

# Prilog povećanju pouzdanosti sustava mlinova TE Plomin 2

---

**Batelić, Jakov**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:304842>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Jakov Batelić

**PRILOG POVEĆANJU POUZDANOSTI  
SUSTAVA MLINOVA TE PLOMIN 2**

Doktorska disertacija

Rijeka, 2019.



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Jakov Batelić

**PRILOG POVEĆANJU POUZDANOSTI  
SUSTAVA MLINOVA TE PLOMIN 2**

Doktorska disertacija

Mentor: prof. dr. sc. Dario Matika

Rijeka, 2019.



UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF ENGINEERING

Jakov Batelić

**CONTRIBUTION TO RESEARCH ON  
INCREASING MILL SYSTEM RELIABILITY  
OF THE PLOMIN 2 THERMAL POWER  
PLANT**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2019



Mentor rada: prof. dr. sc. Dario Matika

Doktorski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ godine na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Duško Pavletić - predsjednik
2. Prof. dr. sc. Zoran Jurković - član
3. Doc. dr. sc. Luka Mihanović – član (HVU „Dr. Franjo Tuđman“)





## SAŽETAK

Općenito se može navesti da je učinkovit i ekonomičan onaj tehnički sustav koji uspješno vrši svoju funkciju uz najniže ukupne troškove (troškove nabave, troškove održavanja, troškove amortizacije itd.). Sagledavajući životni ciklus jednog takvog složenog tehničkog sustava kao što je termoelektrana TE Plomin 2, ukupni se troškovi mogu znatno umanjiti ako se odgovarajuća pozornost pravodobno posveti eksploatacijskoj pouzdanosti i pogodnosti održavanja njezinih podsustava. Zbog kompleksnosti same termoelektrane, istraživanje čiji se rezultati predstavljaju u ovoj doktorskoj disertaciji bilo je usmjereno na sustav mlinova za ugljen. U cilju prethodno navedenog, istražen je učinak sanacijskog održavanja na točku ekonomičnosti održavanja na primjeru sustava mlinova u TE Plomin 2. U svrhu navedenog, razvijen je model kojim se procjenjuje doprinos sanacijskog održavanja na točku ekonomičnosti održavanja iz dva aspekta, pri čemu prvi predstavlja doprinos sanacijskog održavanja na eksploatacijsku pouzdanost i ukupne troškove održavanja promatranog tehničkog sustava, dok drugi aspekt predstavlja doprinos sanacijskog održavanja na optimizaciju vremena provedbe preventivnog održavanja za promatrani tehnički sustav. U skladu s time, bilo je nužno analizirati složeni tehnički sustav u kojem je zastupljena provedba sanacijskog održavanja uz postojanje relevantne baze podataka o karakterističnim događajima na temelju kojih je postavljen i statistički potvrđen numerički model kao podloga pri određivanju točke ekonomičnosti održavanja.

**KLJUČNE RIJEČI:** termoelektrana, mlinovi za ugljen, održavanje, eksploatacijska pouzdanost, pogodnost održavanja, numerički model, ekonomičnost održavanja.

## ABSTRACT

It can be generally specified that a technical system is effective and profitable if it successfully performs its function with lowest total costs (procurement costs, maintenance costs, depreciation costs etc.). Taking into consideration the life cycle of a complex technical system such as the Plomin 2 thermal power plant, total costs can be significantly reduced if due and timely attention is paid to exploitation reliability and maintainability of its subsystems. Because of the complexity of the thermal power plant itself, this research was focused on the coal mill system, and this doctoral thesis serves to present its results. For the aforementioned purpose, the effect of remedial maintenance without downtime on optimal maintenance point was examined on the example of the TE Plomin 2 mill system. Therefore, a model was developed to evaluate the contribution of remedial maintenance without downtime on optimal maintenance point from two aspects. The first aspect represents the contribution of remedial maintenance without downtime to exploitation reliability and total maintenance costs of the observed technical system, while the second aspect signifies the contribution of remedial maintenance without downtime to the optimisation of implementation time needed to perform the preventive maintenance in the case of the technical system that is observed. Consequently, it was necessary to analyse the complex technical system that incorporates the implementation of remedial maintenance without downtime with the existence of a relevant database of characteristic events, the events being the basis for establishing and statistically confirming the numerical model used for determining the optimal maintenance point.

KEYWORDS: thermal power plant, coal mills, maintenance, exploitation reliability, maintainability, numerical model, maintenance cost-effectiveness.

## PREDGOVOR I ZAHVALA

Osnovni motiv koji je autora potaknuo na istraživanje jesu pitanja o tome kako postići bolju pouzdanost tehničkih sustava uz optimalne troškove održavanja, koje metode, alate, materijale, tolerantnost, primijeniti kako bi se nastanak kvarova minimizirao ili sanirao, a sve u cilju što duljeg rada sustava bez zastoja prouzročenih kvarom. Također je kao predmet provedbe istraživanja postavljeno pitanje o mjeri u kojoj je moguće primijeniti dosadašnje metode pouzdanosti i pogodnosti održavanja u termoelektrani TE Plomin 2. Praćenjem rada pojedinih komponenti, sklopa, podsustava, sustava u razdoblju eksploatacije i pri tome discipliniranim evidentiranjem svih bitnih podataka stvara se relevantna baza podataka kao podloga za provedbu statističkih analiza. Upravo rezultati statističkih analiza daju podatke bitne pri donošenju odluka održavatelja. U skladu s time, tako dobiveni podaci usmjereni su određivanju utjecaja sanacijskog održavanja na točku ekonomičnosti održavanja, područje u kojem se dosadašnjom literaturom ne uzima u obzir doprinos sanacijskog održavanja. Provođenjem istraživanja na primjeru sustava mlinova u TE Plomin 2 potvrđuje se da primjena sanacijskog održavanja pridonosi točki ekonomičnosti održavanja i to iz dva aspekta: prvi ukazuje na doprinos eksploatacijske pouzdanosti uz smanjenje ukupnih troškova održavanja, dok drugi indicira doprinos u obliku produljenja vremena rada do provedbe preventivnog održavanja uz zadržavanje jednake razine eksploatacijske pouzdanosti pri smanjenju ukupnih troškova održavanja.

Ujedno se koristim prilikom da se zahvalim svojem mentoru, prof. dr. sc. Dariju Matiki na nesebičnoj pomoći i korisnim savjetima pri izradi doktorske disertacije, suradnicima iz TE Plomin 2, dr. sc. Serđu Klapčiću i Adrijanu

Štembergi, dipl. ing. stroj. na ustupanju važnih podataka pri izradi baze podataka te svojoj supruzi Lani na bezuvjetnom razumijevanju jer bez njezine podrške ovaj rad ne bi bio dovršen.

# SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
ABSTRACT .....	II
PREDGOVOR I ZAHVALA .....	IV
1. UVOD.....	1
1.1. Predmet i cilj istraživanja.....	3
1.2. Hipoteze .....	5
1.3. Metodologija .....	10
1.4. Očekivani znanstveni doprinos .....	10
1.5. Pregled dosadašnjih istraživanja .....	11
1.6. Struktura doktorske disertacije.....	13
2. EKONOMIČNOST ODRŽAVANJA SUSTAVA MLINOVA TE PLOMIN 2.....	15
2.1. Financijski prihodi i rashodi TE Plomin 2 .....	16
2.2. Statusi termoelektrane i troškovi ulaska u pogon .....	19
2.3. Proizvodni proces TE Plomin 2 .....	21
2.3.1. Kvantitativni pokazatelji proizvodnje električne energije .....	22
2.3.2. Kvantitativni pokazatelji sustava mlinova.....	25
2.4. Proces održavanja sustava mlinova.....	29
2.4.1. Korektivno održavanje sustava mlina.....	34
2.4.2. Preventivno održavanje.....	38
2.4.3. Sanacija oštećenja tijekom rada sustava .....	45
2.5. Korelacija karakterističnih varijabli pri analizi ekonomičnosti sustava mlina .....	48
2.6. Proračun troškova.....	52
3. MODEL SUSTAVA MLINA U FUNKCIJI ODRŽAVANJA.....	56
3.1. Statusi sustava mlinova .....	56
3.2. Forma za prikupljanje podataka o nastanku događaja kvara i/ili sanacije oštećenja ..	61
3.3. Obrada i analiza prikupljenih podataka.....	70
3.3.1. Prikupljanje empirijskih podataka .....	72

3.3.2. Statistička obrada podataka za podsustav padnog kanala ugljena .....	75
3.3.3 Statistička obrada podataka za podsustav dodavač ugljena – kućište .....	86
3.3.4. Statistička obrada podataka za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 .....	89
4. ODREĐIVANJE TOČKE EKONOMIČNOSTI.....	92
4.1. Određivanje optimalnog intervala preventivne zamjene bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja .....	92
4.2. Određivanje optimalnog intervala preventivne zamjene na temelju funkcije hipotetske eksploatacijske pouzdanosti .....	99
4.3. Određivanje optimalnog intervala preventivne zamjene sagledavajući doprinos sanacije oštećenja .....	105
4.4. Evaluacija doprinosa sanacije oštećenja na točku ekonomičnosti .....	112
5. ZAKLJUČAK.....	116
LITERATURA.....	121
POPIS KRATICA I OZNAKA .....	127
POPIS SLIKA .....	133
POPIS TABLICA.....	136
PRILOG A .....	138
PRILOG B.....	141
PRILOG C.....	142
ŽIVOTOPIS .....	160
POPIS RADOVA.....	161



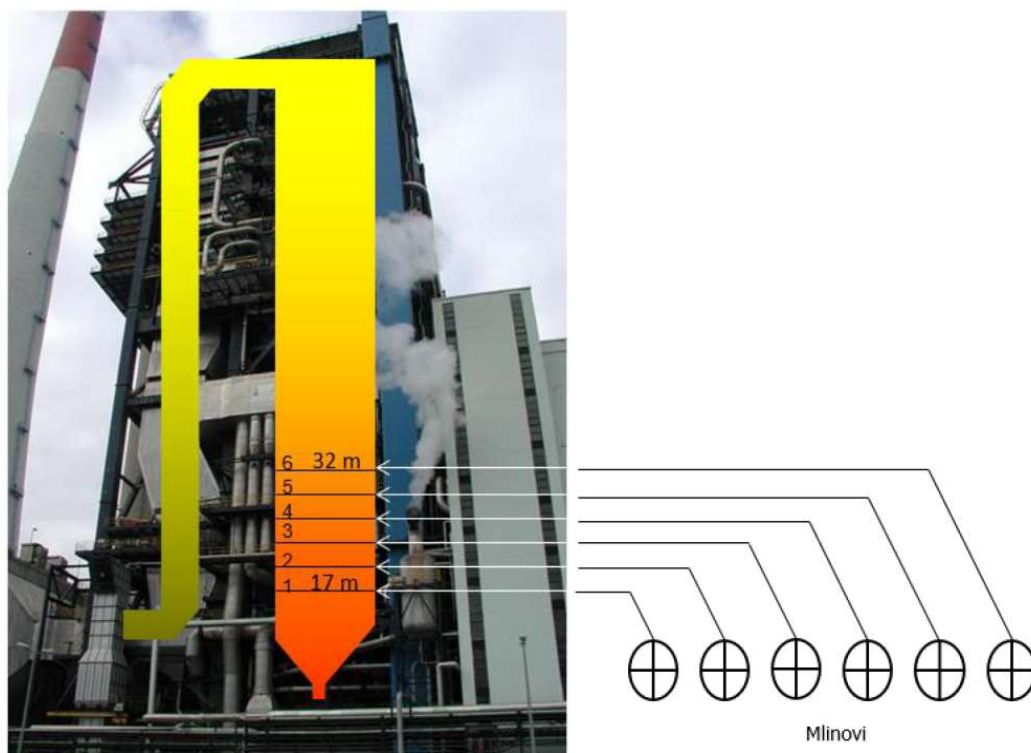
## 1. UVOD

Općenito se može napisati kako je učinkovit i ekonomičan onaj tehnički sustav koji uspješno obavlja svoju funkciju uz najniže ukupne troškove (troškove nabave, troškove održavanja, troškove amortizacije itd.). Sagledavajući životni ciklus jednog tako složenog tehničkog sustava kao što je termoelektrana Plomin 2, ukupni se troškovi mogu znatno smanjiti ako se odgovarajuća pozornost pravodobno posveti eksploatacijskoj pouzdanosti i pogodnosti održavanja njegovih podsustava. Zbog kompleksnosti same termoelektrane, istraživanje čiji se rezultati prezentiraju u ovoj doktorskoj disertaciji bilo je usmjereno na sustav mlinova za ugljen. Na slici 1.1. prikazan je mlin za ugljen u TE Plomin 2. Proces pretvorbe kemijske energije,



**Slika 1.1.** Kuglasti mlin TE Plomin 2

sadržane u ugljenu, u toplinsku energiju jedan je od glavnih procesa i odvija se u ložištu kotla termoelektrane. No, kako bi se osiguralo kontinuirano odvijanje procesa pretvorbe kemijske energije, nužno je održavati sustav i stvoriti adekvatne uvjete koji će jamčiti pouzdano odvijanje tog procesa. Sustav koji omogućava kontinuiranu i pouzdanu pretvorbu energije osiguravanjem potrebne količine kvalitetne ugljene prašine i njezinim „dostavljanjem” u ložište upravo je sustav mlinova. Prema tome, proces pretvorbe kemijske energije u toplinsku energiju dio je proizvodnog procesa termoelektrane čiji je glavni proizvod električna energija; stoga je pouzdanost i raspoloživost tog proizvodnog procesa termoelektrane od iznimne važnosti za sveukupnu ekonomičnost termoelektrane. Na slici 1.2. prikazan je sustav mlinova povezan s kotlom i ložištem TE Plomin 2. Na slikama 1.3. a) i b) prikazano je ložište.



**Slika 1.2.** Sustav mlinova povezan sa kotlom i ložištem TE Plomin 2 [61]



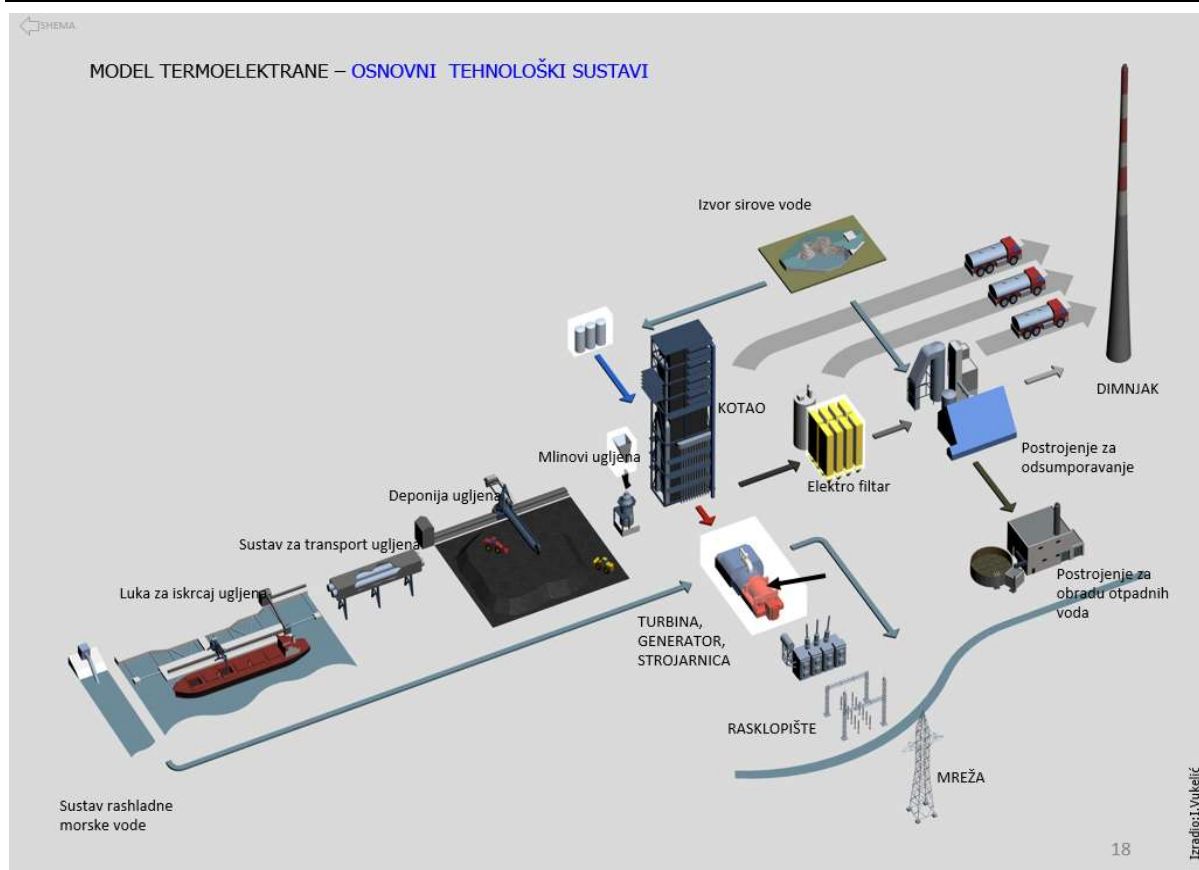
a)



b)

**Slika 1.3.** a) i b) Ložište TE Plomin 2 [61]

Na slici 1.4. prikazan je model TE Plomin 2 i njezini osnovni tehnološki procesi.



**Slika 1.4.** Model TE Plomin 2 – osnovni tehnološki proces [61]

Kao što se može uočiti, središnje mjesto u tehnološkom procesu zauzimaju mlinovi ugljena koji se nadovezuju na ukupan sustav dobave i pripreme goriva (ugljena) – luka za iskrcaj ugljena, sustav za transport ugljena i deponij ugljena.

### 1.1. Predmet i cilj istraživanja

Kao što je i prethodno navedeno, predmet istraživanja ove doktorske disertacije jest sustav mlinova TE Plomin 2 kao neophodan pri proizvodnji električne energije. U okviru navedenog predmeta istraživanja bilo je potrebno istražiti ekonomičnost održavanja sustava mlinova TE Plomin 2: s jedne strane ekonomske ciljeve, a s druge strane tehničko - tehnološke ciljeve održavanja, jer se ekonomičnošću održavanja nastoje dostići tehničko - tehnološki ciljevi, a posebice oni koji su povezani s produljenjem vijeka trajanja tehnološke opreme te ravnomjernijeg i bržeg odvijanja proizvodnog procesa, čime se smanjuju troškovi nastali zbog zastoja i samog održavanja. Optimizacija i odgovarajuća strategija održavanja može biti samo rezultat provedbe istraživanja, obrade i analize prikupljenih podataka i empirijskih pokazatelja te se zbog toga upotrebljava pojam „eksploatacijska pouzdanost” za razliku od projektirane (konstrukcijske) pouzdanosti.

---

Bilo je nužno istražiti:

- rentabilnost putem financijskih pokazatelja prihoda i rashoda
- statuse termoelektrane i troškove ulaska u pogon
- kvantitativne pokazatelje proizvodnje električne energije
- kvantitativne pokazatelje sustava mlinova
- proces održavanja sustava mlinova (korektivno i preventivno održavanje te sanacije oštećenja u radu)
- korelaciju karakterističnih varijabli pri analizi ekonomičnosti sustava mlinova
- proračun troškova korektivnog i preventivnog održavanja te troškova sanacije oštećenja u radu

Cilj istraživanja bio je odrediti:

- raspoloživost elektrane u funkciji sustava mlina
- operativnu raspoloživost pojedinog mlina
- vrijednosti karakterističnih varijabli za sustav mlina ostvarenih u pojedinoj kalendarskoj godini
- funkciju eksploatacijske pouzdanosti i očekivano vrijeme rada do pojave kvara termoelektrane
- funkciju eksploatacijske pouzdanosti i očekivano vrijeme rada sustava do nastanka kvara na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja i vrijeme rada sustava do nastanka sanacije oštećenja na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti i vrijeme rada sustava do nastanka događaja (kvar ili sanacija oštećenja) na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- funkcija pogodnosti održavanja i očekivano vrijeme popravka pri korektivnom održavanju na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- funkcija aktivnog korektivnog održavanja i očekivano aktivno vrijeme korektivnog održavanja na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1

- funkcija logističkog korektivnog održavanja i očekivano logističko vrijeme korektivnog održavanja na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- funkcija pogodnosti sanacijskog održavanja i očekivano vrijeme provedbe sanacijskog održavanja na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- funkcija logističkog sanacijskog održavanja pri saniranju oštećenja i očekivano logističko vrijeme provedbe sanacijskog održavanja na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- funkcija aktivnog sanacijskog održavanja i očekivano aktivno vrijeme provedbe sanacijskog održavanja na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1
- određivanje točke ekonomičnosti pri održavanju na podsustavima dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a svi kao dio sustava mlina br. 1

## 1.2. Hipoteze

Glavna je hipoteza ove doktorske disertacije da se optimizacijom procesa održavanja TE Plomin 2 s jedne strane povećava rentabilnost i radni vijek tehnološke opreme, a s druge strane smanjuju ukupni troškovi održavanja čime TE Plomin 2 kao proizvodni i poslovni objekt ostvaruje manje rashode. Naime, troškovi održavanja čine 18 % ukupnih poslovnih rashoda TE Plomin 2, među kojima fiksni troškovi održavanja iznose 62 %, a varijabilni 38 % pri iskoristivosti TE Plomin 2 od 37 %. Ključni kvantitativni pokazatelj pogonska je učinkovitost kao omjer ukupno proizvedene energije i ukupno uložene energije sadržane u gorivu (ugljenu), a promjena kvalitete ugljena, greška i/ili kvar na tehničkom sustavu, ljudski čimbenik i sl. mogu izazvati znatne oscilacije. Tako, primjerice, pad pogonske učinkovitosti od 3 do 4 % izaziva povećanje utroška ugljena od 9 do 12 %. To je i razlog zbog kojeg je predmet istraživanja bio usmjeren na sustav mlinova, odnosno njihovu raspoloživost i pouzdanost. Raspoloživost jest sposobnost, u ovom slučaju sposobnost termoelektrane ili nekog njezina podsustava da izvrši potrebnu funkciju pod zadanim uvjetima u zadanom roku ili tijekom zadanog vremenskog intervala, dok je pouzdanost mjerilo sposobnosti da će sustav raditi bez kvara te se matematičkim putem predviđa ponašanje sustava u očekivanim pogonskim uvjetima. Brojčani

pokazatelj tog predviđanja jest interval bezotkaznog rada (rada bez kvara); on se razlikuje i ovisi o tome promatra li se projektirana (konstrukcijska) ili eksploatacijska pouzdanost. U ovoj je disertaciji fokus na eksploatacijskoj pouzdanosti koja se određuje na temelju pokazatelja i uvjeta eksploatacije sustava, a oni se dinamički mijenjaju i ovisni su o konkretnom okruženju, neposrednim klimatskim uvjetima te posebice o navikama i načinima odražavanja svakog podsustav, u ovom slučaju sustava mlinova u TE Plomin 2.

Polazeći od glavne hipoteze, radne su hipoteze ove doktorske disertacije radi preglednosti grupirane u četiri skupine. Prva skupina radnih hipoteza predstavlja funkciju mlinova u proizvodnom procesu elektrane te utjecaj strategije održavanja sustava mlinova na pouzdanost i raspoloživost elektrane, dok se preostale na podsustave sustava mlina br. 1. Drugom je skupinom obuhvaćen podsustav dodavača ugljena – kućište, trećom podsustav padnog kanala ugljena, a četvrtom podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1.

U skladu s time, prva je skupina radnih hipoteza sljedeća:

**H<sub>0</sub><sup>I-1</sup>**: funkcija eksploatacijske pouzdanosti TE Plomin 2 ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez pojave kvara u TE Plomin 2;

**H<sub>0</sub><sup>I-2</sup>**: razina kvalitete rada mlinova izravno utječe na kvantitativne pokazatelje uspješnosti termoelektrane, kao što su: pogonska učinkovitost, radna i vremenska raspoloživost te eksploatacijska pouzdanost;

**H<sub>0</sub><sup>I-3</sup>**: korektivno održavanje pojedinog mlina u sustavu mlinova TE Plomin 2 doprinijelo je održavanju visoke razine operativne raspoloživosti;

**H<sub>0</sub><sup>I-4</sup>**: postoji povezanost između provedbe broja remonta i broja zastoja radi kvara, odnosno provedba većeg broj remonata pridonosi smanjenju broja zastoja zbog kvara i obratno;

**H<sub>0</sub><sup>I-5</sup>**: postoji povezanost između sati rada sustava mlina i broja zastoja zbog kvara na mlinovima, odnosno veći broj radnih sati sustava mlina pridonosi većem broju zastoja zbog kvara i obratno;

**H<sub>0</sub><sup>I-6</sup>**: ne postoji bitna povezanost broja provedbe preventivnog održavanja - pregled i broja zastoja radi korektivnog održavanja;

**H<sub>0</sub><sup>I-7</sup>**: ne postoji bitna povezanost broja zastoja mlina zbog vanjskih čimbenika (razina kvalitete ugljena) i broja zastoja radi korektivnog održavanja.



---

Druga je skupina radnih hipoteza u nastavku:

**H<sub>0</sub><sup>II-1</sup>**: funkcija eksploatacijske pouzdanosti na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez pojave kvara;

**H<sub>0</sub><sup>II-2</sup>**: funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>II-3</sup>**: funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez nastanka kvara ili sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>II-4</sup>**: funkcija pogodnosti održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>II-5</sup>**: funkcija logističkog korektivnog održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano logističko vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>II-6</sup>**: funkcija aktivnog korektivnog održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano aktivno vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>II-7</sup>**: funkcija pogodnosti sanacijskog održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano vrijeme sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>II-8</sup>**: funkcija logističkog vremena sanacijskog održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano logističko vrijeme sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>II-9</sup>**: funkcija aktivnog vremena sanacijskog održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano aktivno vrijeme sanacije oštećenja.

---

Treća je skupina radnih hipoteza:

**H<sub>0</sub><sup>III-1</sup>**: funkcija eksploatacijske pouzdanosti na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez pojave kvara;

**H<sub>0</sub><sup>III-2</sup>**: funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>III-3</sup>**: funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez nastanka kvara ili sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>III-4</sup>**: funkcija pogodnosti održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>III-5</sup>**: funkcija logističkog korektivnog održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1 ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano logističko vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>III-6</sup>**: funkcija aktivnog korektivnog održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano aktivno vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>III-7</sup>**: funkcija pogodnosti sanacijskog održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1 ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano vrijeme sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>III-8</sup>**: funkcija logističkog vremena sanacijskog održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1 ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano logističko vrijeme sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>III-9</sup>**: funkcija aktivnog vremena sanacijskog održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena sustava mlina br. 1 ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano aktivno vrijeme sanacije oštećenja.



---

Četvrta skupina radnih hipoteza obuhvaća sljedeće:

**H<sub>0</sub><sup>IV-1</sup>**: funkcija eksploatacijske pouzdanosti na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1 ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez kvara;

**H<sub>0</sub><sup>IV-2</sup>**: funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>IV-3</sup>**: funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1, ravna se po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivani interval rada bez nastanka događaja kvara ili sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>IV-4</sup>**: funkcija pogodnosti održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1 ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>IV-5</sup>**: funkcija logističkog korektivnog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano logističko vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>IV-6</sup>**: funkcija aktivnog korektivnog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano aktivno vrijeme popravka;

**H<sub>0</sub><sup>IV-7</sup>**: funkcija pogodnosti sanacijskog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1, ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano vrijeme sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>IV-8</sup>**: funkcija logističkog vremena sanacijskog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1 ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano logističko vrijeme sanacije oštećenja;

**H<sub>0</sub><sup>IV-9</sup>**: funkcija aktivnog vremena sanacijskog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri sustavu mlina br. 1 ravna se po log-normalnoj raspodjeli i moguće je izračunati očekivano aktivno vrijeme sanacije oštećenja.

Testiranjem radnih hipoteza potvrditi će se glavna hipoteza da se optimizacijom procesa održavanja TE Plomin 2 s jedne strane povećava rentabilnost i radni vijek tehnološke opreme,

a s druge strane smanjuju ukupni troškovi održavanja čime TE Plomin 2 kao proizvodni i poslovni objekt ostvaruje manje rashode. Jednako tako, potvrditi će se da provedba istraživanja u eksploatacijskim uvjetima te znanstveni pristup tumačenju tih rezultata i njihova validacija u području pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sustava mogu znatno doprinijeti financijskim pokazateljima uspješnosti složenih tehničkih sustava kao što je TE Plomin 2.

### 1.3. Metodologija

U provedbi istraživanja i obradi rezultata, njihovu ispitivanju i validaciji korištena je odgovarajuća kombinacija sljedećih znanstvenih metoda: povijesna metoda, empirijska metoda, metoda analize, apstrakcije, klasifikacije, generalizacije i sinteze, metoda indukcije i dedukcije, deskriptivne metode te metode kompilacije. U analitičkom i sintetičkom dijelu primijenjene su klasične matematičke metode, statistička metoda i metode komparacije rezultata istraživanja.

### 1.4. Očekivani znanstveni doprinos

Od složenih tehničkih procesa, kao što su procesi prisutni u termoelektranama na ugljen, očekuje se neprekidan rad (> 8 000 sati/god.) pri čemu je prisutna nemogućnost skladištenja proizvoda (električne energije) u izvornom obliku. U slučaju zastoja nastaju iznimno visoki troškovi i to zbog: zastoja proizvodnje električne energije, pokretanja i uspostavljanja ponovne proizvodnje, održavanje razine eksploatacijske pouzdanosti svake komponente, sklopa, podsustava i sustava.

*Optimiziranje troškova održavanja* predstavlja izazov za svakog korisnika odnosno proces održavanja termoelektrane, i u tu svrhu neophodno je provesti sustavna znanstvena istraživanja takvog složenog tehničkog sustava i njegovog procesa održavanja kao što je termoelektrana. Obzirom na tehničku i procesnu složenost termoelektrane, fokus provedenih istraživanja usmjeren je bio na podsustave, konkretno na podsustav dodavača ugljena – kućište, podsustav padnog kanala ugljena i podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1, a zajedno svi čine integralni dio sustava mlina br. 1. Istraživanja su obuhvatila prikupljanje i obradu podataka te provedbu numeričkog modeliranja (simulacija) događaja - npr. kvar ili npr. sanacija oštećenja.

Znanstveni doprinos ove disertacije ogleda se prije svega u determiniranju stohastičkog procesa pojave kvara ili pojave sanacije oštećenja pri tehnički vrlo složenog sustava (sustava mlinova) na način da je određen numerički model vjerojatnosti događaja (kvar odnosno sanacija) polazeći od empirijski prikupljenih podataka. To je omogućilo definiranje parametara karakteristike

distribucije vjerojatnosti događaja, kako u pogledu pouzdanosti, tako i u pogledu pogodnosti održavanja i predikciju događaja kako bi se moglo preventivno djelovati na neprekidnost procesa (neprekidan rad), a kada dođe do oštećenja da njegovo saniranje bude što kraće odnosno kada dođe do zastoja da njegovo otklanjanje bude što kraće.

Informacijska tehnologija omogućuje postavljanje matematičkih modela planiranja i optimizacije u središte pozornosti jer omogućavaju simulaciju procesa i događaja. Isto značajno doprinosi i pospješuje proces odlučivanja kroz kvantitativnu potvrdu prije svega logističke odluke koja se odnosi, osim na kvarove i sanaciju oštećenja tehničkog sustava, na menadžerske odluke tj. optimalne točke ekonomičnosti održavanja tehničkog sustava.

Izvorni znanstveni doprinos disertacije ogleda se formulaciji matematičkog (numeričkog) i simulacijskog modela planiranja i optimizacije jednog složenog logističkog procesa (predikcije kvara, sanacije oštećenja, pogodnosti održavanja i pogodnosti sanacijskog održavanja) koji se kao model može dalje razvijati i gdje je kroz korelaciju različitih varijabli stvorena mogućnost povezivanja različitih entiteta u cilju kvalitetnog poslovnog odlučivanja. Upravo se u tome ogleda i praktični doprinos ove disertacije, a to je potpora donošenju kvalitetnih poslovnih odluka u TE Plomin 2 i sa ekonomske strane i sa tehničko – tehnološke strane, kako bi se primjenom rezultata istraživanja i znanstveno utemeljenu optimizaciju procesa održavanja (modeliranjem i simulacijom) izradila odgovarajuća strategija održavanja u čijem je fokusu: povećanje rentabilnosti termoelektrane, produženje radnog vijeka opreme, manji rashodi i manji ukupni troškovi održavanja termoelektrane.

## **1.5. Pregled dosadašnjih istraživanja**

U znanstvenoj i stručnoj literaturi nalazi se velik broj radova u kojima je razmatrana problematika teorije pouzdanosti tehničkih sustava, polazeći činjenicom „*Kako preduhitriti kvar sustava koji će uzrokovati neplanski zastoj tehnološkog procesa?*“. Upravo radi toga teorija pouzdanosti je često obrađivano znanstveno područje pri tehnološkim procesima, osobito danas aktualno, implementacija procesa upravljanja rizicima održavanja. U teoriji razlikuju se projektirana i eksploatacijska pouzdanost. S obzirom da se do vrijednosti eksploatacijske pouzdanosti dolazi provedbom statističke analize kvarova nastalih u toku eksploatacije promatranog tehničkog sustava ista predstavlja bazu informacija za provedbu daljnjih analiza kao što je optimizacija troškova održavanja.

Analize pokazatelja uspješnosti tehničkog sustava u obliku raspoloživosti, pouzdanosti i pogodnosti održavanja s opisom načina njihova određivanja na temelju baze podataka o kvarovima i vremenima otklanjanja prikupljenih za vrijeme eksploatacije, prikazane su u radovima označenima sljedećim referencama u literaturi: [12, 16, 45, 48, 50 i 60]. Korištene metodologije u navedenim referencama bazirane su na primjeni teorije pouzdanosti pri složenim tehničkim sustavima analizirajući isključivo stanje „rada“ ili stanje „kvara“ te isključenjem ostalih mogućnosti. Tako formuliranim modelima provedbom stohastičkih analiza određuju se teorijske funkcije distribucije vjerojatnosti gdje na prihvatljivoj razini signifikantnosti opisuju dobivene vrijednosti te iste navode kao bitne menadžmentu pri donošenju odluka. Pregledom normi s aspekta teorije pouzdanosti, označenima sljedećim referencama u literaturi: [24, 25 i 26], opisuju sljedeće postupke:

- određivanje eksploatacijske pouzdanosti za tehničke sustave uz međusobnu neovisnost pri uzroku nastanka događaja kvara, nepopravljivosti i nezamjenjivosti komponenti,
- određivanje eksploatacijske pouzdanosti sustava s ovisnim komponentama i
- određivanje eksploatacijske pouzdanosti i raspoloživosti za tehničke sustave s popravljivim komponentama.

