimbenika koja bi mogla negativno utjecati na TPM i lean alate općenito. To su nedostatak prepoznavanja prednosti interne revizije, izbor opreme, sigurnost posla i nedovoljno posvećivanje pažnje lean zadacima u usporedbi s drugim radnim aktivnostima. Pružene su preporuke kako smanjiti utjecaj ovih čimbenika i spriječiti njihov negativan utjecaj. S druge strane, prepoznati su i neki pozitivni aspekti. Zaposlenici na svim razinama izrazili su uvjerenje da će poduzeće na kraju imati koristi od implementacije lean alata te da je vrijeme uloženo u njih dobro utrošeno. Ovo pokazuje da su zaposlenici prepoznali prednosti i, ako se obuka i implementacija provode strateški, strukturirano i pažljivo, postoji dovoljno volje za izvršavanje zadataka. Također, s obzirom na to da uspješna implementacija ovisi o podršci menadžmenta, pozitivno je da oni na upravljačkim pozicijama također prepoznaju koristi koje lean alati mogu donijeti za optimizaciju. Kako bi se postigla uspješna implementacija, važno je, prilikom planiranja uvođenja lean alata, pripremiti i predstaviti vremenski okvir, raspored ili Ganttov dijagram menadžerima ili investitorima. Postavljanje jasnih prekretnica i ciljeva vezanih za vrijeme



ključno je za održavanje transparentne nadzorne ploče za praćenje aktivnosti. Ovaj pristup pomaže u sprječavanju problema vezanih uz rokove izvršenja specifičnih aktivnosti ili cijelog projekta. Strateško planiranje, uključujući redovitu komunikaciju i jasnu prezentaciju ciljeva, može značajno doprinijeti uspješnoj implementaciji TPM-a i lean alata, osiguravajući dugoročne koristi za poduzeće i njegove zaposlenike.

Centralni dio istraživanja je detaljan korak po korak implementacijski model nazvan TIPAS. Podijeljen je u pet faza koje su jednostavne za praćenje i razumijevanje. Model pruža čvrste temelje čak i za neiskusne trenere te je prikladan za okruženja koja nisu imala prethodno znanje ili gdje je koncept potpuno nov za tvrtku. Uz model su dana i objašnjenja kako prikupljati i obrađivati podatke za izračun ukupne učinkovitosti opreme (OEE), ključnog pokazatelja performansi TPM-a. TIPAS model je univerzalni model implementacije TPM-a za proizvodna poduzeća. Sastoji se od pet glavnih faza, svaka sa specifičnim ciljevima i aktivnostima koje osiguravaju uspjeh implementacije TPM-a. Prva faza uključuje obuku tima i odabir opreme. Cilj je upoznati osoblje s metodologijom TPM-a, formirati timove i odabrati opremu na kojoj će se provoditi TPM aktivnosti. Ova faza postavlja temelje za uspješnu implementaciju, osiguravajući da svi sudionici razumiju svoje uloge i odgovornosti. Druga faza, koja je ujedno i najopsežnija, fokusira se na procjenu trenutnog stanja opreme. U ovoj fazi identificiraju se i ispravljaju postojeći kvarovi, te se započinje s mjerenjem ukupne učinkovitosti opreme (OEE). Cilj je dobiti jasnu sliku o trenutnoj učinkovitosti i identificirati područja koja zahtijevaju poboljšanja. Ova faza pruža ključne podatke koji će se koristiti za planiranje i implementaciju daljnjih aktivnosti. U trećoj fazi razvija se strategija planiranog održavanja. Ovo uključuje izradu detaljnih planova za redovito održavanje opreme, s ciljem smanjenja neplaniranih zastoja i povećanja ukupne učinkovitosti. Strategija planiranog održavanja osigurava da su sve aktivnosti održavanja unaprijed planirane i organizirane, što smanjuje mogućnost iznenadnih kvarova i produžava vijek trajanja opreme. Četvrta faza fokusira se na zadatke autonomnog održavanja, koje će uglavnom obavljati operateri na strojevima. Cilj je osposobiti operatere za osnovne zadatke održavanja, poput čišćenja, podmazivanja i vizualnih inspekcija. Ova faza osigurava da operateri preuzmu aktivnu ulogu u održavanju opreme, što doprinosi bržem otkrivanju i rješavanju problema te povećava ukupnu učinkovitost. Završna faza osigurava održivost implementiranih praksi. U ovoj fazi uvode se sustavi za praćenje i evaluaciju rezultata, kako bi se osiguralo da se postignuti rezultati održavaju i dalje poboljšavaju. Redovite revizije i prilagodbe osiguravaju kontinuirano poboljšanje i prilagodbu promjenama u proizvodnom okruženju. Ova faza

