

Suvremeni alati za primjenu Šest sigma metodologije

Lončar, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:085586>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-06**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Lončar

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Cajner, dipl. ing

Student:

Ivan Lončar

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svom mentoru Izv. prof. dr. sc. Hrvoju Cajneru na susretljivosti i pruženoj pomoći u pisanju ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom dosadašnjeg studija.

Ivan Lončar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Lončar** Mat. br.: 0035207389

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Suvremeni alati za primjenu Šest sigma metodologije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modern tools for applying Six sigma methodology**

Opis zadatka:

Primarna zadaća poduzeća jest zadovoljstvo kako krajnjih korisnika tako i dionika procesa. S obzirom na činjenicu da je proces konstantno u dinamici potrebna je kontinuirana kontrola i kontinuirano poboljšavanje svih aktivnosti u procesu. Do danas je razvijeno mnogo alata, tehnika i metoda kojima se uspješno kontrolira i unaprjeđuje proces. Šest sigma metodologija je jedna od najčešće korištenih metodologija koja se primarno fokusira na smanjenje nesukladnosti u procesu. Razvojem tehnologije i njenom dostupnošću mijenja se i brzina i način aplikacija Šest sigma metodologije.

U radu je potrebno:

1. Sistematizirati tradicionalne metode i alate Šest sigma metodologije.
2. Istražiti i sistematizirati promjene u pristupu provođenja Šest sigma metodologije u posljednjih nekoliko godina, a vezano na aplikaciju novih tehnoloških rješenja.
3. Analizirati dostupna programska rješenja koja se koriste za provođenje Šest sigma metodologije.
4. Na dostupnom primjeru razraditi koncept primjene odabranog programskog rješenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Cajner

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. Šest sigma metodologija.....	2
2.1. DMAIC metoda.....	3
2.1.1. Faza definiranja (engl. Define)	3
2.1.2. Faza mjerenja (engl. Measure).....	7
2.1.2.1. Izrada mape procesa.....	7
2.1.2.2. FMEA metoda.....	9
2.1.2.3. Procjena sposobnosti procesa	9
2.1.2.4. Procjena mjernog sustava	12
2.1.3. Faza analiziranja (engl. Analyze).....	13
2.1.3.1. Testiranje hipoteza	13
2.1.3.2. Korelacija i regresija	14
2.1.3.3. Analiza varijance (ANOVA)	14
2.1.3.4. Ishikawa dijagram.....	15
2.1.4. Faza unaprjeđivanja (engl. Improve)	16
2.1.4.1. Planiranje i analiza pokusa (DOE).....	17
2.1.4.2. QFD metoda.....	18
2.1.5. Faza kontroliranja (engl. Control).....	19
2.1.5.1. Statistička kontrola procesa (SPC).....	20
2.1.5.2. Poka-Yoke metoda.....	21
2.1. Oblikovanje za šest sigmu (DFSS)	22
3. Moderni pristupi u primjeni šest sigme	24
3.1. Industrija 4.0	24
3.2. Utjecaj Industrije 4.0 na šest sigmu	25
3.2.1. Umjetna inteligencija	25
3.2.1.1. Rudarenje procesa.....	26
3.2.2. eKanban sustavi	30
3.2.3. Internet stvari i Blockchain.....	31
4. Programska rješenja u primjeni šest sigme.....	34
4.1. Statistički alati.....	34
4.2. Sustavi za poslovno planiranje resursima	36
5. Primjena programskih rješenja na simuliranom problemu.....	38
6. ZAKLJUČAK.....	49

LITERATURA.....	50
PRILOZI.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1.	Pareto dijagram razine 1 i 2 [1]	4
Slika 2.	CTQ stablo [3].....	5
Slika 3.	SIPOC dijagram [1].....	6
Slika 4.	Mapiranje toka vrijednosti (VSM mapa) [4].....	8
Slika 5.	Ilustracija indeksa sposobnosti procesa C_p i C_{pk} [2].....	11
Slika 6.	Indeks sposobnosti usluge (SCI) [2]	12
Slika 7.	Shema Ishikawa dijagrama [8].....	16
Slika 8.	Shema modela planiranja pokusa [6]	17
Slika 9.	Primjer QFD matrice [10]	19
Slika 10.	Kontrolne karte [11]	21
Slika 11.	Shema PMSS-a [17]	27
Slika 12.	Odoo – šest sigma projektni tim.....	38
Slika 13.	Odoo – zadavanje aktivnosti (DMAIC)	39
Slika 14.	Odoo – VOC anketa	39
Slika 15.	Minitab – Pareto dijagram za svako skladište	40
Slika 16.	Odoo – ažuriranje aktivnosti i prijelaz na sljedeću fazu	40
Slika 17.	Minitab – deskriptivna statistika – vrijeme isporuke u danima.....	41
Slika 18.	Minitab – histogram vremena isporuke za svako skladište.....	41
Slika 19.	Minitab – kontrolna karta za istočno skladište.....	42
Slika 20.	Minitab – kontrolna karta za središnje skladište	42
Slika 21.	Minitab – kontrolna karta za zapadno skladište	42
Slika 22.	Minitab – dijagram korelacije svakog skladišta	43
Slika 23.	Odoo – ažuriranje aktivnosti i prijelaz na sljedeću fazu (2).....	43
Slika 24.	Minitab – deskriptivna statistika – vrijeme isporuke u danima, nakon izmjena ...	44
Slika 25.	Minitab – histogram vremena isporuke za svako skladište nakon izmjena	44
Slika 26.	Minitab – dijagram korelacije svakog skladišta nakon izmjena.....	45
Slika 27.	Minitab – Pareto dijagram za svako skladište nakon izmjena.....	45
Slika 28.	Odoo – ažuriranje aktivnosti i prijelaz na sljedeću fazu (3).....	46
Slika 29.	Minitab – kontrolna karta za istočno skladište nakon izmjena	46
Slika 30.	Minitab – kontrolna karta za središnje skladište nakon izmjena.....	47
Slika 31.	Minitab – kontrolna karta za zapadno skladište nakon izmjena.....	47
Slika 32.	Odoo – ažuriranje projekta i završetak projektnih aktivnosti.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Struktura 6 σ pojaseva.....	6
Tablica 2. Primjer FMEA tablice [2].....	9
Tablica 3. DMAIC i rudarenje procesa [15].....	29
Tablica 4. Usporedba značajki statističkih programskih rješenja	35
Tablica 5. Usporedba alata anlike varijance	35
Tablica 6. Usporedba alata regresijske analize	35
Tablica 7. Usporedba grafičke obrade podataka	36
Tablica 8. Usporedba moudla za predanalizu podataka	36

POPIS KRATICA

5W1H – *What? Where? When? Who? Why? How?*

6M – *Machine, material, method, manpower, measurement, Mother Nature*

AI – *Artificial Intelligence*

ANOVA – *Analysis of Variance*

AS – *Adequate service*

CCR – *Critical to customer*

COGQ – *Cost of good quality*

COPQ – *Cost of poor quality*

COQ – *Cost of quality*

CPS – *Cyber-physical system*

CTD – *Critical to delivery*

CTQ – *Critical to quality*

CTS – *Critical to satisfaction*

DFSS – *Design for Six Sigma*

DMAIC – *Define, Measure, Analyse, Improve and Control*

DOE – *Design of experiments*

DS – *Desired service*

ERP – *Enterprise resource planning*

FMEA – *Failure mode and effects analysis*

GGG/DGS – *gornja/donja granica specifikacije*

GKG/DKG – *gornja/donja kontrolna granica*

GLM – *Generalized linear model*

GPS – *Global Positioning System*

IoT – *Internet of Things*

JIT – *Just-in-time*

LoRaWAN – *Long range wide-area network*

MBQA – *Malcom Baldrige Quality Award*

MRP – *Material requirements planning*

MSA – *Measurement systems analysis*

OFAT – One factor at a time

PLM – Product lifecycle management

PMSS – Process Mining for Six Sigma

QFD – Quality function deployment

RPN – Risk priority number

SCI – Service capability index

SIPOC – Supplier, input, process, output, customer

SPC – Statistical process control

TPS – Toyota Production System

VOC – Voice of the customer

VOP – Voice of the process

VSM – Value stream mapping

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
\bar{x}	-	aritmetička sredina uzorka
μ	-	aritmetička sredina populacije
C_p	-	potencijalna sposobnost procesa
C_{pk}	-	demonstrirana izvrsnost procesa
r	-	Pearsonov koeficijent korelacije
σ	-	standardna devijacija
σ^2	-	varijanča

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada primjena je suvremenih alata za provedbu šest sigma metodologije. Šest sigma je metodologija kontinuiranog unaprjeđivanja procesa i uklanjanja nesukladnosti. U okviru DMAIC pristupa, u radu su detaljno objašnjeni koraci provođenja projekta poboljšanja šest sigma metodologijom te alati koji se pritom koriste u pojedinim fazama. Zatim su, s obzirom na razvoj novih tehnologija potaknut Industrijom 4.0, istražene promjene u pristupu provođenja šest sigma metodologije. Opisani su suvremeni alati i tehnologije te njihov utjecaj na kontinuirano unaprjeđivanje procesa. Na kraju je napravljen osvrt na programska rješenja koja se koriste za provedbu šest sigma metodologije te je na ilustrativnom primjeru prikazana upotreba dostupnih programskih rješenja.

Ključne riječi: šest sigma, DMAIC, poboljšanje procesa, prikupljanje podataka, analiza podataka, zahtjevi kupaca, kvaliteta

SUMMARY

The topic of this undergraduate thesis is the application of modern tools for the implementation of the Six Sigma methodology. Six Sigma is a methodology for continuous process improvement and elimination of nonconformities. In this paper, within the DMAIC approach, the steps of conducting the Six Sigma improvement project are explained in detail, as well as the tools used in individual phases. Then, given the development of new technologies driven by Industry 4.0, changes in the approach to implementing the Six Sigma methodology were explored. Modern tools and technologies are described and their impact on continuous process improvement. Finally, a review of software solutions used to implement the Six Sigma methodology is made, and the use of some software solutions is shown in an illustrative example.

Key words: Six Sigma, DMAIC, process improvement, data collection, data analysis, customer requirements, quality

1. UVOD

Kako bi osigurala konkurentnost na tržištu, proizvodna i uslužna poduzeća moraju kontinuirano unaprjeđivati vlastite procese i usluge. Bez obzira o kojoj industriji se radilo, uspjeh organizacije mjeri se zadovoljstvom kupaca odnosno korisnika. Stoga je važno odabrati kvalitetnu strategiju upravljanja proizvodnim i poslovnim procesima kako bi se moglo udovoljiti zahtjevima kupaca i korisnika. Brojni su pristupi kojima poduzeća to pokušavaju postići, a jedan od njih, koji se kroz godine provedbe pokazao izuzetno uspješnim, je šest sigma metodologija. Ona se temelji na statistici i kontroli kvalitete i cilj joj je, koristeći brojne tehnike i alate, poboljšati kvalitetu proizvodnje otkrivajući i uklanjajući uzroke nesukladnosti i minimizirajući varijabilnost u proizvodnim i poslovnim procesima. Prikupljajući podatke o ključnim parametrima (kvaliteta, cijena, isporuka) i analizirajući te podatke organizacije mogu identificirati područja koja je potrebno poboljšati.

Najavom Četvrte industrijske revolucije (Industrija 4.0), koja za cilj ima u potpunosti automatizirati tradicionalne proizvodne i industrijske prakse, te razvojem tehnologije i boljom povezanošću svijeta, modernizirali su se tradicionalni alati šest sigma metodologije, tj. pristup i implementacija.

Upotrebom najsuvremenije pametne tehnologije omogućena je automatizacija proizvodnih procesa, praćenje podataka u stvarnom vremenu, trenutno djelovanje na pojedine faze procesa zbog mogućnosti rada na daljinu te rješavanje problema uz minimalnu ljudsku intervenciju. Primjenom takvih sustava minimizira se mogućnost pogrešaka, smanjuje se opterećenje kadrovskih resursa i daje se mogućnost jednostavnije implementacije metodologije kontinuiranog unaprjeđenja kvalitete proizvoda i procesa.

2. Šest sigma metodologija

Šest sigma (6σ) metodologija je koju je 1987. godine, radeći za Motorolu, razvio američki inženjer Bill Smith s ciljem poboljšanja proizvodnih i poslovnih procesa.