Također navedene norme baziraju se na stanju „kvara“ ili stanju „rada“ promatranog tehničkog sustava. Pri složenim tehničkim sustavima pojedini autori u svrhu izračuna primjenjuju Markovljevi lanci [4, 10], gdje metoda ima ograničenu primjenu uvjetovano konstantnom vrijednošću funkcije intenziteta kvara. Pregledom znanstvenih dostignuća u području optimizacije ciklusa provedbe preventivnog održavanja, s obzirom na iznimno široki spektar primjene u skladu s raznovrsnosti tehnoloških procesa u industrijama i primijenjenih strategija održavanja, autori analiziraju optimizaciju ciklusa provedbe preventivnog održavanja primjenom determinističkog pristupa i optimizaciju provedbe ciklusa preventivnog održavanja primjenom probabilističkog pristupa. Istraživanja ukazuju kako probabilističke metode imaju superiornost u usporedbi s determinističkim metodama. Iako su probabilističke metode složenije, rezultati su bliskiji praktičnim iskustvima [47]. U radovima [2, 6, 29, 42, 44] razmatrana je optimizacija provedbe ciklusa preventivnog održavanja bazirana na determinističkom pristupu kao što su održavanja po stanju kontinuiranim praćenjem karakterističnih vrijednosti (temperatura, vibracije i dr.) te njihovim odstupanjem od ciljne vrijednosti omogućuje ranu detekciju početnih kvarova. Modeli koji se temelje na probabilističkom pristupu prikazani su u radovima označenima sljedećim referencama u

literaturi: [3, 13, 15, 33, 65]. Važno je naglasiti da autori primjenjuju teoriju pouzdanosti u funkciji strategije održavanja, uz prethodno definiranje karakterističnih statusa tehničkog sustava odnosno definiranje probabilističkog modela, na način da na temelju poznatih funkcija distribucije vjerojatnosti određuju optimalni ciklus provedbe preventivnog održavanja. Gdje određivanje optimalnog ciklusa preventivnog održavanja autori baziraju na teoriji pouzdanosti dok statuse kao „oštećenje“ i status „sanacija oštećenja u radu“ tehničkog sustava isključuju iz analize. Implementacijom „suvremenijih“ strategija održavanja, poput održavanja usmjerenog na pouzdanost, cjelovito učinkovito održavanje i dr., nije garancija dostizanja ekonomičnosti održavanja [55], već se preporuča provedba vlastitog istraživanja te rezultate istih koristiti kao podatke ili spoznaje bitne pri donošenju odluka u svrhu poboljšanja ekonomičnosti održavanja [30, 38, 46].

Teorija pouzdanosti predstavlja „alat“ koji će omogućiti istraživaču da na temelju uočenih pojava u obliku događaja na promatranom tehničkom sustavu, predvidi njegovo ponašanje i otkrije ona specifična područja gdje pouzdanost, raspoloživost i sigurnost mogu biti povećani, a rizik smanjen na tehnički i ekonomski prihvatljiv način [37]. Sukladno tomu, u ovom radu provelo se istraživanje bazirano na teoriji pouzdanosti uz integraciju događaja sanacije oštećenja podsustava bez obustave tehnološkog procesa. Pretraživanjem najznačajnijih baza radova poput: *Web of Science (WoS)*, *Science Direct*, *Scopus*, *Springer Link*, *SNAME Libraries*, *AIAA E-Library*, *Google Scholar* i sl. nije primjećen rad koji analizira doprinos sanacije oštećenja u radu na eksploatacijsku pouzdanost promatranog tehničkog sustava.

## 1.6. Struktura doktorske disertacije

Struktura doktorske disertacije se sastoji od pet međusobno povezanih dijelova.

U prvom uvodnom dijelu formulirani su predmet i cilj istraživanja, hipoteze, metodologija, očekivani doprinos, pregled dosadašnjih istraživanja te je na kraju obrazložena struktura rada. U drugom su poglavlju opisani financijski prihodi i rashodi termoelektrane, prikazana je podjela troškova u skladu sa strategijom održavanja termoelektrane, definirani su statusi elektrane i troškovi nastali zbog njihove promjene te su analizirani kvantitativni pokazatelji rada elektrane u funkciji raspoloživosti sustava mlina. Zatim se detaljno opisuje strategija održavanja sustava mlina u TE Plomin 2 te je uveden pojam sanacijskog održavanja. Također je izvršena statistička analiza u svrhu utvrđivanja korelacije karakterističnih varijabli pri analizi ekonomičnosti sustava mlina. Na samom su kraju opisani troškovi održavanja na sustavu mlina s pripadajućim matematičkim relacijama. Trećim poglavljem opisuje se postupak modeliranja događaja

---

kvarova, vremena popravka na sustavu mlina te se uvodi pojam događaja sanacije oštećenja tijekom rada sustava i numeričkim modelom se opisuje. Detaljno se razrađuju promjene stanja sustava mlina i postupak prikupljanja karakterističnih podataka za provedbu statističke analize. Na primjeru podsustava dodavača ugljena – kućište, podsustava padnog kanala ugljena i podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1, a svi dio sustava mlina broj 1 opisani su realni događaji (kvar ili sanacija oštećenja) u funkciji vremena s opisom pripadajućih aktivnosti održavatelja. Na istim podsustavima izvršena je statistička obrada događaja i karakterističnih vremena te je za svaki podsustav izrađen numerički model koji je opisan teoretskim funkcijama razdiobe vjerojatnosti nastanka pojedinog događaja u vremenu rada i vjerojatnosti popravka ili sanacije oštećenja u određenom vremenu. Četvrto poglavlje sadržava postupak određivanja optimalnog intervala preventivne zamjene te je navedeno sprovedeno za podsustav dodavača ugljena – kućište, podsustav padnog kanala ugljena i podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1. Ujedno su sintetizirani rezultati te je izvršena evaluacija o doprinosu sanacije oštećenja na razinu ekonomičnosti održavanja. U posljednjem dijelu, u zaključku, na koncizan su način sistematizirani rezultati istraživanja kojima se potvrđuju radne hipoteze i glavna hipoteza te je ujedno prikazan sažeti prikaz doprinosa rada i smjerovi daljnjih istraživanja.

## 2. EKONOMIČNOST ODRŽAVANJA SUSTAVA MLINOVA TE PLOMIN 2

Ekonomičnost predstavlja osnovno načelo poslovanja, a očituje se u zahtjevu da se vrijednost proizvedene električne energije (učinak) ostvari uz što manje troškove. Pojam ekonomičnost osim poslovanja, prate još dva pojma: rentabilnost i produktivnost. Rentabilnost u osnovi predstavlja dobitak, a nerentabilnost gubitak i može se definirati kao razlika imovine na početku i kraju obračunskog razdoblja, dok produktivnost predstavlja odnos između vrijednosti količine upotrijebljenih ili utrošenih resursa i ostvarene vrijednosti proizvedene električne energije. Istraživanje i analiza ekonomičnosti bolji je pokazatelj za racionalnost poslovanja nego produktivnost, dok se rentabilnost još naziva i stopa povrata koja ukazuje za koliko se godina ekonomičnim poslovanjem vraćaju uložena sredstava, što je za investicijsku i razvojnu politiku vrlo važno, ali i za samu alokaciju kapitala kao najvažnijeg pokazatelja. Tamo gdje je stopa rentabilnosti ili povrata niska, nema previše investicija. Prema tomu, ekonomičnost je odnos između korištenih čimbenika proizvodnje i ostvarenog proizvoda koji se izražava vrijednosno kao odnos između troškova proizvodnje i vrijednosti proizvedenih dobara i/ili usluga. Cilj je da troškovi po jedinici proizvoda budu što manji, a to se postiže racionalnim gospodarenjem, tehnološkim usavršavanjem, unapređenjem organizacije rada, uštedama i održavanjem.

Općenito se može navesti da je održavanje postupak kojim se želi zadržati postojeće stanje i/ili sposobnost, no tehnički promatrano, to je postupak pregleda, popravka ili poboljšanja nekog sustava, podsustava, uređaj ili sklopa na način da se predvidi i/ili otkloni kvar (zastoj, ispad i sl.), poboljša postojeće stanje i produži radni vijek sustava. Stoga se ciljevi održavanja mogu podijeliti na tehničko - tehnološke i ekonomske ciljeve, kao što je prikazano u tablici 2.1.

**Tablica 2.1.** Podjela ciljeva održavanja [49]

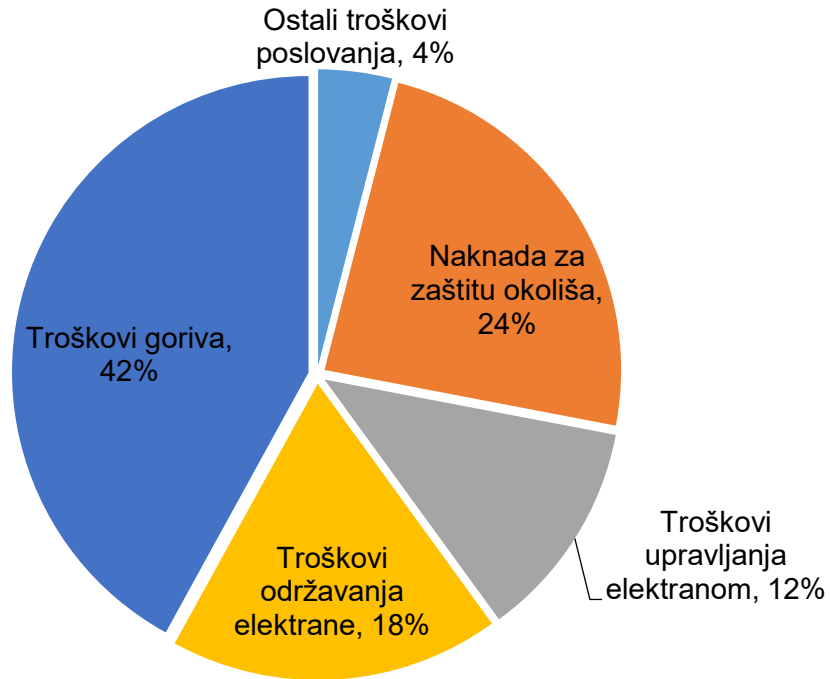
Tehničko – tehnološki ciljevi	Ekonomske ciljevi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• održavanje radne sposobnosti tehnološke opreme na potrebnoj razini</li> <li>• uvođenje inovacija i usavršavanje radnih sredstava</li> <li>• produljenje vijeka trajanja tehnološke opreme</li> <li>• postizanje bolje kvalitete obrade proizvoda</li> <li>• ravnomjernije i brže odvijanje proizvodnog procesa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• racionalno iskorištavanje radnih sredstava</li> <li>• povećanje proizvodnosti</li> <li>• smanjenje troškova proizvodnje</li> <li>• povećanje ekonomičnosti u samom procesu održavanja</li> </ul>

Ovo poglavlje usmjereno je na ekonomičnost održavanja sustava mlinova kao cilj kojim se želi povećati ekonomičnost u samom procesu održavanja kako bi se dostigli tehničko - tehnološki ciljevi, posebice oni koji su u vezi s produljenjem vijeka trajanja tehnološke opreme te ravnomjernijeg i bržeg odvijanja proizvodnog procesa. U tom kontekstu, ekonomičnost održavanja ovisi o troškovima zastoja i troškovima održavanja. Naime, nedovoljno često održavanje uzrok je čestih zastoja u proizvodnji, smanjuje rentabilnost i radni vijek tehnološke opreme, dok prečesto održavanje povećava ukupne troškove proizvodnje. Optimizacija ovih dviju komponenti determinira ekonomično održavanje, a kako bi se to dostiglo, potrebno je odrediti odgovarajuću strategiju održavanja na temelju provedbe istraživanja, obrade i analize prikupljenih podataka te empirijskih pokazatelja. No, ovdje je potrebno nešto više navesti o rentabilnosti TE Plomin 2 putem prezentacije financijskih prihoda i rashoda elektrane.

## 2.1. Financijski prihodi i rashodi TE Plomin 2

Financijski pokazatelji uspješnosti rada termoelektrane ukazuju koliko pojedini udio resursa utječe na ostvarenje dobiti poduzeća. Elektrane, kao i ostala poduzeća, prikazuju poslovanje godišnjim izvješćima o dobiti. Dobit ili profit poduzeća izravno označava razliku između prihoda i rashoda. Glavni pokazatelj ekonomičnosti poslovanja ili uspješnosti poslovanja za izvještajno razdoblje omjer je između ostvarenih poslovnih prihoda i ostvarenih poslovnih rashoda, koji mora biti veći od jedan [52]. Poslovni prihodi termoelektrane  $D_{PP}$  ostvaruju se prodajom električne energije  $D_{EL}$  uz relativno mali udio od svega 0,25 % iz prodaje nusproizvoda  $D_{NUS}$ , kao što su gips, lebdeći pepeo i šljaka. Ostali prihodi, kao što su financijski, izvanredni prihodi i dr. ovise o politici vođenja elektrane te sačinjavaju udio u ukupnim приходima od svega nekoliko promila na godišnjoj razini. Kako je ostvarenje poslovnih prihoda i rashoda u korelaciji s ostvarenom isporukom električne energije te cjenovnim stanjem karakterističnih resursa na tržištu, udjeli pojedinih rashoda su promjenjivi. Upravo zbog toga, poslovni rashodi elektrane  $D_{PR}$ , čine zbroj varijabilnih i fiksnih poslovnih rashoda. Poslovni rashodi najvećim udjelom nastaju: utroškom goriva  $D_G$ , naknade za zaštitu okoliša  $D_E$ , troškovima održavanja elektrane  $D_{OS}$ , troškovima upravljanja elektranom  $D_{VS}$  i ostalim troškovima poslovanja  $D_O$ . Na slici 2.1. prikazani su relativni postotni udjeli ukupnih poslovnih rashoda. Analiza udjela poslovnih rashoda temelji se na vremenskom ciklusu koji obuhvaća planirano kalendarsko vrijeme od početka prvog remonta do početka drugog remonta. Za TE Plomin 2 vremenski ciklus od početka prvog remonta do početka drugog remonta, u prosjeku iznosi dvije godine [53].





**Slika 2.1.** Udio poslovnih rashoda TE Plomin 2 [53]

Međusobna raspodjela udjela troškova održavanja za ciklus od početka prvog remonta do početka drugog remonta za TE Plomin 2 prikazana je na slici 2.2. gdje udio troškova korektivnog održavanja iznosi 38 % dok udio ukupnih troškova preventivnog održavanja iznosi 62 %. Također ukupni troškovi preventivnog održavanja dijele se u dvije grupe, odnosno udio troškova preventivnog održavanja koji se odnosi na sve one aktivnosti koje se obavljaju na sustavima izvan remonta iznose 26 %, dok udio troškova remonta iznosi 36 %.



**Slika 2.2.** Udjeli troškova održavanja TE Plomin 2 [53]

Troškovi održavanja klasificiraju se kao fiksni i varijabilni [52]. Fiksni udio troškova održavanja sačinjavaju troškovi preventivnog održavanja, dok varijabilni dio čine troškovi korektivnog održavanja  $D_{OK}$ . Troškovi preventivnog održavanja  $D_{OP}$  dijele se u dvije osnovne skupine: troškovi preventivnog održavanja koji se provode bez obzira na pogonski status elektrane  $D_{OPT}$  i preventivni troškovi - remont  $D_{OR}$ . Udjeli troškova, prikazani na slikama 2.1. i 2.2. ukazuju analitičku vrijednost troškova korektivnog održavanja i preventivnog održavanja za promatrano vremensko razdoblje eksploatacije, što je bitan podatak pri donošenju odluka u korekciji pojedine funkcije održavanja ili proizvodnje, a sve u cilju postizanja ukupne ekonomičnosti termoelektrane. Prema tome se može zaključiti:

- da troškovi održavanja iznose 18 % ukupnih rashoda termoelektrane,
- da fiksni troškovi iznose 62 % troškova održavanja,
- da varijabilni troškovi iznose 38 % troškova održavanja.

U spomenutom kontekstu troškova potrebno je naglasiti da pogonska učinkovitost tehnološkog procesa novoizgrađenih termoelektrana na ugljen doseže do 46 %, dok TE Plomin 2 postiže pogonsku učinkovitost do 37 % [1].

## 2.2. Statusi termoelektrane i troškovi ulaska u pogon

Status ulaska u pogon definira ono stanje termoelektrane pri kojem operateri, u skladu s pogonskim uputama, upravljaju funkcijskim procesima do postizanja cilja, odnosno do ulaska termoelektrane u područje stabilnog rada. Područje stabilnog rada termoelektrane definirano je gornjom i donjom granicom. Rad termoelektrane pri nazivnoj snazi ili 100 % nazivnog opterećenja predstavlja gornju granicu stabilnosti  $P_N$ , dok se donja granica stabilnosti ili tehnički minimum termoelektrane postiže kada su zadovoljena dva sljedeća uvjeta: isključena pomoćna potpala gorionika plinskog ulja te su zatvoreni svi zaobilazni cjevovodi turbine. Donja granica  $P_{MIN}$ , ovisno o izvedbi i karakteristikama termoelektrane, u rasponu je od otprilike 60 % nazivnog opterećenja, dok najsuremenije postižu i od 30 % nazivnog opterećenja, u svrhu većeg raspona izlazne električne snage pri pružanju regulacijskih usluga u elektroenergetskom sustavu [32]. U termoenergetskim postrojenjima kao što su termoelektrane klasificiraju se tri tipa ulaska u pogon, ovisno o temperaturi pregrijane pare i tlaku u kotlovskom sustavu. U skladu s time razlikuju se sljedeće vrste ulaska termoelektrana u pogon [1]:

- hladni start, temperatura pregrijane pare manja je od 350 °C i tlak je 0 bara, što je podudarno razdoblju zastoja elektrane duljem od 16 sati;
- topli start, temperatura pregrijane pare veća je od 350 °C i tlak je 0 bara, što je podudarno razdoblju zastoja elektrane između 4 i 16 sati; i
- vrući start, temperatura pregrijane pare veća je od 420 °C i tlak je veći od 90 bara, što je podudarno razdoblju zastoja elektrane kraćem od 4 sata.

Osim navedenih vrsta ulaska u pogon, u pojedinim termoelektranama postoji mogućnost nastanka međustanja definiranog kao ispad turbinsko-generatorskog sustava zbog kvara, dok je rad kotlovskog sustava i dalje stabilan.

U tablici 2.2. prikazane su vrijednosti karakterističnih parametara ovisno o vrsti statusa odnosno ulaska TE Plomin 2 u pogon.

**Tablica 2.2.** Vrijednosti karakterističnih parametara ovisno o vrsti ulaska TE Plomin 2 u pogon [1]

KARAKTERISTIČNI PARAMETRI	ULAZAK U POGON		
	HLADNI START	TOPLI START	VRUĆI START
POTREBNO VRIJEME DO SINKRONIZACIJE, h	6,0	4,0	2,5
POTREBNO VRIJEME DO STABILNOG STANJA, h	8,0	5,5	3,5
POTREBNO VRIJEME DO NAZIVNE SNAGE, h	9,0	6,5	4,5
UTROŠAK PLINSKOG ULJA, l	96 000	70 000	32 000
UTROŠAK UGLJENA DO STABILNOG RADA, t	85	52	31
UTROŠAK ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ EES-a, MWh	86	61	36
PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE DO STABILNOG RADA, MWh	89	57	60

Udio utroška resursa ukupne potrebne energije za promjenu statusa elektrane u ovisnosti o vrsti starta prikazan je u tablici 2.3., pri čemu je udio troškova plinskog ulja veći od 75 % ukupnih troškova tijekom ulaska u pogon.

**Tablica 2.3.** Udio troškova karakterističnih resursa ovisno o vrsti ulaska TE Plomin 2 u pogon [9]

KARAKTERISTIČNI PARAMETRI	UDIO TROŠKOVA		
	HLADNI START	TOPLI START	VRUĆI START
UDIO TROŠKOVA PLINSKOG ULJA	79,6 %	78,5 %	75,2 %
UDIO TROŠKOVA UGLJENA DO SINKRONIZACIJE	7,8 %	6,9 %	8,8 %
UDIO TROŠKOVA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ EES-a	12,6 %	14,7 %	16,1 %

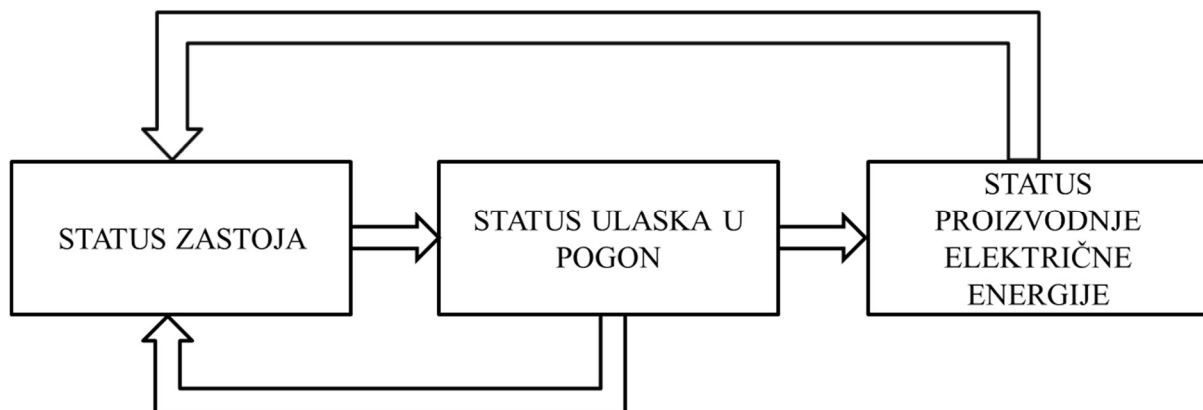
Status proizvodnje električne energije definira ono stanje rada termoelektrane pri kojem je stabilno stanje između tehničkog minimuma i nazivnog opterećenja termoelektrane uz stopostotni udio utroška glavnog energenta odnosno ugljena. Opseg regulacije električne snage na generatoru od tehničkog minimuma ( $P_{\text{MIN}} = 126 \text{ MW}$ ) do nazivnih vrijednosti snage na generatoru ( $P_{\text{N}} = 210 \text{ MW}$ ) regulira se promjenom dobave količine ugljena putem sustava

mlinova. Promjena količine goriva funkcijski je povezana s promjenom dobave zraka, promjenom količine evakuacije dimnih plinova, promjenom količine protoka napojne vode u kotlu i dr. [1].

Status u zastoju elektrane definira ono stanje u kojem se ne odvijaju glavni energetske procesi nužni za proizvodnju električne energije. S obzirom na uzrok postoje sljedeći oblici zastoja:

- neplanski zastoj prouzročen unutarnjim čimbenicima, pri čemu unutarnji čimbenici mogu biti kvar tehničkog sustava, ljudski čimbenik i sl.;
- neplanski zastoj prouzročen vanjskim čimbenicima, pri čemu entiteti vanjskih čimbenika mogu biti kvar u elektroenergetskom sustavu ili ostali razlozi prouzročeni višim silama;
- planski zastoj termoelektrane, zaliha u elektroenergetskom sustavu, provedba preventivnog održavanja ili remont.

Na slici 2.3. prikazani su statusi termoelektrane i mogućnosti promjene tih statusa. Promjene statusa odvijaju se logičkim slijedom, kao što je prikazano na shemi spomenute slike.



**Slika 2.3.** Statusi termoelektrane i logični slijed promjene statusa

Ono što je potrebno naglasiti je činjenica da promjene statusa iz ulaska u pogon u status proizvodnje električne energije iziskuje veliki utrošak energije odnosno financijske troškove. Upravo je zbog tog razloga pouzdanost i raspoloživost proizvodnog procesa termoelektrane od iznimne važnosti za sveukupnu ekonomičnost termoelektrane.

### 2.3. Proizvodni proces TE Plomin 2

Cilj je proizvodnog procesa u termoelektrani poslovati ekonomično pri standardnim pogonskim uvjetima rada termoelektrane i uz minimalne financijske troškove potrebne za realizaciju planirane pouzdanosti i raspoloživosti u zadanom vremenskom razdoblju rada termoelektrane.

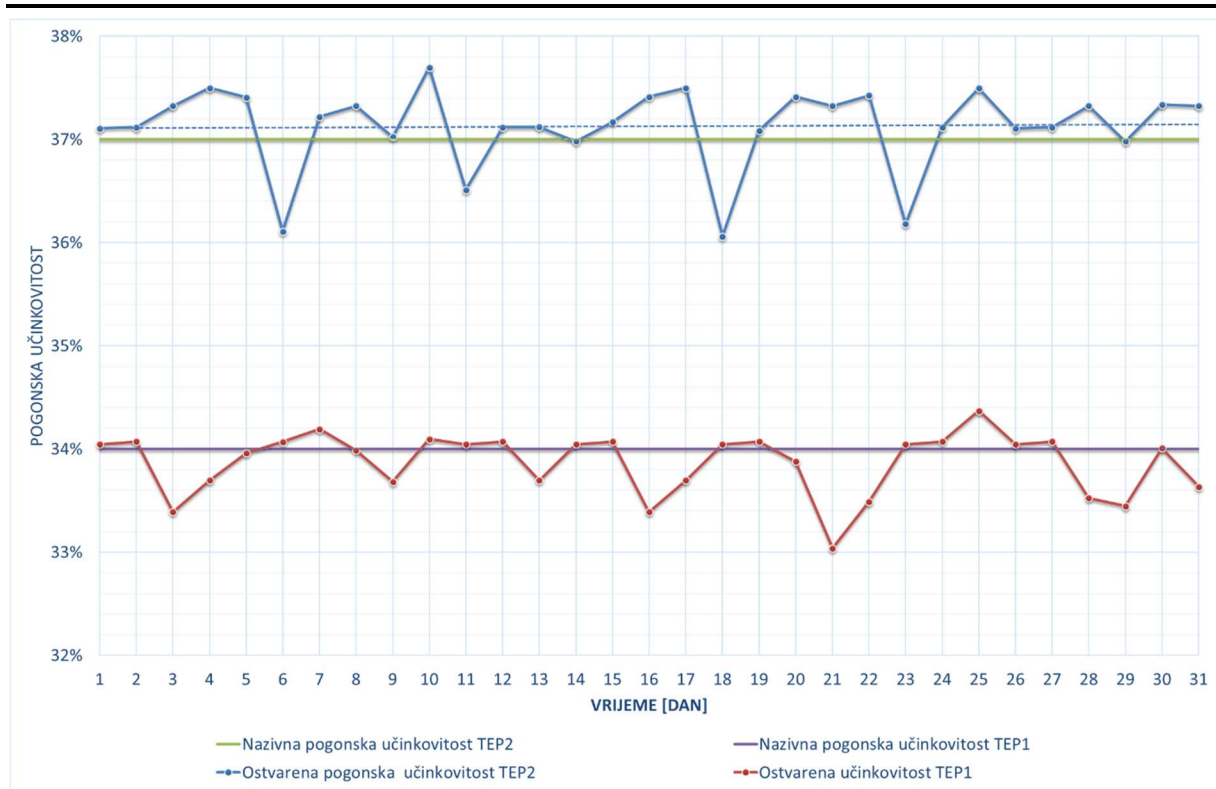
Naime, realizirana proizvodnja električne energije osim o potrebama tržišta ovisi i o pouzdanosti i raspoloživosti svih podsustava termoelektrane na koje utječu zastoji do kojih je došlo zbog kvara tehničkog sustava, ljudskog čimbenika i nedostatka ključnih resursa potrebnih za rad. Prema tome, što je pouzdanost i raspoloživost termoelektrane veća, to su troškovi zastoja manji i termoelektrana je konkurentnija na tržištu. Kako su cijene energenata i naknade za zaštitu okoliša određene tržišnim uvjetima, najučinkovitiji način smanjenja rashoda jest optimalna strategija održavanja uz zadržavanje visoke razine raspoloživosti i pouzdanosti termoelektrane. Upravo stoga, najvažniji učinak na ostvarenja profita termoelektrane (uz optimalne uvjete rada tehničkih sustava) osigurava se kontinuiranim poboljšanjem kvalitete održavanja tehničkih podsustava termoelektrane, pri čemu je jedan od najvažnijih podsustava upravo podsustav mlinova, o čemu će biti riječi u nastavku rada.

### **2.3.1. Kvantitativni pokazatelji proizvodnje električne energije**

Pogonska učinkovitost predstavlja omjer ukupno proizvedene električne energije i ukupno uložene energije sadržane u gorivu, odnosno ugljenu [11]. Ulazni su podaci pri određivanju pogonske učinkovitosti utrošena količina ugljena, kalorična vrijednost ugljena i neto vrijednost proizvedene električne energije za promatrano vremensko razdoblje. Na slici 2.4. prikazana je pogonska učinkovitost na mjesečnoj razini te usporedba ostvarene i nazivne učinkovitosti pri nazivnom opterećenju TE Plomin 1 i TE Plomin 2.

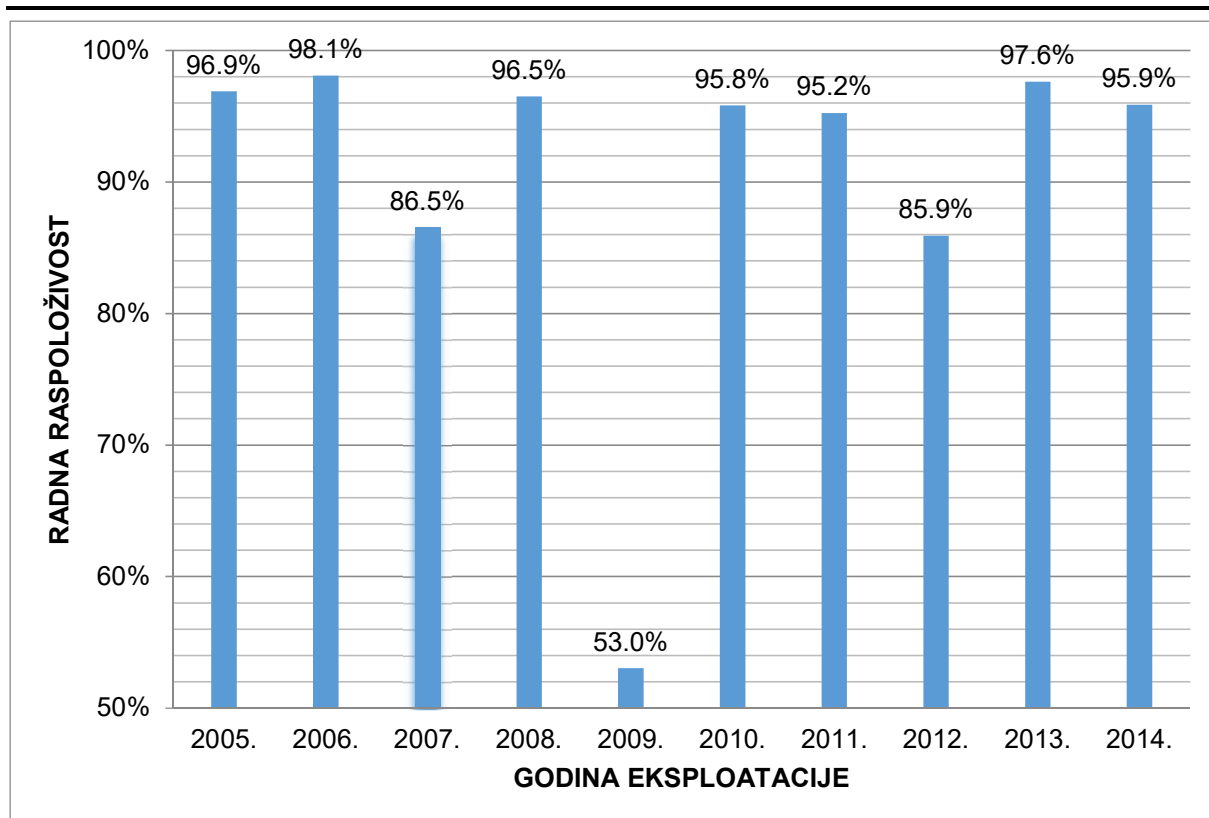
Oscilacije pogonske učinkovitosti mogu biti prouzročene promjenom kvalitete ugljena, prisutnošću greške i/ili kvara na tehničkom sustavu, ljudskim čimbenikom i sl. Važnost održavanja pogonske učinkovitosti na nazivnoj vrijednosti od iznimnog je značaja za ekonomičnost poslovanja tim više što pad pogonske učinkovitosti od 3 do 4 % rezultira relativnim povećanjem utroška ugljena od 9 do 12 %, uz isporuku jednake količine električne energije u elektroenergetski sustav [9].

Pogonska učinkovitost ključni je pokazatelj pri donošenju odluka bitnih za postizanje i održavanje ekonomičnog rada elektrane.



**Slika 2.4.** Usporedba ostvarene i nazivne pogonske učinkovitosti u razdoblju eksploatacije od 1.03.2015. do 31.03.2015., pri nazivnom opterećenju na primjeru TE Plomin 1 i TE Plomin 2 [9]

Raspoloživost se definira kao mogućnost elektrane da izvrši zadanu funkciju pod zadanim uvjetima u zadanom razdoblju ili tijekom zadanog vremenskog intervala. Na vrijednost raspoloživosti utječe vrijeme zastoja pojedinog tehničkog podsustava prouzročeno unutarnjim čimbenicima, a razlikuju se vremenska i radna raspoloživost termoelektrane [11]. Vremenska raspoloživost predstavlja udio ostvarenog vremenskog rada termoelektrane od ukupno planiranog vremena pri čemu su obuhvaćena samo vremena zastoja zbog unutarnjih čimbenika. Radna raspoloživost predstavlja udio količine proizvedene električne energije tijekom vremena rada u usporedbi s nazivnom količinom električne energije za određeno promatrano vremensko razdoblje planiranog rada elektrane. Za razliku od vremenske raspoloživosti kojom se u obzir uzimaju vremena zastoja elektrane, radnom raspoloživosti elektrane se, osim količine neisporučene energije u vremenu zastoja, obuhvaća i količine neisporučene energije pri radu elektrane u vremenu smanjenog kapaciteta. Radna raspoloživost TE Plomin 2 za razdoblje eksploatacije od 2005. do 2014. godine prikazano je na slici 2.5., gdje vrijednosti ukazuju da je termoelektrana bila najuspješnija 2006., uz ostvarenje ukupne radne raspoloživosti od 98,1 % dok 2009. godina bila je najnepovoljnija jer je ostvarena radna raspoloživost od 53 %. [18].



**Slika 2.5.** Radna raspoloživost TE Plomin 2 za razdoblje eksploatacije od 2005. do 2014. godine [18]

Pouzdanost se definira kao mjerilo sposobnosti uređaja da radi bez kvara. Pouzdanost matematičkim putem predviđa ponašanje sustava ili uređaja u očekivanim pogonskim uvjetima. Još točnije, pouzdanošću se izražava brojna vjerojatnost uređaja da radi bez kvara tijekom određenog vremenskog intervala i uz radne uvjete za koje je uređaj namijenjen [13]. Takav se vremenski interval još naziva i interval rada bez zastoja. Tehnički sustav sadržava dvije vrijednosti pouzdanosti, projektiranu (konstrukcijsku) i eksploatacijsku. Projektirana pouzdanost implementira se pri konstruiranju sustava, odnosno proizvođač određuje matematičku vrijednost pouzdanosti. Kao takva, pouzdanost ima konstantnu vrijednost ovisnu o vremenu rada sustava. Za razliku od projektirane pouzdanosti, eksploatacijska pouzdanost određuje se iz eksploatacije sustava i njezina se vrijednost dinamički mijenja [36]. Razlika između navedenih pouzdanosti temelji se na činjenici da isti složeni tehnički sustav može raditi u različitom okruženju, klimatskim uvjetima, načinu i rutinama održavanja te drugim uvjetima rada.