osigurava dugoročnu održivost TPM-a i njegovih benefita za proizvodno poduzeće. Stručnjak koji je imenovan za implementaciju TPM-a može slijediti korake predstavljene u TIPAS modelu uz mogućnost prilagodbe koraka prema vlastitim potrebama. Faze TIPAS modela su detaljno objašnjene i dane su preporuke kako ih pravilno provesti. Sadrži radnje koje je potrebno poduzeti, imenovanja osoblja, organizaciju edukacije i odabir odgovarajuće opreme. Navodi dokumentaciju koja mora biti prisutna kako bi podržala TPM metodologiju i daje savjete za kontinuiranu održivost implementiranih praksi.

Kako bi se evaluirali učinci implementiranih TPM praksi, potrebno je izračunati i pratiti OEE, ključni pokazatelj performansi TPM-a. OEE se mora izračunati kao dio faze 2 implementacije, a praćenjem se može uočiti koliko je TPM uspješan u povećanju učinkovitosti i pouzdanosti proizvodne opreme. Za uspješno mjerenje OEE-a, u odjeljku 5 ovog rada, dana je detaljna procedura mjerenja OEE-a, uključujući podatke koje je potrebno bilježiti i sam izračun. Za bolje razumijevanje gubitaka koje je potrebno evidentirati, dan je pregled kategorija gubitaka.

Model je uspješno implementiran u velikom proizvodnom poduzeću, čime je demonstrirana njegova praktična primjenjivost i učinkovitost. Nakon implementacije TPM-a, ukupni OEE (Overall Equipment Effectiveness) proizvodne opreme značajno je porastao. To je omogućilo smanjenje neplaniranih zastoja, poboljšanje produktivnosti i optimizaciju korištenja resursa. Osim toga, dobre prakse održavanja se kontinuirano prate i evaluiraju, što osigurava dugoročnu održivost i pouzdanost proizvodne opreme.

Model je postao sastavni dio operativnog upravljanja u poduzeću, a on se aktivno i kontinuirano koristi u svojim relevantnim područjima rada autora i mentora ovog rada, potvrđujući njegovu učinkovitost i prilagodljivost. Uvođenje TPM-a nije samo povećalo operativnu učinkovitost, već je također poboljšalo radno okruženje i motivaciju zaposlenika, jer su svi uključeni u proces održavanja i poboljšanja. Slijedeći detaljne upute dane u ovom radu, tehničko osoblje proizvodnog poduzeća može osigurati stratešku, uspješnu i održivu implementaciju TPM metodologije. Upute uključuju jasne korake za svaki dio procesa, od početne obuke i planiranja, preko implementacije osnovnih TPM praksi, do kontinuiranog praćenja i poboljšanja. Također su navedene preporuke za prilagodbu modela specifičnim potrebama poduzeća, osiguravajući da se TPM može integrirati u različite proizvodne okruženja.

Model optimizacije održavanja može se značajno poboljšati korištenjem modernih računalnih alata. Istraživanja su pokazala da se heurističke tehnike poput metode "Monte Carlo" (MC) ili linearno programiranje mogu koristiti za stvaranje prediktivnih ili optimizacijskih modela. Ti modeli mogu poslužiti kao temelj za donošenje informiranih odluka s ciljem poboljšanja praksi održavanja. Prepoznavanje paradigme Industrije 4.0 (I4.0) u rješavanju izazova opisanih u studiji je značajno. I4.0, koja predstavlja četvrtu industrijsku revoluciju, integrira digitalne tehnologije, automatizaciju i razmjenu podataka u proizvodne procese, što vodi stvaranju "pametnih tvornica". Lean automatizacija (LA) unutar okruženja I4.0 pozitivno utječe na operativne performanse poboljšavajući produktivnost, isporuku, upravljanje zalihama i kvalitetu. Planiranje u stvarnom vremenu i dinamička samooptimizacija, koja zamjenjuje tradicionalno planiranje temeljeno na prognozama, transformativni su aspekti koje su autori istaknuli. IoT uređaji omogućuju prikupljanje podataka za prediktivno održavanje, dok Digitalni Blizanci (DT) osnažuju TPM prakse. Virtualna stvarnost (VR) služi kao alat za obuku, a inteligentni sustavi povezani mrežom imaju za cilj samo-regulirajuće proizvodne procese. Podatkovna znanost igra ključnu ulogu, omogućujući donošenje odluka temeljenih na podacima unutar I4.0. Transparentnost i dostupnost podataka u stvarnom vremenu pojednostavljaju procese, povećavaju zadovoljstvo zaposlenika i pridonose informiranom donošenju odluka, posebno u odabiru opreme za implementaciju TPM-a. Sveukupno, integracija tehnologija Industrije 4.0 nudi obećavajuća rješenja za izazove u lean proizvodnji, osiguravajući uspješnu implementaciju i održivost lean alata i TPM praksi.