Potreba za uvođenjem 6σ programa bila je potaknuta krizom koju je izazvala jaka konkurencija, nedovoljna kvaliteta proizvoda i usluga te visoki troškovi, a 1995. godine Motorola je osvojila prestižnu nagradu za kvalitetu (MBQA – *Malcom Baldrige Quality Award*). [2]

Šest sigma je strukturirana metodologija za poboljšanje procesa i rješavanje problema. Obuhvaća mnoštvo alata, tehnika i smjernica koji za cilj imaju smanjenje varijacija, poboljšanje kvalitete proizvodnih procesa smanjenjem broja nesukladnosti i poboljšanjem sposobnosti procesa, proizvoda i usluga. To se postiže praćenjem i statističkom analizom podataka određenog procesa.

Naziv šest sigma potječe iz statističke kontrole kvalitete gdje je „ σ “ mjera varijabilnosti određenog procesa koji se ponaša prema normalnoj razdiobi, a $k\sigma$ označava razinu kvalitete i govori o učestalosti mogućih pogrešaka uz unaprijed definirane granice tolerancije. 6σ označava šest standardnih devijacija od srednje vrijednosti, odnosno 3,4 nesukladnosti na milijun jedinica.

U posljednje vrijeme šest sigma metodologija razvila se u filozofiju poslovnog menadžmenta čiji je fokus na ispunjavanju zahtjeva kupaca, stalnom unaprjeđenju razumijevanja korisničkih potreba, na poboljšanju i održavanju poslovnih proizvoda i usluga te na povećanju kvalitete, što podrazumijeva smanjenje udjela defekata u proizvodnji i krajnjim proizvodima. Ukratko, to je filozofija koja govori kako se svaki proces može mjeriti i optimizirati.

Dva su osnovna pristupa primjene šest sigma metodologije. Metoda DMAIC koja se primarno koristi za poboljšanje već postojećih poslovnih ili proizvodnih procesa te DFSS metoda koja se uobičajeno koristi pri stvaranju novih procesa, proizvoda ili usluga. U sklopu prethodno navedenih metoda primjenjuju se brojni alati koji omogućuju njihovu pravilnu provedbu.

2.1. DMAIC metoda

DMAIC (engl. DMAIC – *Define, Measure, Analyse, Improve and Control*) metoda podijeljena je u 5 faza koje podrazumijevaju definiciju problema, mjerenje (praćenje) podataka, analizu dobivenih podataka, poboljšanje procesa te njegovu kontrolu. Ideja iza DMAIC pristupa je ta da je svaki, naizgled nerješivi, problem moguće riješiti slijedeći prethodno navedene faze. Važno je napomenuti kako organizacija ne mora nužno biti suočena s nekim problemom kako bi primijenila DMAIC metodologiju već to može biti u svrhu kontinuiranog poboljšanja koje će osigurati konkurentnost na tržištu. Metoda nije strogo linearna te po potrebi zahtijeva vraćanje na prethodne korake kako bi se prikupilo više informacija i dobio bolji uvid u trenutačno stanje.

2.1.1. Faza definiranja (engl. *Define*)

„Faza definiranja osigurava da je problem, odnosno proces izabran za provedbu kroz DMAIC metodologiju poboljšanja procesa povezan s organizacijskim prioritetima i da ima podršku uprave. Ona započinje identificiranjem problema koji je potrebno riješiti, a završava s jasnim razumijevanjem opsega problema.“ [1]

Potrebno je odrediti koji su ciljevi poboljšanja, pomoću kojih je mjerljivih varijabli moguće postići te ciljeve te koliko one u danom trenutku iznose. Ciljevi mogu biti smanjenje nesukladnosti u procesu, smanjenje reklamacija korisnika, ubrzanje isporuke, smanjenje troškova itd. „Definicija problema mora biti temeljena na kvantitativno izraženim činjenicama koje su potkrijepljene analitičkim podacima.“ [2]

Kako odrediti projekt za poboljšanje? Jedan od alata kojim se odabire potencijalni projekt za poboljšanje procesa je izračun troškova. COQ (engl. *Cost of quality*), odnosno trošak kvalitete dijeli se u dvije skupine: trošak sukladnosti i trošak nesukladnosti. Troškovi sukladnosti ili troškovi dobre kvalitete (engl. COGQ – *Cost of good quality*) dijele se na troškove procjene i na troškove prevencije. Troškovi procjene odnose se na inspeksijske aktivnosti (kontrola kvalitete), pregled dokumentacije itd., a troškovi prevencije odnose se na aktivnosti sprječavanja grešaka, planiranje, revizije dobavljača, obuku itd. Troškovi nesukladnosti ili troškovi loše kvalitete (engl. COPQ – *Cost of poor quality*) su troškovi povezani s neispunjavanjem zahtjeva kupaca i oni se dijele na unutarnje i vanjske troškove neuspjeha. Unutarnji troškovi odnose se na otpad, ponovnu obradu, zastoje itd., a vanjski na reklamacije, prigovore, jamstvene zahtjeve...

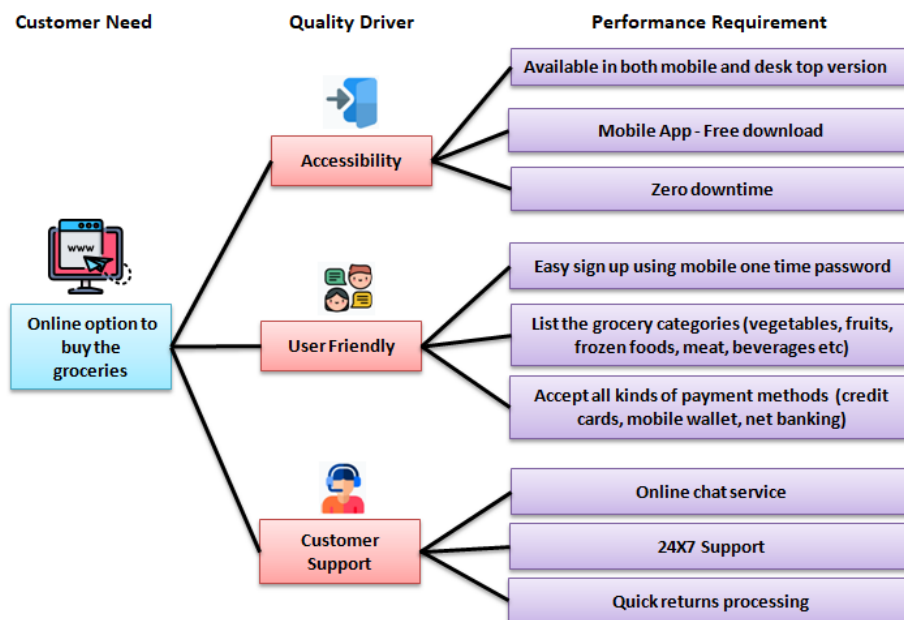
Za otkrivanje uzroka problema, bilo vanjskih ili unutarnjih troškova loše kvalitete, primjenjuje se Pareto analiza (engl. *Pareto analysis*). Pareto analiza je tehnika koja se koristi za donošenje poslovnih odluka i ima primjenu u različitim područjima, od ekonomije do kontrole kvalitete. Statistički odvaja ograničen broj ulaznih čimbenika, bilo poželjnih ili nepoželjnih, koji imaju najveći utjecaj na ishod. Temelji se na Pareto principu, odnosno na „pravilu 80-20“ koje kaže da se 80% problema može svesti na 20% uzroka. To je alat kojim se dobivaju informacije temeljem kojih se postavljaju prioriteta u rješavanju problema.



Slika 1. Pareto dijagram razine 1 i 2 [1]

Više razina Pareto dijagrama daje uvid u prirodu problema koji mogu biti kritični za kvalitetu (engl. CTQ – *Critical to quality*), kritični za isporuku (engl. CTD – *Critical to delivery*) ili kritični za zadovoljstvo (engl. CTS – *Critical to satisfaction*) i povezuje ih s kupcem i dijelom procesa u kojem se taj problem manifestira. CTQ označava ključne karakteristike proizvoda ili usluge koje su kupcu važne. Te mjerljive karakteristike pomažu u razumijevanju koji su koraci u procesu dodane vrijednosti, a koji ne-dodane vrijednosti. Kako bi se to odredilo koristi se VOC (engl. *Voice of the customer*), odnosno glas kupca. VOC je termin koji podrazumijeva detaljno istraživanje i prikupljanje podataka koji se odnose na potrebe, želje i očekivanja kupaca vezana uz kvalitetu proizvoda ili usluga koje im se isporučuju. Pomoću tih podataka utvrđuje

se popis CTQ zahtjeva. CTQ stablo (engl. *Critical to quality tree*) alat je koji se koristi za identifikaciju i popisivanje svih potreba kupaca i prevođenje tih podataka u mjerljive zahtjeve proizvoda ili usluge. CTQ stablo prikazuje potrebe (engl. *needs*), pokretače (engl. *drivers*) i zahtjeve (engl. *requirements*).



Slika 2. CTQ stablo [3]

Nakon određivanja prioriteta među problemima i odabira dijela procesa za poboljšanje, slijedi određivanje opsega problema pomoću SIPOC dijagrama (engl. *Suppliers, input, process, output, customers*) koji daje cjelokupni pregled procesa. SIPOC dijagram alat je koji u formi tablice i blok dijagrama prikazuje *inpute* i *outpute* jednog ili više procesa, a koristi se za definiranje procesa od početka do kraja, prije početka rada. Umjesto SIPOC dijagrama može se koristiti i VSM (engl. *Value stream mapping*), odnosno mapiranje toka vrijednosti. VSM je vizualni alat toka rada, informacija i materijala u procesu koji uključuje sve ključne korake nekog procesa, trajanje pojedinog koraka te opseg. Proces započinje i završava s kupcem.



Slika 3. SIPOC dijagram [1]

Nakon toga potrebno je formirati tim ljudi koji će voditi projekt poboljšanja. Poželjno je da to budu ljudi različitih funkcija kako bi se problem sagledao iz više perspektiva. Nadalje, potrebno je odrediti stručnjaka za područje procesa u kojem je otkriven problem te voditelja tima. Stručnost pojedinca za primjenu šest sigma metodologije određena je šest sigma certifikatom, odnosno šest sigma pojasevima. Tablica 1. prikazuje šest sigma kompetentnost sudionika u šest sigma metodologiji poredano od najveće prema najmanjoj.

Tablica 1. Struktura 6 σ pojaseva

Majstor crnog pojasa	- podučava crne i zelene pojaseve - zadužen za 6 σ program u organizaciji
Crni pojas	- vodi projekte rješavanja problema - podučava projektne timove
Zeleni pojas	- pomaže u prikupljanju i analizi podataka za projekte crnog pojasa - vodi projekte zelenog pojasa i timove
Žuti pojas	- sudjeluje u projektnom timu - pregledava poboljšanja procesa
Bijeli pojas	- ima osnovno znanje o 6 σ - sudjeluje u timu za rješavanje problema

Naposljetku, izrađuje se povelja projekta čime završava faza definiranja. Povelja projekta (engl. *Project Charter*) dokument je koji ukratko prikazuje cijeli projekt. U tom dokumentu nalaze se ciljevi projekta, opseg projekta, sudionici u projektu, njihove uloge i odgovornosti u projektu te odgovorna osoba – voditelj projekta.

2.1.2. Faza mjerenja (engl. *Measure*)

Nakon prethodno definiranih ciljeva odnosno problema slijedi faza prikupljanja (mjerenja) osnovnih podataka o procesu koji se unaprjeđuje. Podaci poput broja nesukladnih proizvoda, aktivnosti, broja neuspjelih ispunjavanja zahtjeva kupaca itd.

Četiri su ključne aktivnosti koje treba ispuniti u fazi mjerenja, a to su: izrada mape procesa trenutnog stanja, provedba FMEA metode, izračun sposobnosti procesa te procjena mjernog sustava (utvrđivanje mjerne nesigurnosti).

2.1.2.1. Izrada mape procesa

Za izradu mape procesa, ovisno o željenoj razini detalja, mogu se koristiti već spomenuti SIPOC dijagram, VSM, $Y=F(X)$ mapa ili dijagram toka.