Osnovni podatak za određivanje funkcije eksploatacijske pouzdanosti je vrijeme rada termoelektrane između dva zastoja prouzročena kvarom. Funkcija eksploatacijske pouzdanosti TE Plomin 2 ravna se prema dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli [36] te je izražena sljedećom relacijom:



$$R_{e,el}(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^c} = e^{-\left(\frac{t}{950,49}\right)^{0,55}} \quad (2.1.)$$

Primjenom relacije (2.1.) određuje se eksploatacijska pouzdanost za predviđeni vremenski interval, pri čemu se ne uzimaju u obzir kvarovi onih sustava čiji je zastoj uzrok rada termoelektrane sa smanjenim kapacitetom.

Očekivano vrijeme rada elektrane do kvara  $E_{R,el}(T)$  računa se prema sljedećoj relaciji [36]:

$$E_{R,el}(T) = \int_0^{\infty} R_{e,el}(t) dt \quad (2.2.)$$

Uvrštenjem vrijednosti iz relacije (2.1.) u relaciju (2.2.) izračunava se očekivano vrijeme rada elektrane do kvara za TE Plomin 2 koje iznosi 97,7 dana [36].

### 2.3.2. Kvantitativni pokazatelji sustava mlinova

Raspoloživost, pouzdanost i pogonska učinkovitost rada sustava mlinova pri zahtijevanoj razini kvalitete ugljene prašine zavisno je o utjecaju vanjskih i unutarnjih čimbenika. U daljnjem razmatranju vanjski čimbenici predstavljaju razinu kvalitete ugljena, dok unutarnji čimbenici predstavljaju rad mlina s prisutnim oštećenjem, odnosno greškom, ili zastoj mlina prouzročen kvarom ili zastoj radi provedbe preventivnog održavanja. Ugljen za termoelektranu Plomin uvozi se iz raznih zemalja svijeta, kupljen putem međunarodnih natječaja. Granice kojima se specificira raspon kvalitete ugljena određene su u skladu sa zahtjevima pri projektiranju kotlovskeg sustava, kojeg je sustav mlinova sastavni dio [1]. Donja granica  $DG$  i gornja granica  $GG$  za pojedine karakteristične vrijednosti ugljena pri ostvarenju zahtijevane razine kvalitete rada sustava mlinova navedene su u tablici 2.4.

**Tablica 2.4.** Karakteristične granične vrijednosti ugljena te utjecaj čimbenika na kvalitetu [28, 41]

Naziv	Oznaka	Jedinica	$DG$	$GG$	Utjecaj vanjskog čimbenika	Utjecaj unutarnjeg čimbenika
Donja ogrjevna vrijednost ugljena	$H_d$	MJ/kg	24	28	DA	NE
Sadržaj grube vlage	$W$	%	8	11	DA	NE
Indeks tvrdoće (meljivosti) ugljena (po metodi Hardgrove)	$HGI$		52	60	DA	NE

Izlazni proizvod sustava mlinova je ugljena prašina, pri čemu se razina kvalitete mjeri u finoći meljivosti ili granulaciji ugljene prašine i vrijednosti temperature ugljene prašine (tablica 2.5.).

**Tablica 2.5.** Granične vrijednosti ugljene prašine i utjecaj čimbenika na kvalitetu [1]

Naziv	Oznaka	Jedinica	DG	GG	Utjecaj vanjskog čimbenika	Utjecaj unutarnjeg čimbenika
Temperatura ugljene prašine	$T_{UP}$	°C	65	90	DA	DA
Granulacija ugljene prašine, R90	$G_{UP}$	μm	–	≤ 10 %	DA	DA

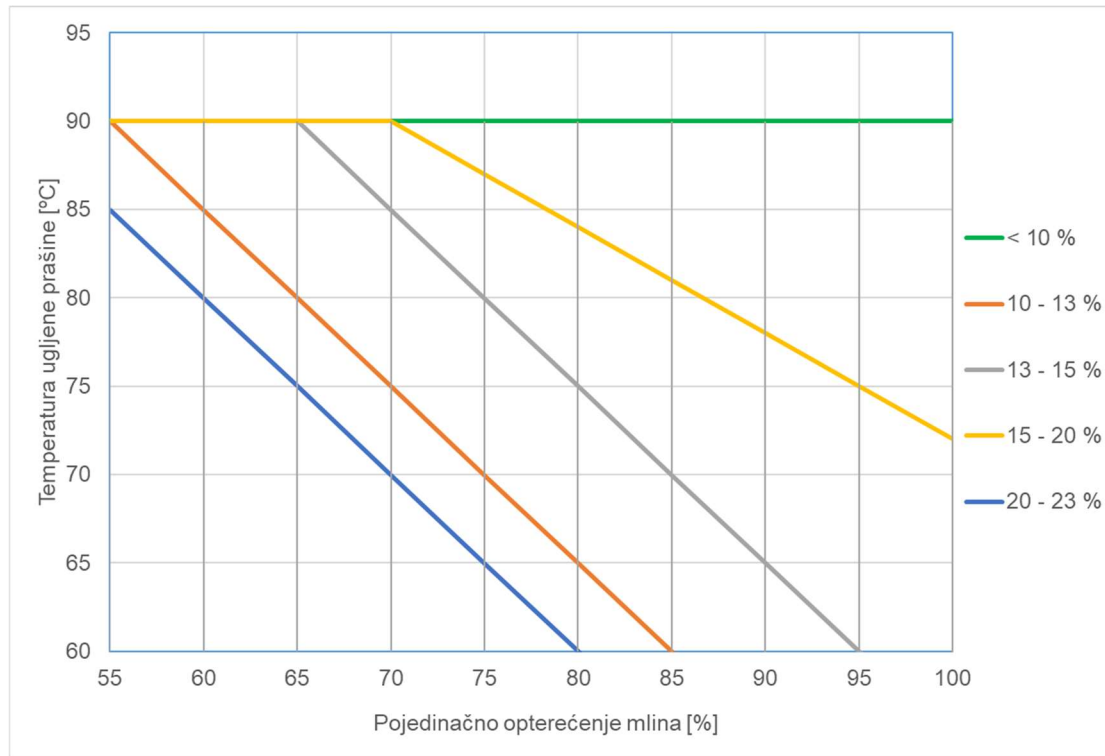
Razina kvalitete rada mlinova izravno utječe na kvantitativne pokazatelje uspješnosti termoelektrane kao što su pogonska učinkovitost, radna i vremenska raspoloživost te eksploatacijska pouzdanost. Tako, primjerice, TE Plomin 2 područje stabilnog rada postiže sa 60 % nazivne električne snage na generatoru uz rad četiriju mlina. Takvo opterećenje elektrane od 60 % naziva se i tehnički minimum te se ostvaruje pri električnoj snazi na generatoru od 126 megavata, dok se nazivno opterećenje elektrane postiže pri električnoj snazi na generatoru od 210 megavata uz rad pet ili šest mlinova, ovisno o utjecaju unutarnjih i vanjskih čimbenika. Maksimalno opterećenje elektrane postiže se pri snazi od 220 megavata [1].

TE Plomin 2 ima mogućnost stabilnog rada od 126 do 210 megavata uz različiti broj uključenih mlinova. Svaki mlin može biti opterećen od 40 do 100 %, no s obzirom na izvedbu postrojenja i pogonske protokole, granica opsega rada mlina se nalaze u intervalu od 60 do 85 % opterećenja mlina. Gornja granica opterećenja pojedinog mlina od 85 % omogućava pričuvu u slučaju poremećaja u radu elektrane. Pri opterećenju pojedinog mlina manjem od donje granice od 60 % nastupa potencijalna opasnost od smanjenja intenziteta vatre u ložištu kotla na razinu manju od dozvoljene, što posljedično dovodi do isključenja mlina radi zaštite.

U nastavku rada opisuje se utjecaj pojedinog vanjskog čimbenika na posljedice rada sustava mlina.

Kao prvi vanjski čimbenik je donja ogrjevna vrijednost ugljena čija vrijednost utječe na opterećenje sustava mlina. Termoelektrana postiže nazivne vrijednosti snage na generatoru od 210 megavata pri radu sa šest mlinova za raspon donje ogrjevnosti ugljena od 24 do 28 MJ/kg što odgovara rasponu opterećenja pojedinog mlina od 65 % do 85 %. Ukoliko bi za isti raspon ogrjevnosti ugljena došlo do isključenja jednog od mlinova tada bi pojedinačno opterećenje preostalih pet mlinova, za ostvarenje vrijednosti nazivne snage na generatoru od 210 megavata kretalo u rasponu od 78 % do 100 %. Ugljen sa donjom ogrjevnom vrijednošću manjom od 25 MJ/kg, iziskuje raspoloživost svih šest mlinova kako bi se osigurao stabilan i pouzdan rad elektrane pri nazivnoj snazi od 210 megavata.

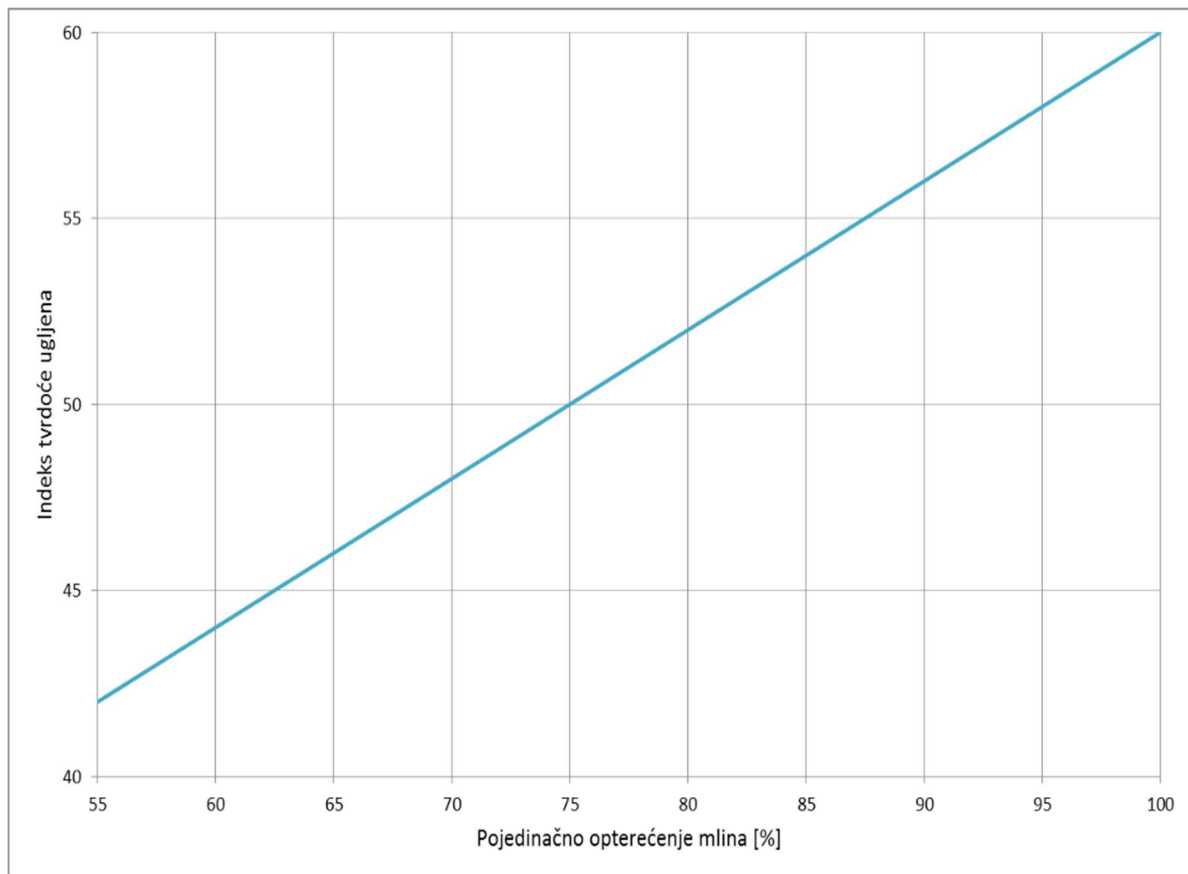
Drugi vanjski čimbenik koji utječe na kvalitetu ugljene prašine, a posljedično i na pogonsku učinkovitost elektrane, jest sadržaj grube vlage u ugljenu. Na slici 2.6. prikazan je utjecaj sadržaja grube vlage i odziv temperatura ugljene prašine u ovisnosti o pojedinačnom opterećenju mlina uz konstantnu vrijednost granulacije ugljene prašine  $R_{UP} \leq 10 \%$  pri  $R_{90} \mu\text{m}$  [1].



**Slika 2.6.** Aproximativni prikaz temperature ugljene prašine ovisno o sadržaju grube vlage u ugljenu i pojedinom opterećenju mlina pri konstantnom sadržaju granulacije ugljene prašine  $\leq 10 \%$  pri  $R_{90} \mu\text{m}$

Veći sadržaj grube vlage u ugljenu iziskuje veću količinu toplog zraka za postizanje zadane temperature ugljene prašine od  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . S obzirom da je količina zraka ograničena drugim pogonskim parametrima, sustav mlina ograničen je povećanjem količine zraka i njezinom temperaturom. Osim smanjenja temperature ugljene prašine visoka gruba vlaga sadržana u ugljenu omogućuje lijepljenje ugljena za stjenke mlina zbog čega dolazi do oscilacija u protoku količine ugljene prašine u ložištu, što posljedično dovodi do oscilacija električne snage na generatoru. Najniža dozvoljena temperatura ugljene prašine je  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ , nakon čega dolazi do isključenja mlina radi zaštite.

Treći je vanjski čimbenik indeks tvrdoće (meljivosti) ugljena *HGI*. Na slici 2.7. prikazana je ovisnost indeksa tvrdoće ugljena o pojedinačnom opterećenju mlina [1].



**Slika 2.7.** Aproximativni prikaz ovisnosti indeksa tvrdoće ugljena o pojedinačnom opterećenju mlina pri konstantnom sadržaju granulacije ugljene prašine  $\leq 10\%$  pri  $R_{90} \mu\text{m}$

Kako bi se zadržala granulacija meljivosti do  $10\%$  ostatka na situ pri  $R_{90} \mu\text{m}$  ovisno o različitim vrijednostima *HGI*, nužno je smanjiti pojedinačno opterećenje sustava mlina. No, osim vanjskih čimbenika na kvalitetu ugljene prašine i sadržaj granulacije ugljene prašine utječu i unutarnji čimbenici, jer karakteristične komponente sustava mlina posjeduju oštećenje koje umanjuje funkcionalnost komponente u okviru dozvoljenih granica.

Analizirajući međuovisnosti sadržaja donje ogrijevne vrijednosti, grube vlage i tvrdoće ugljena može se uočiti da na raspoloživost termoelektrane znatno utječe rad sustava mlinova koji, ovisno o prisustvu vanjskih i/ili unutarnjih čimbenika, mogu ostvariti njezinu potpunu raspoloživost s pet ili šest mlinova. Termoelektrana pri raspoloživosti svih šest mlinova postiže svoju potpunu radnu raspoloživost u cijelom rasponu odstupanja kvalitete ugljena pod djelovanjem vanjskih čimbenika. Upravo zbog tog razloga, održavanje sustava mlinova s visokom raspoloživošću i pouzdanošću uz optimalne financijske troškove za promatrani vremenski ciklus izravno utječe na ostvarenje ekonomskih ciljeva u poslovanju TE Plomin 2.

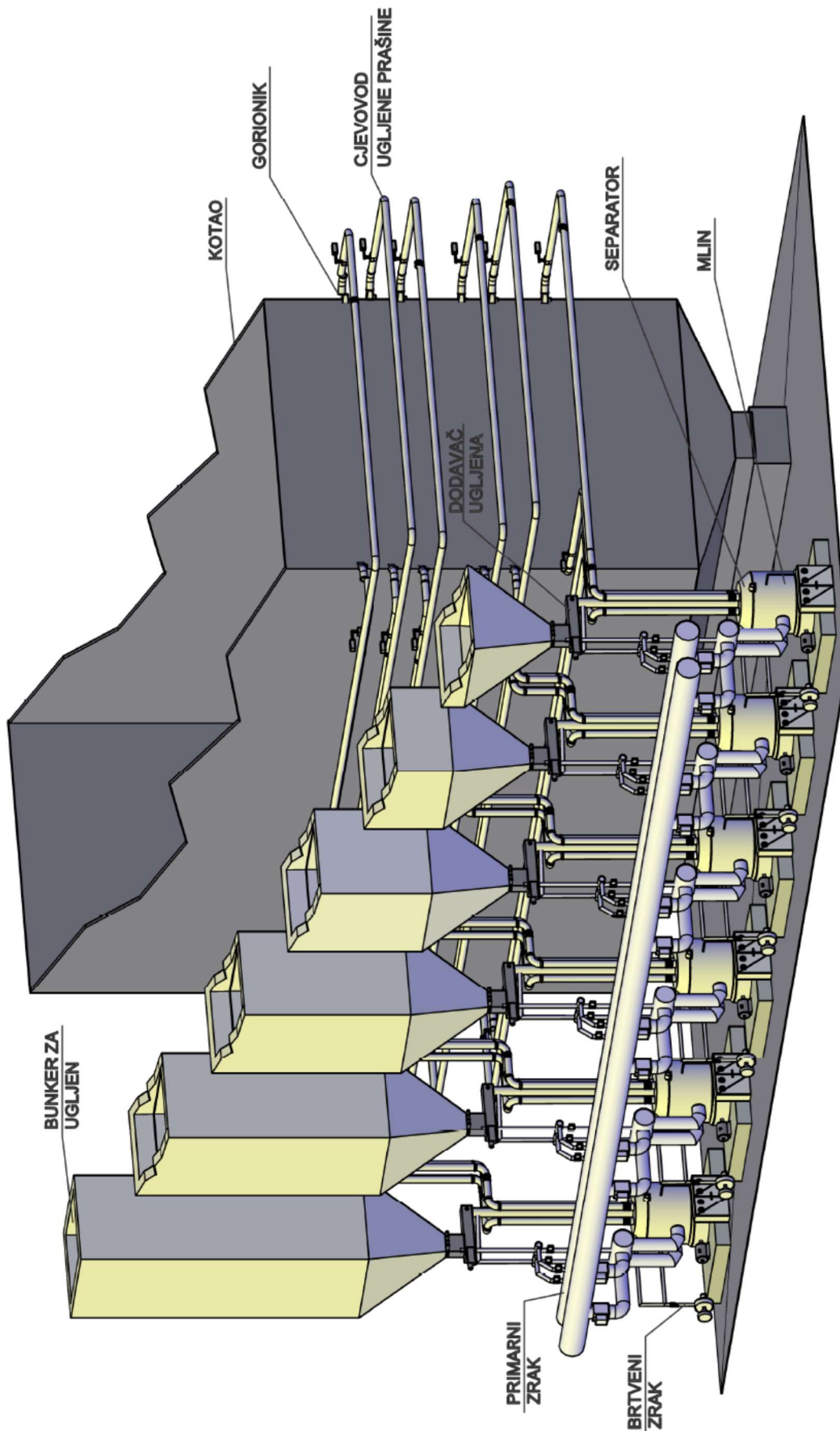
---

## 2.4. Proces održavanja sustava mlinova

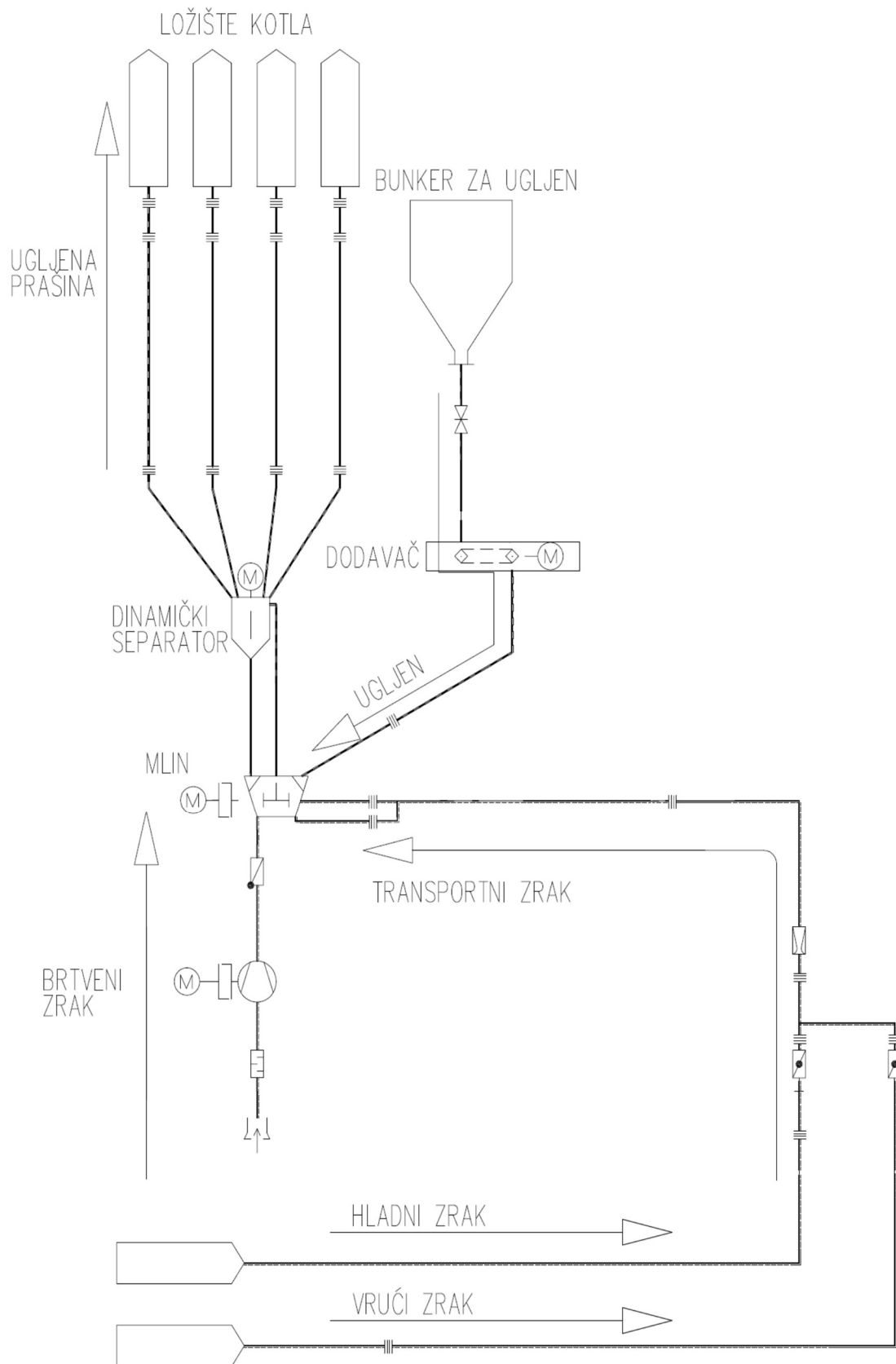
U informacijskom sustavu TE Plomin 2, elementi i sklopovi nazivaju se objekti održavanja, a objekti održavanja klasificiraju se u četiri osnovne skupine [20]:

- mehanički ili strojarski  $K_S$ ;
- instrumentacijski ili mjerno, regulacijski i upravljački  $K_I$ ;
- elektroenergetski  $K_E$  i
- betonsko-konstruktivski  $K_G$ .

Sustav mlinova sačinjava šest identičnih sustava, sustav mlina 1 do sustava mlina 6, kao što je prikazano na slici 2.8. Svaki mlin kroz svoja četiri cjevovoda injektira ugljenu prašinu u ložište kotla u kojem se odvija tangencijalno loženje u obliku ciklona [1]. Bunker mlina kapaciteta 200 tona padnim je kanalom metalne izvedbe povezan s dodavačem. Funkcija dodavača je da u skladu sa zadanim vrijednostima kontinuirano opskrbljuje mlin ugljenom. Konkretno je riječ o koritastom lančanom transporteru u izvedbi s dvostrukim lancem koji pogoni asinkroni frekventno upravljani elektromotor. U svrhu upravljanja, nadzora i zaštite na dodavaču su postavljena tri neovisna mjerača broja okretaja i jedan mjerač sloja ugljena. Promjenom brzine vrtnje dodavača regulira se i promjena doziranja količine ugljena u mlin; na slici 2.9. prikazana je shema tehnološkog procesa proizvodnje ugljene prašine [1].



Slika 2.8. Prikaz sustav mlinova za ugljen u TE Plomin 2



**Slika 2.9.** Tehnološki proces proizvodnje ugljene prašine [2]

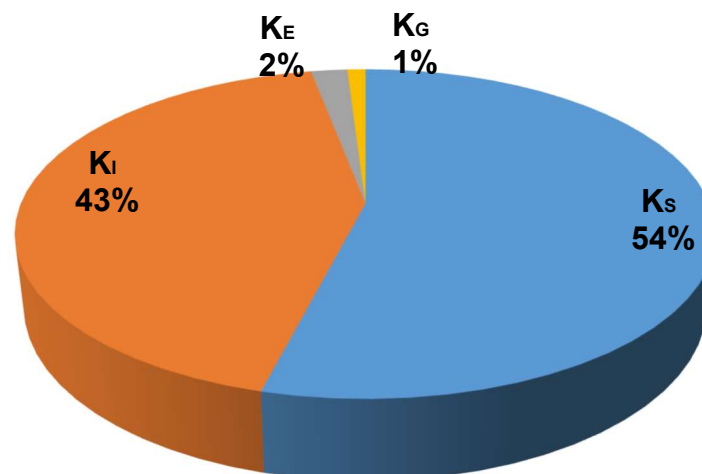
Kapacitet mlina u rasponu je od 12 do 17 tona ugljena na sat uz ostvarenje zahtijevane razine kvalitete kojom se podrazumijeva temperatura ugljene prašine od 90 °C uz sadržaj granulacije čestica u ugljenoj prašini  $\leq 10\%$  ostataka na situ od R90  $\mu\text{m}$  pri brzini injektiranja u ložište od 20 m/s [1]. Rad mlina moguć je i pri nižoj razini kvalitete ugljene prašine od zahtijevane, no tada se to negativno odražava na pogonsku učinkovitost elektrane.

Prema klasifikaciji objekata održavanja na sustavu mlina, u tablici 2.6. je prikazan broj objekata održavanja po klasifikaciji za sustav mlina.

**Tablica 2.6.** Broj objekata održavanja na sustavu mlina [19]

SUSTAV MLINOVA	OBJEKTI ODRŽAVANJA				UKUPNO ( $\Sigma R$ )
	$K_S$	$K_I$	$K_E$	$K_G$	
BROJ OBJEKATA ODRŽAVANJA PO MLINU	214	168	9	3	394

Na temelju tablice 2.6. izrađen je prikaz udjela zastupljenosti pojedine skupine objekata održavanja u sustavu mlina, kao što je prikazano na slici 2.10.



**Slika 2.10.** Udio zastupljenosti pojedine skupine objekata održavanja u sustavu mlina

Najveći udio od 54 % sačinjava skupina strojarskih objekata održavanja, dok skupina betonsko-konstruktivskih objekata održavanja čini udio od svega 1 %. Skupina instrumentacijskih objekata održavanja zauzima udio od 43 %, što naglašava visoki stupanj implementirane automatizacije pri vođenju, nadzoru i zaštiti tehnološkog procesa.



Proces održavanja sustava mlinova definiran je strategijom održavanja. Ta se strategija temelji na korektivnom i preventivnom održavanju, a sudionici procesa održavanja su sljedeći:

- tehnolozi struke<sup>1</sup>, odnosno održavatelji kao provoditelji aktivnosti održavanja
- operateri sustava mlina<sup>2</sup>, kao nadziretelji funkcionalne ispravnosti sustava mlinova i njihova utjecaja na okolinu

Objekti održavanja na temelju klasifikacije tehnologa struke razvrstani su u četiri osnovne skupine, pri čemu svaka skupina pripada pojedinom tehnologu struke [19]. U skladu s navedenim:

- a) tehnolog instrumentacije  $L_I$  je pri provedbi procesa održavanja odgovoran za objekte održavanja koji su obuhvaćeni funkcijom mjerenja, regulacije i upravljanja sustavom mlina;
- b) strojarski tehnolog  $L_S$  odgovoran je za objekte održavanja obuhvaćene mehaničkim dijelom sustava mlina;
- c) tehnolog za elektroenergetiku  $L_E$  odgovoran je za elektroenergetske objekte održavanja; i
- d) građevinski tehnolog  $L_G$  odgovoran je za objekte održavanja betonskih konstrukcija.

Analogno statusu termoelektrane, na sustav mlina neophodno je uvesti klasifikaciju statusa, odnosno sustav se nalazi u jednom od četiriju statusa, i to:

1. sustav u radu  $S_R$ ;
2. sustav u zastoju radi provedbe preventivnog održavanja  $S_P$ ;
3. sustav u zastoju radi provedbe korektivnog održavanja  $S_K$ ; ili
4. zastoj ispravnog sustava  $S_I$ .

Trajanje pojedinog statusa uvjetovano je vjerojatnošću nastanka događaja ili provedbe planirane aktivnosti koja uvjetuje promjenu statusa, a događaji koji uvjetuju promjenu statusa na sustavu mlina klasificiraju se kao kvar sustava mlina, kvar elektrane, preventivni pregled elektrane, preventivni pregled mlina, zastoj elektrane zbog više sile i dr. U tablici 2.7. prikazano je nazivlje vremena trajanja pojedinačnog statusa u skladu s definicijom odgovarajuće norme.

---

<sup>1</sup>Tehnolozi struke – djelatnici kojima je dodijeljena odgovornost održavanja onih objekata održavanja za koje posjeduju propisanu internu i eksternu kvalifikaciju.

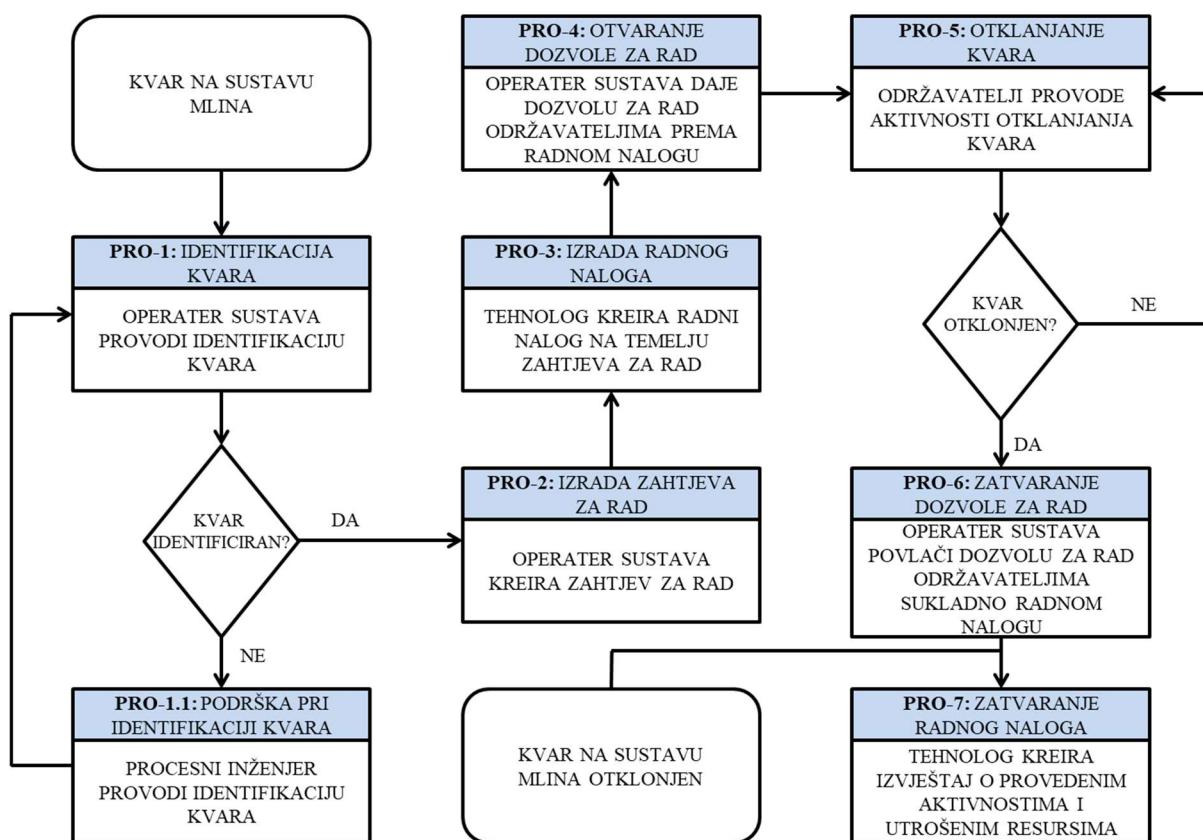
<sup>2</sup>Operateri sustava – djelatnici kojima je dodijeljena odgovornost upravljanja i nadziranja sustava za koje posjeduju internu i eksternu kvalifikaciju.

**Tablica 2.7.** Nazivlje vremena trajanja pojedinog statusa mlina [22]

Status	Vrijeme trajanja statusa [sat]
Sustav u radu ( $S_R$ )	Vrijeme rada sustava ( $T_R$ )
Zastoj ispravnog sustava ( $S_I$ )	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava ( $T_I$ )
Sustav u zastoju radi provedbe korektivnog održavanja ( $S_K$ )	Vrijeme korektivnog održavanja ( $T_K$ )
Sustav u zastoju radi provedbe preventivnog održavanja ( $S_P$ )	Vrijeme preventivnog održavanja ( $T_P$ )

### 2.4.1. Korektivno održavanje sustava mlina

Korektivno održavanje je održavanje koje se obavlja nakon kvara u cilju vraćanja funkcionalnosti sustava [22]. Na slici 2.11. prikazan je dijagram tijeka procesa pri provedbi korektivnog održavanja na sustavu mlina u TE Plomin 2 i opisan je s pomoću sedam procedura [19, 21, 43].