Pregledom nedavne literature na temu implementacije TPM-a (Total Productive Maintenance) i prednosti TPM-a u proizvodnim poduzećima evidentno je da TPM donosi mnoge prednosti i uštede u proizvodnji. Oprema postaje učinkovitija i pouzdanija, a proizvodnja se može optimizirati kako bi se postigao najbolji materijalni output. Osim što smanjuje neplanirane zastoje i povećava proizvodnu učinkovitost, TPM također poboljšava ukupnu kvalitetu proizvoda, smanjuje troškove održavanja i produžava vijek trajanja opreme. Iako se pokazalo da je TPM izuzetno koristan, nedostaje literatura koja detaljno obrađuje strategije i postupke implementacije TPM-a. Neka dostupna literatura temelji strategije implementacije na PDCA (Plan-Do-Check-Act) ciklusu. PDCA ciklus je dobar univerzalni model za optimizaciju jer osigurava kontinuirano poboljšanje procesa kroz planiranje, provedbu, provjeru i djelovanje. Međutim, PDCA je grubi vodič za složenu metodologiju poput TPM-a i ne pruža dovoljno detalja za sveobuhvatnu implementaciju u proizvodnim poduzećima. Ovaj rad sažima stručna znanja, primjere najbolje prakse i dostupne postupke

koji su se pokazali korisnima u implementaciji TPM-a. Daje detaljne upute za implementaciju TPM-a koje se mogu prilagoditi za potrebe svakog proizvodnog poduzeća, uzimajući u obzir specifične zahtjeve i uvjete svake proizvodne linije ili postrojenja.

## 8. LITERATURA

1. Szwejczewski, Marek, et al. "Cost Reduction through total productive maintenance." *Learning From World-Class Manufacturers* (2013): 66-83.
2. Madanhire, Ignatio, and Charles Mbohwa. "Implementing successful Total Productive Maintenance (TPM) in a manufacturing plant." *Proceedings of the world congress on engineering*. Vol. 2. 2015.
3. Gunasekaran, A., et al. "The impact of OPT and TPM on the economic production quantity." *International journal of systems science* 26.9 (1995): 1715-1727.
4. Lee, Jay. "Modern computer-aided maintenance of manufacturing equipment and systems: review and perspective." *Computers & industrial engineering* 28.4 (1995): 793-811.
5. Panagiotidou, Sofia, and George Tagaras. "Evaluation of maintenance policies for equipment subject to quality shifts and failures." *International Journal of Production Research* 46.20 (2008): 5761-5779.
6. Venkatesh, Jindal. "An introduction to total productive maintenance (TPM)." *The plant maintenance resource center* (2007): 3-20.
7. <https://www.webofknowledge.com/>, 24.01.2024.
8. Virk, Shahryar Irfan, et al. "Review of Total Productive Maintenance (TPM) & Overall Equipment Effectiveness (OEE) Practices in Manufacturing Sectors." *Proceedings of the International Conference on Industrial & Mechanical Engineering and Operations Management Dhaka, Bangladesh*. 2020.
9. Tsarouhas, P. H., Evaluation of overall equipment effectiveness in the beverage industry : a case study. 7543. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.653014>, 2013.
10. Lahri, V., & Pathak, P., A Case Study of Implementation of Overall Equipment Effectiveness on CNC Table type boring & milling machine of a Heavy Machinery Manufacturing Industry. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(5), 63–70. <https://doi.org/10.9790/1684-12556370>, 2015.
11. Rajput, S., Khan, M. A., Samejo, S., Murtaza, G. & Rao, A. A., Productivity Improvement by the Implementation of lean manufacturing practice (takt time) in an automobile assembling plant, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dubai, UAE, March 10-12, 2020*.