Proces izrade mape procesa je sljedeći:

- odrediti šest do osam koraka u procesu
- odrediti inpute procesa
- odrediti inpute svakog koraka – upotrebom *brainstorming* metode
- kategorizirati inpute
- odrediti outpute svakog koraka

Mapiranje toka vrijednosti vizualni je alat vitke (engl. *lean*) proizvodnje kojim se prikazuje protok materijala i informacija te trajanje pojedinih koraka proizvodnog procesa od početka do kraja. Izradom VSM-a vizualiziraju se aktivnosti koje dodaju vrijednost i one koji stvaraju gubitke što omogućuje provedbu detaljne analize i identificiranje promjena koje se mogu napraviti kako bi se poboljšao proces.



Slika 4. Mapiranje toka vrijednosti (VSM mapa) [4]

2.1.2.2. FMEA metoda

Nakon izrade mape procesa provodi se FMEA metoda (engl. *Failure mode and effects analysis*).

„FMEA je metoda za identifikaciju, analizu, izbor prioriteta i dokumentiranje potencijalnih vrsta nesukladnosti, njihovih utjecaja na sustav, proizvod ili značajku procesa uz navođenje mogućih uzroka nesukladnosti. Primjenjuje se u cilju preventivnog djelovanja. FMEA mora sadržavati: vrstu nesukladnosti s nazivom i oznakom, moguće nesukladnosti u svakoj operaciji, učestalost nesukladnosti, uzrok nesukladnosti i važnost nesukladnosti.“ [2]

Ocjenom od 1 do 10 procjenjuje se jakost, učestalost i uočljivost, a umnožak ta tri člana daje RPN (engl. *Risk priority number*), odnosno broj prioriteta rizika.

$$RPN = jakost \times učestalost \times uočljivost \quad (1)$$

RPN kvantificira rizik svakog pojedinog koraka u procesu. RPN veći od 100 upućuje na značajan rizik, između 10 i 100 na manje značajan rizik, a manji od 10 na beznačajan rizik.

Tablica 2. Primjer FMEA tablice [2]

Funkcija	Potencijalna nesukladnost	Potencijalni učinak nesukladnosti	Stupanj jakosti	Postojeća kontrola procesa					
				Potencijalni uzrok	Učestalost	Zaštita	Uočljivost	Stupanj uočljivosti	RPN
Automobil	Zatajenje kočnog sustava	Nesreća	10	Nedostatak ulja	7	Kontrola	Senzor	1	70
				Zatajenje pumpe	3	Preventivni pregled	Senzor	1	30
				Blokada glavnog cilindra	1	Ne postoji	Ne postoji	10	100

2.1.2.3. Procjena sposobnosti procesa

Za procjenu sposobnosti procesa primjenjuje se proces sigma. Proces sigma je mjera varijacije procesa u odnosu na zahtjeve kupaca izražena kao broj standardnih odstupanja pri normalnoj razdiobi. Proces sigma alat je pomoću kojeg se mjeri učestalost pojave nesukladnosti u procesu i pomoću kojeg određujemo je li proces sposoban udovoljiti zahtjevima kupaca. Nesukladnosti podrazumijevaju svako neispunjenje zahtjeva u krajnjem proizvodu ili usluzi.

Kako bi se proces sigma mogao provesti potrebno je obraditi empirijske podatke primjenom deskriptivne statistike (engl. *descriptive statistics*) koja se bavi organizacijom prikupljenih podataka i njihovim sažetim opisom pomoću numeričkih i grafičkih prikaza. Pritom prikupljeni (mjereni) podaci mogu biti diskretne varijable ili kontinuirane varijable. Diskretne varijable su one koje dobivamo prebrojavanjem i one mogu biti atributne (kvalitativne) ili brojčane (kvantitativne). Atributni podaci odnose se na rezultate kontrole kvalitete – dobro/loše, zadovoljavajuće/nezadovoljavajuće, prihvaćeno/odbijeno... Brojčani podaci odnose se na broj nesukladnosti po jedinici poput broja grešaka u pošiljci, broja oštećenja na proizvodu... Kontinuirane varijable su one koje dobivamo mjernim instrumentima poput visine, duljine, mase, sile...

Nakon prikupljanja podataka slijedi njihovo opisivanje u formi osnovnih parametara, što uključuje izračun aritmetičke sredine (\bar{x}) kako bi se saznalo oko koje vrijednosti su podaci centrirani, izračun standardne devijacije (σ) kako bi se vidjela raspršenost podataka, odnosno odstupanje od aritmetičke sredine, izračun moda, medijana, varijance (σ^2), standardne pogreške raspona... Zatim slijedi grafička obrada empirijskih podataka pomoću histograma, *box-whiskera*, *steam-leaf* prikaza, *pie charta*, *scatter plot*...

Proces je sposoban ako je raspon tolerancijskog područja veći ili jednak rasponu varijacije procesa ($T \geq 6\sigma$). Raspon varijacije procesa određen je područjem $\pm 3\sigma$ u odnosu na aritmetičku sredinu čime je definirana gornja (GKG) odnosno donja kontrolna granica (DKG) (engl. UCL/LCL – *Upper/Lower control limit*). Kontrolne granice su statističke granice i nisu povezane s granicama specifikacije. One predstavljaju VOP (engl. *Voice of the process*), odnosno glas procesa, a gornja i donja granica specifikacije (engl. USL/LSL – *Upper/lower specification limit*) predstavljaju glas kupca (VOC). Tolerancijsko područje definirano je kao razlika između gornje i donje granice specifikacije ($T = USL - LSL$).

C_p i C_{pk} indeksi su sposobnosti procesa. C_p je omjer razlike gornje i donje granice specifikacije i razine kvalitete ($k\sigma$).

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (2)$$

C_{pk} označava sposobnost procesa da zadovolji zahtijevane granice specifikacije te prikazuje koliko je proces centriran. Centriran proces ima jednako rasipanje s lijeve i desne strane normalne razdiobe.

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}\right) \quad (3)$$

$C_{pk} < 0$ znači da proces izlazi iz granica zahtijevanih specifikacija, $C_{pk} = 1$ znači da se proces nalazi točno na granicama specifikacija, $C_{pk} = 1,33$ znači da je proces udaljen jednu standardnu devijaciju od granica specifikacija itd.

Pritom moraju biti zadovoljeni sljedeći preduvjeti:

- mogućnost opisa podataka normalnom raspodjelom,
- promatrani proces mora biti stabilan i bez značajnih uzroka varijacija,
- proces mora biti u stanju statističke kontrole.



Slika 5. Ilustracija indeksa sposobnosti procesa C_p i C_{pk} [2]

Indeks sposobnosti uslužnog procesa (engl. *SCI – Service capability index*) temelji se na mjeri kvalitete usluga *SERVQUAL*. *SERVQUAL* je višedimenzionalni istraživački alat, u formi upitnika, za mjerenje kvalitete usluge kojim se ispituju očekivanja kupaca i njihove percepcije kvalitete usluga. Pet dimenzija koje su obuhvaćene upitnikom su: pouzdanost (engl. *reliability*), povjerenje (engl. *assurance*), opipljivost (engl. *tangibles*), suosjećanje (engl. *empathy*) i odaziv (engl. *responsiveness*).

Tolerancijsko područje određeno je dvjema granicama: AS (engl. *Adequate service*) i DS (engl. *Desired service*). AS označava minimalni stupanj usluge koji se smatra prihvatljivim, a DS stupanj usluge koju klijent očekuje.



Slika 6. Indeks sposobnosti usluge (SCI) [2]

$$SCI = \frac{(\mu - 3,5\sigma) - AS}{DS - AS} \quad (4)$$

Za negativne vrijednosti indeksa, proces se odvija ispod prihvaćenog minimuma, a za vrijednosti ≥ 1 proces je konkurentan (najbolji u kategoriji).

2.1.2.4. Procjena mjernog sustava

Mjerni sustav sastoji se od predmeta mjerenja, mjerne metode i mjeritelja koji vrši mjerenje u realnoj okolini i realnom vremenu. [5] Procjena mjernog sustava (engl. MSA – *Measurement systems analysis*) je analiza trenutačnog načina prikupljanja podataka (mjerenja). Poznata je i pod nazivom R&R analiza (engl. *Gage repeatability and reproducibility*), odnosno analiza ponovljivosti i obnovljivosti. Cilj provođenja R&R analize je utvrđivanje je li izvor varijacija u načinu prikupljanja podataka. U idealnom slučaju MSA će dati podatke koji su ponovljivi i obnovljivi, a ovisno o vrsti podataka koji se analiziraju, kontinuirane ili diskretne varijable, koriste se različite metode.

Postoje tri analize ponovljivosti i obnovljivosti mjernog sustava, a to su *R&R study crossed*, *R&R study nested*, *R&R study expanded*. Razlikuju se u pristupu procjenjivanja ponovljivosti i obnovljivosti sustava. U provedbi svih triju analiza koristi se analiza varijance – ANOVA (engl. *Analysis of Variance*), dok se za prvu koristi i metoda aritmetičkih sredina i raspona ($\bar{x} - R$).

Naposlijetku, na temelju dobivenih podataka i uvidom u trenutačno stanje, potrebno je odrediti dijelove procesa koje se želi unaprijediti i poboljšanja koja se žele isprobati.

2.1.3. Faza analiziranja (engl. *Analyse*)

Svrha faze analize je bolje razumijevanje uzročno-posljedičnih veza u procesu. U ovoj fazi važno je uočiti koji su uzroci nastalih problema, jesu li ti uzroci testirani i verificirani, koji su ključni faktori na koje se treba fokusirati, na koje od njih je moguće utjecati i kakvi su potencijalni efekti.

Faza analiziranja započinje primjenom aktivnosti koje su definirane na kraju faze mjerenja. Zatim slijedi prikupljanje podataka nakon provedenih izmjena te se radi statistička analiza. Za analizu se koriste sljedeći statistički alati: testiranje hipoteza, korelacija i regresija te analiza varijance (ANOVA). Provedbom statističke analize saznaje se imaju li *inputi* koji su prethodno izmijenjeni značajan utjecaj na *outpute*.

Izvođenjem zaključaka o populaciji na temelju uzoraka bavi se inferencijalna statistika (engl. *Inferential statistics*)

2.1.3.1. Testiranje hipoteza

Testiranje hipoteza je postupak donošenja zaključaka i procjene vjerojatnosti postavljene hipoteze na temelju podataka iz uzorka. Postavljaju se dvije hipoteze: nulta hipoteza H_0 i alternativna hipoteza H_a . Nulta hipoteza predstavlja okvirnu pretpostavku o nekom parametru ili raspodjeli, a alternativna hipoteza njoj suprotnu. Zatim se na temelju podataka iz uzorka donosi zaključak o prihvatanju ili o odbacivanju nulte hipoteze. U slučaju potkrijepljenosti nulte hipoteze podacima iz uzorka, nulta hipoteza smatra se ispravnom i prihvaća se. U slučaju nepotkrijepljenosti nulte hipoteze podacima iz uzorka, nulta hipoteza smatra se neispravnom i odbacuje se što dovodi do zaključka kako je alternativna hipoteza ispravna. Međutim, budući da su hipoteze temeljene na uzorcima, potrebno je u obzir uzeti moguće pogreške. Dvije su vrste pogrešaka: pogreška prve vrste i pogreška druge vrste. Pogreška prve vrste nastaje pogrešnim odbacivanjem nulte hipoteze (nulta hipoteza ispravna), a pogreška druge vrste nastaje pogrešnim prihvaćanjem nulte hipoteze (alternativna hipoteza ispravna).

α -rizik predstavlja zajamčeno malu vjerojatnost pogrešnog odbacivanja nulte hipoteze. Drugim riječima označava razinu pouzdanja u izvedeni zaključak, poznatu i pod terminom razina

značajnosti (engl. *level of significance*). U praksi je uobičajeno postaviti α -rizik na 5%. U slučaju izračuna manje vjerojatnosti od one postavljene α -rizikom ($<0,05$), nulta hipoteza se odbacuje.

2.1.3.2. Korelacija i regresija

Korelacija je mjera povezanosti dviju ili više varijabli, odnosno metoda kojom se utvrđuje postoji li funkcionalna ovisnost između varijabli. Metoda korelacije prati odstupanja i uspoređuje varijacije dviju ili više varijabli te mjeri odnose među varijacijama – jakost veze. Koeficijent kojim se opisuje jakost veze i smjer povezanosti naziva se Pearsonov koeficijent (r) i može poprimiti vrijednosti od -1 do +1.