**Slika 2.11.** Dijagram tijeka procesa pri provedbi korektivnog održavanja

---

Procedure su međusobno zavisne i pojedinačno predstavljaju sljedeće:

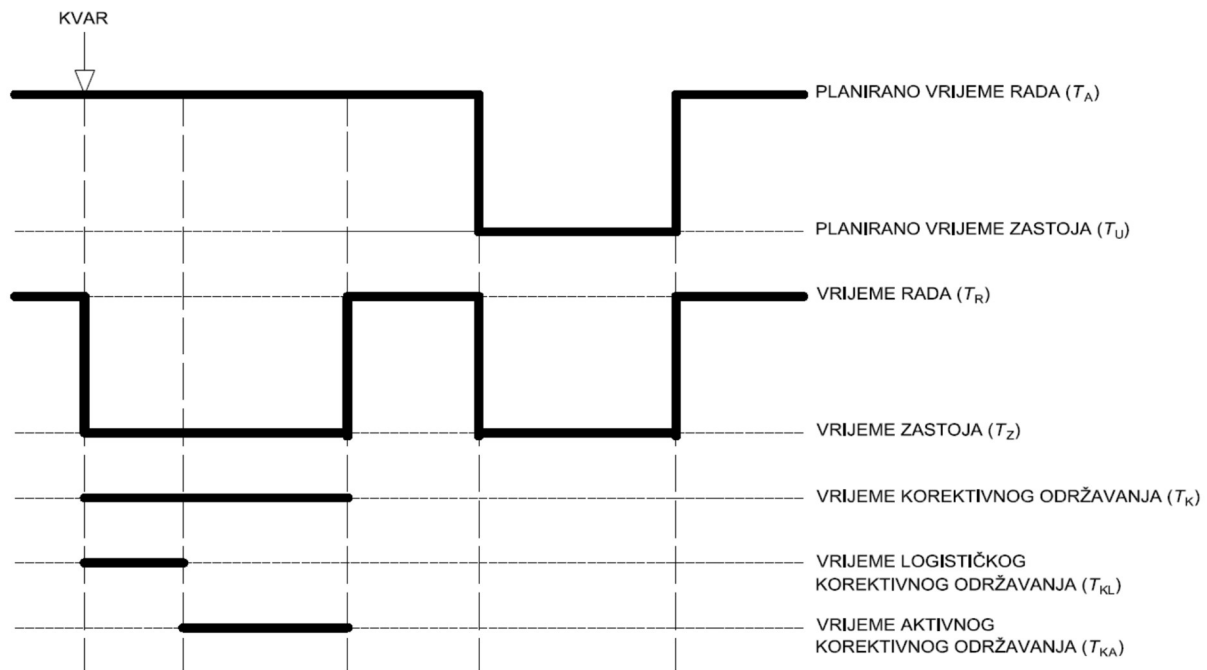
- Procedura 1 (*PRO-1*) utvrđuje obvezu operatera sustava da identificira kvar utvrđivanjem na kojoj komponenti ili sklopu je kvar nastao. S obzirom na složenost sustava mlina kvar ponekad nije egzaktno vidljiv. Upravo pri takvom scenariju angažira se dodatna podrška utvrđena procedurom (*PRO-1.1*). Uloga je procesnog inženjera da na temelju procesne analize događaja pohranjenih u bazi podataka utvrdi lokaciju kvara na sustavu.
- Procedura 2 (*PRO-2*) utvrđuje obvezu operatera sustava da nakon primanja informacija o lokaciji kvara tu informaciju evidentira u informatičkom sustavu u za to predviđenoj elektroničkom obliku obrasca. Elektronički oblik obrasca pod nazivom „Zahtjev za rad” sadržava identifikacijski broj zahtjeva za rad (automatski se generira), kalendarsko vrijeme prijave kvara (automatski se generira), ime i prezime tehnologa struke (odabire se iz baze podataka), oznaku komponente (odabire se iz baze podataka), opis kvara (upisuje operater sustava), utjecaj na raspoloživost elektrane (odabire se prioritet iz baze kao potpuno ili djelomično neraspoloživo ili raspoloživo) i dr.
- Procedura 3 (*PRO-3*) utvrđuje obvezu tehnologa struke, na kojeg je u proceduri 2 naslovljen zahtjev za rad, da organizira provedbu aktivnosti održavatelja i osigura resurse, kao što su adekvatan broj održavatelja, doknadni dijelovi, posebni alati i sl., a sve putem elektroničkog oblika obrasca pod nazivom „Radni nalog”. Elektronički oblik obrasca radnog naloga sadržava identifikacijski broj radnog naloga (istovjetan identifikacijskom broju zahtjeva za rad, automatski se generira), kalendarsko vrijeme izrade radnog naloga (automatski se generira), ime i prezime održavatelja (odabire se iz baze podataka), oznaku komponente (automatski se generira na temelju zahtjeva za rad), predviđeni opis aktivnosti (upisuje tehnolog struke) i dr.
- Procedura 4 (*PRO-4*) utvrđuje obvezu operatera sustava da, nakon što tehnolog struke izradi radni nalog, osigura mjesto rada provedbom sigurnosnih mjera propisanih pravilima zaštite na radu. Osiguravanje mjesta rada na sustavu mlina evidentira se elektroničkim oblikom obrasca pod nazivom „Dozvola za rad”. Elektronički oblik obrasca radnog naloga sadržava identifikacijski broj dozvole za rad (istovjetan identifikacijskom broju zahtjeva za rad, automatski se generira), kalendarsko vrijeme kreiranja (automatski se generira), ime i prezime operatera sustava (odabire se iz baze podataka), opis provedenih aktivnosti kojima je osigurano mjesto rada (upisuje operater sustava) te ostale podatke koji se automatski generiraju, kao što je oznaka komponente

---

ili sklopa (identifikacijski broj komponente ili sklopa s njihovim nazivom) i dr. Tako ispunjeni elektronski obrazac ispisuje se pisačem te ga potpisuju održavatelj i operater sustava uz dodatnu naznaku točnog kalendarskog vremena.

- Procedura 5 (*PRO-5*) utvrđuje obvezu održavatelja da sve aktivnosti provede u skladu s pogonskim uputama za održavanje sustava te da nakon izvršenih aktivnosti poprati ispravnost funkcioniranja sustava mlina.
- Procedura 6 (*PRO-6*) utvrđuje obvezu operatera sustava da, nakon što održavatelj dovrši svoje aktivnosti, ukloni sigurnosne mjere postavljene tijekom procedure 4. Uklanjanje sigurnosnih mjera u informatičkom sustavu evidentira se pozivanjem postojećeg zapisa pod nazivom „Dozvola za rad”, a zatim se odabire opcija „Dozvola za rad zatvorena” nakon čega se automatski generira kalendarsko vrijeme zatvaranja dozvole za rad. Također, na postojećem ispisanom obrascu naziva „Dozvola za rad” upisuje se kalendarsko vrijeme zatvaranja dozvole te ga potpisuju održavatelj i operater sustava. Dovršetkom procedure 6 sustav mlina vodi se kao raspoloživ.
- Procedura 7 (*PRO-7*) utvrđuje obvezu tehnologa struke da upotpuni postojeći elektronički oblik obrasca radnog naloga s točno utrošenim resursima, dok se utrošena vremena automatski generiraju.

Vrijeme trajanja korektivnog održavanja  $T_K$  sačinjeno je od logističkog vremena  $T_{KL}$  i aktivnog vremena korektivnog održavanja  $T_{KA}$ , kao što je prikazano na slici 2.12. Logističko vrijeme definira se kao akumulirano vrijeme tijekom kojeg se ne može obaviti održavanje zbog nedostatka resursa za provedbu korektivnog održavanja [22].



**Slika 2.12.** Prikaz vremena korektivnog održavanja u eksploataciji sustava [22]

Aktivno vrijeme korektivnog održavanja definira se kao vrijeme provođenja radnih aktivnosti na sustavu u cilju otklanjanja kvara [22]. Vrijeme korektivnog održavanja  $T_K$  izraženo je sljedećom relacijom:

$$T_K = T_{KL} + T_{KA}[\text{sat}] \quad (2.3.)$$

pri čemu je:

$T_{KL}$ – logističko vrijeme korektivnog održavanja

$T_{KA}$ –aktivno vrijeme korektivnog održavanja

Za  $n$  kvarova u promatranom vremenskom razdoblju  $T$ , relacija (2.3.) izražava se u sljedećem obliku:

$$T_K = \sum_{i=1}^n (T_{KL,i} + T_{KA,i}) [\text{sat}] \quad (2.4.)$$

Operativna raspoloživost ( $A_{OM}$ ) sustava mlina određena je sljedećom relacijom [22]:

$$A_{OM} = \frac{T_R}{T_R + T_K} \quad (2.5.)$$

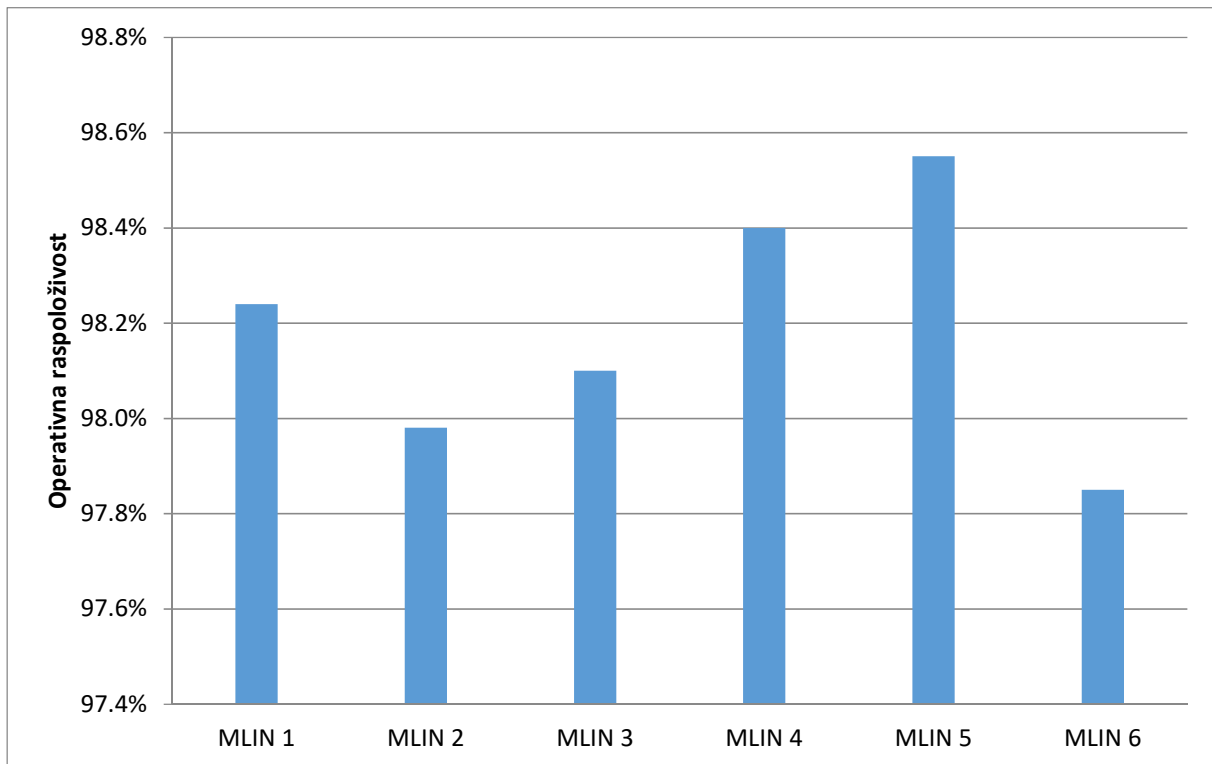
pri čemu je:

$T_R$  – vrijeme rada

$T_K$  – vrijeme korektivnog održavanja

Primjenom relacije 2.5. za promatrano vremensko razdoblje  $T$ , uz vremena rada pojedinog mlina ( $T_{R,M1}$ ,  $T_{R,M2}$ ,  $T_{R,M3}$ ,  $T_{R,M4}$ ,  $T_{R,M5}$  i  $T_{R,M6}$ ) pri nastalim korektivnim vremenima održavanja

( $T_{K,M1}$ ,  $T_{K,M2}$ ,  $T_{K,M3}$ ,  $T_{K,M4}$ ,  $T_{K,M5}$  i  $T_{K,M6}$ ), određene su operativne raspoloživosti pojedinog sustava mlina na sustavu mlinova, kao što je prikazano na slici 2.13. za period eksploatacije od 2005. do 2013. godine.

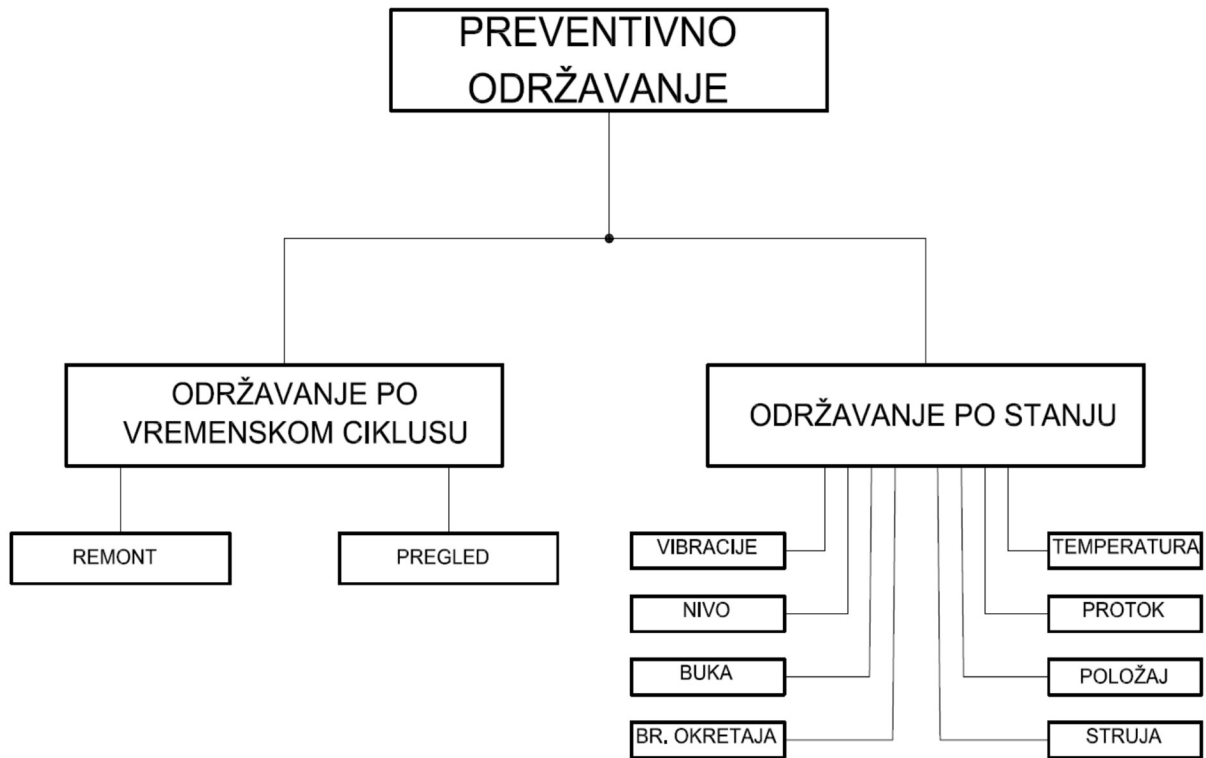


**Slika 2.13.** Operativna raspoloživost pojedinog mlina u TE Plomin 2 za period eksploatacije od 2005. do 2013. godine [17]

Operativna raspoloživost pojedinog mlina u razdoblju eksploatacije od 2005. do 2013. godine bila je od 97 do 99 %, što znači da je godišnje vrijeme zastoja pojedinog mlina bilo od 80 do 240 sati radi provedbe korektivnog održavanja [17].

#### 2.4.2. Preventivno održavanje

Preventivno održavanje provodi se u okviru unaprijed određenog vremenskog intervala usklađenog s propisanim kriterijima za ispravnu funkcionalnost objekata, odnosno postrojenja [34]. Preventivno održavanje dijeli se na održavanje po vremenskom ciklusu i održavanje po stanju, kao što je prikazano slikom 2.14.



**Slika 2.14.** Preventivno održavanje na sustavu mlinova TE Plomin

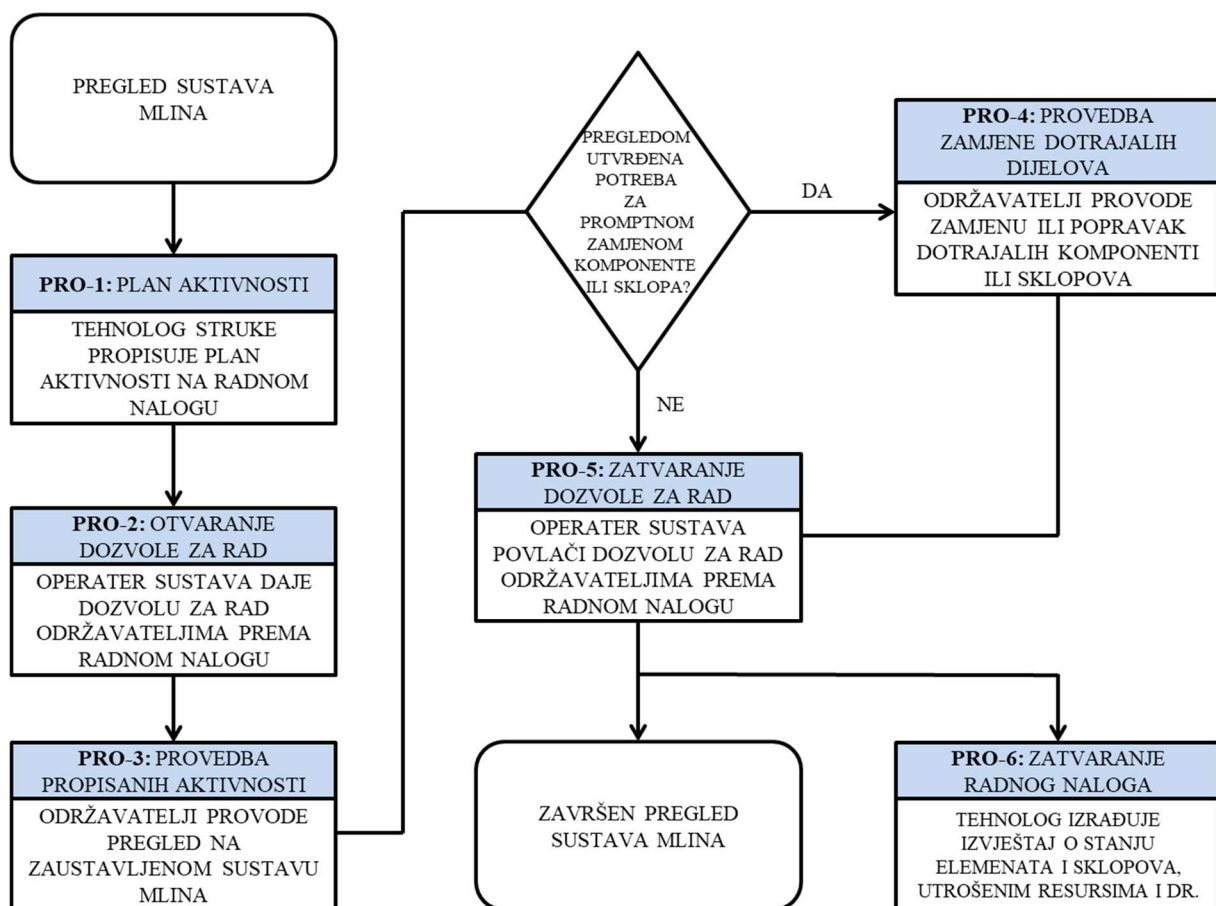
Preventivno održavanje po vremenskom ciklusu provodi se isključivo tijekom obustave mlina, odnosno kada je aktivan status mlina  $S_P$ , dok održavanje po stanju provodi se nakon što karakteristične fizikalne veličine (mjerenje vibracija, struje, buke i dr.) tehnološkog procesa indiciraju odstupanja koja predstavljaju početne kvarove.

Remont je vrsta preventivnog održavanja po vremenskom ciklusu čiji je cilj većim popravcima i zamjenama dotrajalih dijelova, a u granicama pogonskih potreba, održati energetska postrojenja u tehnički ispravnom stanju. Remont se provodi u unaprijed određenim vremenskim razmacima, odnosno onda kada kontrolirani parametri dosegnu granicu upotrebljivosti ili predkritični nivo [19]. Ciklus provedbe remonta na sustavu mlina propisan je preporukama proizvođača i utvrđenim općim stanjem objekata održavanja ili provedbom pregleda u vremenu  $T_{PP}$  ili provedbom održavanja po stanju  $T_{PS}$ . Remontom sustava mlina najvećim djelom obuhvaćene su mehaničke komponente i sklopovi na mlinu na kojima se vrši zamjena gornje i donje zdjele te zamjena kugli. Vremenski ciklus remonta na sustavu mlina obavlja se u okvirnom ciklusu od 24 000 radnih sati sustava mlina, dok se ostale komponente i sklopovi pregledavaju u vremenskom razdoblju od 2000 radnih sati te se ovisno o zatečenom stanju obavlja njihov popravak ili zamjena. Jednako tako, tijekom remonta obavlja se i zamjena svih onih komponenti ili sklopova u kojih je tijekom preventivnog održavanja - pregleda utvrđena granična razina dotrajlosti. Potrebno vrijeme zamjene zdjela i kugli mlina, kao vremenski

najzahtjevnija aktivnost, određeno je ukupnim vremenom remonta sustava mlina  $T_{PR}$ . Vrijeme remonta mlina uračunano je u vrijeme remonta elektrane, a u skladu s dosadašnjim iskustvom pri eksploataciji, vrijeme trajanja remonta sustava mlina  $T_{PR}$  u prosjeku je 120 sati [43].

Preventivno održavanje – pregled ili dalje u radu pregled, je vrsta preventivnog održavanja po vremenskom ciklusu u cilju utvrđivanja stanja pogonske ispravnosti energetskog dijela postrojenja, a obavlja se u okviru unaprijed određenih rokova. Pregled pojedinog objekta održavanja služi i za eventualno određivanje prijevremenih modifikacija i remonta, odnosno proširenja opsega poslova tijekom redovitih modifikacija i remonta [19].

Pregled se obavlja u skladu s procesom provedbe preventivnog održavanja - pregleda sustava mlina, kao što je prikazano na slici 2.15.



**Slika 2.15.** Dijagram tijeka procesa pri provedbi preventivnog održavanja - pregleda sustava mlina

Preventivno održavanje - pregledi sustava mlina, u čiju je svrhu potrebno osigurati status zastoja  $S_P$ , obavljaju se u vremenskom ciklusu od približno 2000 radnih sati sustava mlina i u prosječnom trajanju od 10 sati. Trajanje provođenja aktivnosti održavatelja pri obavljanju pregleda mlina  $T_{PP}$  također je definirano i-tom planiranom aktivnošću čija provedba iziskuje



najdulji vremenski angažman održavatelja. No, ako pri obavljanju pregleda održavatelji utvrde nužnost provedbe zamjene dotrajalih dijelova, tada se vrijeme pregleda produljuje, a ono u najvećoj mjeri ovisi o stanju rezervnih materijala ili dijelova, stručnosti i broju održavatelja i sl. Proces provedbe pregleda sustava mlina odvija se sljedećim procedurama [19, 21, 43]:

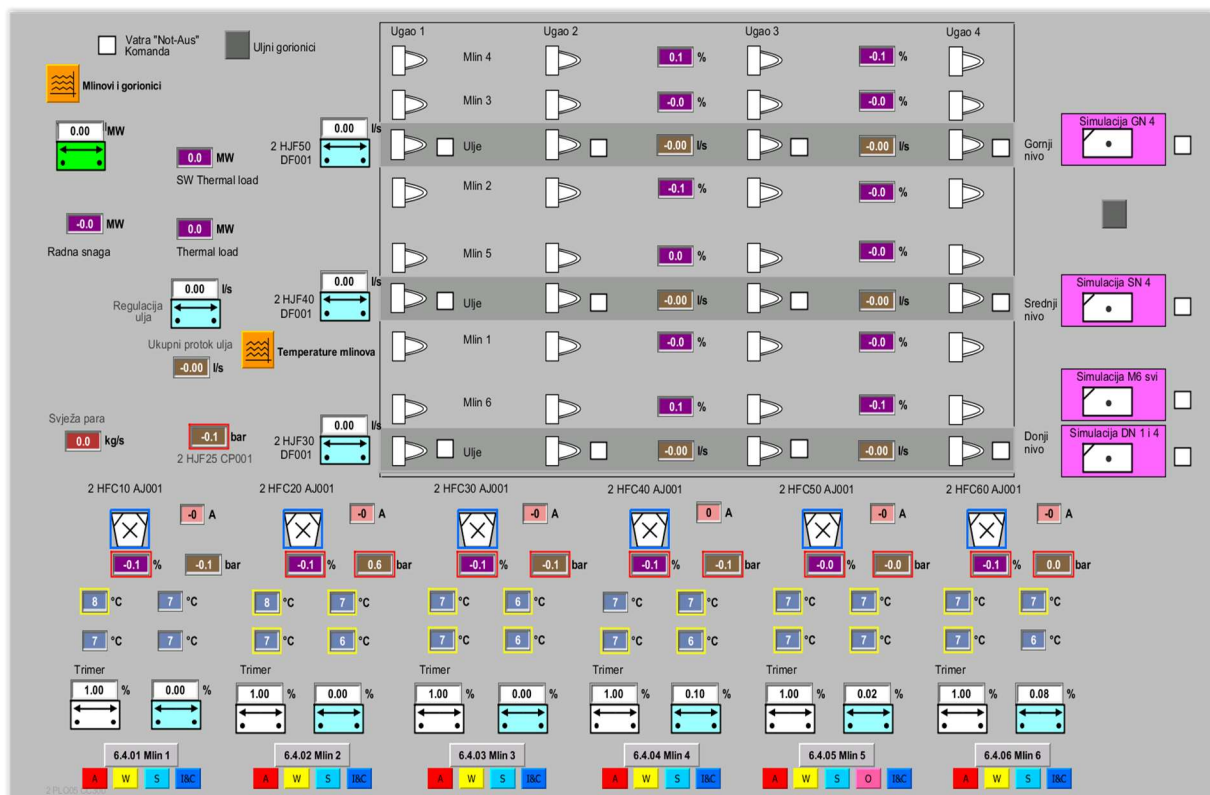
- Procedura 1 (*PRO-1*) utvrđuje obvezu tehnologa struke da utvrdi plan provedbe aktivnosti održavatelja na odabranim objektima održavanja. Odabir objekata održavanja koje će pregledati održavatelj temelji se na sljedećim podacima: propisane upute i ciklusi provedbe pregleda koje izvršava proizvođač, popis svih zapaženih manjih nesukladnosti tijekom obavljanja zadnjeg pregleda, popis svih aktivnih grešaka nastalih u vremenu eksploatacije od zadnjeg pregleda, a koje su utvrđene provedbom održavanja po stanju i dr.
- Procedura 2 (*PRO-2*) utvrđuje obvezu operatera sustava da, nakon što tehnolog struke izradi radni nalog, osigura mjesto rada provedbom sigurnosnih mjera propisanih pravilima zaštite na radu. Osiguravanje mjesta rada na sustavu mlina evidentira se elektroničkim oblikom obrasca naziva „Dozvola za rad” koji je istovjetnog sadržaja kao u proceduri 4 procesa korektivnog održavanja.
- Procedura 3 (*PRO-3*) utvrđuje obvezu održavatelja da sve aktivnosti provede u skladu s pogonskim uputama za održavanje sustava te da nakon izvršenih aktivnosti poprati ispravnost funkcioniranja sustava mlina.
- Procedura 4 (*PRO-4*) utvrđuje obvezu održavatelja istovjetnu proceduri 3, uz obvezu tehnologa struke da osigura potreban materijal ili doknadne dijelove.
- Procedura 5 (*PRO-5*) utvrđuje obvezu operatera sustava da, nakon što održavatelj dovrši svoje aktivnosti, ukloni sigurnosne mjere postavljene tijekom procedure 2. Uklanjanje sigurnosnih mjera u informatičkom sustavu evidentira se jednako kao pri provedbi procedure 6 procesa korektivnog održavanja.
- Procedura 6 (*PRO-6*) utvrđuje obvezu tehnologa struke da upotpuni postojeći elektronski oblik obrasca radnog naloga s točno utrošenim resursima, dok se utrošena vremena automatski generiraju.

Održavanje po stanju dijagnostički je proces kojim određujemo stanje („zdravlje”) svakog dijela tehničkog sustava čije varijable može se mjeriti i čije ponašanje može se kontrolirati određenim parametrima [34]. Održavanje po stanju zasniva se na rezultatima dijagnostičkog procesa koji omogućava određivanje stanja svake komponente obuhvaćene dijagnostičkim nadzorom.

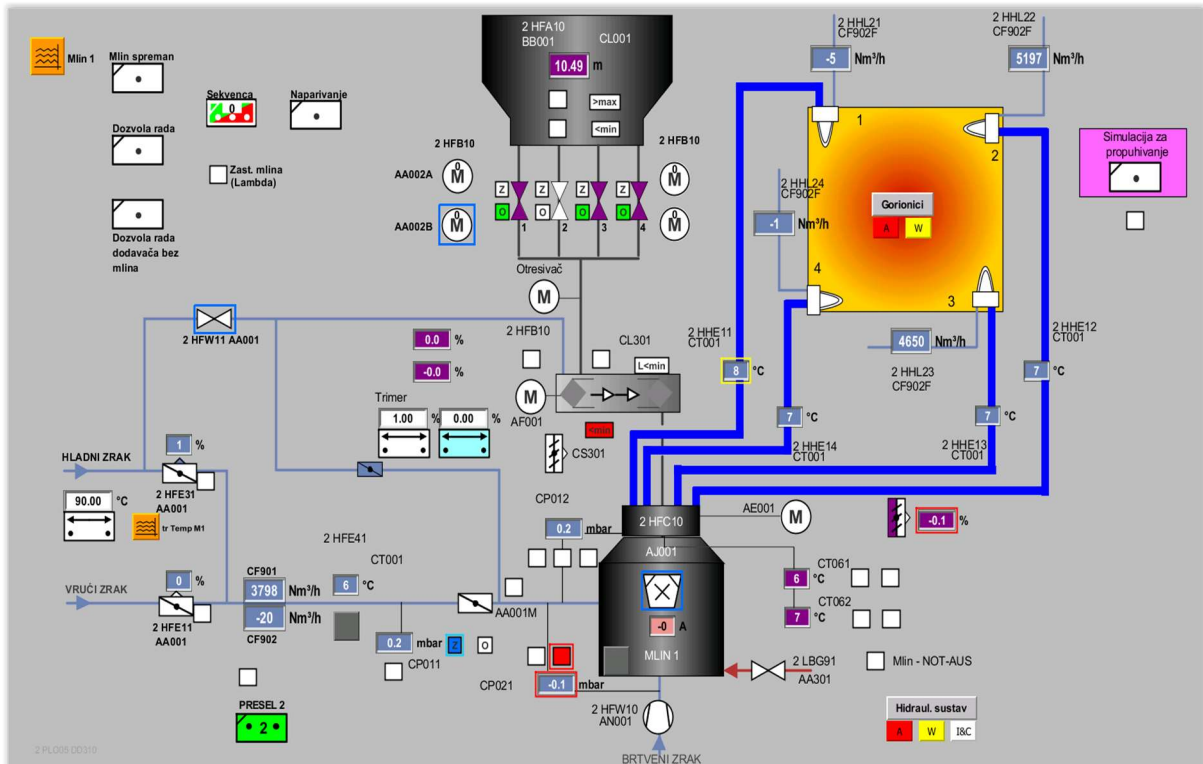
Modeli održavanja po stanju mogu se podijeliti u dvije glavne skupine [34]:

- održavanje po stanju s kontrolom parametara,
- održavanje po stanju s kontrolom razine pouzdanosti.

Na sustavu mlinova primijenjen je model održavanja po stanju s kontrolom parametara. Parametri koji se upotrebljavaju kao mjerila u promjeni radnih karakteristika fizikalne su veličine koje se mjere i prenose analognim putem. Na sustavu mlina u kojem se odvija visokoautomatizirani proizvodni proces ti parametri ujedno su i parametri kojima se nadzire i upravlja tehnološkim procesom. Na slikama 2.16. i 2.17. prikazana je vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava mlinova TE Plomin 2 u trenutku zastoja [56].

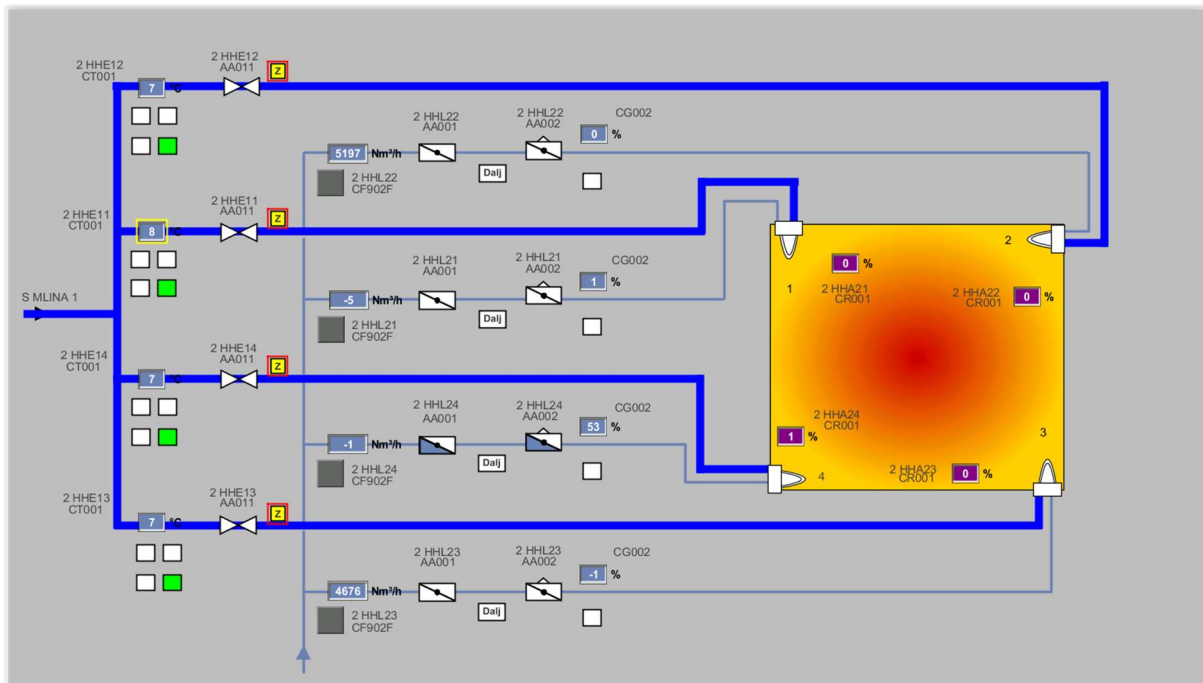


**Slika 2.16.** Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava mlinova TE Plomin 2 u trenutku zastoja



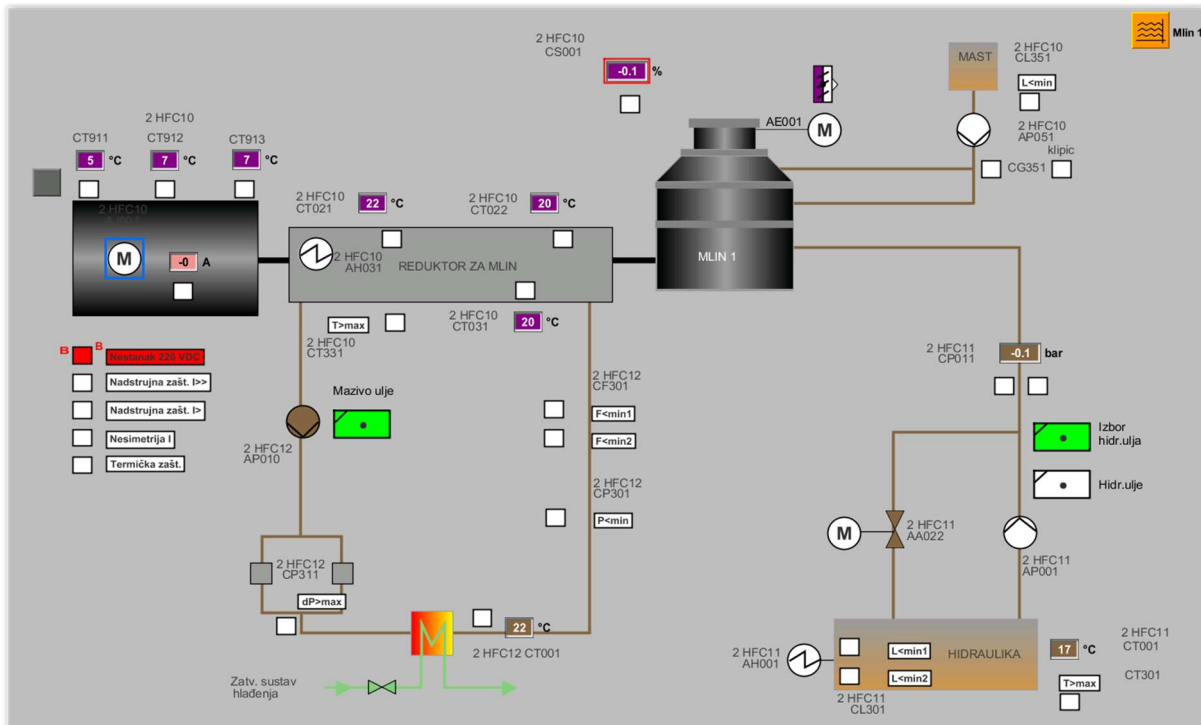
Slika 2.17. Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava mlin 1 u TE Plomin 2 u trenutku zastoja

Na slici 2.18. prikazana je vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava transporta ugljene prašine mlin 1 u trenutku zastoja [56].