12. Adesta, Erry YT, Herry Agung Prabowo, and Delvis Agusman. "Evaluating 8 pillars of Total Productive Maintenance (TPM) implementation and their contribution to manufacturing performance." IOP conference series: materials science and engineering. Vol. 290. No. 1. IOP Publishing, 2018.
13. Nakajima, S. Introduction to Total Productive Maintenance (TPM); Productivity Press: Portland, OR, USA, 1988.
14. Manihalla, Prashanth Pai, et al. "A survey on factors affecting total productive maintenance (TPM) in service industries." AIP Conference Proceedings. Vol. 2080. No. 1. AIP Publishing, 2019.
15. Jain, Abhishek, Harwinder Singh, and Rajbir S. Bhatti. "Identification of key enablers for total productive maintenance (TPM) implementation in Indian SMEs: A graph theoretic approach." Benchmarking: An International Journal 25.8 (2018): 2611-2634., <https://doi.org/10.1108/BIJ-02-2016-0019>
16. Poduval, P.S.; Pramod, V.R.; Jagathy Ray, V.P. Interpretive Structural Modeling (ISM) and its application in analyzing factors inhibiting implementation of Total Productive Maintenance (TPM). *Int. J. Qual. Reliabil. Manag.* 2015, 32, 308–331. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2013-0090>.
17. Munir, M.A.; Zaheer, M.A.; Haider, M.; Rafique, M.Z.; Rasool, M.A.; Amjad, M.S. Problems and Barriers Affecting Total Productive Maintenance Implementation. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 2019, 9, 4818–4823. <https://doi.org/10.48084/etasr.3082>.
18. Xiang, Z.T.; Feng, C.J. Implementing total productive maintenance in a manufacturing small or medium-sized enterprise. *J. Ind. Eng. Manag.* 2021, 14, 152–175. <https://doi.org/10.3926/jiem.3286>.
19. Pačaiová, H.; Ižaričková, G. Base Principles and Practices for Implementation of Total Productive Maintenance in Automotive Industry. *Qual. Innov. Prosper.* 2019, 23, 45–59. <https://doi.org/10.12776/QIP.V23I1.1203>.
20. Chaurey, S.; Kalpande, S.D.; Gupta, R.; Toke, L.K. A review on the identification of total productive maintenance critical success factors for effective implementation in the manufacturing sector. *J. Qual. Maint. Eng.* 2023, 29, 114–135. <https://doi.org/10.1108/jqme-11-2020-0118>.
21. Bon, Abdul Talib, and Mandy Lim. "Total Productive Maintenance in automotive industry: Issues and effectiveness." 2015 international conference on industrial engineering and operations management (IEOM). IEEE, 2015.

22. Modgil, Sachin, and Sanjay Sharma. "Total productive maintenance, total quality management and operational performance: An empirical study of Indian pharmaceutical industry." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 22.4 (2016): 353-377.
23. Singh, Sukhpreet, et al. "Implementation of Total Productive Maintenance Approach: Improving Overall Equipment Efficiency of a Metal Industry." *Inventions* 7.4 (2022): 119.
24. Wickramasinghe, G. L. D., and Asanka Perera. "Effect of total productive maintenance practices on manufacturing performance: Investigation of textile and apparel manufacturing firms." *Journal of Manufacturing Technology Management* 27.5 (2016): 713-729.
25. Toke, Lalit K., and Shyamkumar D. Kalpande. "An assessment of key performance indicators and its relationship for implementation of total productive maintenance in manufacturing sector." *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* (2023): 1-13.
26. Schindlerová, Vladimíra, et al. "Potential of using TPM to increase the efficiency of production processes." *Tehnički vjesnik* 27.3 (2020): 737-743.
27. Bataineh, Omar, et al. "A sequential TPM-based scheme for improving production effectiveness presented with a case study." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 25.1 (2019): 144-161.
28. Sahoo, Saumyaranjan. "Assessment of TPM and TQM practices on business performance: a multi-sector analysis." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 25.3 (2019): 412-434.
29. Singh, Kanwarpreet, and Inderpreet Singh Ahuja. "An evaluation of transfusion of TQM-TPM implementation initiative in an Indian manufacturing industry." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 21.2 (2015): 134-153.
30. Khalfallah, Meriem, and Lassaad Lakhel. "The relationships between TQM, TPM, JIT and agile manufacturing: an empirical study in industrial companies." *The TQM Journal* 33.8 (2021): 1735-1752.
31. Necas, L. Training and practice to ensure implementation of the TPM system. *MM Sci. J.* 2020, 2020, 4124–4127. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020\\_11\\_2020043](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_11_2020043).
32. Manihalla, Prashanth Pai, et al. "A survey approach to study the influence of management factor in implementing TPM in selected SMEs." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2236. No. 1. AIP Publishing, 2020.