Regresijskom analizom određuje se oblik krivulje koja najbolje opisuje zadane podatke. Oblik povezanosti može biti linearan i nelinearan i definiran je regresijskom jednadžbom. Kod regresijske analize mora se znati što je uzrok, a što posljedica, odnosno koja je varijabla zavisna, a koja nezavisna. Osnovni problem metode je određivanje koeficijenata regresije.

2.1.3.3. Analiza varijance (ANOVA)

Jedna od temeljnih metoda određivanja značajnosti utjecaja promatranih parametara (faktora) na proces je ANOVA. Analiza varijance je postupak usporedbe aritmetičkih sredina više uzoraka pri čemu svaki uzorak predstavlja osnovni skup (populaciju). Na temelju F -testa donosi se zaključak o postojanju ili nepostojanju značajnih razlika između aritmetičkih sredina više populacija. Time se analizira utjecaj jedne ili više nezavisnih varijabli na jednu zavisnu varijablu. Nultom hipotezom (H_0) pretpostavlja se da su aritmetičke sredine svih populacija jednaki, a alternativnom hipotezom (H_a) da nisu.

U tehničkim i proizvodnim uvjetima analiza varijance predstavlja postupak provjere djelovanja promjene stanja nekog faktora na mjerenu vrijednost – rezultat. Analizom varijance provjeravaju se promjene aritmetičkih sredina uzoraka – jednakost očekivanih vrijednosti osnovnog skupa. [6]

Najčešće su u primjeni analiza varijance s jednim utjecajnim faktorom (engl. *One-way ANOVA*) i analiza varijance s dva utjecajna faktora (engl. *Two-way ANOVA*). Navedeni modeli su specijalni slučajevi poopćenog linearnog modela GLM (engl. *Generalized linear model*).

Analizom varijance s jednim utjecajnim faktorom cilj je ispitati odnos varijance podataka između uzoraka s onom unutar uzoraka. Odnos tih dviju varijanci naziva se F -omjer i on pripada Fisherovoj razdiobi. Ako je taj omjer značajan, odbacuje se nulta hipoteza.

Kod analize varijance s dva utjecajna faktora ispituje se djelovanje promjenjivih faktora (x i z) na numeričku vrijednost slučajne varijable (y). Pritom se testira skup nultih hipoteza o jednakosti aritmetičkih sredina više osnovnih skupova, ali po dva različita faktora koji djeluju na istu numeričku varijablu (y). [7]

2.1.3.4. Ishikawa dijagram

U fazi analize često se koristi i Ishikawa dijagram. Ishikawa dijagram, poznat i kao dijagram riblje kosti (engl. *Fishbone diagram*) te dijagram uzroka i posljedica (engl. *Cause and effect diagram*), je dijagram koji prikazuje potencijalne uzroke određenog problema. Često se koristi u proizvodnji i razvoju proizvoda te u kontroli kvalitete. Svrha dijagrama je određivanje odnosa između uzroka i posljedica te izdvajanje prioriternih uzroka nesukladnosti. Osmislio ga je prof. Kaoru Ishikawa koji ga je počeo razvijati 1943. godine na Sveučilištu u Tokiju, a prvi put ga je primijenio radeći na japanskom brodogradilištu Kawasaki i pritom definirao šest kategorija glavnih uzroka poznatih kao 6M. 6M odnosi se na opremu (engl. *machine*), materijal (engl. *material*), metodu (engl. *method*), čovjeka (engl. *manpower*), mjerenja (engl. *measurement*), okolinu (engl. *Mother Nature*) i karakterističan je za proizvodne sustave, dok su u uslužnim sustavima oprema i materijal zamijenjeni s politikom (engl. *policies*) i procedurama (engl. *procedures*).

Izrađuje ga grupa djelatnika koji imaju izravan doticaj s definiranim problemima (voditelji odjela/određenog procesa, izvršitelji) pri čemu su djelatnici osobe različitih stručnosti i pozicija u organizaciji.

Kako bi se otkrio korijen problema često se kombinira s 5W1H alatom:

- *What?* – Što je projekt? Što je potrebno poboljšati? Koji su ciljevi?
- *Who?* – Tko je uključen u projekt? Tko su klijenti?
- *Where?* – Gdje su potrebna poboljšanja?
- *When?* – Kada je uočen problem?
- *How?* – Kako se problem dogodio? Kako postići veću efikasnost?
- *Why?* – Zašto je potrebno raditi izmjene?



Slika 7. Shema Ishikawa dijagrama [8]

2.1.4. Faza unaprjeđivanja (engl. *Improve*)

Faza I faza je unaprjeđivanja u kojoj se definira koje daljnje korake je potrebno poduzeti i na koji način. Nakon faze analiziranja trebao bi biti jasniji opseg problema koji se pokušava riješiti i trebalo bi dosad prikupljene informacije prevesti u matematički model. Slijedi postupak eksperimentalne optimizacije procesa korištenjem planiranja i analize pokusa.

2.1.4.1. Planiranje i analiza pokusa (DOE)

Planiranje i analiza pokusa (engl. DOE – *Design of experiments*) metoda je koja se koristi za planiranje, provođenje, analiziranje i tumačenje kontroliranih testova radi procjene utjecajnih faktora na karakteristike proizvoda ili procesa. DOE je moćan alat za prikupljanje i analizu podataka koji je primjenjiv u raznim situacijama.

Proces se opisuje pomoću nezavisnih ulaznih varijabli koje mogu biti kontrolirane i nekontrolirane te pomoću zavisnih izlaznih varijabli, odnosno odziva procesa. Planiranjem pokusa moguće je upravljati s više ulaznih faktora promatrajući tako njihov utjecaj na željene izlazne faktore (odzive). Upravljajući s više varijabli moguće je uočiti odnose između ulaza i izlaza koji mogu proći nezamijećeni u slučaju upravljanja jednom varijablom.

Strateški planiran i dobro proveden eksperiment pruža puno informacija o utjecaju ulazne varijable na odzivnu. Tako su mnogi eksperimenti koncipirani na način da jednu varijablu drže konstantnom, dok druge mijenjaju. Takav pristup naziva se faktor po faktor (engl. OFAT – *One factor at a time*). Međutim, takav pristup manje je efikasan u usporedbi s onim gdje se istovremeno mijenjaju sve varijable.



Slika 8. Shema modela planiranja pokusa [6]

Faze izvođenja pokusa [6]:

- 1) definirati problem i cilj istraživanja
- 2) odabrati utjecajne faktore i njihove razine

- 3) odabrati mjerene vrijednosti (izlazne varijable)
- 4) odabrati model pokusa
- 5) izvesti pokus („predpokus“, glavni pokus)
- 6) analizirati rezultate
- 7) formulirati zaključke i prijedloge

2.1.4.2. QFD metoda

QFD (engl. *Quality function deployment*) je metoda koja se koristi za definiranje zahtjeva kupaca i njihovo pretvaranje u inženjerske specifikacije i planove za proizvodnju proizvoda koji ispunjavaju te zahtjeve. Metodu je 1960-ih godina razvio Japanac Yoji Akao radeći u brodogradilištu Mitsubishi.

Primjenjiv je u proizvodnim i u uslužnim djelatnostima kao dio faze definiranja, ali i faze analiziranja. QFD metoda potiče kooperativnost i komunikaciju više odjela u organizaciji, što omogućuje zajednički rad cijele organizacije. QFD stavlja naglasak na želje i potrebe kupaca te prevodi VOC u inženjerske ili procesne zahtjeve korisnika. Zahtjevi korisnika objedinjuju se i sortiraju prema prioritetima i u skladu s njima postavljaju se ciljevi. Pomoću QFD alata „kuća kvalitete“ (engl. *House of Quality*) moguća je izravna usporedba ispunjenja VOC-a vlastitog proizvoda ili usluge s onima od konkurencije. QFD smanjuje vrijeme razvoja i snižava troškove te generira dobro strukturiranu dokumentaciju koja može biti korisna i u budućim projektima.

QFD metoda sastoji se od četiri faze i u svakoj fazi pomoću QFD matrica prioriteta i korelacija oblik CCR (engl. *Critical to customer*) transformira se u oblik COQ.

QFD faze: definicija proizvoda, razvoj proizvoda, razvoj procesa, kontrola kvalitete procesa.



Slika 9. Primjer QFD matrice [10]

2.1.5. Faza kontroliranja (engl. Control)

Faza C faza je upravljanja i kontroliranja procesa, a ujedno i posljednja faza DMAIC metode. U njoj se koriste prethodno spomenuti alati, međutim s novim parametrima i zahtjevima. Najčešće korišteni alati su SPC (engl. *Statistical process control*), TPM (engl. *Total productive maintenance*), revidirana FMEA, praćenje indeksa sposobnosti procesa, verifikacija kroz financijsku korist, postavljanje preduvjeta za poboljšanje i povratak u fazu definiranja. [2]

2.1.5.1. Statistička kontrola procesa (SPC)

Statistička kontrola procesa (SPC) je metoda praćenja stabilnosti procesa i kontrole procesa uporabom statističkih alata i uzorkovanjem. Tradicionalno se u masovnoj proizvodnji kvaliteta proizvoda osigurava naknadnom provjerom. Prednost SPC metode u odnosu na konvencionalne metode provjere je u tome što omogućuje rano uočavanje izvora značajnih varijacija, prije nego li rezultiraju proizvodnjom nesukladnih jedinica, što onda uzrokuje dodatne troškove zbog nastajanja škarta ili eventualne dorade proizvoda. Izvori varijacija mogu biti uobičajeni uzroci ili posebni uzroci. Uobičajeni uzroci podrazumijevaju slučajne varijacije (ne mogu se pripisati), a posebni uzroci su oni koji utječu samo na neke dijelove procesa (mogu se pripisati). Uz smanjivanje škarta, SPC metodom moguće je skratiti vrijeme proizvodnje i manja je vjerojatnost odbacivanja proizvoda ili dorade.

Statističku kontrolu procesa započeo je Dr. Walter A. Shewhart 1920-ih godina radeći za Bell Telephone Company gdje je razvio kontrolne karte i koncept stanja statističke kontrole.

„Kontrolna karta najznačajniji je alat kontrole kvalitete i temeljni pokazatelj mogućnosti poboljšavanja kvalitete procesa ili proizvoda.“ [11]

Kontrolne karte dijele se u dvije skupine: kontrolne karte za mjerljive karakteristike (\bar{x} - R karta, \bar{x} - s karta) i kontrolne karte za atributivne karakteristike (p , np , c i u karta). Kontrolne karte za mjerljive karakteristike prate normalnu raspodjelu, a za atributivne binomnu i Poissonovu raspodjelu.

„Proces je pod kontrolom“ – stanje statističke kontrole kada nema podataka izvan kontrolnih granica (DKG i GKG).

„Termin „pod kontrolom“ statistički je termin kojim se pokazuje da proces varira pod utjecajem slučajnih, procesu svojstvenih, utjecaja... Kada su podaci izvan kontrolnih granica to nipošto ne znači da proces daje nesukladne jedinice (proizvode)... Kontrolne karte se mogu i trebaju primjenjivati kako za procese koji nužno daju nesukladne proizvode ($C_p < 1$), tako i za sposobne procese ($C_p > 1$).“ [11]



Slika 10. Kontrolne karte [11]

2.1.5.2. Poka-Yoke metoda

Jedan od alata kojim se osigurava kontinuirano unaprjeđivanje i kontrola novog (poboljšanog) procesa je *Poka-Yoke* metoda.

Poka-Yoke (engl. *mistake-proofing*) japanski je naziv za metodu sprječavanja grešaka u procesu koje uzrokuju ljudi. Metodu je 1960-ih godina, osmislio Shiego Shingo, japanski industrijski inženjer koji je radio u Toyoti. *Poka-Yoke* osigurava postojanje odgovarajućih uvjeta prije izvođenja koraka procesa kako bi se spriječio nastanak grešaka, a gdje to nije moguće, greške se pokušavaju čim prije uočiti kako bi se odmah uklonile. Primjer *Poka-Yoke* je nemogućnost pokretanja motora u automobilu s automatskim prijenosom sve dok mjenjač nije u neutralnom položaju ili u položaju za parkiranje.

Nenamjerne greške koje čine ljudi prenose se na proces, a greške u procesu uzrokuju nesukladne proizvode. Cilj je spriječiti nesukladne proizvode da izađu iz tvornice.

Na kraju je potrebno napraviti kontrolni plan, ažurirati postojeću dokumentaciju, izračunati postignute uštede te napisati završno izvješće.