Slika 2.18. Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava transporta ugljene prašine mlin 1 u trenutku zastoja

Na slici 2.19. prikazana je vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava elektromotora i hidraulike na sustavu mlina u trenutku zastoja [56].



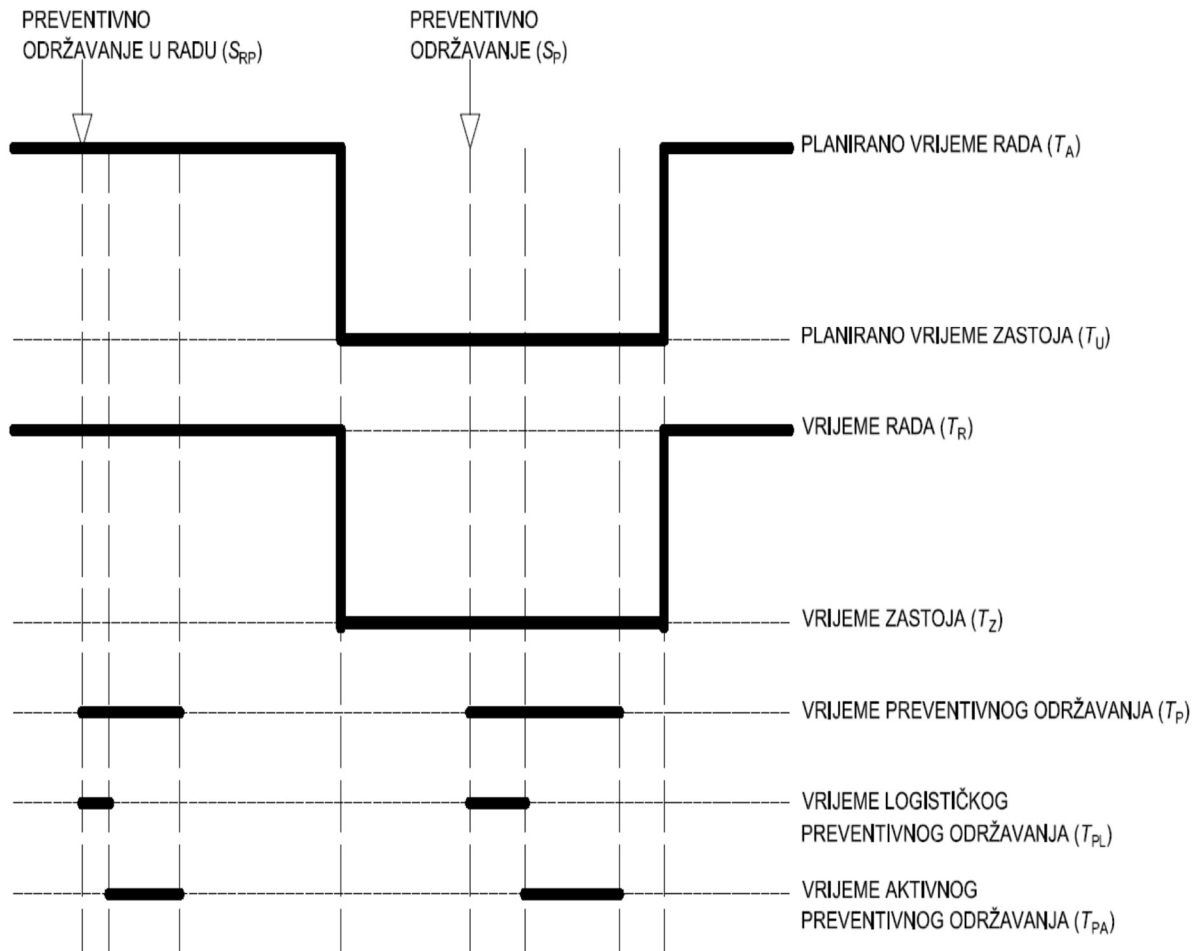
**Slika 2.19.** Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava elektromotora i hidraulike na sustavu mlina u trenutku zastoju

Visoki stupanj automatiziranosti sustava mlinova i veliki broj objekata održavanja zahtijeva kontinuirani nadzor koji provodi operater sustava, a u skladu s kontrolnim popisom [20] provodi se i lokalni nadzor u kontinuiranom ciklusu od četiri sata. Utvrđene su dopuštene granice vrijednosti parametara te kritične vrijednosti potrošenosti ili odstupanja od normalnog rada koje s velikom vjerojatnošću dovode do oštećenja, kvara ili havarije. Ako se preventivnim pregledima po stanju utvrdi prisutnost oštećenja na sustavu koje je iznad granice prihvatljivosti i održavatelj donese odluku da se sustav mora zaustaviti prije planiranog vremena kako bi se izvršio popravak oštećenja, tada se to klasificira kao kvar, a popravak kao korektivno održavanje [11].

Kao i u slučaju korektivnog održavanja, utvrđuju se vremena i u preventivnom održavanju na način koji je opisan u nastavku. Vrijeme trajanja preventivnog održavanja  $T_P$  sastoji se od logističkog vremena  $T_{PL}$  i aktivnog vremena preventivnog održavanja  $T_{PA}$ , kao što je prikazano na slici 2.20. Vrijeme preventivnog održavanja izraženo je sljedećom relacijom:

$$T_P = T_{PL} + T_{PA} \text{ [sat]} \quad (2.6.)$$

Aktivno vrijeme preventivnog održavanja  $T_{PA}$  definira se kao vrijeme provođenja radnih aktivnosti na sustavu u cilju preventivnih utvrđivanja i/ili otklanjanja dotrajalih dijelova tijekom planiranog zastoja [22].



**Slika 2.20.** Prikaz vremena preventivnog održavanja u eksploataciji sustava

Kao i u slučaju korektivnog održavanja, logističko vrijeme definira se kao akumulirano vrijeme tijekom kojeg se ne može obaviti održavanje zbog nedostatka resursa za provedbu preventivnog održavanja [22].

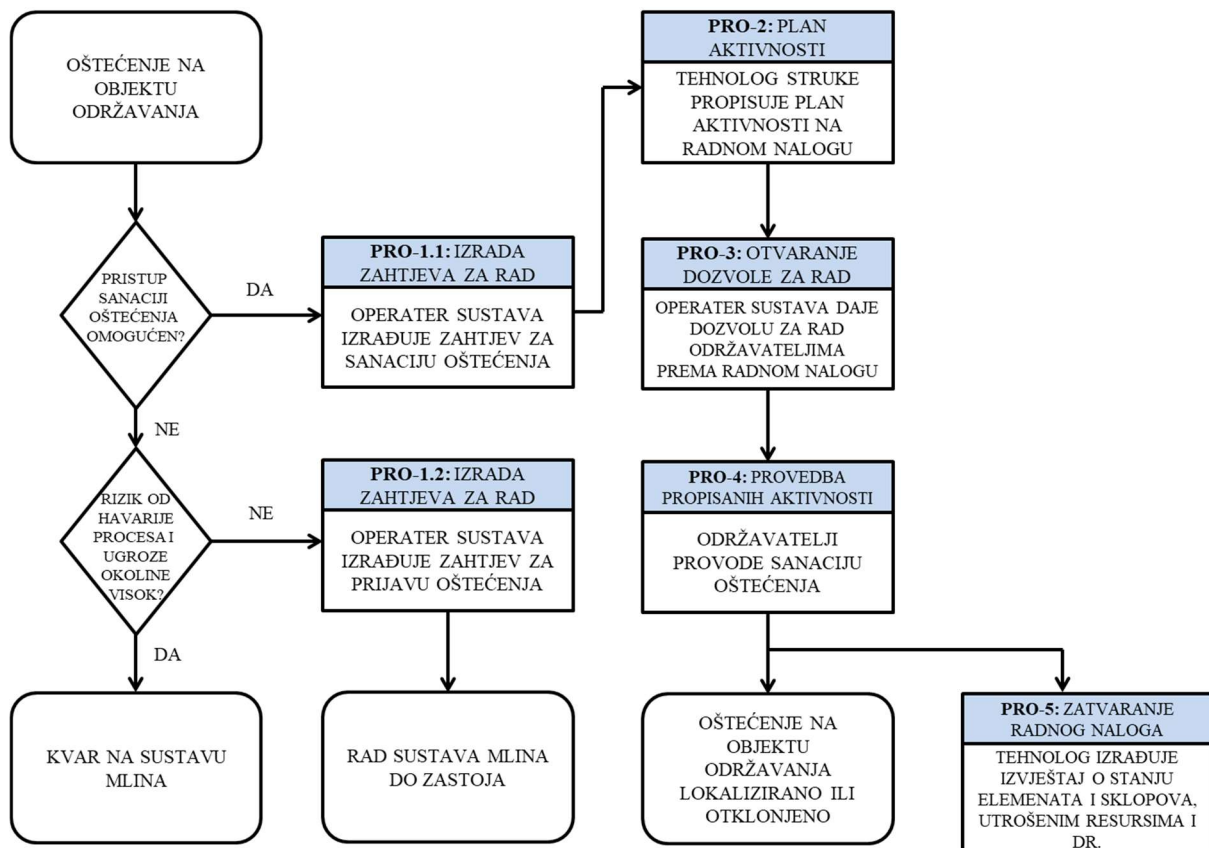
### 2.4.3. Sanacija oštećenja tijekom rada sustava

Oštećenje ili greška definira se kao neusklađenost objekta održavanja u usporedbi s normalnim stanjem uz zadržavanje performansi procesa u okviru specificiranih granica. Oštećenje na objektu održavanja tijekom rada sustava može poprimiti sljedeća dva statusa:

- bez mogućnosti sanacije  $O_{GK}$  ili
- mogućnost sanacije  $O_{GP}$ .

Sam status ovisi o različitim čimbenicima, ali najvećim dijelom o samoj izvedbi objekta održavanja, uzroku nastanka oštećenja te mogućim posljedicama na proces i okolinu. Sanacija oštećenja definira se kao provedba mjera aktivnosti održavatelja na promatranoj komponenti, sklopu, podsustavu ili sustavu pri čemu se djelomično ili potpuno sanira nastalo oštećenje korištenjem za to predviđenim resursima, a da se pri tome ne prekida tehnološki proces koji obavlja sustav.

U slučaju nastanka oštećenja na objektu održavanja postupa se u skladu s dijagramom tijeka procesa prikazanim na slici 2.21.



**Slika 2.21.** Dijagram tijeka procesa u slučaju sanacije oštećenja na objektu održavanja

Proces postupanja sa sustavom mlina pri nastanku oštećenja utvrđen je sljedećim procedurama:

- Procedura 1.1 i 1.2 (*PRO-1.1* i *PRO 1.2*) utvrđuje obvezu operatera sustava da nakon primanja informacija o lokaciji oštećenja tu informaciju evidentira u informatičkom sustavu u za to predviđenoj elektroničkom obliku obrasca. Elektronički oblik obrasca pod nazivom „Zahtjev za rad” sadržava identifikacijski broj zahtjeva za rad (automatski se generira), kalendarsko vrijeme prijave oštećenja (automatski se generira), ime i prezime tehnologa struke (odabire se iz baze podataka), oznaku komponente (odabire se iz baze podataka), opis oštećenja (upisuje operater sustava) i dr.

- 
- Procedura 2 (*PRO-2*) utvrđuje obvezu tehnologa struke na kojeg je u proceduri 1.1 i 1.2 naslovljen zahtjev za rad da organizira provedbu aktivnosti održavatelja i osigura resurse, kao što su: adekvatan broj održavatelja, doknadni dijelovi, posebni alati i sl., a sve putem elektroničkog oblika obrasca naziva „Radni nalog”. Elektronički oblik obrasca radnog naloga sadržava identifikacijski broj radnog naloga (istovjetan identifikacijskom broju zahtjeva za rad, automatski se generira), kalendarsko vrijeme izrade radnog naloga (automatski se generira), ime i prezime održavatelja (odabire se iz baze podataka), oznaku objekta održavanja (automatski se generira na temelju zahtjeva za rad), predviđeni opis aktivnosti (upisuje tehnolog struke) i dr.
  - Procedura 3 (*PRO-3*) utvrđuje obvezu održavatelja da obavijesti operatera sustava kako bi povećao mjere opreza pri nadzoru procesa dok održavatelji provode sanaciju oštećenja. Ta informacija za operatera sustava evidentira se elektroničkim obrascem „Dozvola za rad”. Elektronički oblik obrasca radnog naloga sadržava identifikacijski broj dozvole za rad (istovjetan identifikacijskom broju zahtjeva za rad, automatski se generira), kalendarsko vrijeme ispunjavanja obrasca (automatski se generira), ime i prezime operatera sustava (odabire se iz baze podataka) i ostale podatke koji se automatski generiraju, kao što su oznaka komponente ili sklopa (identifikacijski broj komponente ili sklopa s njihovim nazivom) i dr. Tako ispunjeni elektronički obrazac ispisuje se na pisaču i potpisuju ga održavatelj i operater sustava uz dodatnu naznaku točnog kalendarskog vremena.
  - Procedura 4 (*PRO-4*) utvrđuje obvezu održavatelja da sve aktivnosti provede u skladu s pogonskim uputama za održavanje sustava i da nakon izvršenih aktivnosti poprati ispravnost funkcioniranja sustava mlina.
  - Procedura 5 (*PRO-5*) utvrđuje obvezu održavatelja da obavijesti operatera sustava kako su aktivnosti održavatelja završene, što se u informatičkom sustavu evidentira na način da se pozove postojeći zapis pod nazivom „Dozvola za rad” te se odabere opcija „Dozvola za rad zatvorena”, nakon čega se automatski generira kalendarsko vrijeme zatvaranja dozvole za rad. Također, na postojećem ispisanom obrascu naziva „Dozvola za rad” upisuje se kalendarsko vrijeme zatvaranja dozvole, a potpisuje ga održavatelj i operater sustava. Također utvrđuje obvezu tehnologa struke da u postojeći elektronički oblik obrasca radnog naloga zabilježi točno utrošene resurse, dok se utrošena vremena automatski generiraju.

Vrijeme trajanja sanacijskog održavanja  $T_S$  sastoji se od logističkog vremena  $T_{SL}$  i aktivnog vremena provedbe sanacije  $T_{SA}$ , odnosno izraženo je sljedećom relacijom:

$$T_S = T_{SL} + T_{SA} \text{ [sat]} \quad (2.7.)$$

Ovakav oblik održavanja u praksi se provodi u TE Plomin 2 gdje je postrojenje predviđeno za neprekidan rad (> 8000 sati / god.) uz visoku razinu raspoloživosti.

## 2.5. Korelacija karakterističnih varijabli pri analizi ekonomičnosti sustava mlina

Pouzdan i siguran rad sustava mlina s visokom razinom operativne raspoloživosti ovisi o vrijednostima karakterističnih veličina prikazanih u prilogu A. Vrijednosti karakterističnih veličina prikazanih u tablici A.1., ovise o više čimbenika, no neki od bitnijih čimbenika su sljedeći:

- kvaliteta ugrađenih elemenata i sklopova u sustav mlina,
- kvaliteta održavatelja pri izvođenju radova na sustavu mlina,
- kvaliteta rada operatera pri vođenju, nadziranju i upravljanju sustavom mlina,
- kvaliteta rada tehnologa struke iz aspekta planiranja aktivnosti i pravodobnog osiguravanja potrebnih resursa.

Svi prethodno navedeni čimbenici djeluju na karakteristične veličine u određenim udjelima, a među njima postoji korelacija. Kako se korelacija definira kao sukladnost vrijednosti dviju skupina podataka, bilo je potrebno istražiti stupanj korelacije karakterističnih veličina. Spearmanovim koeficijentom korelacije ranga mjeri se stupanj i smjer asocijacije dviju pojava predloženih parovima ranga - varijabli, a Spearmanov koeficijent određen je sljedećom relacijom [51]:

$$r_S = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}, d_i = r(x_i) - r(y_i), -1 \leq r_S \leq 1 \quad (2.8.)$$

pri čemu su:

$x_i$  i  $y_i$  – varijable

$r(x_i)$  i  $r(y_i)$  – rang varijable



Na temelju podataka iz priloga A i izračunom Spearmanovog koeficijenta<sup>3</sup> određena je jakost veze između karakterističnih veličina, a sam koeficijent proračunan je primjenom programa IBM SPSS [64] te razinom signifikantnosti  $P$ . Korelacija i jakosti veze određena je za sljedeće parove karakterističnih varijabli, kako slijedi:

- a) *Povezanost provedbe broja remonta na sustavu mlina  $Z_{PR}$  i broja zastoja radi korektivnog održavanja  $Z_K$*

U tablici 2.8. prikazani su rezultati testa za pojedini mlin u sustavu mlina za varijable  $Z_{PR}$  i  $Z_K$ . Dobiveni rezultati za vrijednost  $r_s$  pri razini signifikantnosti  $< 5\%$  potvrđuju znatnu (vrlo dobru) povezanost između provedbe remonta i broja zastoja zbog kvara na svim uzorcima. Evidentno je da provedba većeg broja remonata doprinosi smanjenju broja zastoja zbog kvara i obrnuto.

**Tablica 2.8.** Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli  $Z_{PR}$  i  $Z_K$

Koeficijent/Sustav	MLIN 1	MLIN 2	MLIN 3	MLIN 4	MLIN 5	MLIN 6
Spearmanov koeficijent, $r_s$	-0,803	-0,855	-0,737	-0,755	-0,794	-0,850
$P$ (signifikantnost)	0,016	0,007	0,037	0,030	0,019	0,007

- b) *Povezanost sati rada sustava mlina  $T_{RM}$  i broja zastoja radi korektivnog održavanja  $Z_K$*

U tablici 2.9. prikazani su rezultati testa za pojedini mlin u sustavu mlina za varijable  $T_{RM}$  i  $Z_K$ . Dobiveni rezultati za vrijednost  $r_s$  pri razini signifikantnosti manjoj od  $5\%$  potvrđuje znatnu (dobru) povezanost između sati rada sustava mlina i broja zastoja zbog kvara na mlinovima

<sup>3</sup> Ako su u svakom paru rangovi jednaki, njihove su razlike jednake nuli, a koeficijent poprima vrijednost 1. U tome slučaju govori o potpunoj (perfektnoj) pozitivnoj korelaciji ranga. Kada je redoslijed modaliteta jedne rang-varijable obrnut od redoslijeda druge varijable u paru, koeficijent će poprimiti vrijednost -1, pa je korelacija ranga potpuna i negativnog smjera. Za najveće neslaganje rangova drugi član s desne strane navedenog izraza jest 1, a koeficijent korelacije ranga jednak je nuli. Pri računanju koeficijenta zadanom formulom pretpostavlja se da nema vezanih rangova ili da je njihov broj zanemariv s obzirom na broj parova. Ako je koeficijent korelacije bitan s obzirom na postavljenu granicu značajnosti (uobičajeno  $P < 0,05$ ), zaključujemo da je koeficijent korelacije bitan i da se smije tumačiti. Ako je vrijednost  $P > 0,05$  zaključujemo da koeficijent korelacije nije bitan i tada se bez obzira na njegovu vrijednost ne smije tumačiti. Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta tumače se u skladu sa sljedećim rangom:  $r_s$  od 0 do 0,25 ili od 0 do -0,25 upućuju da nema povezanosti, dok vrijednosti  $r_s$  od 0,25 do 0,50 ili od -0,25 do -0,50 upućuju na slabu povezanost među varijablama. Vrijednosti  $r_s$  od 0,50 do 0,75 ili od -0,50 do -0,75 upućuju na umjerenu do dobru povezanost te vrijednosti  $r_s$  od 0,75 do 1 ili od -0,75 do -1 upućuju na vrlo dobru do izvrsnu povezanost među varijablama [58].

br. 2, 3, 4 i 6, dok na mlinovima br. 1 i 5 zbog signifikantnosti veće od 5 % to nije slučaj. Evidentno je da veći broj radnih sati sustava mlina doprinosi većem broju zastoja zbog kvara i obratno.

**Tablica 2.9.** Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli  $T_{RM}$  i  $Z_K$

Koeficijent/Sustav	MLIN 1	MLIN 2	MLIN 3	MLIN 4	MLIN 5	MLIN 6
Spearmanov koeficijent, $r_s$	0,497	0,795	0,667	0,798	0,491	0,683
$P$ (signifikantnost)	0,210	0,018	0,047	0,018	0,217	0,042

c) *Povezanost broja provedbi preventivnog održavanja - pregleda  $Z_{PP}$  na sustavu mlina i broja zastoja radi korektivnog održavanja  $Z_K$*

U tablici 2.10. prikazani su rezultati testa za pojedini mlin u sustavu mlina za varijable  $Z_{PP}$  i  $Z_K$ . Dobiveni rezultati za vrijednost  $r_s$  pri razini signifikantnosti od 5 % ukazuju na to da ne postoji bitna povezanost broja provedbe preventivnog održavanja - pregleda i broja zastoja radi korektivnog održavanja. Kao razlog može se navesti da aktivnost obavljanja pregleda na sustavu mlina često nije zamjena dotrajalih dijelova, već najvećim dijelom utvrđivanje njihova trenutnog stanja.

**Tablica 2.10.** Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli  $Z_{PP}$  i  $Z_K$

Koeficijent/Sustav	MLIN 1	MLIN 2	MLIN 3	MLIN 4	MLIN 5	MLIN 6
Spearmanov koeficijent, $r_s$	0,372	0,657	0,482	0,500	0,361	0,539
$P$ (signifikantnost)	0,364	0,077	0,227	0,207	0,379	0,168

d) *Povezanost broja zastoja mlina zbog vanjskih čimbenika  $Z_I$  i broja zastoja radi korektivnog održavanja  $Z_K$*

U tablici 2.11. prikazani su rezultati testa za pojedini mlin u sustavu mlina za varijable  $Z_I$  i  $Z_K$ . Dobiveni rezultati za vrijednost  $r_s$  pri razini signifikantnosti od 5 % ukazuju na to da ne postoji bitna povezanost zastoja mlina zbog vanjskih čimbenika i zastoja radi korektivnog održavanja. Evidentno je da naprezanja koja nastaju pri zaustavljanju ili pokretanju sustava mlina nemaju znatniji utjecaj na broj zastoja mlina zbog kvara.

**Tablica 2.11.** Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli  $Z_I$  i  $Z_K$

Koeficijent/Sustav	MLIN 1	MLIN 2	MLIN 3	MLIN 4	MLIN 5	MLIN 6
Spearmanov koeficijent, $r_s$	-0,006	-0,224	0,066	-0,209	-0,115	-0,093
P (signifikantnost)	0,988	0,593	0,876	0,620	0,786	0,8226

Na temelju prethodno prikazanih rezultata u tablicama 2.8. do 2.11. može se utvrditi:

- postojanje značajne (vrlo dobre) povezanosti između provedbe broja remonta i broja zastoja zbog kvara na svim uzorcima,
- postojanje značajne (dobre) povezanost između sati rada sustava mlina i broja zastoja zbog kvara na mlinovima br. 2, 3, 4 i 6, dok na mlinovima br. 1 i 5 to nije slučaj.

Jednako tako, nije utvrđeno:

- postojanje značajne povezanosti broja provedbe preventivnog održavanja-pregleda i broja zastoja radi korektivnog održavanja,
- postojanje značajne povezanosti broja zastoja mlina zbog vanjskih čimbenika i broja zastoja radi korektivnog održavanja.

Evidentno je da provedba većeg broj remonta pridonosi smanjenju broja zastoja zbog kvara i obratno te da veći broj radnih sati sustava mlina pridonosi većem broju zastoja zbog kvara i obrnuto. Logično se nameće zaključak da povećanje intenziteta obavljanja preventivnog održavanja na TE Plomin 2 pridonosi smanjenju broja korektivnih zastoja, ali u tom slučaju rastu ukupni troškovi održavanja termoelektrane. Stoga je rukovoditelju nadležnom za održavanje TE Plomin 2 najveći izazov pronaći točku ekonomičnosti između potreba održavanja i troškova.

## 2.6. Proračun troškova

### *Korektivno održavanje*

Troškovi korektivnog održavanja sustava mlina  $C_K$  za promatrano razdoblje eksploatacije  $T$  pri kojem je nastalo  $i = 1$  do  $n$  kvarova mogu se iskazati kao kumulativ troškova utrošenog materijala  $C_M$ , troškova radne snage  $C_R$ , troškova nastalih kao posljedica neraspoloživosti elektrane  $C_N$ , odnosno mogu se opisati sljedećom relacijom:

$$C_K = \sum_{i=1}^n (C_{Mi} + C_{Ri} + C_{Ni}) \text{ [novac]} \quad (2.9.)$$

Troškovi utrošenog materijala  $C_M$  mogu se iskazati kao kumulativ nastalih troškova utrošenog potrošnog materijala  $C_{MM}$  i troškova ugrađenih pričuvnih dijelova ili komponenti  $C_{MD}$ , odnosno mogu se opisati sljedećom relacijom:

$$C_M = C_{MM} + C_{MD} \text{ [novac]} \quad (2.10.)$$

Troškovi radne snage  $C_R$  u skladu s kvalifikacijom angažiranih održavatelja mogu se izraziti kao kumulativna vrijednost troškova specijalista  $C_{RS}$ , troškova visokokvalificiranih radnika  $C_{RV}$  i troškova kvalificiranih radnika  $C_{RK}$ , odnosno mogu se opisati sljedećom relacijom:

$$C_R = C_{RS} + C_{RV} + C_{RK} \text{ [novac]} \quad (2.11.)$$

Troškovi kao posljedica neraspoloživosti elektrane  $C_N$  prikazani su sljedećom relacijom:

$$C_N = (1 - X)P_N \cdot T_K \cdot c_E \text{ [novac]} \quad (2.12.)$$

pri čemu su:

faktor  $X$  – udio smanjenja kapaciteta proizvodnje električne energije zbog kvara, a taj udio u slučaju TE Plomin 2 može poprimiti vrijednosti od 0 do 0,6 [1],  $P_N$  – nazivna električna snaga elektrane [MW] i  $c_E$  – ugovorno utvrđena jedinična cijena neisporučene električne energije između proizvođača i kupca ili penalizacija zbog neisporučene usluge [novac/MWh].

*Troškovi sanacije oštećenja tijekom rada sustava*

Troškovi sanacije oštećenja tijekom rada sustava mlina  $C_S$  za promatrano razdoblje eksploatacije  $T$  pri kojem je nastalo  $i = 1$  do  $n$  oštećenja saniranih bez zaustavljanja tehnološkog procesa mogu se iskazati kao kumulativ troškova utrošenog materijala za sanaciju  $C_{SM}$  i troškova radne snage  $C_R$ , odnosno mogu se opisati sljedećom relacijom:

$$C_S = \sum_{i=1}^n (C_{SMi} + C_{Ri}) \text{ [novac]} \quad (2.13.)$$

U skladu s relacijom 2.13. proizlazi da su u slučaju lokalizacije ili otklanjanja nastalog oštećenja na objektu održavanja, tijekom rada sustava mlina nastali troškovi zbog neraspoloživosti elektrane jednaki nuli.

*Preventivno održavanje*

Troškovi provedbe preventivnog održavanja - remont ili dalje u tekstu remont na sustavu mlina  $C_{PR}$  za promatrano razdoblje eksploatacije  $T$  pri kojem je provedeno  $i = 1$  do  $n$  ciklusa remont mogu se izraziti kao kumulativ troškova materijala  $C_M$  i kumulativ troškova radne snage  $C_R$ , dok se troškovi posljedica neraspoloživosti elektrane ne obračunavaju jer je preventivno održavanje planirana aktivnost, odnosno mogu se opisati sljedećom relacijom:

$$C_{PR} = \sum_{i=1}^n (C_{Mi} + C_{Ri}) \text{ [novac]} \quad (2.14.)$$

Troškovi provedbe preventivnog održavanja - pregled na sustavu mlina  $C_{PP}$  za promatrano razdoblje eksploatacije  $T$  pri kojem je provedeno  $i = 1$  do  $n$  pregleda mogu se izraziti kao kumulativ troškova potrošnog materijala  $C_{MM}$ , troškova radne snage  $C_R$ , odnosno mogu se opisati sljedećom relacijom:

$$C_{PP} = \sum_{i=1}^n (C_{MMi} + C_{Ri}) \text{ [novac]} \quad (2.15.)$$

U skladu s relacijama 2.14. i 2.15. ukupni troškovi preventivnog održavanja  $C_P$  za promatrano razdoblje eksploatacije  $T$  mogu se opisati sljedećom relacijom:

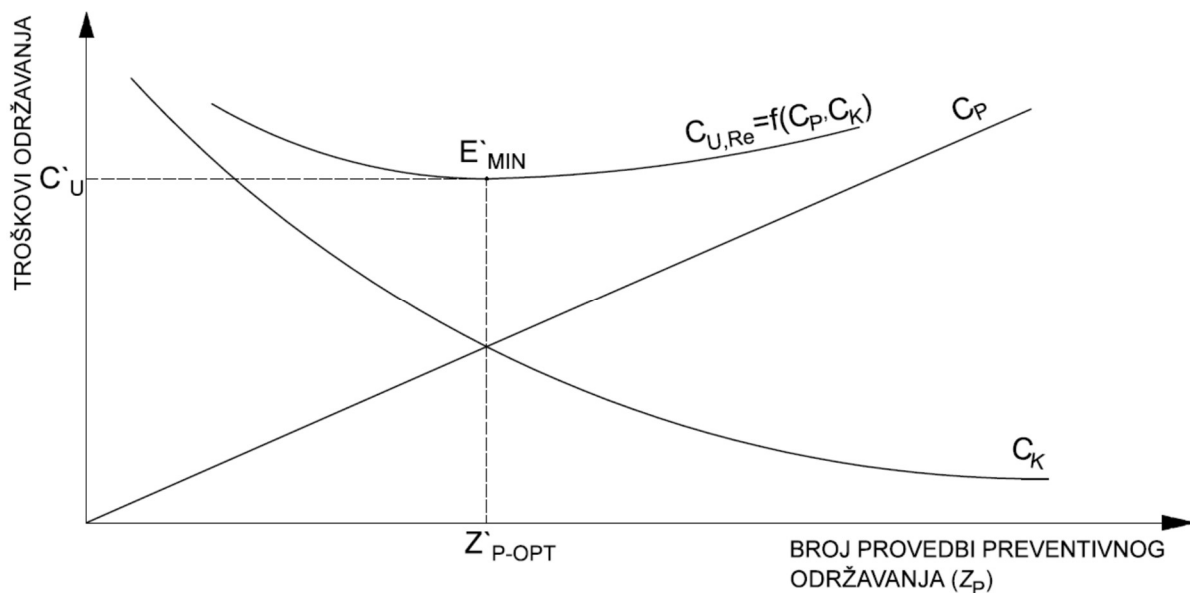
$$C_P = C_{PP} + C_{PR} \text{ [novac]} \quad (2.16.)$$

*Ukupni troškovi održavanja*

Ukupni troškovi održavanja bez provedbe sanacije oštećenja ili troškovi održavanja bez provedbe sanacije oštećenja  $C_{U,Re}$  predstavljaju kumulativ troškova održavanja sustava za promatrano razdoblje eksploatacije  $T$ , opisani su sljedećom relacijom:

$$C_{U,Re} = C_P + C_K \text{ [novac]} \quad (2.17.)$$

Pregled troškova održavanja bez provedbe sanacije oštećenja u funkciji broja provođenja preventivnog održavanja  $Z_P$ , prikazan je na slici 2.22. pri čemu  $E'_{MIN}$  predstavlja točku ekonomičnosti



**Slika 2.22.** Optimizacija troškova održavanja

Ukoliko tehnički sustav omogućava a proces održavanja provodi aktivnosti sanacije oštećenja bez obustave tehnološkog procesa, tada ukupni troškovi održavanja ili troškovi održavanja opisuju se sljedećom relacijom:

$$C_U = C_P + C_K + C_S \text{ [novac]} \quad (2.18.)$$

Događaj provedbe sanacije oštećenja za vrijeme rada sustava hipotetski eliminira događaj kvara odnosno zastoj istog, gdje prema izrazu 2.13. isključuje troškove neisporučene energije. Sukladno tome u poglavlju 3. ove disertacije prikazat će se rezultati istraživanja u svrhu približavanja procesa održavanja prema točki ekonomičnosti  $E_{MIN}$  koja je jednaka optimalnom

---

broju provedbi preventivnih održavanja  $Z_{P-OPT}$ , uzimajući u obzir mogućnost provedbe sanacije nastalih oštećenja tijekom rada sustava. Polazište su predstavljali empirijski podaci o eksploataciji sustava mlina u TE Plomin 2 (prilog A).

### 3. MODEL SUSTAVA MLINA U FUNKCIJI ODRŽAVANJA

Kao što je naglašeno u prethodnom poglavlju, u ovom će se poglavlju predstaviti rezultati istraživanja čija je svrha optimizacija, odnosno pojednostavljeno, biti će riječi o približavanju procesa održavanja prema točki ekonomičnosti  $E_{MIN}$  koja odgovara optimalnom broju provedbi preventivnih održavanja  $Z_{P-OPT}$  uzimajući u obzir mogućnost provedbe sanacije oštećenja tijekom rada sustava. Preventivno održavanje dijeli se u dvije kategorije: održavanje po vremenskom ciklusu, kojeg čine remont i pregledi, i održavanje po stanju, kojeg čine održavanje po stanju s kontrolom parametara i održavanje po stanju s kontrolom razine pouzdanosti. Na stanje mlinova primijenjen je model održavanja po stanju s kontrolom parametara, a na slikama 2.16. do 2.19. prikazana je vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava mlinova TE Plomin 2 u trenutku zastoja.

U prethodnom poglavlju jednako je tako navedeno da je oštećenje određeno kao nesukladnost objekta održavanja u usporedbi s normalnim stanjem uz zadržavanje performansi procesa u okviru specificiranih granica. Važno je naglasiti da su utvrđene dopuštene granice vrijednosti parametara i kritične vrijednosti potrošenosti ili odstupanja od normalnog rada, a premašivanjem tih vrijednosti s velikom će vjerojatnošću doći do kvara ili havarije. Stoga je osim kvarova koji dovode do zastoja sustava mlinova tijekom eksploatacije uočeno da na sustavu mlinova TE Plomin 2 dolazi do oštećenja, pri čemu se oštećenje definira kao odstupanje od normalnog rada sustava, ali u okviru dozvoljenih granica iz aspekta ispravnosti rada sustava i razine prihvatljivosti po utjecaju na okolinu. Oštećenje na objektu održavanja tijekom rada sustava može poprimiti status bez mogućnosti sanacije  $O_{GK}$  ili status s mogućnošću sanacije  $O_{GP}$ .