33. Yingkai, et al. "Impact of human error on electrical equipment preventive maintenance policy." 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015.
34. Khan, M. A., Preliminary study on lean manufacturing practices at yarn manufacturing industry: A case study, Masters of Engineering (Thesis), Department of Industrial Engineering & Management, Mehran University of Engineering & Technology, Jamshoro, 76062, Sindh, Pakistan, 2018.
35. Nisbantor, F. U., Jinan, R., & Purba, H. H., Measurement Overall Equipment Effectiveness on Injection Moulding Machine : A Case Study in Injection Moulding Manufacturing Industry. 8, 62–69, 2018.
36. Saleem, F., & Nisar, S., Overall equipment effectiveness of tyre curing press : a case study. 23(1), 39–56. <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2015-0021>, 2017.
37. Sahito. S. A., Khan, M. A., Arain, A. A., Bhutto, S. A., Wadhyo, R., & Memon, S. A., A Study For The Identification And Elimination Of Lean Manufacturing Wastes At The Pharmaceutical Production Plant, Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dubai, UAE, March 10-12, 2020.
38. Morales Méndez, Jonathan David, and Ramon Silva Rodriguez. "Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: a case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92 (2017): 1013-1026.
39. Chen, Ping-Kuo, et al. "Sustainable manufacturing: Exploring antecedents and influence of Total Productive Maintenance and lean manufacturing." *Advances in mechanical engineering* 11.11 (2019): 1687814019889736.
40. Tortorella, Guilherme Luz, et al. "Digitalization of maintenance: exploratory study on the adoption of Industry 4.0 technologies and total productive maintenance practices." *Production Planning & Control* (2022): 1-21.
41. Jain, Abhishek, Rajbir S. Bhatti, and Harwinder Singh. "OEE enhancement in SMEs through mobile maintenance: a TPM concept." *International Journal of Quality & Reliability Management* 32.5 (2015): 503-516.
42. Qingfeng, Wang, et al. "Development and application of equipment maintenance and safety integrity management system." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24.4 (2011): 321-332.



43. Tsarouhas, Panagiotis H. "Equipment performance evaluation in a production plant of traditional Italian cheese." *International Journal of Production Research* 51.19 (2013): 5897-5907.
44. Chen, Xiaohui, et al. "An integrated model of production scheduling and maintenance planning under imperfect preventive maintenance." *Eksploracja i Niezawodność* 17.1 (2015): 70-79.
45. Quinn, Brigid Mary. *Planned maintenance systems with respect to modern manufacturing strategies*. Diss. Durham University, 1989.
46. Ferreira, Cloves Wanderlande Torres, and Jandecy Cabal Leite. "Applied autonomous maintenance in the improvement of production quality: A case study." *ITEGAM-JETIA* 2.7 (2016).
47. Kigsirisin, Soraphon, Sirawit Pussawiro, and Onurai Noohawm. "Approach for total productive maintenance evaluation in water productivity: A case study at Mahasawat water treatment plant." *Procedia Engineering* 154 (2016): 260-267.
48. Kodali, Rambabu, and Subhash Chandra. "Analytical hierarchy process for justification of total productive maintenance." *Production Planning & Control* 12.7 (2001): 695-705.
49. Manzini, Riccardo, et al. "The scheduling of maintenance. A resource-constraints mixed integer linear programming model." *Computers & Industrial Engineering* 87 (2015): 561-568.
50. Jaturonnate, Jarumon, D. N. P. Murthy, and Rein Boondiskulchok. "Optimal preventive maintenance of leased equipment with corrective minimal repairs." *European Journal of Operational Research* 174.1 (2006): 201-215.
51. Saleh, N., et al. "A new approach for preventive maintenance prioritization of medical equipment." *XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013: MEDICON 2013*, 25-28 September 2013, Seville, Spain. Springer International Publishing, 2014.
52. Alsubaie, Barrak, and Qingping Yang. "Maintenance process improvement model by integrating LSS and TPM for service organisations." *Engineering Asset Management 2016: Proceedings of the 11th World Congress on Engineering Asset Management*. Springer International Publishing, 2018.
53. Nithiyanandhan, V., and KM Senthil Kumar. "Total Productive Maintenance (TPM) Implementation Process in Machining Line." *Journal on Science Engineering & Technology* 3.1 (2016): 17-24.