2.1. Oblikovanje za šest sigmu (DFSS)

DFSS (engl. *Design for Six Sigma*) je inženjerski pristup oblikovanju i upravljanju procesima na način da zadovoljavaju kvalitetu tradicionalne šest sigme pri čemu očekivana razina kvalitete mora biti $4,5\sigma$ ili veća.

Razvoj proizvoda složen je proces i postoji vjerojatnost da će nešto poći po zlu. U slučaju neispunjenja potreba i očekivanja kupaca, odnosno ne pružanja vrijednosti koju je spreman platiti potrebno je redizajnirati proizvod što iziskuje velike troškove. U slučaju nemogućnosti poboljšanja trenutnog proizvoda ili usluge potrebno ih je zamijeniti. DFSS ne podrazumijeva inkrementalne promjene već sprječavanje problema vezanih uz kvalitetu.

DFSS pristup koristi se pri razvoju novih procesa, proizvoda i usluga s ciljem minimiziranja nesukladnosti i varijacija u početnim stadijima projekta, odnosno s ciljem zadovoljenja potreba i zahtjeva kupaca iz prve. Stoga, umjesto DMAIC metode, koja se koristi za unaprjeđenje već postojećih procesa, proizvoda ili usluga, u okviru DFSS pristupa najčešće se koristi DMADV metoda.

DMADV (engl. *Define, measure, analyse, design, verify*) metoda, slično kao i DMAIC metoda, podijeljena je u pet faza: fazu definiranja, fazu mjerenja, fazu analiziranja, fazu oblikovanja i fazu provjere. Alati korišteni u DMAIC metodi koriste se i u DMADV metodi.

Faza definiranja

U fazi definiranja potrebno je pomoću mjerljivih podataka i ciljeva definirati svrhu i opseg projekta na način da se: odredi željeni smjer poslovanja, uspoređi trenutno i željeno stanje organizacije, istraže potrebe i zahtjevi kupaca itd. Potrebno je oformiti projektni tim i napraviti povelju projekta. Ciljevi i strategije moraju biti usklađeni s očekivanjima organizacije i kupaca.

Faza mjerenja

U fazi mjerenja fokus je na razumijevanju želja i potreba kupaca i njihovo prevođenje u mjerljive projektne zahtjeve. Na temelju povijesnih podataka ili istraživanjem (VOC) prikupljaju se podaci o parametrima koji su kritični za kvalitetu (CTQ), radi se procjena proizvodne sposobnosti te procjena rizika.

Faza analiziranja

U fazi analiziranja, na temelju prikupljenih podataka, razvijaju se konceptualna rješenja projekta i procjenjuje se koliko je svako od njih sposobno udovoljiti zahtjevima kupaca ili zahtjevima poslovanja. Nakon detaljnog analiziranja svakoga od njih, odabire se jedno od rješenja koje će se dalje razvijati u fazi oblikovanja.

Faza oblikovanja

U fazi oblikovanja počinje detaljan razvoj koji uključuje osmišljavanje proizvodnog procesa, odabir potrebnog materijala, tehnologije izrade, potrebnu opremu... Nakon detaljno razrađenog koncepta slijedi provođenje računalnih simulacija i korištenje analitičkih alata za bolje razumijevanje *inputa* i *outputa* procesa. To uključuje alate kao što su planiranje i analiza pokusa (DOE) te FMEA.

Faza verificiranja

U fazi verificiranja, na razvijenom rješenju proizvoda ili procesa, provode se ispitivanja valjanosti kako bi se uistinu provjerilo ispunjavaju li zahtjeve kupaca i projektne zahtjeve.

Nakon toga potrebno je napraviti detaljnu mapu procesa, projektnu dokumentaciju i upute. Izrađuje se prototip proizvoda ili se, u slučaju usluge, provodi testna verzija usluge te se prikupljaju podaci vezani uz proizvod odnosno uslugu. Prikupljene informacije analiziraju se u svrhu poboljšanja proizvoda ili usluge prije izbacivanja na tržište.

3. Moderni pristupi u primjeni šest sigme

3.1. Industrija 4.0

Posljednja tri stoljeća obilježena su velikim tehnološkim postignućima u relativno kratkom vremenskom razdoblju. Počevši s Prvom industrijskom revolucijom i izumom parnog stroja koji je zamijenio ručni rad, zatim Drugom industrijskom revolucijom i širokom primjenom električne energije koja je omogućila masovnu proizvodnju te Trećom industrijskom revolucijom koja je napretkom informacijskih i računalnih tehnologija omogućila automatizaciju proizvodnje. Trenutačno se nalazimo u začecima Četvrte industrijske revolucije. Četvrtu industrijsku revoluciju i termin Industrija 4.0 prva je predstavila grupa znanstvenika, okupljena oko *World Economic Forum*a, razvijajući strategiju visoko-tehnološke industrije za njemačku vladu. Industrija 4.0 podrazumijeva povezivanje suvremenih informacijsko-komunikacijskih tehnologija s tradicionalnom proizvodnjom i procesima. Temelji se na kibernetско-fizičkom sustavu (engl. *CPS – Cyber-physical system*) što označava pojam za integrirane virtualne i fizičke procese primjenom računalne tehnologije i interneta. Integracija fizičkog i digitalnog svijeta omogućena je upotrebom senzora i međusobnim povezivanjem uređaja koji tvore digitalni ekosustav. Industrija 4.0 obuhvaća pojmove kao što su pametne tvornice, Internet stvari (engl. *IoT – Internet of Things*), *Big Data*, umjetna inteligencija, rudarenje podataka, aditivna proizvodnja itd. Kombinacija svih tih pojmova ono je na čemu se zasniva Industrija 4.0, a to podrazumijeva: potpunu automatizaciju procesa, mogućnost prikupljanja i analiziranja velike količine podataka u stvarnom vremenu, prediktivnu analizu i održavanje, mogućnost rada na daljinu i trenutno djelovanje na proces, autonomne sustave koji su sposobni samostalno donositi odluke, minimalne zahtjeve za ljudskom intervencijom, stvaranje virtualne kopije stvarnog svijeta itd.

Osnovna načela kojima je oblikovana Industrija 4.0 uključuje [14]:

- interoperabilnost – mogućnost komunikacije. izmjenjivanja podataka i koordiniranja aktivnosti između uređaja, strojeva i ljudi
- virtualizacija – mogućnost stvaranja virtualnog pregleda operacija i virtualne kopije svega kako bi se uvidio utjecaj opreme ili procesa na operacije
- decentralizacija – dijeljenje centralnog sustava na podsustave ili komponente
- mogućnost rada u stvarnom vremenu – prikupljanje i analiza podataka u stvarnom vremenu što omogućuje trenutno donošenje odluka u svakom trenutku

- orijentiranost usluzi – slobodan protok informacija unutar i između poduzeća radi boljeg zadovoljavanja potreba kupaca
- modularnost – sposobnost fleksibilnog prilagođavanja promjenjivim zahtjevima i potrebama industrije

3.2. Utjecaj Industrije 4.0 na šest sigma

Industrija 4.0 omogućuje bolju implementaciju šest sigma metodologije i ostvarivanje još većeg utjecaja na poslovanje. Temelj šest sigma metodologije su podaci, a primjenom suvremenih alata i tehnologija, koji su dio Industrije 4.0, organizacije mogu brže, lakše i preciznije prikupljati velike količine podataka i time steći bolje razumijevanje trenutnog stanja procesa. Jedna od ključnih inovacija u tom području je upotreba senzora koji u sklopu interneta stvari omogućuju automatizirano prikupljanje podatka u stvarnom vremenu čime se osigurava kontinuirano unaprjeđivanje procesa. Nadalje, pohranom podataka u oblaku (engl. *cloud storage*) omogućeno je upravljanje podacima u svakom trenutku neovisno o geografskoj lokaciji, a samim time olakšana je i analiza prikupljenih podataka.

Napretkom umjetne inteligencije potaknut je razvoj autonomnih sustava koji su sposobni samostalno donositi odluke te analizirati i optimizirati procese. Sve to dovodi do bržeg uočavanja uzroka varijacija u procesu i ubrzanog poboljšanja.

3.2.1. Umjetna inteligencija

Uz pomoć umjetne inteligencije (engl. AI – *Artificial Intelligence*), preciznije strojnog učenja (engl. *machine learning*) poboljšano je prikupljanje podataka. Strojno učenje pomaže u provedbi uzročno-posljedične analize procesa te pomaže u strukturiranju nestrukturiranih podataka. Nadalje, automatiziranim prikupljanjem podataka algoritmi umjetne inteligencije, poput neuronskih mreža, mogu dati rješenja za poboljšanje procesa, mogu „razumjeti“ proces, detektirati uska grla procesa i dati rješenja za njihovo uklanjanje.

Neke od tehnologija koje mogu dati značajan doprinos u primjeni šest sigma metodologije su rudarenje procesa (engl. *process mining*) i izdvajanje podataka (engl. *data extraction*).

3.2.1.1. Rudarenje procesa

Rudarenje procesa je analitička disciplina za modeliranje, nadziranje, analiziranje i poboljšanje poslovnih procesa primjenom tehnika rudarenja podataka (engl. *data mining*). Rudarenje procesa prikazuje procese onakvima kakvi oni uistinu jesu, a ne onakvima kakvima se misli da jesu. Unutar informacijskog sustava kojim se kontrolira poslovni ili proizvodni proces zapisuju se događaji vezani uz proces i pohranjuju se u zapisnik događaja (engl. *event logs*). Korištenjem alata za rudarenje organizacije mogu vidjeti stvarno stanje procesa, usporediti ga sa željenim procesom i napraviti analizu uzroka i posljedica što, u okviru šest sigma metodologije, dovodi do znatno bržeg smanjenja varijacija u procesu.

Razlikuju se tri vrste analize u rudarenju procesa: otkriće procesa (engl. *process discovery*), provjera sukladnosti (engl. *conformance checking*), poboljšanje procesa (engl. *process enhancement*).

Otkriće procesa podrazumijeva generiranje modela i strukture procesa temeljem podataka iz zapisnika događaja (pri čemu nije nužan već postojeći model). Zapisnik događaja mora sadržavati jedinstveni identifikator kako bi se znalo o kojem događaju se radi, opis događaja i vrijeme kada se taj događaj odvio.

Provjera sukladnosti podrazumijeva usporedbu postojećeg modela procesa s procesom koji je generiran temeljem zapisnika događaja kako bi se utvrdilo je li postojeći model dobro definiran ili je u kontradikciji sa zapisnikom događaja. Drugim riječima, provjerava se postoje li odstupanja u usporedbi s pravim stanjem.

Poboljšanje procesa podrazumijeva korištenje informacija iz zapisnika događaja za pronalaženje načina kako unaprijediti postojeći proces. Moguća poboljšanja automatski se primjenjuju i ispravljaju postojeći model procesa ili ga proširuju dodatnim informacijama. [15][16]

Prednosti korištenja rudarenja procesa je objektivn i činjenicama potkrijepljen uvid u proces te brže, jeftinije i preciznije provođenje u odnosu na tradicionalno mapiranje procesa.

3.2.1.1.1. Rudarenje procesa za šest sigma (PMSS)

PMSS (engl. *Process Mining for Six Sigma*) je smjernica koja pokazuje kako se u sklopu DMAIC pristupa šest sigma metodologije mogu primijeniti tehnike rudarenja procesa. U nedostatku metoda i smjernica koje su izričito posvećene načinu na koji se te tehnike mogu sustavno primjenjivati u DMAIC ciklusu, *Eindhoven University of Technology, Information System Group* i *ProcessGold* odlučili su razviti PMSS. [17]



Slika 11. Shema PMSS-a [17]

Rudarenje procesa u okviru DMAIC-a prema [17]:

Faza definiranja

Faza definiranja sadrži tri koraka: planiranje (engl. *planning*), pripremu preliminarnih podataka (engl. *preliminary data preparation*) i istraživačko rudarenje i analizu (engl. *exploratory mining and analysis*).

U koraku planiranja potrebno je postaviti pitanja: koji su poslovni procesi organizacije, koji su glavni problemi s kojima su ti procesi suočeni, zatim pitanja koja se odnose na jedan ili više aspekata poslovnog procesa koji uključuju kvalitetu, troškove, resurse, vrijeme itd. Zatim se odabiru procesi za poboljšanje i formira se projektni tim ljudi koji imaju različite perspektive provođenja poboljšanja.