#### 3.1. Statusi sustava mlinova

Uzimajući u obzir prethodno navedeno, u nastavku se prikazuje model koji se temelji na sljedećim statusima objekta održavanja [8]:

1. objekt održavanja je u točki ispravnosti  $S_{RN}$ ;
2. objekt održavanja je u radu uz prisutnost oštećenja  $S_{RG}$ ;
3. objekt održavanja je u kvaru  $S_{KO}$ ;
4. objekt održavanja je u zastoju radi provedbe preventivnog održavanja  $S_{PO}$ ; ili
5. ispravni objekt održavanja  $S_{ZO}$  je u zastoju.

Svaki status određen je vremenskim intervalom eksploatacije objekta održavanja, kao što je prikazano u tablici 3.1. Bitno je istaknuti da svaki status može prijeći u jedan od ostalih statusa



te je zbog toga bilo važno odrediti vjerojatnost promjene statusa iz točke ispravnosti u status kvara ili u status rada s prisutnošću oštećenja.

**Tablica 3.1.** Status i vrijeme trajanja pojedinog statusa objekta održavanja

Status	Vrijeme trajanja statusa [sat]
Objekt održavanja u točki ispravnosti $S_{RN}$	Vrijeme rada objekta u točki ispravnosti $T_{RN}$
Objekt održavanja u radu uz prisutnost oštećenja $S_{RG}$	Vrijeme rada objekta u radu uz prisutnost oštećenja $T_{RG}$
Zastoj ispravnog sustava $S_{ZO}$	Vrijeme zastoja ispravnog sustava $T_{ZO}$
Objekt održavanja u kvaru $S_{KO}$	Vrijeme korektivnog održavanja $T_{KO}$
Sustav u zastoju radi provedbe preventivnog održavanja $S_{PO}$	Vrijeme preventivnog održavanja $T_{PO}$

U kontekstu određivanja vjerojatnosti promjene statusa u funkciji vremena rada sustava prisutna su ograničenja iz aspekta međusobne zavisnosti nastanka događaja, a oni se očituju na sljedeći način:

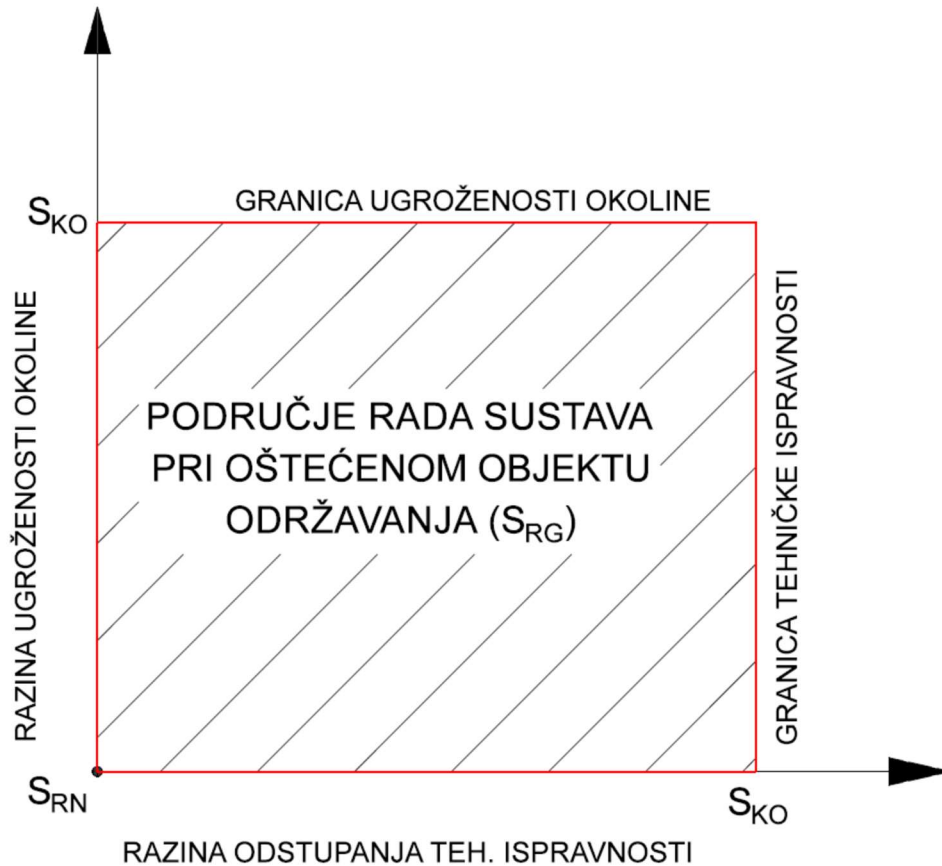
- nastanak kvara na objektu održavanja uvjetuje zastoj sustava mlina,
- nastanak oštećenja na objektu održavanja tretira se kao kvar ako se ne može pristupiti održavanju tijekom njegova rada i ako je došlo do propagacije oštećenja izvan okvira dozvoljenih granica,
- sanacijom nastalog oštećenja na objektu održavanja bez obustave tehnološkog procesa zadržava se razina njegove eksploatacijske pouzdanosti, i
- svi događaji na objektu održavanja međusobno su neovisni.

Pri radu pojedinih objekata održavanja uz prisutnost oštećenja neophodno je sagledati: razinu nastale nesukladnosti s tehnološkog aspekta i razinu utjecaja nastalog oštećenja na okolinu u kojoj se objekt održavanja nalazi. Stoga status razine oštećenja objekta održavanja analizira se dvjema uzročno - posljedičnim komponentama:

- a) prva komponenta (uzročna) – iskazuje razinu odstupanja sustava s obzirom na tehničku ispravnost sustava u kojem je objekt održavanja implementiran. Uzrok je isključivo interni čimbenik, kao što je erozija, zamor, korozija, abrazija (i dr.) materijala, nastao pri obavljanju tehnološkog procesa tijekom njegove eksploatacije.

- b) druga komponenta (posljedična) – iskazuje razinu ugroženosti okoline u kojoj se objekt održavanja nalazi i vrstu medija u tehnološkom procesu. Posljedice za okolinu su istjecanje pregrijane pare, istjecanje vrućeg zraka, istjecanje ugljene prašine i dr.

Ako se komponente (uzročna i posljedična) prikažu u koordinatnom sustavu (slika 3.1.), tada ishodište predstavlja točku ispravnog rada sustava  $S_{RN}$ . Ordinata predstavlja razinu ugroženosti okoline, dok apscisa razinu odstupanja sustava od tehničke ispravnosti.



**Slika 3.1.** Područje rada sustava uz prisutnost oštećenja objekta održavanja

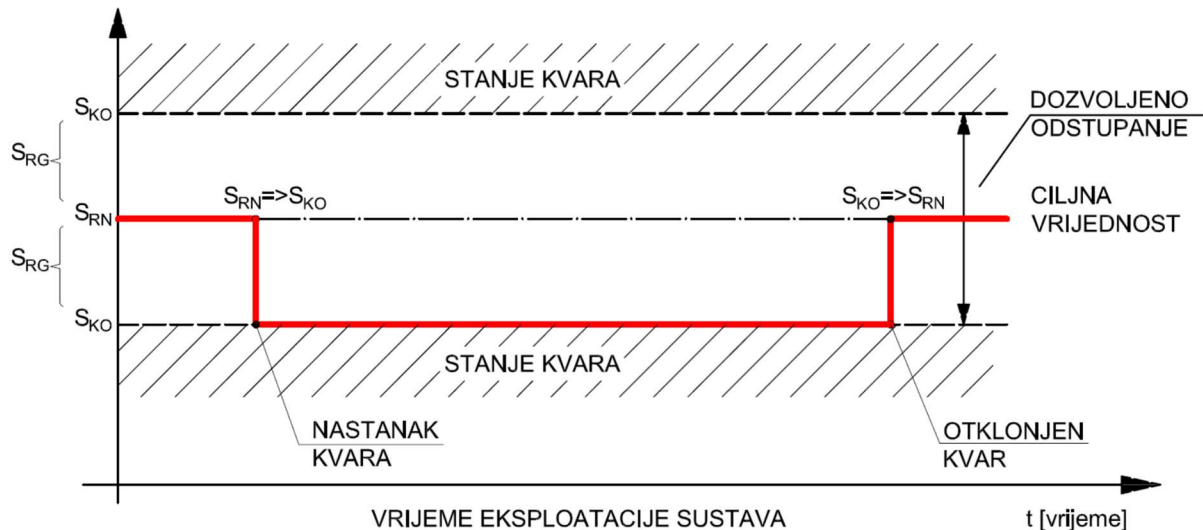
Polazeći od dijagrama razine oštećenja objekta održavanja (slika 3.1), i-ti objekt održavanja u sustavu mlinova može prouzročiti:

- a) zastoj sustava s relativno malom razinom odstupanja od tehničke ispravnosti sustava, ali visokom razinom ugroženosti okoline. Primjer tome je istjecanje ugljene prašine u okolinu na kotlu ili istjecanje pregrijane pare; ili
- b) zastoj sustava s visokom razinom odstupanja tehničke ispravnosti i-tog objekta održavanja bez bitnog utjecaja na okolinu.

Prema tome, kada se sagledava rad termoelektreane, a posebice sustava mlinova povezanog s kotlom i ložištem, svaki objekt održavanja pri nastanku oštećenja mora biti razmatran s pomoću

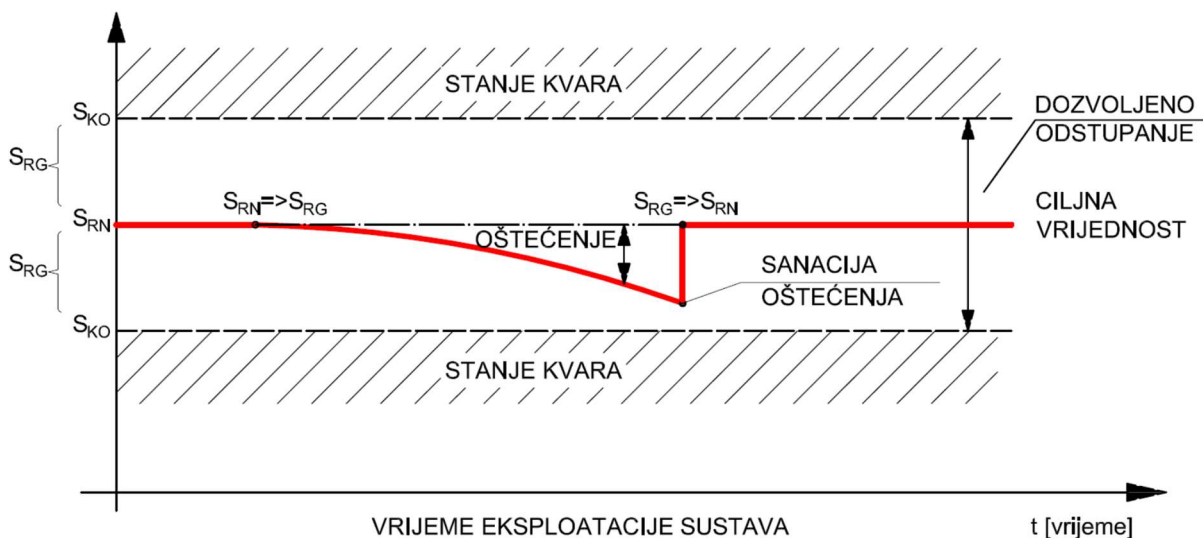
dvije uzročno - posljedične komponente (razina tehničke ispravnosti i razina ugroženosti okoline), pri čemu rad i-tog objekta održavanja s prisutnim oštećenjem osim o razini tehničke ispravnosti sustava ovisi i o uvjetima okoline u koju je smješten, vrsti medija korištenog u procesu i dr. Takav status i-tog objekta održavanja naziva se karakteristični status, a prikaz događaja promjene karakterističnih statusa i-tog objekta održavanja prikazani su na slikama od 3.2. do 3.5. [8].

Na slici 3.2. prikazana je promjena statusa iz ispravnog rada u kvar i obrnuto.



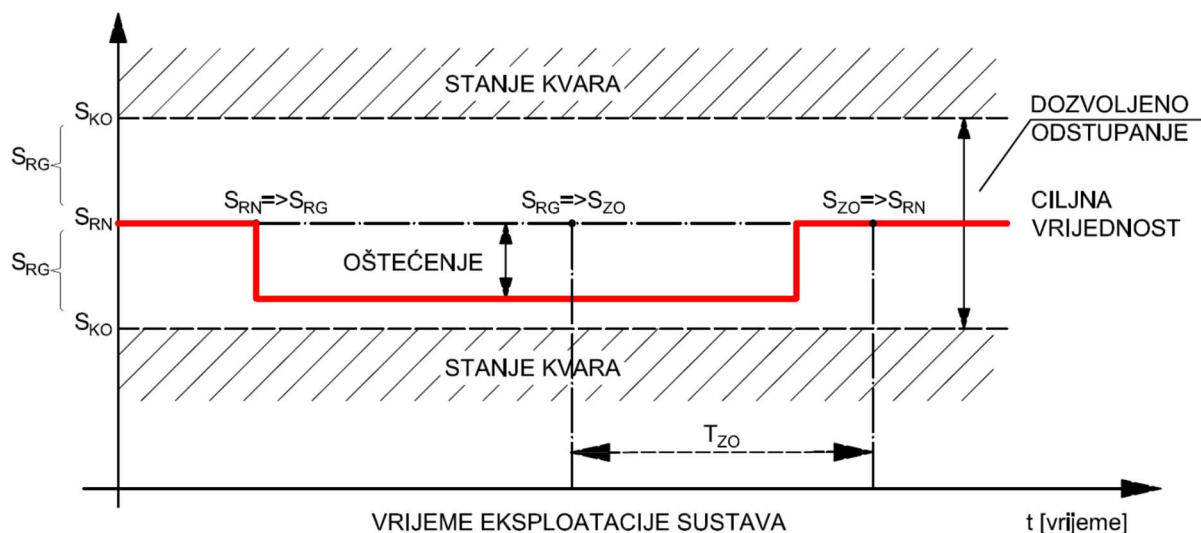
**Slika 3.2.** Promjena statusa iz ispravnog rada u kvar i obrnuto

Na slici 3.3. prikazana je promjena statusa iz ispravnog rada u oštećenje i sanacije oštećenja u radu.



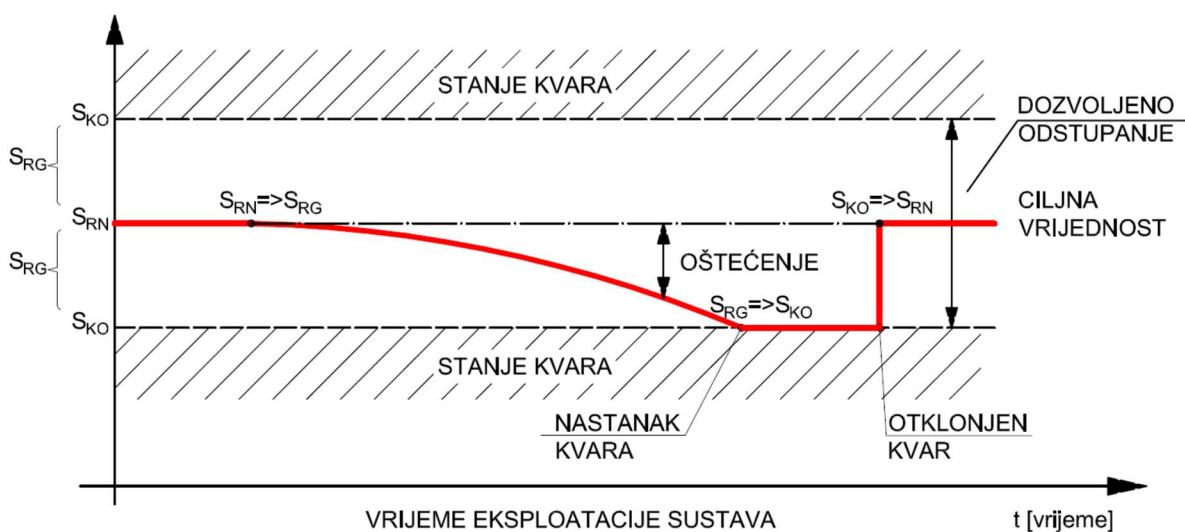
**Slika 3.3.** Promjena statusa od ispravnog rada u oštećenje i sanacija oštećenja u radu

Na slici 3.4. prikazana je promjena statusa iz ispravnog rada u status oštećenja bez progresije njegova razine oštećenja i uz popravak tijekom zastoja prouzročenog neovisnim događajem [9].



**Slika 3.4.** Promjena statusa iz ispravnog rada u status oštećenja bez progresije njegova razine oštećenja uz popravak tijekom zastoja prouzročenoj neovisnim događajem

Na slici 3.5. prikazana je promjena statusa iz ispravnog rada u status oštećenja s brzom progresijom do prelaska donje granice i poprivanja statusa kvara.



**Slika 3.5.** Promjena statusa iz ispravnog rada u status oštećenja uz njegovu progresiju do statusa kvara

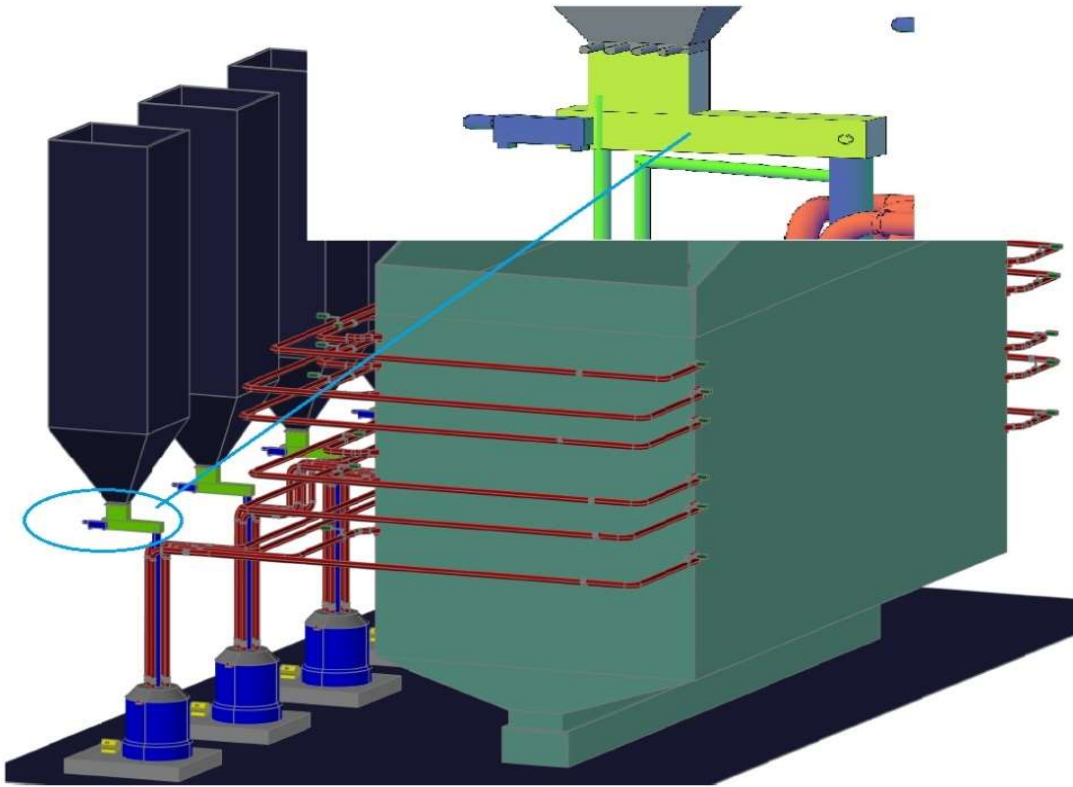
Prema tome, za dostizanje optimalne točke ekonomičnosti održavanja  $E_{MIN}$  nije dovoljno sustav mlinova promatrati samo iz aspekta kvara, već je nužno analizirati i utjecaj oštećenja nastalih na i-tom objektu održavanja te mogućnost sanacije tog objekta tijekom rada sustava kako bi se izbjegao kvar, odnosno nastanak radne neraspoloživosti termoelektrane kao cjeline.

---

### **3.2. Forma za prikupljanje podataka o nastanku događaja kvara i/ili sanacije oštećenja**

U cilju određivanja numeričkog modela tehničkog sustava, nužna je baza relevantnih podataka o vremenima rada objekta održavanja između dva kvara i/ili sanacije oštećenja, vremena zastoja, vremena do dolaska održavatelja, vremena aktivnog provođenja održavanja, vremena preventivnog provođenja održavanja, vremena provođenja sanacije oštećenja i drugo [7]. Uspoređujući broj potrebnih podataka po pojedinom podsustavu sustava mlina radi određivanja numeričkog modela s ukupnim brojem podsustava u svrhu racionalizacije i potvrđivanja postavljenih radnih hipoteza, u ovom radu provedba istraživanja usmjerena je na tri karakteristična podsustava sustava mlina br. 1: podsustav dodavač ugljena – kućište, podsustav padni kanal ugljena i podsustav cjevovod ugljene prašine br. 1. Važno je naglasiti da kvar navedenih podsustava dovodi do zastoja sustava mlina br. 1, a time i radnu nerasplošivost elektrane.

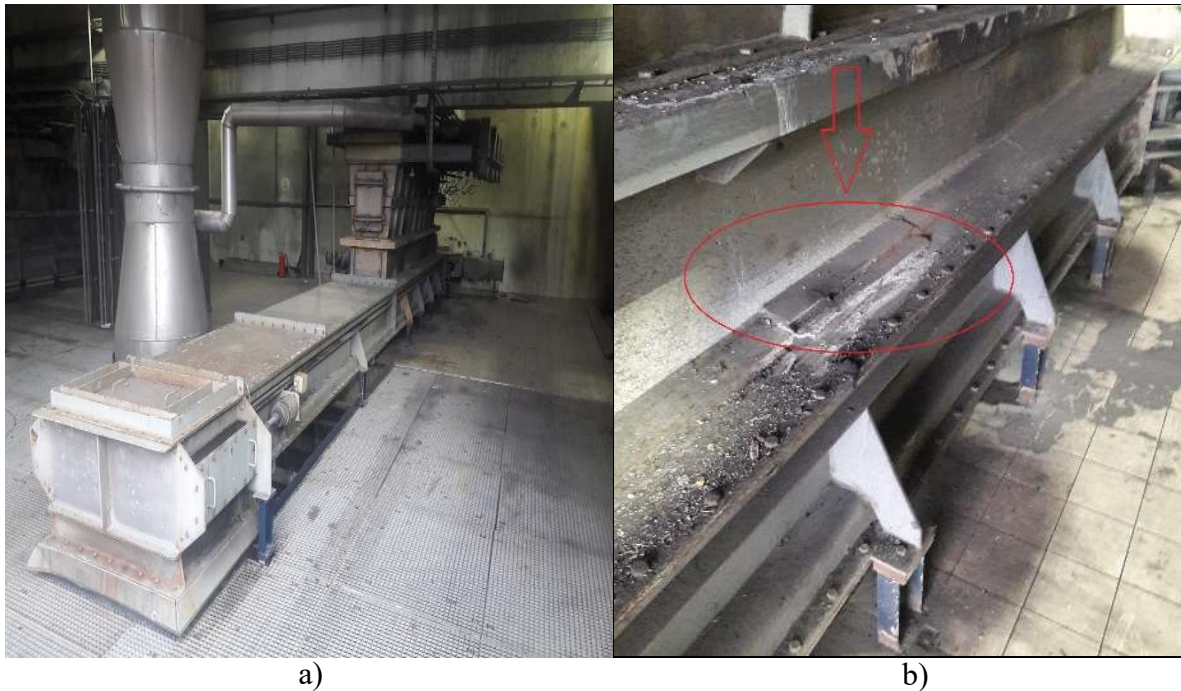
U podsustavu dodavač ugljena – kućište dodavač služi za doziranje ugljena u mlin, kao što je prikazano na slici 3.6. Dodavač ugljena sastoji se od tračnog transportera unutar metalnog kućišta koji pokreće asinkroni motor s frekventnom regulacijom broja okretaja. Također, opremljen je s većim brojem senzora, kao što su davači broja okretaja i senzori visine sloja ugljena na temelju kojih se automatski upravlja tehnološkim procesom doziranja ugljena. Kapacitet dodavača pri doziranju ugljena u mlin je od 6 do 15 t/h [1].



**Slika 3.6.** Dodavač ugljena – skica

Zbog prisutnosti abrazivnog djelovanja ugljena na kućište dodavača taj će dio podsustava biti predmet statističke analize (slika 3.7. a)). Pri radu sustava mlina, svi podsustavi od dodavača ugljena, padnog kanala ugljena, mlina, cjevovoda ugljene prašine, do cjevovoda za dobavu zraka (toplog, hladnog i brtvenog) nalaze se u nadtlaku, što znači da procesni mediji (ugljen, topli zrak, ugljena prašina) izlaze u okolinu kao posljedica kvara ili oštećenja. Nakon nastanka događaja kvara ili oštećenja, održavatelji provode korektivno održavanje ili sanaciju oštećenja. Najčešća korektivna aktivnost je zamjena dijelova oplata dodavača, dok je sanacija oštećenja zavarivanje manjih pločica kojima se sanira popuštanje bez zaustavljanja dodavača (slika 3.7. b)).

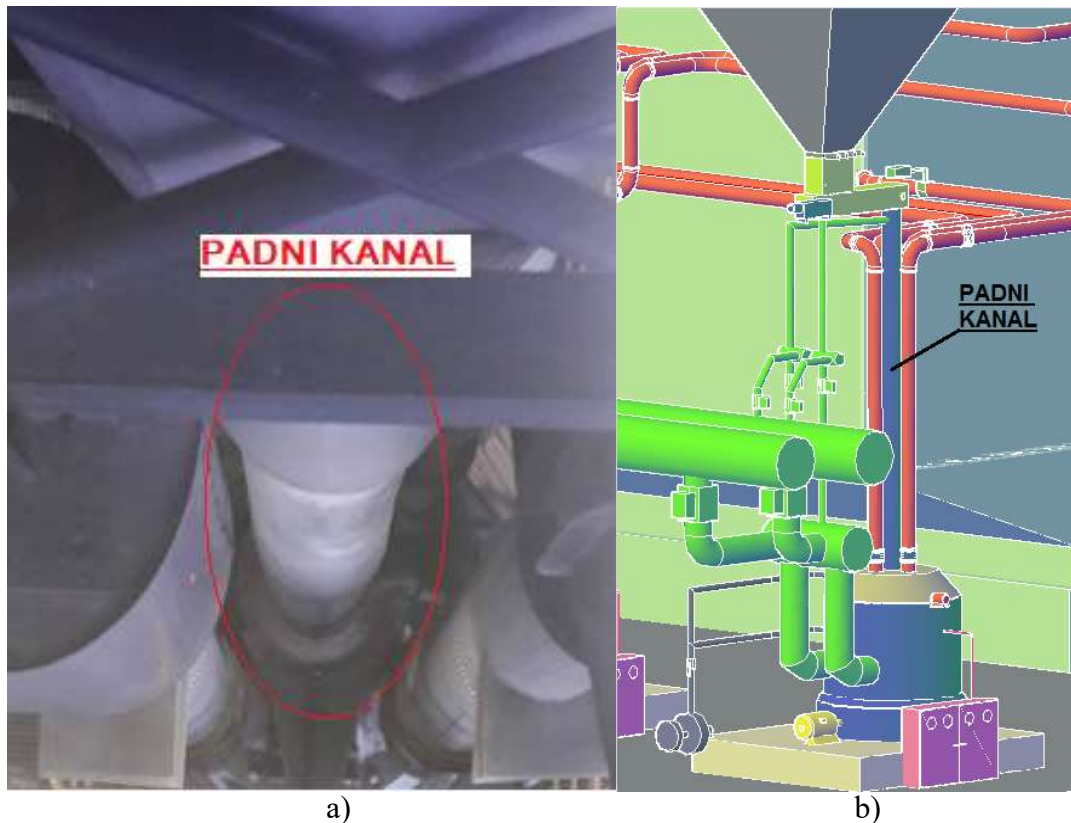




**Slika 3.7.** a) Pod sustav dodavača ugljena-kućište b) Primjer sanacije oštećenja

Važno je naglasiti da se preventivno održavanje - pregledi kućišta dodavača provode svakih 2000 radnih sati, i na temelju zatečenog stanja vrše se zamjene ploča kućišta. Upravo radi toga, nema razlike u planiranim aktivnostima održavatelja između remonta i pregleda dodavača ugljena – kućište osim u nekim izdvojenim situacijama uvjetovanim drugim čimbenicima.

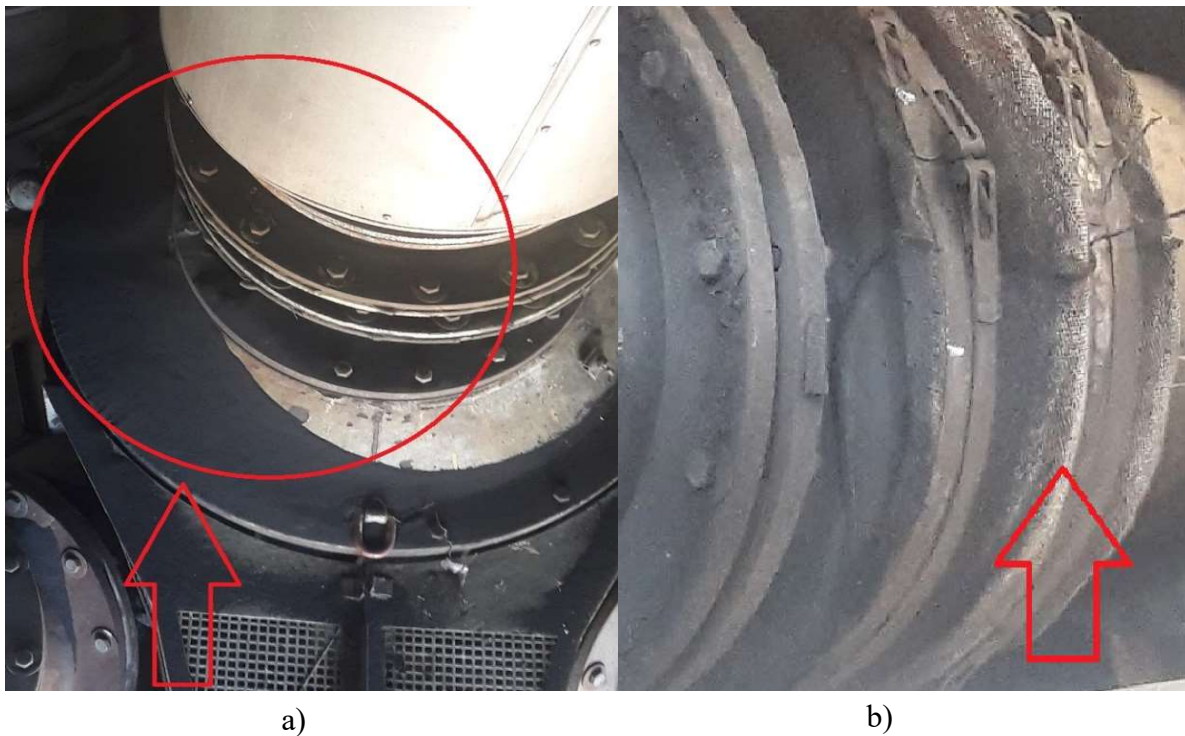
Drugi primjer je podsustav padnog kanala ugljena koji služi za prolaz ugljena iz dodavača ugljena do mlina za ugljen, a dugačak je 6,5 m. Kanal je izveden kao cijev u cijevi, pri čemu između stijenki cijevi struji topli zrak, dok unutar njom cijevi prolazi ugljen [1]. Svrha grijanja padnog kanala je sprečavanje lijepljenja mokrog ugljena za stijenku kanala kako ne bi dolazilo do njegova začepljenja što bi rezultiralo zastojem mlina. Na slikama 3.8. a) i b) prikazan je podsustav padnog kanala ugljena na sustavu mlina i njegova skica.



**Slika 3.8.** a) Padni kanal ugljena, b) Skica padnog kanala

Neposredno prije spajanja kanala na mlin za ugljen, sam kanal postaje kanal s jednom stjenkom (jednostjeni kanal) te je povezan s kompenzatorom čija je funkcija kompenzirati dilataciju metalnih stjenki. S obzirom na abrazivno djelovanje ugljena na stjenke cjevovoda padnog kanala, u nastavku rada provodi se statistička analiza na njegovo propuštanje. Jedna od vrsti propuštanja prikazana je na slici 3.9. a) primjer propuštanja ugljene prašine na kompenzatoru i slici 3.9. b) primjer postavljanja platna u svrhu sanacija propuštanja. I u ovom je primjeru važno naglasiti da se preventivno održavanje - pregledi padnog kanala ugljena provode svakih 2000 radnih sati i na temelju zatečenog stanja vrše se zamjene dotrajalih dijelova. Upravo zbog toga nema razlike između remonta i preventivnog pregleda u pogledu planiranih aktivnosti održavatelja.