54. Ng, K.C.; Goh GG, G.; Eze, U.C. Barriers in total productive maintenance implementation in a semiconductor manufacturing firm: A case study. In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong, China, 10–13 December 2012.
55. Ramakrishnan, V.; Nallusamy, S. Implementation of total productive maintenance lean tool to reduce lead time—A case study. *Int. J. Mech. Eng. Technol.* 2017, 8, 295–306.
56. Suryaprakash, M.; Prabha, M.G.; Yuvaraja, M.; Revanth, R.R. Improvement of overall equipment effectiveness of machining centre using tpm. *Mater. Today Proc.* 2021, 46, 9348–9353. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.820>.
57. Andras, I.; Nan, M.S.; Kovacs, I.; Cristea, D.; Tomescu, L.C. Research regarding the OEE (overall equipment effectiveness) assessment of the coal open pit mines production system. *Ann. Univ. Petroşani Mech. Eng.* 2006, 8, 139–146.
58. Nahavandi, S. Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability* 2019, 11, 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>.
59. Ozkeser, B. Lean innovation approach in Industry 5.0. *Eurasia Proc. Sci. Technol. Eng. Math.* 2018, 2, 422–428.
60. Žmuk, B. The most common problems and challenges in conducting business web surveys. *Oeconomica Jadertina* 2019, 9, 52–60.
61. Tuten, T.L. *Advanced Methods for Conducting Online Behavioural Research*; Gosling, S.D., Johnson, J.A., Eds; American Psychological Association: Washington, DC, USA, 2010; pp.179–192.
62. Payne, R.; Harding WS, A.; Murray, D.A.; Soutar, D.M.; Baird, D.B.; Glaser, A.I. *A Guide to ANOVA and Design in GenStat*; VSN International: Hempstead, UK, 2022.
63. McHugh, M.L. Multiple comparison analysis testing in ANOVA. *Biochem. Medica* 2011, 21, 203–209.
64. Travers, J.C.; Cook, B.G.; Cook, L. Null Hypothesis Significance Testing and p-values. *Learn. Disabil. Res. Pr.* 2017, 32, 208–215. <https://doi.org/10.1111/ldrp.12147>.
65. Kim, H.-Y. Analysis of variance (ANOVA) comparing means of more than two groups. *Restor. Dent. Endod.* 2014, 39, 74–77. <https://doi.org/10.5395/rde.2014.39.1.74>.
66. VVaske, J.J.; Beaman, J.; Sponarski, C.C. Rethinking Internal Consistency in Cronbach’s Alpha. *Leis. Sci.* 2017, 39, 163–173. <https://doi.org/10.1080/01490400.2015.1127189>.

67. Adeniran, A.O. Application of Likert Scale's Type and Cronbach's Alpha Analysis in an Airport Perception Study. *Sch. J. Appl. Sci. Res.* 2019, 2, 1–5.
68. Orcan, F. Comparison of Cronbach's alpha and McDonald's omega for ordinal data: Are they different? *Int. J. Assess. Tools Educ.* 2023, 10, 709–722.  
<https://doi.org/10.21449/ijate.1271693>.
69. Definition of internal auditing, IIA Global. 2015. Available online:  
<https://na.theiia.org/standardsguidance/mandatory-guidance/Pages/Definition-of-Internal-Auditing.aspx> (accessed on 12 December 2023).
70. Dobrowolski, Z.; Sulkowski, L.; Adamisin, P. Innovative ecosystem: The role of lean management auditing. *Mark. Manag. Innov.* 2022, 13, 9–20.  
<https://doi.org/10.21272/mmi.2022.3-01>.
71. Barišić, I.; Tušek, B. The importance of the supportive control environment for internal audit effectiveness—The case of Croatian companies. *Econ. Res. Ekon. Istraživanja* 2016, 29, 1021–1037. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2016.1211954>.
72. Mohammadi, Z.; Shahbazi, S.; Kurdve, M. Critical factors in designing of lean and green equipment. In *Proceedings of the Cambridge International Manufacturing Symposium, (CIM Conference), Cambridge, UK, 11–12 September 2014*.
73. Manyika, J.; Lund, S.; Chui, M.; Bughin, J.; Woetzel, J.; Batra, P.; Ko, R.; Sanghvi, S. *Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation*; McKinsey Global Institute: San Francisco, CA, USA, 2017; Volume 11.
74. Cadiat, A.; Pichère, P. *Maslow's Hierarchy of Needs: Understand the True Foundations of Human Motivation*; 50 Minutes: New York, NY, USA, 2015.
75. McClelland, D.C. *Human Motivation*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1988.
76. Herzberg, F. One More Time: How Do You Motivate Employees? *Harvard Business Review*: Boston, MA, USA, 1976, Volume 40, pp.53–62.
77. Slavina, T. and Štefanić N., 2024. "Facing Challenges of Implementing Total Productive Management and Lean Tools in Manufacturing Enterprises" *Systems* 12, no. 2: 52. <https://doi.org/10.3390/systems12020052>
78. Osada, T. (1991). *The 5S's: Five keys to a Total Quality Environment*. Tokyo: Asian Productivity Organisation.
79. Hirano, H. (1995). *5 Pillars of the visual workplace: The sourcebook for 5S implementation*. New York: Productivity Press.