Drugi korak je priprema preliminarnih podataka čiji je cilj pružiti podatke za nadolazeću istraživačku analizu podataka, a ujedno i olakšati korak planiranja boljim identificiranjem problema. Ovaj korak je poseban oblik pripreme podataka i sastoji se od tri „podkoraka“: preliminarnog izdvajanja podataka (engl. *data extraction*), gdje se podaci o izvođenju procesa izdvajaju iz informacijskog sustava; procesuiranja (engl. *processing*), gdje se podaci pripremaju za pohranjivanje u zapisnik događaja (engl. *event log*) i učitavanje u alat za rudarenje procesa; verificiranja (engl. *verification*), gdje se provjerava ispravnost podataka kako bi se osigurao točan prikaz stvarnog procesa.

Treći korak, istraživačko rudarenje i analiza kao *input* uzima podatke iz prethodnog koraka i pritom koristi tri tehnike: otkriće procesa (engl. *process discovery*), provjeru sukladnosti (engl. *conformance checking*) i analizu procesa (engl. *process analysis*) (uključujući i tehnike poboljšanja). Uz tehnike rudarenja procesa, analiza procesa uključuje i statističke metode i alate (Pareto analiza, histogrami, deskriptivna statistika).

Spoznaje dobivene istraživačkim rudarenjem i analizom mogu u koraku planiranja poslužiti kao *input* za postavljanje poslovnih ciljeva i svi prethodno navedeni koraci mogu se iterativno provoditi sve dok poslovni ciljevi za projekt poboljšanja nisu jasno definirani.

Faza mjerenja

U koraku pripreme podataka (kroz izdvajanje, procesuiranje i verifikaciju) u fazi mjerenja potrebno je iz informacijskih sustava izdvojiti dodatne podatke vezane za izvođenje procesa, zatim ih obraditi kako bi se dobio jasan, filtriran i obogaćen zapisnik događaja i na kraju verificirati njihovu točnost kako bi se mogli koristiti kao *input* za sljedeći korak, odnosno fazu.

Faza analiziranja

U fazi analiziranja detaljnije se razmatraju podaci korištenjem obrazlažućeg rudarenja i analize (engl. *explanatory mining and analysis*). U ovoj fazi provodi se detaljna analiza podataka s ciljem otkrivanja potencijalnih uzroka problema koji su identificirani u fazi definiranja i identificiranje mogućih poboljšanja koji će se primijeniti u fazi unaprjeđivanja.

Faza unaprjeđivanja

U fazi unaprjeđivanja razmatraju se poboljšanja koja su identificirana u prethodnoj fazi, a rudarenjem procesa ispituje se utjecaj alternativnih poboljšanja i odabiru se ona poboljšanja čijom će se implementacijom postići najveći utjecaj na proces.

Faza kontrole

U fazi kontroliranja, tehnike rudarenja procesa mogu se koristiti za nadziranje unaprijed definiranih pokazatelja učinka procesa kako bi se procijenilo jesu li primijenjene promjene dale očekivane rezultate. U ovoj fazi razlikuju se dva koraka: nadziranje (engl. *monitoring*), gdje se izvođenje procesa nadzire s obzirom na pokazatelje učinka; procjena (engl. *evaluation*), gdje organizacija određuje je li proces uspješno poboljšan.

Tablica 3. DMAIC i rudarenje procesa [15]

DMAIC	Rudarenje procesa (aktivnosti)
<i>Define</i>	<ul style="list-style-type: none"> - planiranje - izdvajanje podataka (preliminarno) - procesuiranje podataka (preliminarno) - rudarenje i analiza (istraživačko)
<i>Measure</i>	<ul style="list-style-type: none"> - izdvajanje podataka - procesuiranje podataka
<i>Analyse</i>	<ul style="list-style-type: none"> - rudarenje i analiza (obrazlažuje)
<i>Improve</i>	<ul style="list-style-type: none"> - poboljšanje procesa i podrška - rudarenje i analiza (obrazlažuje)
<i>Control</i>	<ul style="list-style-type: none"> - nadziranje - procjena

3.2.2. *eKanban* sustavi

Kanban je sustav kontrole zaliha koji je razvio industrijski inženjer u Taiichi Ohno u okviru *Toyota Production Systema* (TPS) originalnog naziva *Just-in-time* proizvodnja (engl. JIT – *Just-in-time production*). *Kanban* služi za praćenje stanja zaliha i, po potrebi, naručivanje novih pošiljki potrebnih materijala i dijelova. *Kanban* koristi vizualne znakove kako bi se potakle radnje potrebne za nesmetano odvijanje procesa, odnosno da bi se spriječilo gomilanje zaliha ili manjak zaliha koji uzrokuje zastoj procesa. Potreba za novim zalihama signalizira se pomoću kartica (jap. *Kanban*) po kojima je sustav i dobio ime. Kako se zalihe smanjuju tako se pojavljuju kartice u određenoj boji, ovisno o prioritetu.

Kanban spada u sustav povlačenja (engl. *Pull system*) koji, u cilju smanjenja gubitaka, proizvodnju temelji na stvarnim potrebama tržišta, za razliku od sustava guranja (engl. *Push system*) koji proizvodnju temelji na predviđanjima potreba tržišta. Drugim riječima, proizvodnja ili nabava zaliha ne započinje dok za to ne bude potrebe.

Nadgradnja *kanban* sustava su elektronički *kanban* sustavi. U odnosu na tradicionalne *kanban* sustave *eKanban* sustavi ubrzavaju tok informacija kroz organizaciju do dobavljača i omogućuju bolji nadzor opskrbnog lanca. *eKanban* sustavi su sustavi povlačenja za obnavljanje zaliha koji na temelju stvarne potrošnje zaliha i u stvarnom vremenu odašilju signale o potrebama obnove zaliha. Signali se odašilju skeniranjem barkoda, QR koda ili RFID oznake proizvoda pri čemu se automatski radi nova narudžba od dobavljača.

Na taj način smanjuju se troškovi skladištenja, skraćuje se vodeće vrijeme i vrijeme obnove zaliha, poboljšava isporuka na-vrijeme i smanjuju se administrativni poslovi. Signali se u stvarnom vremenu odašilju kroz cijelu organizaciju i vidljivi su svima što omogućuje učinkovitije upravljanje i bolju kontrolu varijacija u opskrbnom lancu.

eKanban sustavi omogućuju brzu i jednostavnu prilagodbu na nagle promjene potražnje usklađujući stanje na zalihama sa stvarnom potrošnjom zaliha.

eKanban softverska rješenja daju detaljniji uvid u podatke dobivene iz opskrbnog lanca čijom se analizom mogu napraviti precizna predviđanja vezana za zahtjeve tržišta, a cijeli proces može se lakše optimizirati.

3.2.3. Internet stvari i *Blockchain*

„IoT ključni je infrastrukturni element Četvrte industrijske revolucije.“ [18]

Internet stvari naziv je za tehnologiju kojom se fizički objekti opremljeni sensorima, pomoću kojih prikupljaju i obrađuju podatke, putem interneta povezuju s drugim uređajima i sustavima te s njima razmjenjuju podatke. To mogu biti obični kućanski uređaji ili sofisticirani industrijski strojevi. Razvoj tehnologije u posljednjih desetak godina omogućio je IoT. To podrazumijeva senzore koji se ugrađuju u uređaje i koji su pristupačniji cijenom, pouzdaniji i troše manje energije, rašireniji širokopojasni Internet koji omogućuje brzu i efikasnu razmjenu podataka između senzora i oblaka, širu ponudu platformi za računarstvo u oblaku (engl. *cloud computing*), napredak strojnog učenja i analitike koji je ubrzao i olakšao uvid u stanje procesa, napretke u razvoju neuronskih mreža koji omogućuju obradu prirodnog jezika (engl. *natural language processing*) u IoT uređajima itd.

IIoT (engl. *Industrial IoT*) podrazumijeva industrijski internet stvari i u sklopu šest sigme organizacije mogu lakše poboljšati upravljanje i poslovanje. M2M komunikacija (engl. *machine-to-machine*), odnosno komunikacija između strojeva omogućuje potpunu automatizaciju i kontrolu procesa, konstantan nadzor i analiza strojeva osigurava rad u okviru zahtijevanih parametara, nadzor proizvoda u stvarnom vremenu omogućuje trenutno uočavanje defekata, potom GPS praćenje imovine u stvarnom vremenu, efikasniji i sigurniji logistički procesi (preusmjeravanje transporta u stvarnom vremenu s obzirom na vremenske prilike i stanje u prometu), praćenje stanja opreme u svrhu preventivnog održavanja (ujedno smanjuje operativne troškove i sprječava potencijalne zastoje) itd.

Zanimljiv je primjer američke dostavljačke kompanije UPS koja je, tražeći način na koji bi mogla unaprijediti proces dostave, na svoja vozila ugradila senzore koji su u stvarnom vremenu prikupljali podatke i pohranjivali ih u oblak. Vozila u praznom hodu troše gorivo, a pritom se, naravno, ne približavaju odredištu isporuke. Analizom podataka ustanovljeno je da se vozila najčešće nalaze u praznom hodu pri skretanju ulijevo. Ponukani time izmijenili su sustav ruta koji je gotovo u potpunosti eliminirao skretanja ulijevo. Rezultat toga je ušteda oko 37 850 000 litara goriva te godine. [19]

Blockchain je naziv za tehnologiju kriptografski lančano povezanih blokova na kojima se bilježe transakcije i koji tvore javnu računovodstvenu knjigu na decentraliziranoj mreži ravnopravnih partnera (engl. *peer-to-peer*). Drugim riječima, to je decentralizirana baza podataka koja pohranjuje registar imovine i transakcija. Svaki blok sadrži kriptografsku *hash* vrijednost (vrijednost dobivena primjenom *hash* algoritma) prethodnog bloka, vremensku oznaku i podatke o transakcijama. Budući da svaki blok sadrži podatke o prethodnom bloku, oni zajedno tvore lanac, a svaki dodatni blok učvršćuje one prije njega. Na taj način sprječava se krivotvorenje transakcija jer izmjena podataka na jednom bloku nije moguća bez izmjene podataka u svim blokovima koji iza njega slijede. Transakcije se odobravaju digitalnim potpisom, odnosno javnim i privatnim (tajnim) ključem.

Blockchain tehnologija najpoznatija je kao platforma za *Bitcoin* kriptovalutu, međutim *blockchain* tehnologija primjenjiva je u mnogim aspektima – od poslovanja, do distribucije električne energije pa do proizvodnje.

Prednosti *blockchain* tehnologije su višestruke:

Poboljšana sigurnost

- pohranjeni podaci ne mogu se mijenjati i kriptirani su, što sprječava prijevare i neovlaštene aktivnosti
- anonimnost podataka i pristup uz dozvolu
- podaci spremljeni na mreži, a ne na jednom serveru (veća sigurnost od hakerskih napada)

Veća transparentnost

- upotrebom glavne (računovodstvene) knjige, transakcije i podaci identično se bilježe na više lokacija
- svi sudionici mreže s dopuštenim pristupom vide iste podatke u isto vrijeme
- sve zabilježene transakcije su nepromjenjive i označene vremenom i datumom
- pregled cijele povijesti transakcija

Sljedivost podataka

- stvara revizijski trag i dokumentira podrijetlo imovine na svakom koraku puta
- podaci o sljedivosti mogu otkriti slabosti u lancu opskrbe (npr. zastoji u tranzitu)

Veća efikasnost i brzina te smanjenje troškova automatizacijom transakcija pomoću „pametnih ugovora“ koji uklanjaju potrebu za posrednikom. Pametni ugovor je ugovor koji se sam izvršava, a uvjeti ugovora između kupca i prodavatelja izravno su zapisani u retke koda. Kod i sporazumi sadržani u njemu pohranjeni su u distribuiranoj, decentraliziranoj *blockchain* mreži. Kod kontrolira izvršavanje, a transakcije se mogu pratiti i nepovratne su. Pametni ugovori omogućuju izvršavanje pouzdanih transakcija i sporazuma između anonimnih strana bez potrebe za središnjim tijelom ili pravnim sustavom.

Primjer integrirane IoT i *blockchain* tehnologije je Helium mreža. Helium je globalna, distribuirana mreža *hotspotova* koji stvaraju javnu, dalekometnu bežičnu pokrivenost za bežične LoRaWAN IoT uređaje. [20] Helium mreža naziva se i narodna mreža (engl. *People's network*).