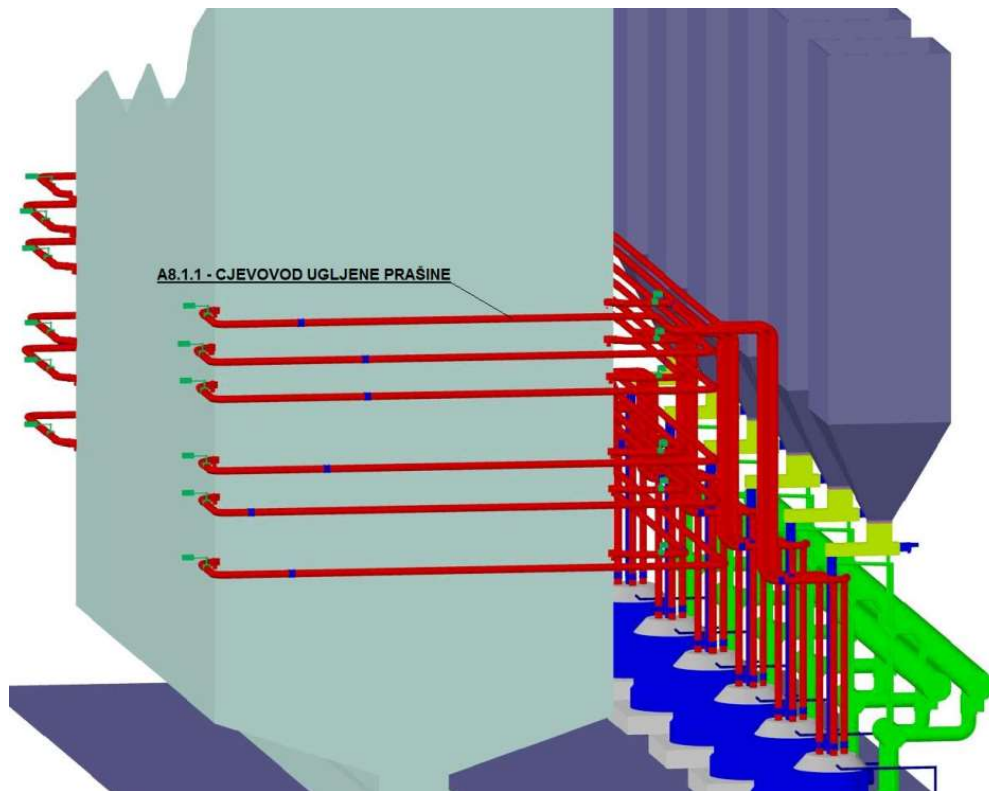




**Slika 3.9.** a) Propuštanja ugljene prašine na kompenzatoru b) Postavljanje platna u svrhu sanacije propuštanja

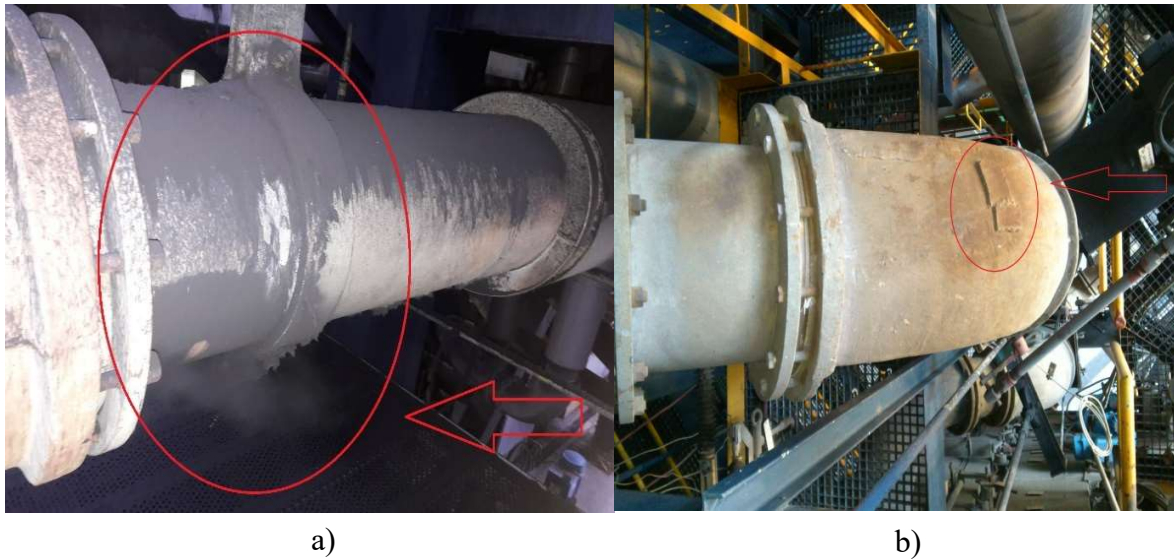
Korektivne aktivnosti na padnom kanalu su zamjena kompenzatora, zamjena cjevovoda između kompenzatora i ulaza u mlin, dok su primjeri sanacije oštećenja omatanje kompenzatora posebnim platnom ili postavljanje metalnih pločica na cjevovodu te njihovo zavarivanje ili povezivanje drugim postupkom uz korištenje specijalnih materijala.

Kao treći primjer navodi se podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 (slika 3.10.). Svaki mlin ima četiri cjevovoda kojima se ugljena prašina iz mlina transportira u ložište kotla [1]. Mlin može raditi samo ako su svi cjevovodi u funkciji. Količina ugljene prašine koja se transportira ovisi o količini doziranja ugljena i količini zraka potrebnog za izgaranje te je sve regulirano automatski u skladu s programom za vođenje loženja termoelektrane. Temperatura ugljene prašine kreće se oko 90 °C, dok je protok ugljene prašine unutar pojedinog cjevovoda od 4500 do 6000 m<sup>3</sup>/h pri gustoći smjese od 0,6 kg/m<sup>3</sup>.



**Slika 3.10.** Skica podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 na sustavu mlina br. 1

I u ovom slučaju do zastoja sustava mlina dolazi zbog propuštanja ugljene prašine u okolinu. Do propuštanja najčešće dolazi zbog abrazivnog djelovanja ugljena, posebice na zavojima cjevovoda. Upravo propuštanja i sanacija ili korekcija bit će predmet ove statističke analize na cjevovodu ugljene prašine br. 1. Na slikama 3.11. a) i b) prikazano je propuštanje ugljene prašine na dijelu cjevovoda ugljene prašine i primjer zavarene pločice u svrhu sanacije propuštanja bez zaustavljanja sustava mlina. Važno je naglasiti da se od 2015. u TE Plomin 2 u praksi više ne provodi sanacija zavarivanjem dodatnih ploča na cjevovoda ugljene prašine tijekom njegova rada. Baza s relevantnim podacima u ovom radu prikupljena je za razdoblje od 2005. do 2013. godine. Danas je praksa izvršiti sanaciju propuštanja omotavanjem posebnog platna ili postavljanjem metalnih pločica sa silikonskim brtvljenjem i obuhvatnim zatezačima. Kao i u slučaju prethodno navedenih podsustava, važno je naglasiti da se preventivno održavanje - pregledi cjevovoda ugljene prašine provode svakih 2000 radnih sati i na temelju zatečenog stanja vrše se zamjene dotrajalih dijelova. Primjer korektivne zamjene cjevovoda ugljene prašine prikazan je na slici 3.12. Provedba preventivnih aktivnosti bilo tijekom preventivnog održavanja - pregled bilo tijekom remonta odvija se potpuno jednako, u ciklusu tromjesečnog pregleda, pri čemu se vrši ultrazvučno mjerenje debljine stjenke cjevovoda na potencijalno kritičnim mjestima i na temelju dobivenih vrijednosti preventivno se zamjenjuje koljeno ili komad cijevi.

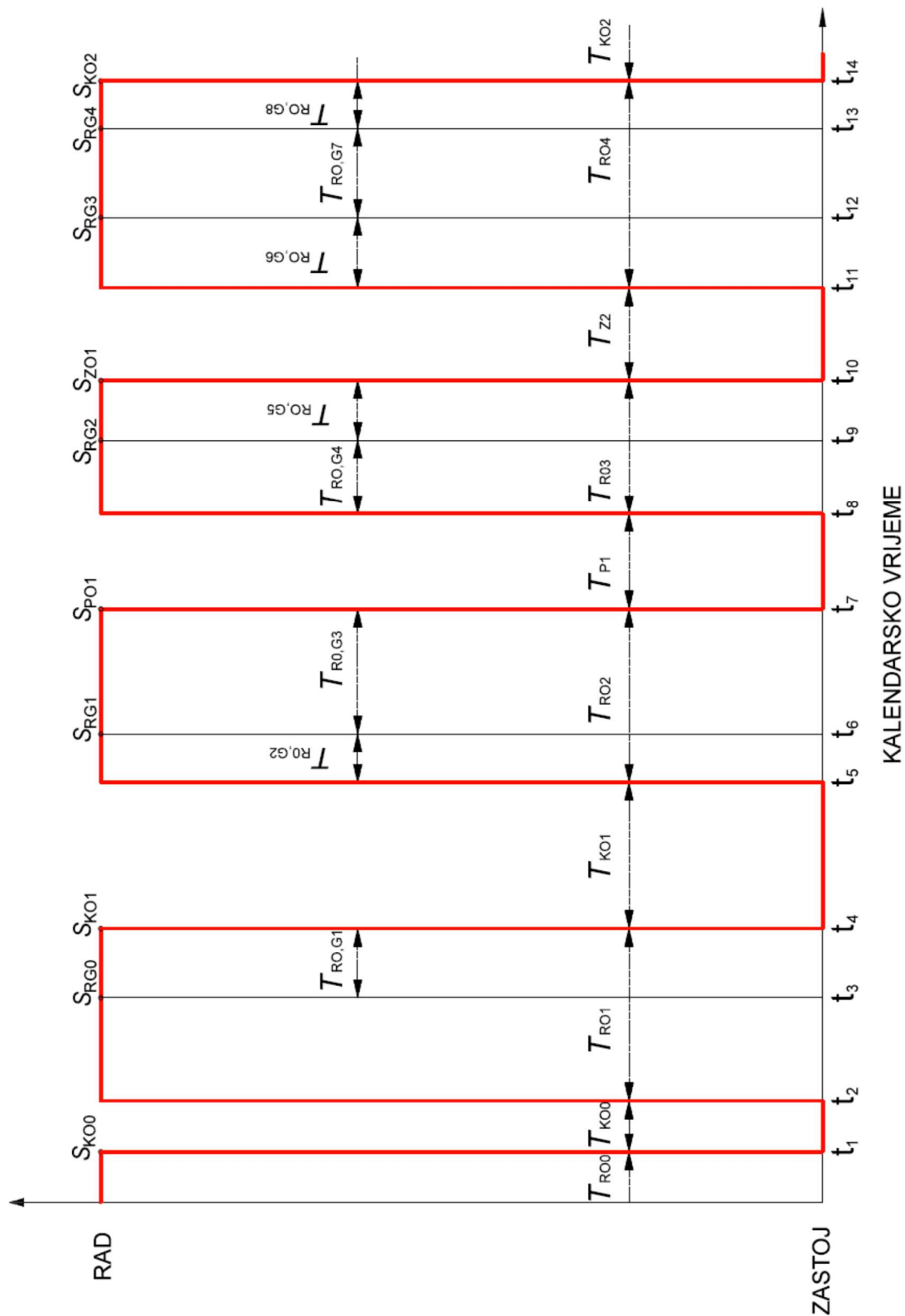


**Slika 3.11.** a) Prikaz propuštanja ugljene prašine na dijelu cjevovoda ugljene prašine b) Prikaz zavarene pločice na cjevovodu ugljene prašine



**Slika 3.12.** Provedba korektivnog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine

Na slici 3.13. prikazan je primjer evidencije događaja za objekt održavanja u funkciji kalendarskog vremena. Ovako prikupljene evidencije događaja u razdoblju eksploatacije predstavljaju osnovu za provedbu statističke analize [7].



Slika 3.13. Primjer evidencije događaja za objekt održavanja u funkciji kalendarskog vremena



U tablici 3.2. prikazana su vremena koja kumulativno sačinjavaju vrijeme između dva kvara  $T_{RK}$ .

**Tablica 3.2.** Vremena između dva kvara objekta održavanja

Oznaka kvara	Vrijeme između dva kvara	Izvor podatka za utvrđivanje vremena ( $T_{RKi}$ )
$S_{KO1}$	$T_{RK1}=T_{R1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>prikupljanje podataka: po proceduri 2 (sl. 2.11., poglavlje 2.4.1.)</li> <li>arhiva podataka: dnevni izvještaj pogona [17]</li> </ul>
$S_{KO2}$	$T_{RK2}=T_{R2}+T_{R3}+T_{R4}$	

U tablici 3.3. prikazana su vremena koja kumulativno sačinjavaju vrijeme između dvije sanacije oštećenja objekta održavanja  $T_{RO}$ .

**Tablica 3.3.** Vremena između dvije sanacije oštećenja objekta održavanja

Oznaka sanacije oštećenja	Vrijeme između dvije sanacije oštećenja	Izvor podatka za utvrđivanje vremena $T_{ROi}$
$S_{RG1}$	$T_{RO1}=T_{R,G1}+ T_{R,G2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>prikupljanje podataka: po proceduri 1.1. (sl. 2.21., poglavlje 2.4.3.)</li> <li>arhiva podataka: dnevni izvještaj pogona [17]</li> </ul>
$S_{RG2}$	$T_{RO2}=T_{R,G3}+ T_{R,G4}$	
$S_{RG3}$	$T_{RO3}= T_{R,G5}+ T_{R,G6}$	
$S_{RG4}$	$T_{RO4}=T_{R,G7}$	

U tablici 3.4. prikazana su vremena između dva događaja  $T_{RIi}$ , neovisno o tome radi li se o kvaru ili oštećenju.

**Tablica 3.4.** Vremena između dva događaja (kvar ili sanacija oštećenja) objekta održavanja

Oznaka događaja (kvar ili sanacija oštećenja)	Vrijeme između dva događaja (kvar ili sanacija oštećenja)	Izvor podatka za utvrđivanje vremena ( $T_{RIi}$ )
$S_{N1}=S_{KO1}$	$T_{RI1}=T_{R1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>prikupljanje podataka: po proceduri 2 (sl. 2.11., poglavlje 2.4.1.)</li> <li>prikupljanje podataka: po proceduri 1.1. (sl. 2.21., poglavlje 2.4.3.)</li> <li>arhiva podataka: dnevni izvještaj pogona [17]</li> </ul>
$S_{N2}=S_{RG1}$	$T_{RI2}=T_{R,G2}$	
$S_{N3}=S_{RG2}$	$T_{RI3}=T_{R,G4}$	
$S_{N4}=S_{RG3}$	$T_{RI4}= T_{R,G5}+ T_{R,G6}$	
$S_{N5}=S_{RG4}$	$T_{RI5}=T_{R,G7}$	
$S_{N6}=S_{KO2}$	$T_{RI6}=T_{R,G8}$	

Kao što je vidljivo u prethodnim tablicama, vremena karakterističnih događaja prikupljaju se po utvrđenoj proceduri i zapisuju u dnevni izvještaj pogona [17] i programski alat za sustavno

upravljanje podacima održavanja [43] te se na taj način arhiviraju. U prilogu B prikazan je ogledni primjer obrasca za prikupljanje karakterističnih podataka u svrhe provedbe statističke analize.

### 3.3. Obrada i analiza prikupljenih podataka

U svrhu potvrđivanja hipoteza ovog rada odabrana metodologija može se prikazati u dvije faze. Prva faza obuhvaća prikupljanje empirijskih podataka koji opisuju vremena nastanka događaja kao što su kvar ili oštećenje nastalih na elementu, podsustavu i sustavu složenog tehničkog sustava tijekom njegove eksploatacije. Važno je naglasiti da podaci vremena nastanka događaja predstavljaju vremena rada promatrane komponente ili podsustava ili sustava od zadnjeg događaja i predstavljaju neovisan uzorak.

Druga je faza statistička obrada podataka, odnosno određivanje teorijskih funkcija raspodjele vjerojatnosti na temelju uzorka odnosno empirijskih podataka na razini signifikantnosti  $\alpha = 0,05$ . Upravo se u tu svrhu u ovom radu upotrebljava programski alat Minitab 16 [62].

Programski paket Minitab analizira empirijske podatke koristeći se Anderson-Darling statističkim testom kojim se ovisno o veličini uzorka primjenjuje metoda procjene najmanjih kvadrata ili metoda procjene najveće vjerodostojnosti. Anderson-Darling statistički test (AD) mjeri koliko su precizno empirijski podaci usklađeni s pojedinom teoretskom raspodjelom, dok je Anderson-Darling statistika (AD\*) mjera udaljenosti točaka koje predstavljaju izmjerene podatke od odgovarajuće linije na grafu vjerojatnosti. Što je vrijednost AD/AD\* manja, to su izmjereni podaci preciznije usklađeni s pretpostavljenom raspodjelom. Za razliku od ostalih kvantitativnih testova ocjene prilagodbe podataka, Anderson-Darling test ističe se većom osjetljivošću na odstupanja u repovima raspodjele [14]. Program pri primjeni iscrtavanja funkcija raspodjela omogućuje i izračun prilagođene Anderson-Darling statistike (AD\*) uz mogućnost odabira metode u skladu s veličinom uzorka. Uvriježena je praksa da se za uzorke  $n > 30$  odabire metoda procjene najmanjih kvadrata uz izračun Pearsonovog koeficijenta korelacije, dok se za uzorke  $5 < n < 30$  odabire metoda procjene najveće vjerodostojnosti.

Hipoteze za Anderson-Darling test su sljedeće:

- $H_0$  – uzorak je usklađen s određenom razdiobom;
- $H_1$  – uzorak nije usklađen s određenom razdiobom.

Odluka o tome prihvaća li se početna hipoteza  $H_0$  donosi se s pomoću računanja  $p$  - vrijednosti, pri čemu se  $p$  - vrijednost izračunava putem relacija definiranih postupkom Anderson-Darling

---

testa.  $p$  - vrijednost izražava mjeru snage dokaza u podacima nasuprot  $H_0$ . Što je  $p$  - vrijednost manja, jači je dokaz za odbacivanje  $H_0$ . Također, programski paket Minitab na grafu vjerojatnosti grafički prikazuje raspodjelu uzorka u usporedbi s teoretskom linijom pretpostavljene teoretske raspodjele vjerojatnosti uz vidljive granice intervala. Graf vjerojatnosti sastoji se od srednje linije koja predstavlja očekivani postotak raspodjele koja se temelji na procjeni najveće vjerodostojnosti i dviju linija intervala pouzdanosti. Lijeva krivulja predstavlja donje granice intervala pouzdanosti, a desna krivulja gornje granice intervala pouzdanosti. Sintetizirajući rezultate analiziranog uzorka, moguće da više teoretskih raspodjela ispunjava kriterije za prihvaćanje nulte hipoteze. Upravo se radi toga kao dodatni kriterij odabire ona raspodjela koja se najčešće upotrebljava u toj industriji, ona koja polučuje najkonzervativnije rezultate ili najjednostavnija raspodjela s najmanjim brojem parametara.

### 3.3.1. Prikupljanje empirijskih podataka

Kao što je prethodno navedeno, prva faza temelji se na prikupljanju empirijskih podataka. U tablici 3.5. prikazani su empirijski podaci za analizu na podsustavu padnog kanala ugljena, u tablici 3.6. prikazani su empirijski podaci za podsustav dodavača ugljena – kućište, a empirijski podaci za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 prikazani su u tablici 3.7.

**Tablica 3.5.** Empirijski podaci za statističku analizu na podsustavu padnog kanala ugljena

Redni broj dogadaja (kvara ili sanacija)	$N_i = S_{RNi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$K_i = S_{KOi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$G_i = S_{RGi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$T_{KLi}$ [sati]	$T_{KAi}$ [sati]	$T_{Ki}$ [sati]	$T_{SLi}$ [sati]	$T_{SAi}$ [sati]	$T_{Si}$ [sati]
1	3481		3481				0,5	1,8	2,3
2	4749		4749				0,7	2,5	3,2
3	6470	6470		2,9	1	3,9			
4	2498		8968				2,5	3,5	6,0
5	5194		5194				11,0	3,0	14,0
6	1908	9600		19,1	6	25,1			
7	3522		13 122				0,5	3,5	4,0
8	2687	6209		9,0	9	18,0			
9	2365	2365		4,2	8	12,2			
10	2333	2333		32,1	2,5	34,6			
11	3820	3820		7,9	3	10,9			
12	2751		17 478				45,8	2,0	47,8
13	5576		5576				19,9	3,3	23,3



**Tablica 3.6.** Empirijski podaci za statističku analizu na podsustavu dodavača  
ugljena – kućište

Redni broj događaja (kvara ili sanacija)	$N_i = S_{RNi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$K_i = S_{KOi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$G_i = S_{RGi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$T_{KLi}$ [sati]	$T_{KAi}$ [sati]	$T_{Ki}$ [sati]	$T_{SLi}$ [sati]	$T_{SAi}$ [sati]	$T_{Si}$ [sati]
1	1127	1127		16,4	3,0	19,4			
2	707		707				6,9	3,3	10,2
3	697		697				6,2	3,0	9,2
4	303		303				40,1	1,7	41,8
5	117		117				18,4	2,3	20,7
6	730	3681		1,2	2,0	3,2			
7	1634		5315				6,9	1,6	8,5
8	1662		1662				3,9	3,0	6,9
9	670	3966		5,6	2,5	8,1			
10	1160		5126				1,7	4,0	5,7
11	10 155	11 315		16,7	2,3	18,9			
12	5557		16 872				2,9	4,5	7,4
13	997		997				2,8	11,0	13,8
14	5046		5046				5,6	4,5	10,1
15	1293	12 893		1,3	3,5	4,8			
16	4563		17 456				33,2	2,5	35,7
17	2318	6881		1,8	4,2	6,0			
18	2200		9081				1,7	3,0	4,7
19	2012		2012				14,1	6,5	20,6
20	452		452				20,0	3,5	23,5
21	4200	8864		6,9	2,0	8,9			
22	6394		6394				24,8	2,5	27,3

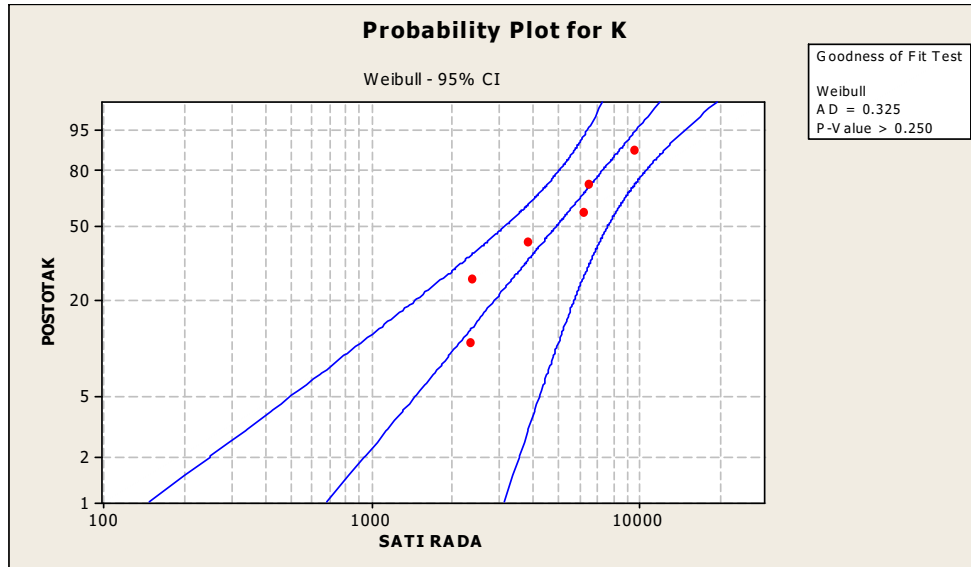
**Tablica 3.7.** Empirijski podaci za statističku analizu na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1

Redni broj dogadaja (kvara ili sanacija)	$N_i = S_{RNi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$K_i = S_{KOi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$G_i = S_{RGi}$ $T_{Ri}$ [sati]	$T_{KLi}$ [sati]	$T_{KAi}$ [sati]	$T_{Ki}$ [sati]	$T_{SLi}$ [sati]	$T_{SAi}$ [sati]	$T_{Si}$ [sati]
1	6843	6843		8,7	6,4	15,1			
2	2639	2639		7,4	8,9	16,3			
3	537	537		1,5	4,5	6,0			
4	3176		13 196				4,6	3,2	7,8
5	5396	8572		3,2	12,3	15,5			
6	1265	1265		6,7	10,1	16,8			
7	7542		14 203				8,9	1,5	10,4
8	261	7803		5,4	7,4	12,8			
9	5557	5557		3,9	2,5	6,4			
10	9876	9876		14,9	7,6	22,5			
11	2333		17 765				6,7	2,7	9,4
12	3013		3013				1,3	4,4	5,7
13	7997	13 343		4,7	5,3	10,0			
14	1978		9975				13,1	1,7	14,8
15	8963	10 941		7,2	11,7	18,9			
16	3008	3008		3,1	6,5	9,6			
17	1551	1551		16,3	9,9	26,2			

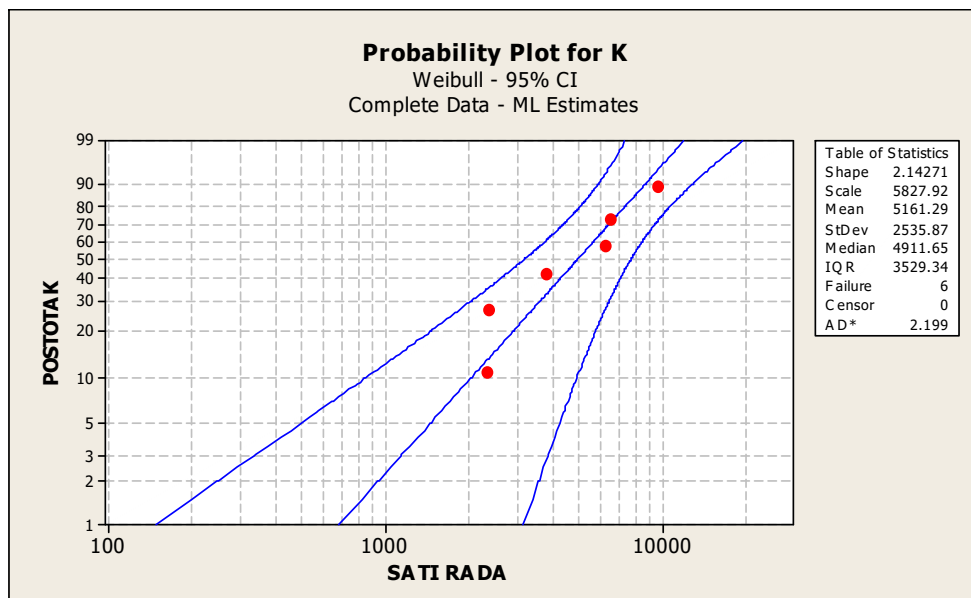
Na temelju prikupljenih empirijskih podataka kojima se opisuju vremena nastanka događaja kao što su kvar ili sanacija oštećenja, pristupa se statističkoj obradi podataka, odnosno određivanju teorijskih funkcija raspodjele vjerojatnosti na temelju uzorka / empirijskih podataka na razini signifikantnosti  $\alpha = 0,05$ . U tu svrhu upotrebljava se programski alat Minitab 16.

### 3.3.2. Statistička obrada podataka za podsustav padnog kanala ugljena

Statistička obrada podataka provedena je na temelju tablice 3.5. za podsustav padnog kanala ugljena uz upotrebu programskog alata Minitab 16. Prva statistička obrada provedena je za slučaj događaja kvara ( $K = S_{KO}$ ) i prikazana je na slici 3.14. Njome se potvrđuje da vjerojatnost pojave kvara najbolje opisuje Weibullova raspodjela, dok su na slici 3.15. dani parametri raspodjele.



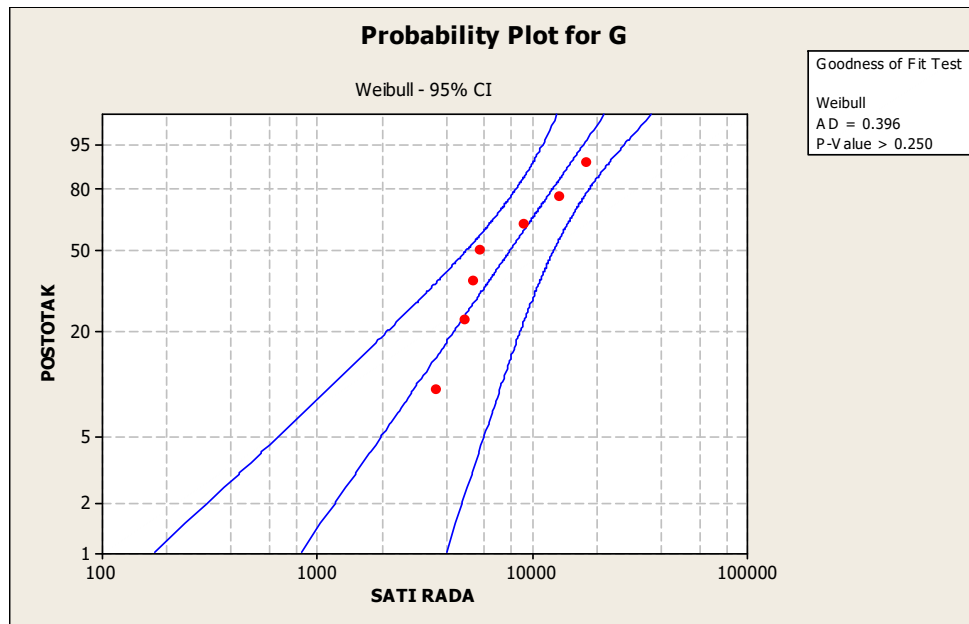
Slika 3.14. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja kvara



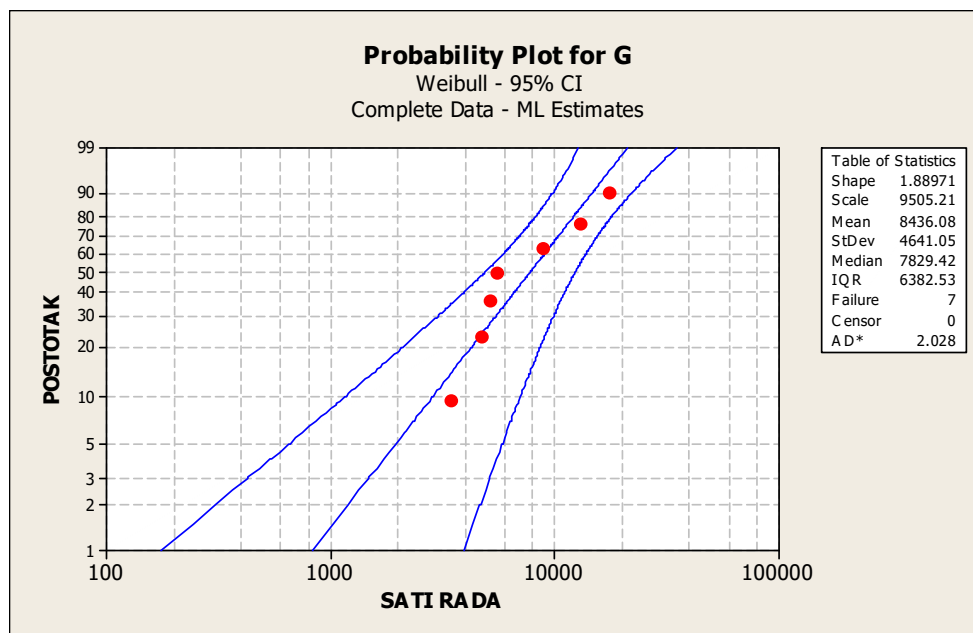
Slika 3.15. Parametri Weibullove raspodjele

Na temelju dobivenih rezultata, očekivano vrijeme rada podsustava padnog kanala ugljena do nastanka kvara je  $E_R(T) = 5161,29$  sati = 215,05 dana.

Druga statistička obrada izvršena je na slučaju sanacije oštećenja ( $G = S_{RG}$ ) i prikazana je na slici 3.16. Njome se potvrđuje da vjerojatnost pojave sanacije oštećenja u radu najbolje opisuje Weibullova raspodjela, dok su na slici 3.17. dani parametri raspodjele.



Slika 3.16. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja sanacije oštećenja

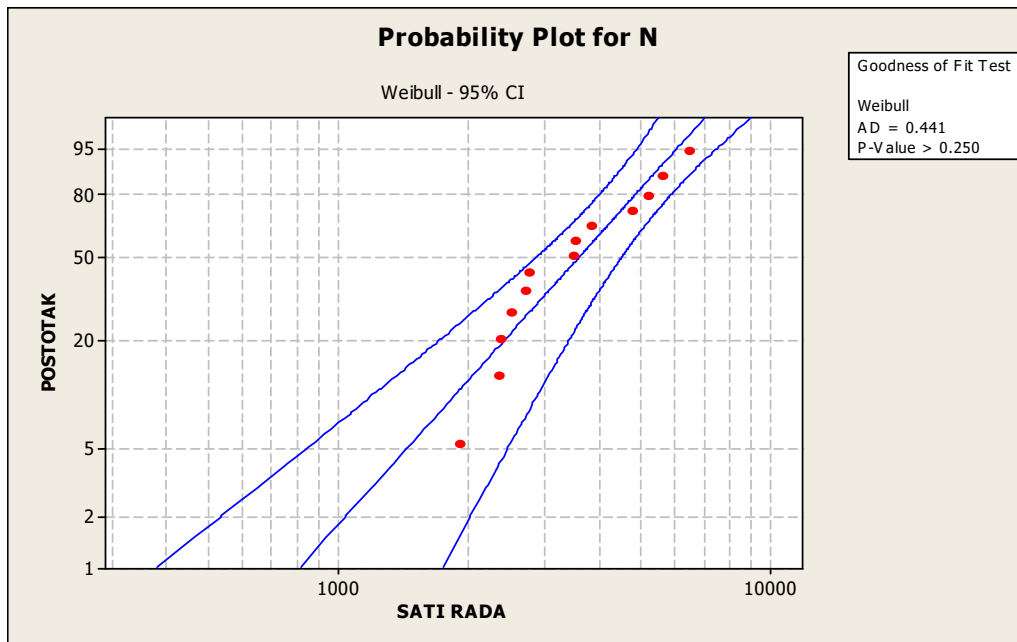


Slika 3.17. Parametri Weibullove raspodjele

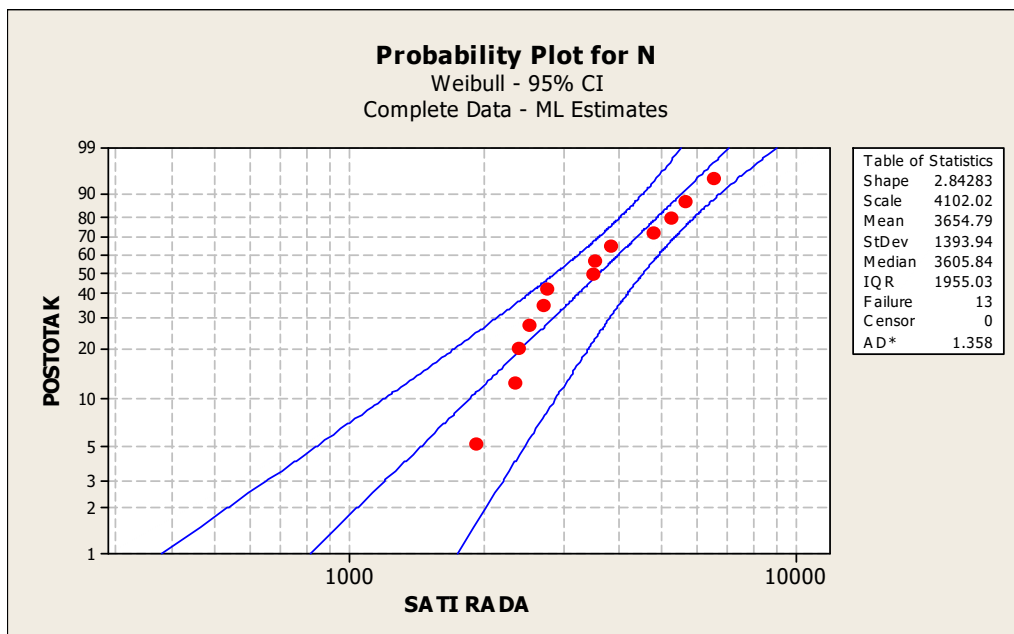
Očekivano vrijeme rada sustava do nastanka sanacije oštećenja na podsustavu padnog kanala ugljena je  $E_G(T) = 8436,08$  sati = 351,5 dana.

Treća statistička obrada provedena je na slučaju nastanka jednog od događaja: kvar ili sanacija oštećenja ( $N = S_{KO}$  ili  $N = S_{RG}$ ) i prikazana je na slici 3.18. Njome se potvrđuje da vjerojatnost

pojave jednog od događaja najbolje opisuje Weibullova raspodjela, dok su na slici 3.19. dani parametri raspodjele.