80. Kobbacy, Khairy AH, et al. "Maintenance: an evolutionary perspective." *Complex system maintenance handbook* (2008): 21-48., [https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_2)
81. Azizi, Amir. "Evaluation improvement of production productivity performance using statistical process control, overall equipment efficiency, and autonomous maintenance." *Procedia manufacturing* 2 (2015): 186-190., <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.032>
82. Rossini, M.; Costa, F.; Tortorella, G.L.; Valvo, A.; Portioli-Staudacher, A. Lean Production and Industry 4.0 integration: how Lean Automation is emerging in manufacturing industry. *Int. J. Prod. Res.* 2022, 60, 6430–6450. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1992031>.
83. Ciano, M.P.; Dallasega, P.; Orzes, G.; Rossi, T. One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. *Int. J. Prod. Res.* 2021, 59, 1386–1410. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1821119>.
84. Mayr, A.; Weigelt, M.; Köhl, A.; Grimm, S.; Erll, A.; Potzel, M.; Franke, J. Lean 4.0—A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia CIRP* 2018, 72, 622–628. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.292>.
85. Kovacs, G.; Kot, S. New Logistics and Production Trends as the Effect of Global Economy Changes. *Pol. J. Manag. Stud.* 2016, 14, 115–126. <https://doi.org/10.17512/pjms.2016.14.2.11>.
86. Pozzi, R.; Cannas, V.G.; Ciano, M.P. Linking data science to lean production: a model to support lean practices. *Int. J. Prod. Res.* 2022, 60, 6866–6887. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1946192>.
87. Li, Jingshan, and Dennis E. Blumenfeld. "Quantitative analysis of a transfer production line with Andon." *IIE Transactions* 38.10 (2006): 837-846.
88. Lei, Gang, Guoping Lu, and Yu Sang. "Design of wireless Andon system based on ZigBee." 2015 8th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI). IEEE, 2015.
89. Ma, Yan Hong, Yao Xie, and Lian Gang Liu. "Intelligent and Real-Time Information System of Production Manufacturing Based on Internet of Things Technology." *Applied Mechanics and Materials* 651 (2014): 1594-1598.
90. Hedman, R., Subramaniyan, M., & Almström, P., Analysis of critical factors for automatic measurement of OEE. *Procedia Cirp*, 57, 128-133, 2016.

91. Muchiri, Peter Nganga, et al. "Modelling maintenance effects on manufacturing equipment performance: results from simulation analysis." *International Journal of Production Research* 52.11 (2014): 3287-3302.
92. Anton-Haro, Carles, and Mischa Dohler. *Machine-to-machine (M2M) Communications*. Woodhead Publishing, 2014.
93. Kaliczyńska, Małgorzata, and Przemysław Dąbek. "Value of the internet of things for the industry—an overview." *Mechatronics-Ideas for Industrial Application* (2015): 51-63.
94. Lvqing, Yang. "The analysis and design of machinery production monitoring system based on Internet of Things." *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*. IEEE, 2011.
95. Chen, Cui Song. "Database Cluster System Design Based on the Internet of Things." *Applied Mechanics and Materials* 556 (2014): 5748-5751.
96. Qu, Ting, et al. "Internet-of-things-enabled smart production logistics execution system based on cloud manufacturing." *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Vol. 45806. American Society of Mechanical Engineers, 2014.
97. Qu, Ting, et al. "Internet-of-Things-based just-in-time milk-run logistics routing system." *2015 IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control*. IEEE, 2015.
98. Dvornik, Josip. "Numeričke, simboličke i heurističke metode." *Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Građevinar* 55 (2003): 575-582.
99. Gudlin, Mihael, *Faktorska analiza i planiranje pokusa*, seminar paper, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2016.
100. Negnevitsky, Michael. *Artificial intelligence: a guide to intelligent systems*. Pearson education, 2005.
101. Crnjac Milić, Dominika, and Dino Masle. "Mogućnost primjene Monte Carlo metode na primjeru agroekonomskog problema prilikom donošenja odluka u uvjetima rizika." *Ekonomski vjesnik* 26.1 (2013).
102. Cvetković et. al., (1996), *Kombinatorna optimizacija*, book, 1996
103. Šošić, V., Serdar, I., *Uvod u statistiku*, Zagreb, Školska knjiga, 2000.
104. *Introduction to Statistics for Data Science*, Diogo Menezes Borges, *The Making Of... a Data Scientist*. Accessed at: <https://medium.com/diogo-menezes-borges/introduction-to-statistics-for-data-science-7bf596237ac6>

105. Runje, Biserka, Diplomski rad: Procjenjivanje sposobnosti procesa i sposobnosti mjernog sustava, 2009, Zagreb
106. Kralj, Hrvoje. Procjenjivanje sposobnosti procesa i sposobnosti mjernog sustava. Diss. University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2009.
107. Bertsimas, Dimitris, and John N. Tsitsiklis. Introduction to linear optimization. Vol. 6. Belmont, MA: Athena scientific, 1997.