Temelji se na Helium *blockchain* tehnologiji koja je razvijena kako bi potakla stvaranje decentralizirane bežične mreže. Helium *blockchain* temelji se na algoritmu dokaza pokrivenosti mreže (engl. *proof of coverage*) pritom nagrađujući vlasnike *hotspotova* Heliumovom \$HNT kriptovalutom. Na taj način potiče se širenje mreže i osiguravaju se infrastrukturni uvjeti, odnosno velika pokrivenost i digitalni ekosustav.

S industrijskog aspekta to može imati višestruke koristi. Poduzeća koja opreme svoju imovinu sensorima koji mogu komunicirati na Heliumovoj decentraliziranoj mreži mogu brže, jeftinije, preciznije i efikasnije prikupljati podatke, imajući tako uvid u stanje procesa u stvarnom vremenu. To pogotovo može imati veliki utjecaj na logistiku i opskrbni lanac pri planiranju ruta s obzirom na dobivene podatke – gdje su zastoji u tranzitu, u koje vrijeme se događaju, kakve vremenske neprilike su moguće na pojedinim dionicama, gdje se točno nalazi proizvod u svakom trenutku itd.

4. Programska rješenja u primjeni šest sigme

Upotrebom programskih rješenja znatno se olakšava proces provođenja šest sigma metodologije. Brojna su programska rješenja koje organizacije pritom koriste, a mogu se svrstati u jednu od sljedećih kategorija:

- alati za provođenje statističke analize i analize procesa – Minitab, Statistica, JMP, SigmaXL, R i brojni drugi
- alati za upravljanje projektima i planiranje proizvodnje – MRP i ERP sustavi
- alati za vizualizaciju procesa – npr. MS Visio, Lucidchart
- alati za prikupljanje podataka

4.1. Statistički alati

Eksplozivnim rastom količine podataka uzrokovane razvojem tehnologije poput IoT-a, sve veći su izazovi pred poduzećima u upravljanju i analizi tih podataka. Temeljem povijesnih podataka trebaju uočiti uzorke i trendove u podacima, a istovremeno razmatrati buduće prilike i rizike. Nadalje, s obzirom na brz razvoj, moraju podatke analizirati brzo i efikasno prije nego li oni postanu nerelevantni.

Postoje različiti statistički alati i oni mogu biti namijenjeni za specifičnu upotrebu, no većina statističkih alata sadrži osnovne funkcije kao što su:

- crtanje i analiza kontrolnih karti
- testiranje hipoteza i generiranje p-vrijednosti
- analiza varijance i regresijska analiza
- modeliranje i analiza procesa
- simulacija i analiza procesa
- provođenje R&R analize i analize pouzdanosti
- FMEA, QFD i Pareto analiza

S obzirom na vrstu, analiza se može podijeliti na: deskriptivnu, preskriptivnu i prediktivnu. Deskriptivna analiza daje uvid u podatke, ali ne sugerira nikakve buduće ishode. Preskriptivna analiza temeljem povijesnih podataka sugerira neki ishod. Prediktivna analiza temeljem povijesnih podataka predviđa buduće događaje.

Popularni statistički alati poput JMP-a, Minitaba, R-a, SigmaXL-a te Statistice više-manje nude jednake mogućnosti obrade podataka. Svi navedeni alati samostalne su verzije programa, dok je SigmaXL dodatak Microsoft Excelu. R programski paket za razliku od ostalih nema grafičko korisničko sučelje, već znakovno korisničko sučelje, no moguće ga je dodati instalacijom proširenja. Velika prednost R-a je ta što je program otvorenog koda i besplatan je za korištenje.

U nastavku je tablicama dana usporedba navedenih statističkih alata prema [21].

Tablica 4. Usporedba značajki statističkih programskih rješenja

Programsko rješenje	Proizvođač	Posljednja verzija	Operativni sustav			Sučelje	Plaća se/besplatan
			Windows	Mac OS	Linux		
JMP	SAS Institute	16.1 (srpanj 2021.)	da	da	ne	GUI	plaća se
Minitab	Minitab, LLC	20.4 (14. travnja 2021.)	da	da	ne	GUI	plaća se
R	R foundation	4.0.3 (10. listopada 2020)	da	da	da	CLI	besplatan
SigmaXL	SigmaXL Inc.	9.05 (20. srpnja 2021.)	da	da	ne	GUI	plaća se
Statistica	Tibco Software	14.0 (prosinac 2020.)	da	ne	ne	GUI	plaća se

Tablica 5. Usporedba alata analize varijance

	ANOVA						
	Jednofaktorska	Dvofaktorska	MANOVA	GLM	Miješani model	Post-hoc	Latinski kvadrat
JMP	da	da	da	da	da	da	da
Minitab	da	da	da	da	da	da	da
R	da	da	da	da		da	da
SigmaXL	da	da	ne	ne			ne
Statistica	da	da	da	da		da	da

Tablica 6. Usporedba alata regresijske analize

	Regresija													
	OLS	WLS	2SLS	NLLS	Logistic	GLM	LAD	Stepwise	Quantile	Probit	Cox	Poisson	MLR	
JMP	da	da	ne	da	da	da	ne	da	JMP Pro	da	JMP pro	da	da	
Minitab	da	da	ne	da	da	ne	ne	da	ne	da		da	da	
R	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da	
SigmaXL	da				da								da	
Statistica	da	da	da	da	da	da	da	da	ne	da	da	da	da	

Tablica 7. Usporedba grafičke obrade podataka

	Dijagrami						
	<i>Bar chart</i>	<i>Box plot</i>	<i>Correlogram</i>	<i>Histogram</i>	<i>Line chart</i>	<i>Scatterplot</i>	<i>Violin plot</i>
JMP	da	da	da	da	da	da	da
Minitab	da	da	da	da	da	da	
R	da	da	da	da	da	da	da
SigmaXL	da	da		da	da	da	
Statistica	da	da	da	da	da	da	

Tablica 8. Usporedba modula za predanalizu podataka

	Deskriptivna statistika		Neparametarska statistika		Kontrola kvalitete	Analiza preživljavanja	Procesuiranje podataka			
	Osn. stat. alati	Test normalnosti	C T A	Neparametarska usporedba, ANOVA			Grupiranje podataka	L D A	osnovno	prošireno
JMP	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da
Minitab	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da
R	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da
SigmaXL	da	da	da	da	da	da			da	da
Statistica	da	da	da	da	da	da	da	da	da	da

4.2. Sustavi za poslovno planiranje resursima

ERP (engl. *Enterprise resource planning*) sustavi programska su rješenja za poslovno planiranje kojima se povezuju svi odjeli unutar organizacije i koji omogućuju potpunu kontrolu nad poslovnim procesima. Takvi sustavi osiguravaju usklađenost organizacije te olakšavaju planiranje proizvodnje i upravljanje projektima.

Primjer ERP sustava je Odoo. Odoo je paket softverskih alata za planiranje poslovnih resursa koji uključuje upravljanje odnosima s klijentima (engl. CRM - *customer relationship management*), e-trgovinu, računovodstvo, naplatu, upravljanje zalihama, upravljanje projektima, upravljanje skladištem, upravljanje financijama, proizvodnju i nabavu...

Odoo sadrži 30 modula koji se redovito ažuriraju te brojne druge koje su napravili programeri i koje je moguće nadodati. Budući da je Odoo softver otvorenog koda moguće je instalirati vlastite nadogradnje, veoma je prilagodljiv te ga je moguće integrirati i s drugim sustavima. Dostupan je u dvije verzije, Odoo Community (besplatna) i Odoo Enterprise. Moguća je upotreba u oblaku ili lokalno.

Najvažnija značajka s aspekta šest sigme je MRP (engl. *Material requirements planning*) dio Odoo softvera koji povezuje proizvodnju, kvalitetu, održavanje, životni ciklus proizvoda, zalihe, nabavu i računovodstvo što olakšava komunikaciju i protok informacija među odjelima.

MRP moduli omogućuju automatsko planiranje proizvodnje, prikupljanje informacija o proizvodnji, automatsko praćenje vremena rada koje softver zatim sprema i koristi za planiranje budućih narudžbi, kreiranje proizvodnih naloga i automatsku provjeru stanja zaliha, izradu radnih naloga, sastavnica i gantograma, usmjeravanje proizvodnje kako bi radnici znali ispravan način provođenja operacija, izradu radnih centara itd.

Uz Odoo postoje i brojna druga programska rješenja poput SAP-a, Sage Intaccta, NetSuitea...

5. Primjena programskih rješenja na simuliranom problemu

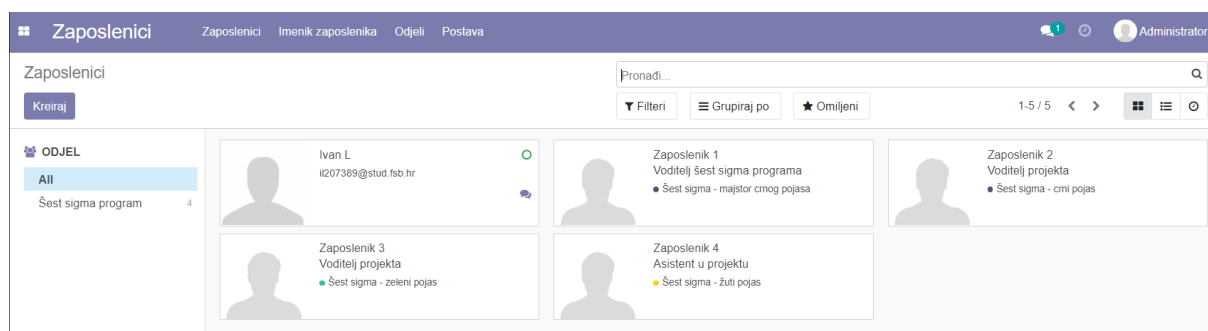
U ovom poglavlju prikazana je primjena programskih rješenja u okviru DMAIC pristupa, a korištena programska rješenja su Odoo Community i probna verzija Minitaba 20. Odoo Community korišten je za početne faze projekta kao što su definiranje problema i ciljeva te formiranje tima koji će voditi projekt, a Minitab je korišten za analizu dostupnih podataka.

Problematika

Na temelju podataka koji su preuzeti iz baze podataka programa Minitab razrađen je primjer u kojem se rješava jednostavni problem smanjenja vremena isporuke.

Neko poduzeće sadrži tri skladišta: istočno, središnje i zapadno skladište. Za svako od skladišta dani su podaci: datum i vrijeme zaprimanja narudžbe, datum i vrijeme isporuke narudžbe, vrijeme isporuke u danima, status narudžbe (isporuka na vrijeme, zakašnjela isporuka ili nema zaliha) te udaljenost mjesta slanja od skladišta.

Prvo je u Odoo Community programu oformljen tim ljudi zadužen za projekt smanjenja vremena isporuke. Unutar aplikacije „Zaposlenici“ napravljeni su profili četiriju zaposlenika. Svakom od zaposlenika dodijeljen je šest sigma pojas.



Slika 12. Odoo – šest sigma projektni tim

Za definiranje projekta korištena je aplikacija „Projekt“ unutar Odoo Community programa te su zadane aktivnosti faze definiranja, faze mjerenja, faze analiziranja, faze unaprjeđivanja te faze kontroliranja. Napravljen je projekt pod nazivom „Šest sigma – završni rad“ te je svakom zaposleniku dodijeljena aktivnost.



Slika 13. Odoo – zadavanje aktivnosti (DMAIC)

Nakon toga, u svrhu boljeg uvida u trenutno stanje i razumijevanja potreba kupaca, provedena je VOC anketa u programu Odoo, unutar aplikacije „Upitnici“.



Slika 14. Odoo – VOC anketa

Provođenjem ankete zaključeno je kako su kupci nezadovoljni vremenom isporuke, koji predugo traje te nezadovoljstvo zbog manjka određenih proizvoda na zalihi.

Uvidom u povijesne podatke napravljena je preliminarna analiza kako bi se bolje razumio problem. U programu Minitab prikazani su podaci Pareto dijagramom.



Slika 15. Minitab – Pareto dijagram za svako skladište

Analizom Pareto dijagrama vidljiv je povećani broj zakašnjelih isporuka i nedostupnosti proizvoda u istočnome skladištu što sugerira potencijalne probleme u upravljanju zalihama u istočnome skladištu.

Okupljanjem projektnog tima postavljeni su ciljevi smanjenja zakašnjelih narudžbi te smanjenje broja narudžbi koje nije moguće isporučiti zbog manjka zaliha. Nakon definiranja ciljeva prikupljaju se dodatni podaci.