## ŽIVOTOPIS

Tomislav Slavina rođen je 19.11.1988. u Zagrebu. Završio je srednju strukovnu školu u Samoboru, zanimanje Tehničar za Mehatroniku te maturirao s odličnim uspjehom. Po završetku srednje škole upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu. Obranom diplomskog rada 2012. godine pod nazivom “Računalni program za pripremu robotskog neurokirurškog operativnog zahvata” stječe akademski naziv magistar inženjer strojarstva.

Od 2013. godine radi u struci, najprije u tvrtci E.G.O. elektrokomponente u tehničkom uredu, a nakon toga, od 2019. godine u Hrvatskoj kovnici novca, gdje postaje zamjenik direktora proizvodnje. Posjeduje certificate za internog auditora ISO 9001 i ISO 50001, certifikat lean trenera stečenog u Njemačkoj na školovanju te odlično poznaje rad na računalu (Microsoft Office alati, Matlab, Latex, AutoCad, SolidWorks, Catia I razni ERP sustavi).

Posjeduje znanje stranih jezika i to C1 razina iz engleskog te A1 razina iz njemačkog jezika. 2015. godine upisuje poslijediplomski doktorski studij te uspješno brani temu pod nazivom “Model održive učinkovitosti i raspoloživosti proizvodne opreme”. Istraživanjem na području dokorskog studija sudjelovao je na brojnim konferencijama te objavio više radova. Od hobija, rekreativno se bavi nogometom te voli čitati knjige.

## **BIOGRAPHY**

Tomislav Slavina was born on November 19, 1988, in Zagreb. He graduated from the vocational high school in Samobor, specializing in Mechatronics, with excellent success. After completing high school, he enrolled at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. In 2012, he defended his master's thesis titled "Computer Program for the Preparation of Robotic Neurosurgical Procedures," earning the academic title of Master of Mechanical Engineering.

Since 2013, he has been working in his field, initially at E.G.O. Elektrokomponente in the technical office, and since 2019, at the Croatian Mint, where he became the Deputy Director of Production. He holds certificates for internal auditor ISO 9001 and ISO 50001, as well as a Lean Trainer certificate obtained in Germany. He has excellent computer skills, including proficiency in Microsoft Office tools, Matlab, Latex, AutoCad, SolidWorks, Catia, and various ERP systems.

He possesses language proficiency in English at the C1 level and German at the A1 level. In 2015, he enrolled in a postgraduate doctoral study and successfully defended his thesis theme titled "Model of Sustainable Efficiency and Availability of Production Equipment." Through his doctoral research, he participated in numerous conferences and published several papers. As a hobby, he recreationally plays football and enjoys reading books.



## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

1. Slavina, Tomislav. *Biokompatibilnost materijala*. Diss. University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2011.
2. Slavina, Tomislav. *Computer program for preoperative planning of a robotic neurosurgical procedure*. Diss. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2012.
3. Nedeljko, Štefanić, and Tomislav Slavina. "Upotreba lean alata u svrhu povećanja učinkovitosti cjeloživotnog upravljanja proizvodom." *MOTSP, 7th International Scientific Conference*. 2015.
4. Slavina, T. (2017). Model of Integrated System for monitoring and increasing availability and efficiency of production equipment. In *Management of Technology-Step to Sustainable Production 2017* (pp. 23-23).
5. Slavina, Tomislav. "MODEL OF INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING AND INCREASING AVAILABILITY AND EFFICIENCY OF PRODUCTION EQUIPMENT." *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering* 16.1 (2018).
6. Slavina, Tomislav, and Nedeljko Štefanić. "Facing Challenges of Implementing Total Productive Management and Lean Tools in Manufacturing Enterprises." *Systems* 12.2 (2024): 52., <https://doi.org/10.3390/systems12020052>
7. Slavina, Tomislav, "TIPAS – NEW UNIVERSAL IMPLEMENTATION MODEL FOR PRODUCTION ENTERPRISES" Lean Spring Summit conference, Rijeka, 2024