U Odo programu ažuriraju se aktivnosti i kreće se u fazu prikupljanja i analize podataka o vremenima isporuke.



Slika 16. Odo – ažuriranje aktivnosti i prijelaz na sljedeću fazu

Obradom podataka dobiveni su sljedeći rezultati.

Statistics

Variable	Center	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Days	Central	98	7	8,904	0,144	1,426	5,520	8,013	9,003	9,849	12,675
	Eastern	92	17	13,663	0,192	1,840	9,196	12,246	13,620	15,235	17,358
	Western	102	3	6,822	0,162	1,637	1,708	5,643	6,816	8,058	10,141

Slika 17. Minitab – deskriptivna statistika – vrijeme isporuke u danima

Histogramima prikazani su podaci o vremenima isporuke u danima u kojima je vidljivo da je prosječno vrijeme isporuke za istočno skladište 13,66 dana, za središnje skladište 8,904 dana, a za zapadno skladište 6,822 dana.



Slika 18. Minitab – histogram vremena isporuke za svako skladište

Kontrolnim dijagramima svakog skladišta utvrđeno je da su procesi pod kontrolom.



Slika 19. Minitab – kontrolna karta za istočno skladište



Slika 20. Minitab – kontrolna karta za središnje skladište



Slika 21. Minitab – kontrolna karta za zapadno skladište

U daljnjoj analizi ispitana je veza između vremena isporuke i udaljenosti odredišta isporuke.

U dijagramima korelacije vidljiva je slaba korelacija između vremena isporuke i udaljenosti isporuke što sugerira loš odabir ruta pri isporuci.



Slika 22. Minitab – dijagram korelacije svakog skladišta

Nakon analize, ponovno se u Odoe programu ažuriraju aktivnosti i daju se prijedlozi za poboljšanje vremena isporuke i razmatraju se potencijalni uzroci dugih vremena isporuke.



Slika 23. Odoe – ažuriranje aktivnosti i prijelaz na sljedeću fazu (2)

Ustanovljeno je kako se puno vremena gubi na procesuiranje narudžbi te da bi trebalo bolje isplanirati rute.

U cilju smanjenja vremena isporuke predlaže se implementacija *eKanban* sustava povlačenja kako bi tok informacija kroz organizaciju bio brži i kako bi se uklonio problem nedostatka zaliha u istočnom skladištu.

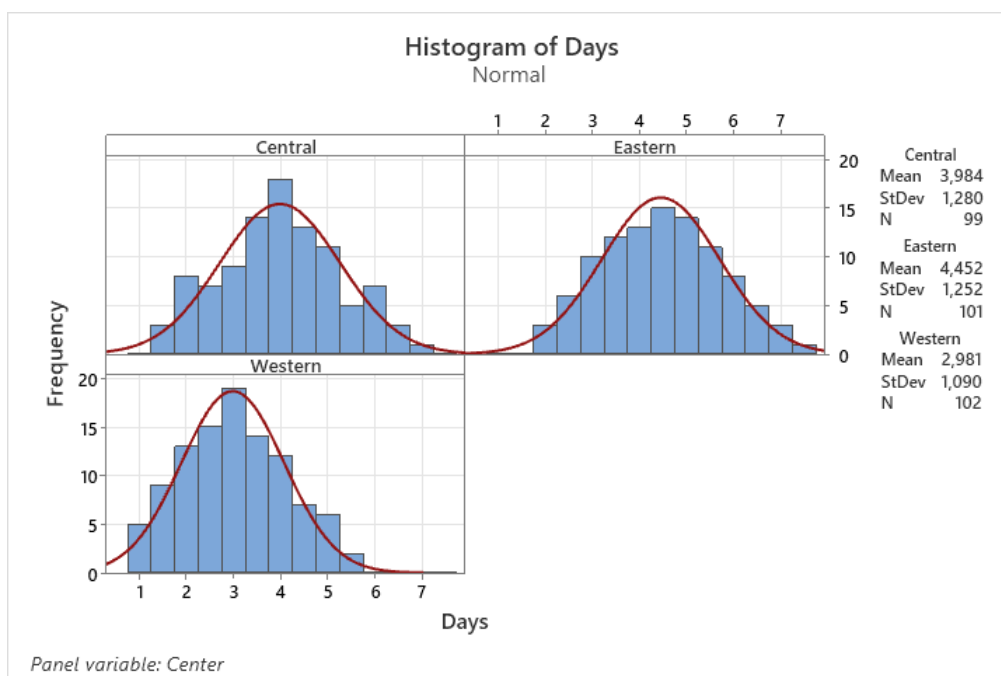
Usvajaju se predložena rješenja i kreće se u izmjene. Nakon određenog perioda ponovno se prikupljaju podaci, a potom analiziraju.

Dobiveni su sljedeći podaci.

Statistics

Variable	Center	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Days	Central	99	6	3,984	0,129	1,280	1,267	2,981	3,987	4,977	7,070
	Eastern	101	8	4,452	0,125	1,252	1,860	3,705	4,711	5,279	7,748
	Western	102	3	2,981	0,108	1,090	0,871	2,148	2,953	3,900	5,681

Slika 24. Minitab – deskriptivna statistika – vrijeme isporuke u danima, nakon izmjena



Slika 25. Minitab – histogram vremena isporuke za svako skladište nakon izmjena

Srednje vrijeme isporuke za istočno skladište nakon izmjena iznosi 4,452 dana, za središnje skladište 3,984, a za zapadno skladište 2,981 dana. Vremena isporuke znatno su smanjena.

Nadalje, boljim planiranjem i izborom ruta, u dijagramu korelacije vidljiva je snažna korelacija između vremena isporuke i udaljenosti odredišta isporuke.



Slika 26. Minitab – dijagram korelacije svakog skladišta nakon izmjena



Slika 27. Minitab – Pareto dijagram za svako skladište nakon izmjena

U Pareto dijagramu nakon izmjena vidljivo je smanjenje neisporučenih narudžbi zbog manjka zaliha i manje zakašnjelih isporuka.

Slijedi ažuriranje aktivnosti projekta i prijelaz na iduću fazu.



Slika 28. Odoo – ažuriranje aktivnosti i prijelaz na sljedeću fazu (3)

Na kraju preostaje provjeriti jesu li izmijenjeni procesi pod kontrolom, tj. unutar kontrolnih granica.



Slika 29. Minitab – kontrolna karta za istočno skladište nakon izmjena



Slika 30. Minitab – kontrolna karta za središnje skladište nakon izmjena



Slika 31. Minitab – kontrolna karta za zapadno skladište nakon izmjena

Na kontrolnim kartama vidljivo je da su procesi pod kontrolom te da su postignuta poboljšanja. Slijedi ažuriranje aktivnosti u Odoo-u te zatvaranje projekta.

U programskom rješenju Odoo moguće je vidjeti i sam tijekom projekta, trajanja aktivnosti te uključenost članova tima u pojedinim fazama.



Slika 32. Odoo – ažuriranje projekta i završetak projektnih aktivnosti

6. ZAKLJUČAK

Cilj svakog proizvodnog ili uslužnog poduzeća je imati zadovoljne kupce, stoga moraju pružati kvalitetne proizvode i usluge koje su oni spremni platiti. Brzim promjenama trendova na tržištu, poduzeća moraju biti spremna brzo se prilagođavati i kontinuirano poboljšavati vlastite procese i usluge. Kako bi u tom naumu uspjela moraju provesti strukturirane i temeljite izmjene. Šest sigma metodologija dugotrajan je i opsežan proces te zahtijeva tim stručnih ljudi i usklađenost cijele organizacije kako bi se pravilno provela, no jednom kada je implementirana donosi velike koristi.

Budući da je u današnje vrijeme sve veći i brži priljev informacija, potrebno ih je brzo prikupiti i obraditi kako bi se strukturirali i kako bi se na temelju tih informacija donijele pravovremene i pravovaljane odluke. Tehnološki procvat i razvoj novih alata i programskih rješenja pomaže u kvalitetnijem i preciznijem pristupu primjene šest sigma metodologije.

U ovom radu prikazan je simulirani problem te mogućnost implementacije šest sigma metodologije korištenjem dostupnih programskih rješenja. Razvojem i implementacijom tehnoloških rješenja moguće je i dodatno olakšati praćenje i provedbu šest sigma programa. Konačno, šest sigma metodologija pokazala se kao vrlo uspješna filozofija u poslovanju proizvodnih i uslužnih poduzeća i daljnji razvoj tehnologije omogućit će još veći utjecaj na poslovanje organizacija.

LITERATURA

- [1] Shankar, R., Process Improvement Using Six Sigma: A DMAIC Guide, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 2009.
- [2] Cajner, H., Predavanja iz kolegija Industrijsko inženjerstvo (pdf), FSB, Zagreb, 2017.
- [3] Six Sigma study guide, preuzeto s: <https://sixsigmastudyguide.com/critical-to-quality-tree/> (datum pristupa 27. 8. 2021.)
- [4] Hegedić, M.: Predavanja iz kolegija proizvodni menadžment (pdf), FSB, Zagreb, 2020.
- [5] Runje, B., Autorizirana predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, FSB, Zagreb, 2014.
- [6] Cajner, H., Predavanja iz kolegija Inženjerska statistika (pdf), FSB, Zagreb, 2019.
- [7] Arnerić, J., Protrka, K.: Modeli analize varijance (ANOVA), Matematičko-fizički list, 2019./20., preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/file/347554> (datum pristupa: 9. 9. 2021.)
- [8] Čelar, D., Valečić, V., Željezić, D. i Kondić, Ž.: Alati za poboljšavanje kvalitete, Tehnički glasnik 8(3), 2014., preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/129384> (datum pristupa: 9. 9. 2021.)
- [9] Ukrainczyk, M.: Planiranje pokusa u industriji, Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam 5(3-4), 2010., preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/63984> (datum pristupa: 10. 9. 2021.)
- [10] Wikipedia, preuzeto s: https://en.wikipedia.org/wiki/Quality_function_deployment#/media/File:A1_House_of_Quality.png (datum pristupa 10. 9. 2021.)
- [11] Baršić, G., Predavanja iz kolegija Kontrola kvalitete (pdf), FSB, Zagreb, 2019.
- [12] Institute for Manufacturing, preuzeto s: <https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/research/dstools/quality-function-deployment/> (datum pristupa 10. 9. 2021.)
- [13] Arcidiacono, G., Pieroni, A.: The Revolution Lean Six Sigma 4.0, International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology Vol. 8, No. 1, 2018., preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/323461248_The_revolution_Lean_Six_Sigma_40 (datum pristupa: 12. 9. 2021.)
- [14] Industry 4.0 Design Principles, RMIT University, preuzeto s: <https://www.rmit.edu.au/news/c4de/industry-4-0-design-principles#:~:text=As%20a%20result%2C%20researchers%20have,service%20orientati on%3B%20and%20modularity1> (datum pristupa: 13. 9. 2021.)

- [15] Graafmans, T., Turetken, O., Poppelaars, H., Fahland, D.: Process Mining for Six Sigma: A Guideline and Tool Support, *Business & Information Systems Engineering* volume 63, 2021., preuzeto s: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-020-00649-w> (datum pristupa 13. 9. 2021.)
- [16] Kregel, I., Stemann, D., Koch, J., Coners, A.: Process Mining for Six Sigma: Utilising Digital Traces, *Computers & Industrial Engineering* Volume 153, 2021., preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835220307531?via%3Dihub> (datum pristupa 13. 9. 2021.)
- [17] Process Mining for Six Sigma, preuzeto s: <https://sites.google.com/view/process-mining-for-six-sigma/home> (datum pristupa: 14. 9. 2021.)
- [18] Schwab, K.: *Shaping the Fourth Industrial Revolution*, World Economic Fund, Ženeva, 2018.
- [19] Six Sigma Daily, *How Lean Six Sigma and the Cloud Work Together*, preuzeto s: <https://www.sixsigmadaily.com/lean-six-sigma-cloud/> (datum pristupa: 17. 9. 2021.)
- [20] Helium, preuzeto s: <https://docs.helium.com/> (datum pristupa: 17. 9. 2021.)
- [21] Wikipedia, *Comparison of statistical packages*, preuzeto s: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_statistical_packages (datum pristupa: 17. 9. 2021.)

PRILOZI

I. CD-R disc