Slika 3.18. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja događaja

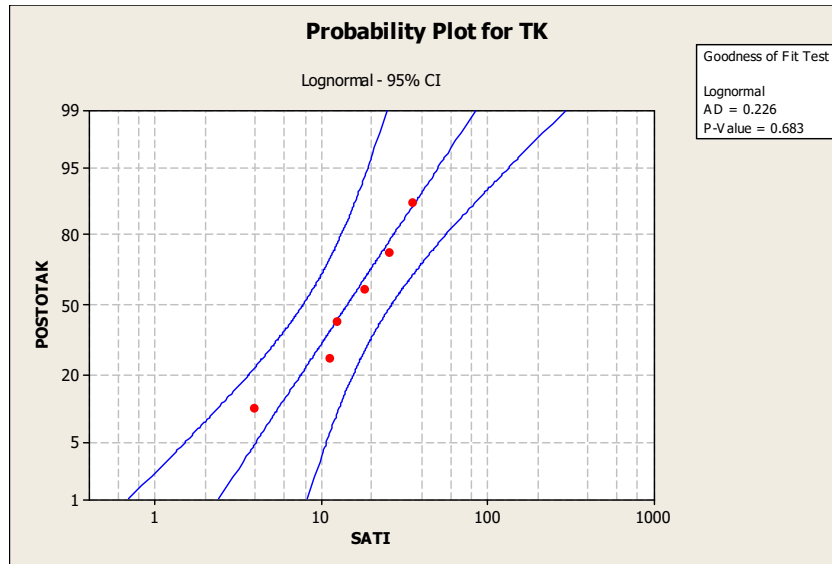


Slika 3.19. Parametri Weibullove raspodjele

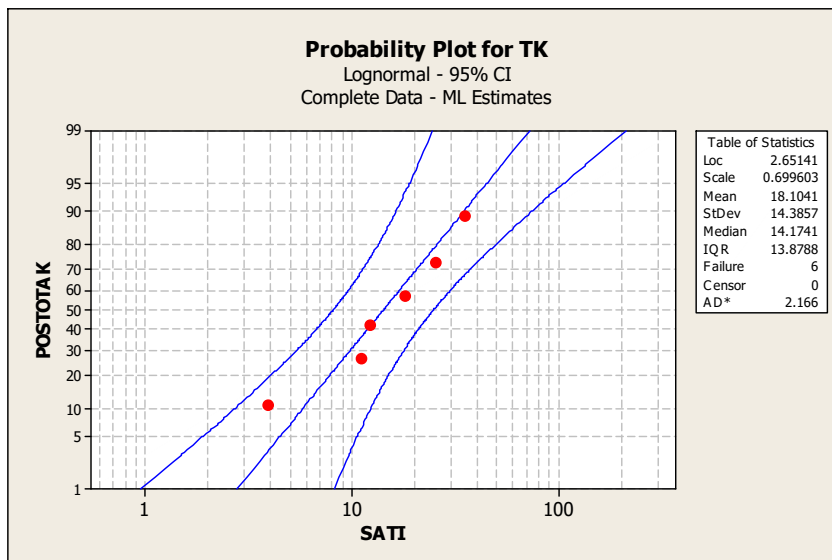
Očekivano vrijeme rada podsustava padnog kanala ugljena do nastanka događaja kvara ili sanacije oštećenja je  $E_N(T) = 3654,79$  sati = 152,28 dana. U tablici 3.8. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu padnog kanala ugljena.

*Korektivno održavanje podsustava padnog kanala ugljena*

Četvrta statistička obrada izvršena je na slučaju određivanja funkcije pogodnosti održavanja pri podsustavu padnog kanala i prikazana je na slici 3.20. Njome se potvrđuje da tu vjerojatnost najbolje opisuju log-normalna raspodjela, dok su na slici 3.21. dani parametri raspodjele.

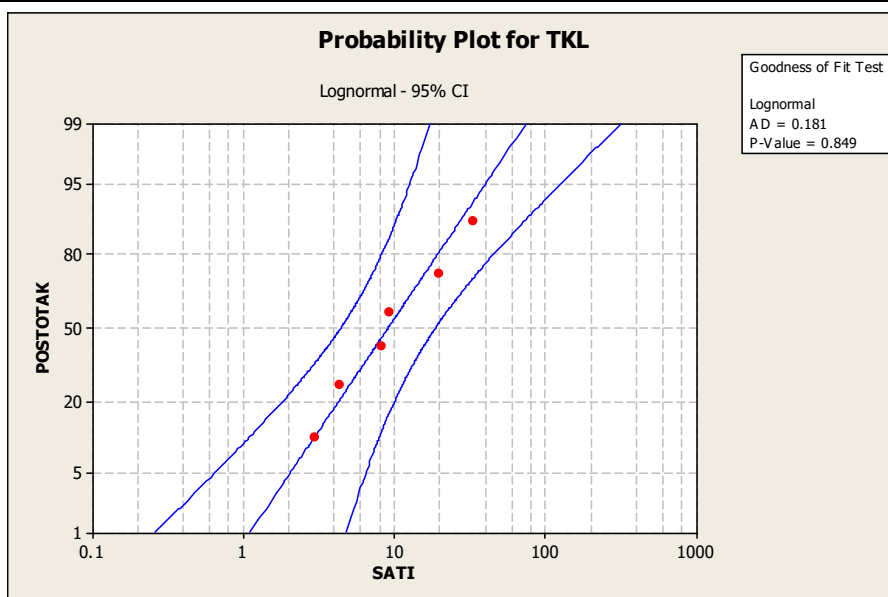


**Slika 3.20.** Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti održavanja

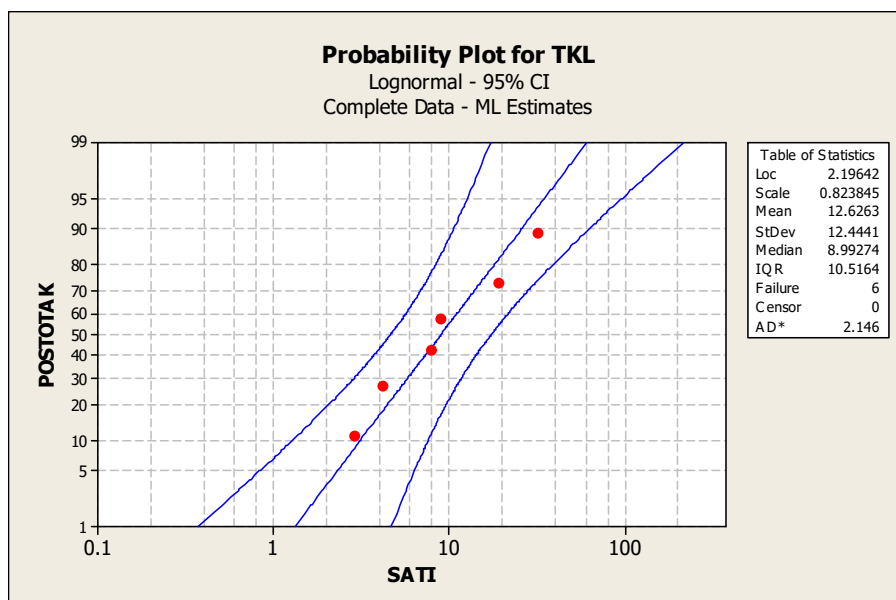


**Slika 3.21.** Parametri log-normalne raspodjele

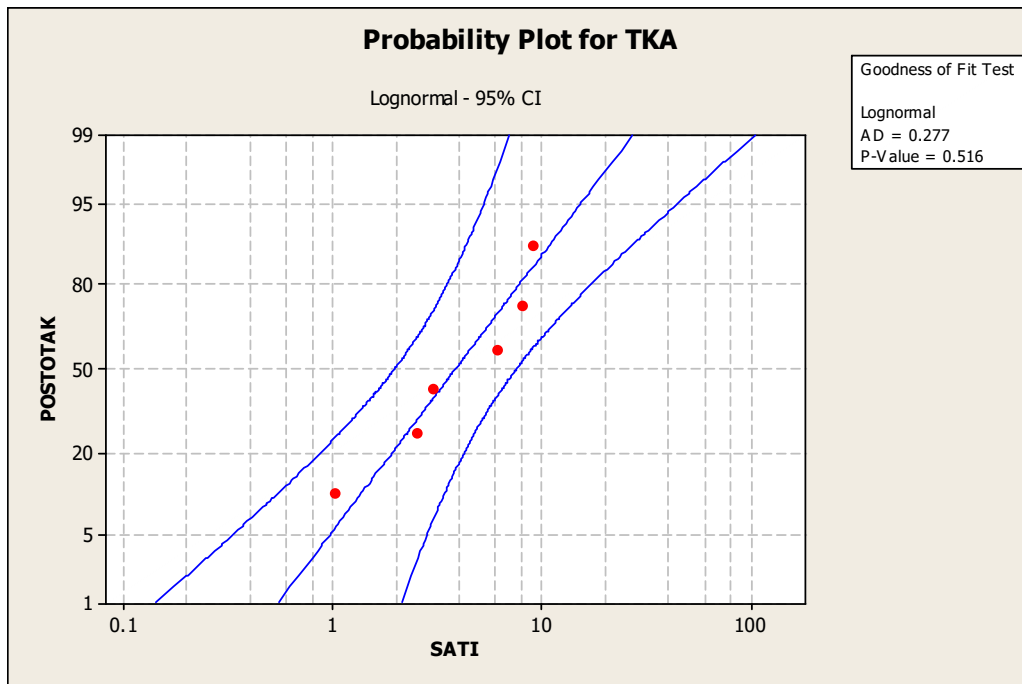
Očekivano vrijeme popravka kvara u slučaju korektivnog održavanja je  $E_K(T) = 18,10$  sati. Jednakim su postupkom provedene statističke obrade broj pet i šest s logističkim vremenima korektivnog održavanja  $T_{KL}$  i aktivnom vremenu korektivnog održavanja  $T_{KA}$ . Rezultati su prikazani na slikama od 3.22. do 3.25. U skladu s dobivenim rezultatima očekivano je logističko vrijeme pri korektivnom održavanju  $E_{KL}(T) = 12,62$  sati, dok je očekivano aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $E_{KA}(T) = 5,15$  sati.



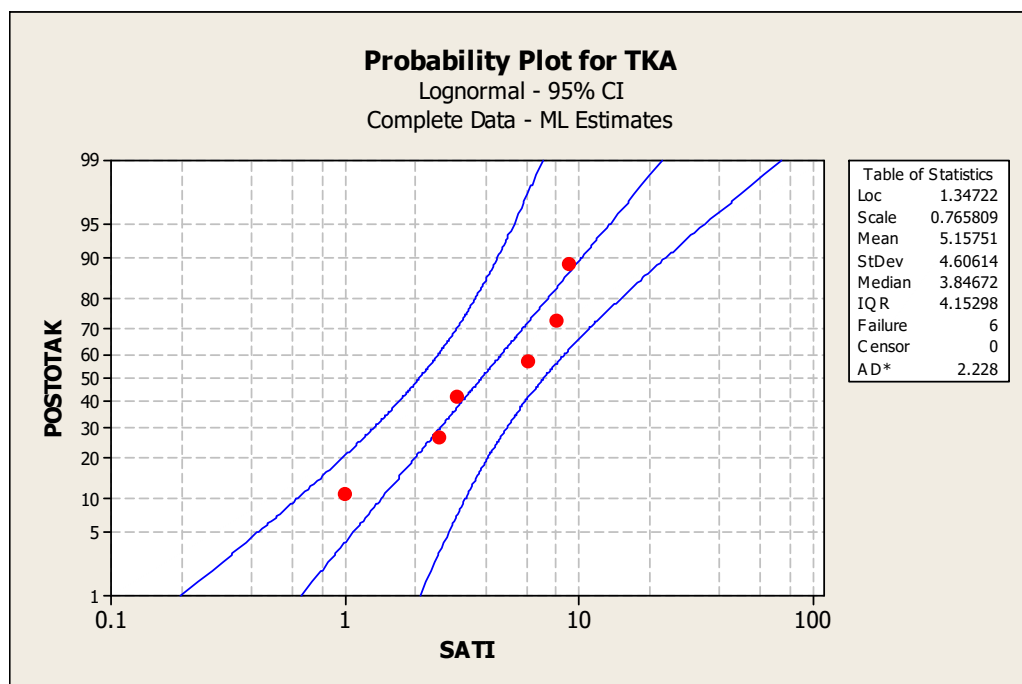
Slika 3.22. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena korektivnog održavanja



Slika 3.23. Parametri log-normalne raspodjele



Slika 3.24. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena korektivnog održavanja



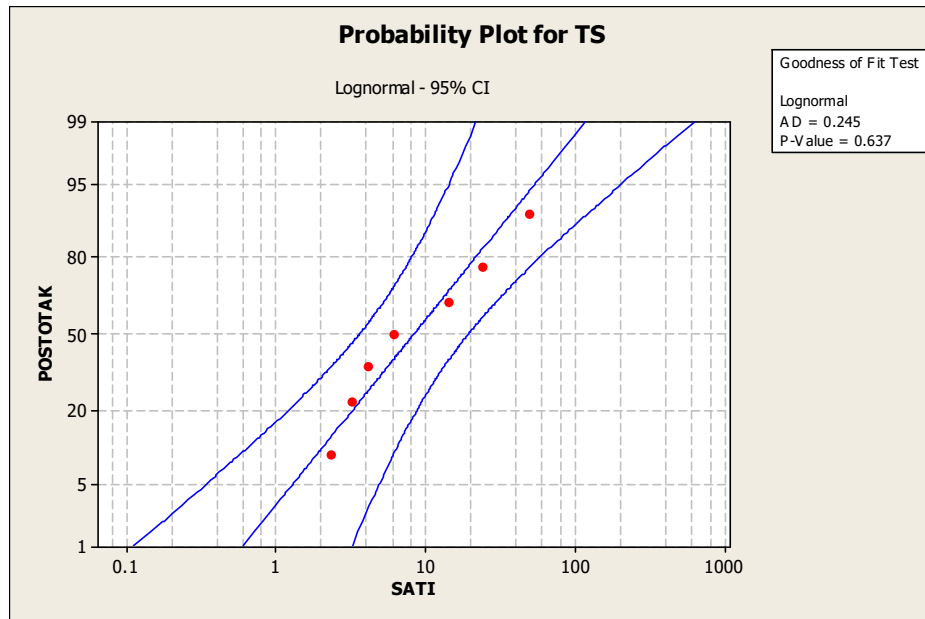
Slika 3.25. Parametri log-normalne raspodjele

U tablici 3.8. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu padnog kanala ugljena.

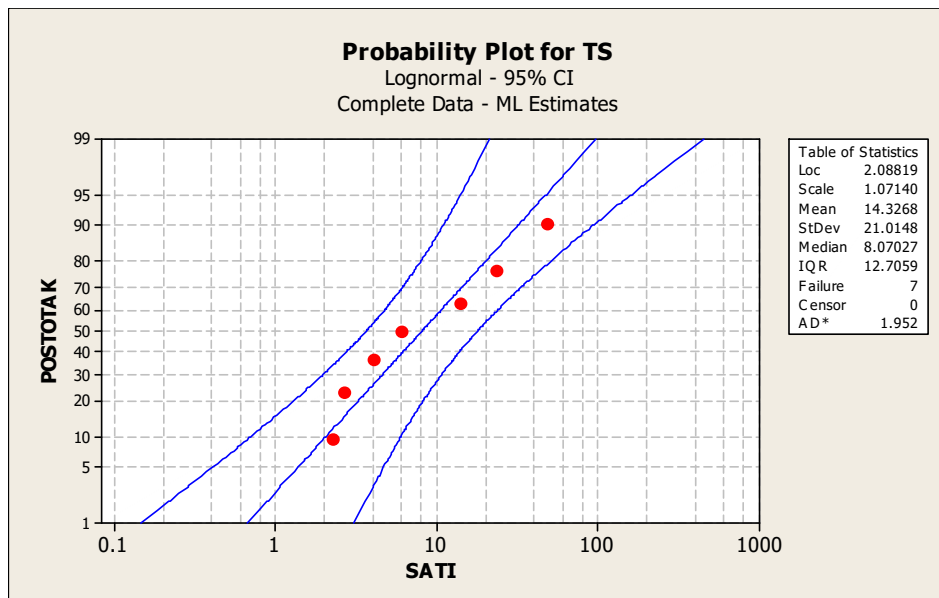


*Sanacijsko održavanje podsustava padnog kanala ugljena*

Sedma statistička obrada kreirana je na slučaju pogodnosti sanacijskog održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena i prikazana je na slici 3.26. Njome se potvrđuje da ovu vjerojatnost najbolje opisuje log-normalna raspodjela, a na slici 3.27. dani su parametri raspodjele.



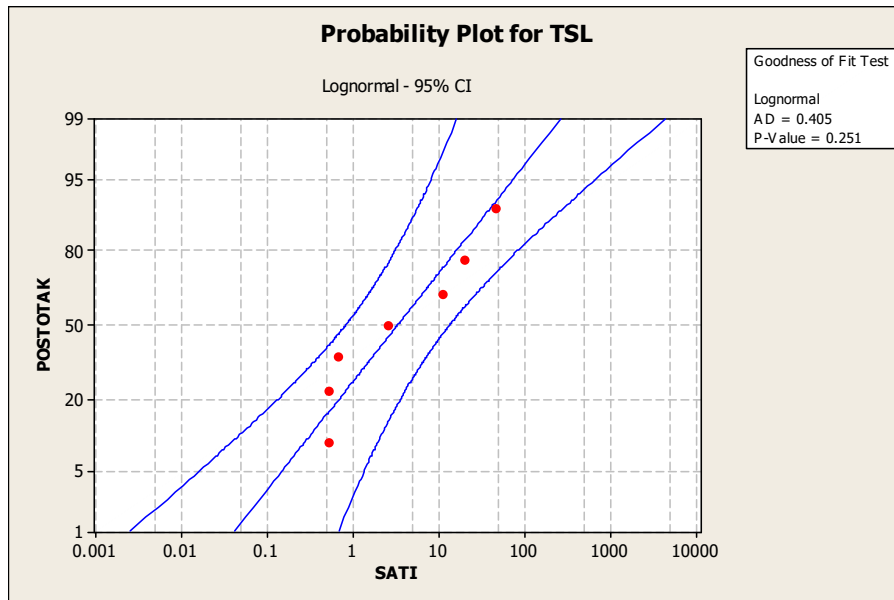
**Slika 3.26.** Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti sanacijskog održavanja



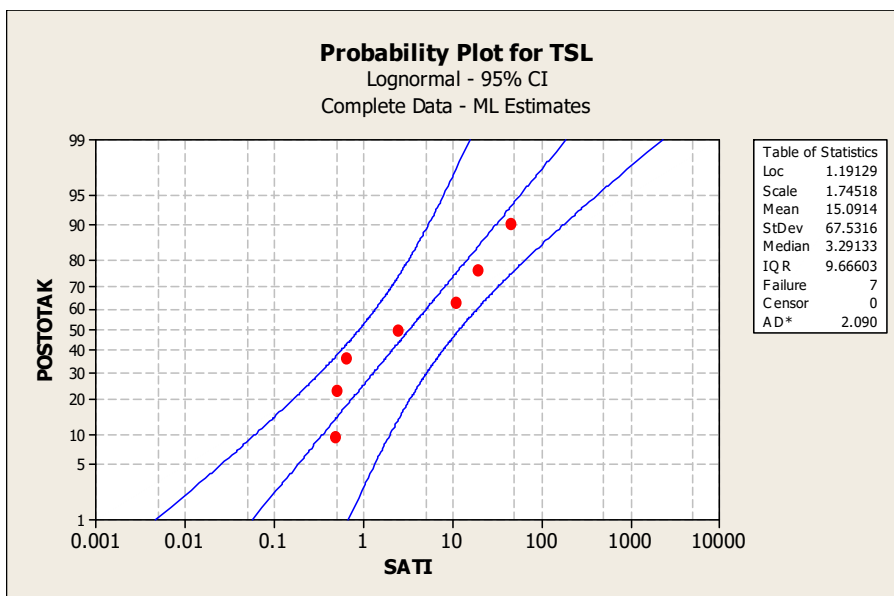
**Slika 3.27.** Parametri log-normalne raspodjele

Očekivano vrijeme provedbe sanacijskog održavanja na podsustavu padnog kanala ugljena je  $E_s(T) = 14,32$  sati.

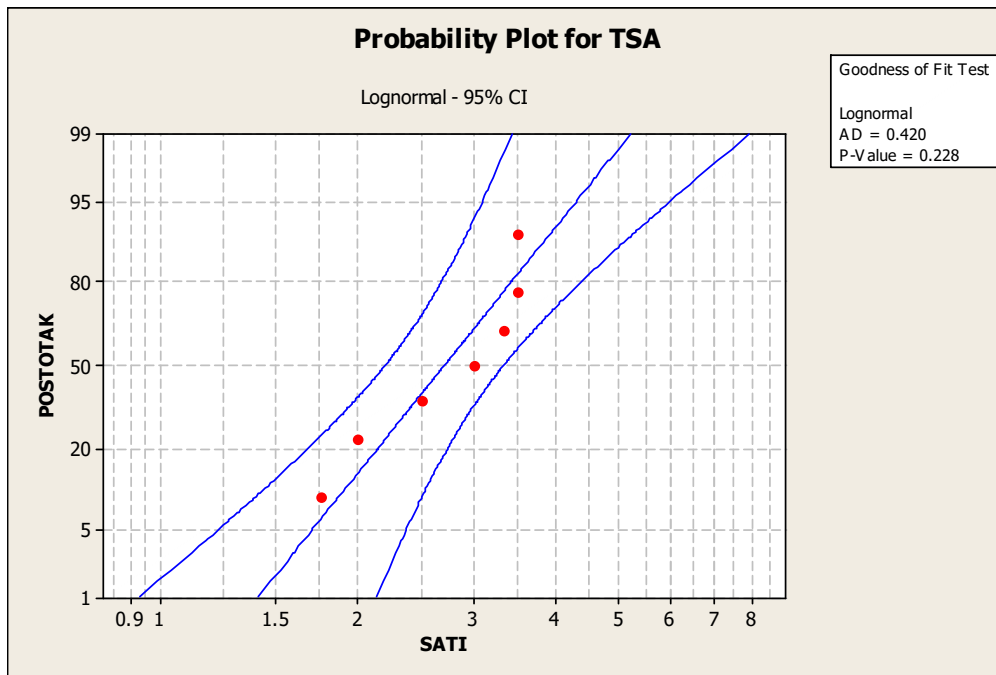
Jednakim postupkom provedene su statističke obrade broj osam i devet s logističkim vremenom sanacijskog održavanja  $T_{SL}$  i aktivnim vremenom sanacijskog održavanja  $T_{SA}$ . Rezultati su prikazani na slikama od 3.28. do 3.31. U skladu s dobivenim rezultatima očekivano logističko vrijeme sanacije oštećenja je  $E_{SL}(T) = 15,09$  sati, dok je očekivano aktivno vrijeme sanacije oštećenja  $E_{SA}(T) = 2,73$  sati.



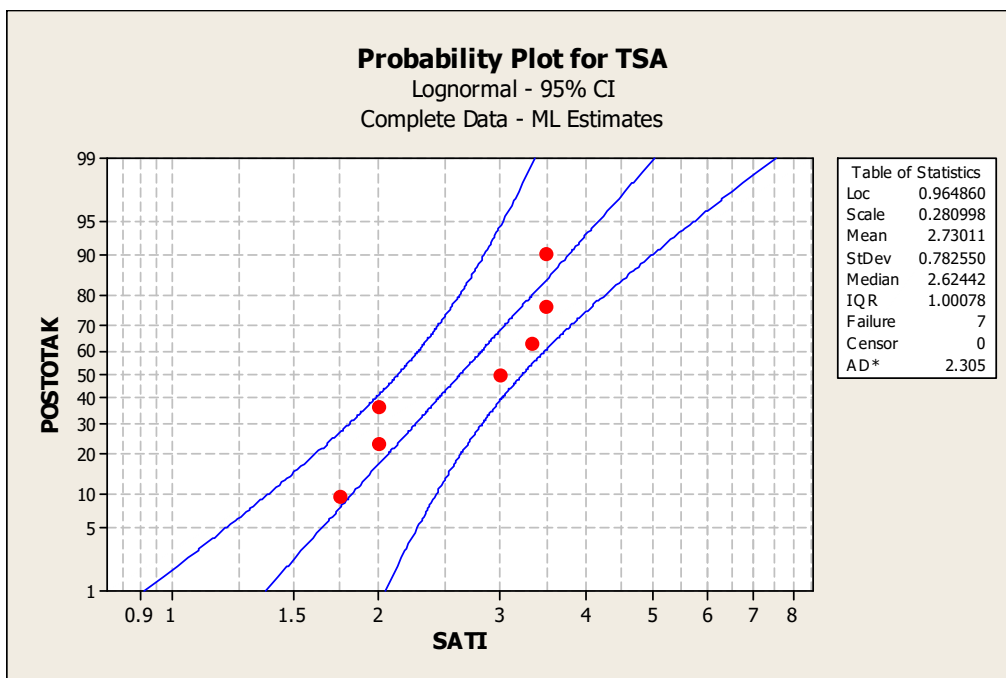
Slika 3.28. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena sanacijskog održavanja



Slika 3.29. Parametri log-normalne raspodjele



Slika 3.30. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena sanacijskog održavanja



Slika 3.31. Parametri log-normalne raspodjele

U tablici 3.8. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu padnog kanala ugljena.

**Tablica 3.8.** Numerički model podsustava padnog kanala ugljena – prikaz teorijskih funkcija gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja i očekivana vremena do njihova nastanka

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Kvar ( $K=S_{KO}$ )	<b>Dvoparameterska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 2,14271$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 5827,92$	$f_e(t) = 3,67 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{5827,92} \right)^{1,14271} e^{-\left( \frac{t}{5827,92} \right)^{2,14271}}$	$E_R(T) = 5161,29$ sati
Sanacija oštećenja ( $G=S_{RG}$ )	<b>Dvoparameterska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 1,88971$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 9505,21$	$f_g(t) = 1,98 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{9505,21} \right)^{0,88971} e^{-\left( \frac{t}{9505,21} \right)^{1,88971}}$	$E_G(T) = 8436,08$ sat
Kvar ili sanacija oštećenja ( $N = S_{KO}$ ili $N = S_{RG}$ )	<b>Dvoparameterska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 2,84283$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 4102,02$	$f_{e,Hip}(t) = 6,93 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{4102,02} \right)^{1,84283} e^{-\left( \frac{t}{4102,02} \right)^{2,84283}}$	$E_N(T) = 3654,79$ sati
Vrijeme korektivnog održavanja, $T_K$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,65141$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,699603$	$m_K(t) = \frac{1}{2,65141 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,699603}{2,65141} \right)^2}$	$E_K(T) = 18,10$ sati
Logističko vrijeme korektivnog održavanja, $T_{KL}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,19642$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,823845$	$m_{KL}(t) = \frac{1}{2,19642 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,823845}{2,19642} \right)^2}$	$E_{KL}(T) = 12,62$ sati

Nastavak tablice 3.8.

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Aktivno vrijeme korektivnog održavanja, $T_{KA}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 1,34722$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,765809$	$m_{KA}(t) = \frac{1}{1,34722 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,765809}{1,34722} \right)^2}$	$E_{KA}(T) = 5,15$ sati
Vrijeme sanacijskog održavanja, $T_S$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,08819$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 1,07140$	$m_S(t) = \frac{1}{2,08819 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 1,07140}{2,08819} \right)^2}$	$E_S(T) = 14,32$ sati
Logističko vrijeme sanacijskog održavanja, $T_{SL}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 1,19129$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 1,74518$	$m_{SL}(t) = \frac{1}{1,19129 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 1,74518}{1,19129} \right)^2}$	$E_{SL}(T) = 15,09$ sati
Aktivno vrijeme sanacijskog održavanja, $T_{SA}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 0,964860$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,280998$	$m_{SA}(t) = \frac{1}{0,964860 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,280998}{0,964860} \right)^2}$	$E_{SA}(T) = 2,73$ sati

### 3.3.3 Statistička obrada podataka za podsustav dodavač ugljena – kućište

Statistička obrada podataka, jednakim postupkom kao u prethodnom poglavlju, provedena je na temelju tablice 3.6. za podsustav dodavača ugljena – kućište uz korištenje programskim alatom Minitab 16. U tablici 3.9. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teorijskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu padnog kanala ugljena, dok postupak statističke obrade podataka nalazi se u prilogu C.

**Tablica 3.9.** Numerički model podsustava dodavača ugljena – kućište – prikaz teorijskih funkcija gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja i očekivana vremena do njihova nastanka

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Kvar ( $K = S_{KO}$ )	<b>Dvoparametarska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 1,75114$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 7794,52$	$f_e(t) = 2,24 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{7794,52} \right)^{0,75114} e^{-\left( \frac{t}{7794,52} \right)^{1,75114}}$	$E_R(T) = 6941,68$ sati
Sanacija oštećenja ( $G = S_{RG}$ )	<b>Dvoparametarska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 0,798922$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 4243,01$	$f_g(t) = 1,88 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{4243,01} \right)^{-0,201078} e^{-\left( \frac{t}{4243,01} \right)^{0,798922}}$	$E_G(T) = 4812,00$ sati
Kvar ili sanacija oštećenja ( $N = S_{KO}$ ili $N = S_{RG}$ )	<b>Dvoparametarska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 1,04546$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 2501,81$	$f_{e,Hip}(t) = 4,17 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{2501,81} \right)^{0,04546} e^{-\left( \frac{t}{2501,81} \right)^{1,04546}}$	$E_N(T) = 2457,75$ sati

Nastavak tablice 3.9.

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Vrijeme korektivnog održavanja, $T_K$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,09810$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,624912$	$m_K(t) = \frac{1}{2,09810 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,624912}{2,09810} \right)^2}$	$E_K(T) = 9,90$ sati
Logističko vrijeme korektivnog održavanja, $T_{KL}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 1,46643$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 1,05547$	$m_{KL}(t) = \frac{1}{1,46643 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 1,05547}{1,46643} \right)^2}$	$E_{KL}(T) = 7,56$ sati
Aktivno vrijeme korektivnog održavanja, $T_{KA}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 0,984572$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,263343$	$m_{KA}(t) = \frac{1}{0,984572 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,263343}{0,984572} \right)^2}$	$E_{KA}(T) = 2,77$ sati
Vrijeme sanacijskog održavanja, $T_S$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,57778$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,662156$	$m_S(t) = \frac{1}{2,57778 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,662156}{2,57778} \right)^2}$	$E_S(T) = 16,39$ sati

Nastavak tablice 3.9.

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Logističko vrijeme sanacijskog održavanja, $T_{SL}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,05861$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 1,01483$	$m_{SL}(t) = \frac{1}{2,05861 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 1,01483}{2,05861} \right)^2}$	$E_{SL}(T) = 13,11$ sati
Aktivno vrijeme sanacijskog održavanja, $T_{SA}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 1,20379$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,479443$	$m_{SA}(t) = \frac{1}{1,20379 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,479443}{1,20379} \right)^2}$	$E_{SA}(T) = 3,73$ sati



### 3.3.4. Statistička obrada podataka za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1

Statistička obrada podataka provedena je na temelju tablice 3.7. za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 uz upotrebu programskog alata Minitab 16. U tablici 3.10. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu padnog kanala ugljena, dok pregled postupka obrade podataka nalazi se u prilogu C.

**Tablica 3.10.** Numerički model podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 – prikaz teorijskih funkcija gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja i očekivana vremena do njihovih nastanka

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Kvar ( $K = S_{KO}$ )	<b>Dvoparameterska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 1,39630$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 6548,38$	$f_e(t) = 2,13 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{6548,38} \right)^{0,39630} e^{-\left( \frac{t}{6548,38} \right)^{1,39630}}$	$E_R(T) = 5970,84$ sati
Sanacija oštećenja ( $G = S_{RG}$ )	<b>Dvoparameterska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 2,55615$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 13047,1$	$f_g(t) = 1,95 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{13047,1} \right)^{1,55615} e^{-\left( \frac{t}{13047,1} \right)^{2,55615}}$	$E_G(T) = 11582,9$ sata
Kvar ili sanacija oštećenja ( $N = S_{KO}$ ili $N = S_{RG}$ )	<b>Dvoparameterska Weibullova raspodjela</b> Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ), $c = 1,36754$ Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ), $a = 4611,98$	$f_{e, Hip}(t) = 2,96 \cdot 10^{-4} \left( \frac{t}{4611,98} \right)^{0,36754} e^{-\left( \frac{t}{4611,98} \right)^{1,36754}}$	$E_N(T) = 4219,63$ sati

Nastavak tablice 3.10.

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Vrijeme korektivnog održavanja $T_k$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,5957$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,442723$	$m_k(t) = \frac{1}{2,5957 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,442723}{2,5957} \right)^2}$	$E_k(T) = 14,78$ sati
Logističko vrijeme korektivnog održavanja $T_{kl}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 1,73571$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,647127$	$m_{kl}(t) = \frac{1}{1,73571 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,647127}{1,73571} \right)^2}$	$E_{kl}(T) = 6,99$ sati
Aktivno vrijeme korektivnog održavanja $T_{ka}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 1,96718$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,432485$	$m_{ka}(t) = \frac{1}{1,96718 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,432485}{1,96718} \right)^2}$	$E_{ka}(T) = 7,85$ sati
Vrijeme sanacijskog održavanja $T_s$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 2,21435$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,315545$	$m_s(t) = \frac{1}{2,21435 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,315545}{2,21435} \right)^2}$	$E_s(T) = 9,62$ sati

Nastavak tablice 3.10.

Događaj / vremena	Teorijska raspodjela vjerojatnosti	Numerički model (funkcija gustoće vjerojatnosti)	Očekivano vrijeme događaja / vremena
Logističko vrijeme sanacijskog održavanja $T_{SL}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 1,68984$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,791844$	$m_{SL}(t) = \frac{1}{1,68984 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,791844}{1,68984} \right)^2}$	$E_{SL}(T) = 17,41$ sati
Aktivno vrijeme sanacijskog održavanja $T_{SA}$	<b>Log-normalna raspodjela</b> Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ), $s = 0,91482$ Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ), $\mu = 0,399026$	$m_{SA}(t) = \frac{1}{0,914820 \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - 0,399026}{0,914820} \right)^2}$	$E_{SA}(T) = 2,70$ sati

## 4. ODREĐIVANJE TOČKE EKONOMIČNOSTI

Cilj je održavatelja svesti intenzitet kvarova na najmanju moguću razinu uz optimalnu provedbu preventivnog održavanja. No, u cilju optimiranja ciklusa preventivnog održavanja za promatrani tehnički sustav, nužno je provesti analizu događaja kvara ili događaja sanacije oštećenja, vremena korektivnog održavanja, vremena preventivnog održavanja, vremena sanacijskog održavanja te analizirati troškove u odabranom vremenskom ciklusu eksploatacije. Upravo su tim redosljedom u trećem poglavlju definirani numerički modeli koji opisuju karakteristične događaje u eksploataciji na trima podsustavima sustava mlina u TE Plomin 2, dok su u drugom poglavlju opisani troškovi. Integracijom numeričkog modela i jediničnih troškova korektivnog, preventivnog i sanacijskog održavanja dolazi se do funkcije troškova održavanja sustava u vremenu eksploatacije, pri čemu minimum funkcije predstavlja optimalnu točku, odnosno točku ekonomičnosti održavanja. Optimalna točka opisana je koordinatama kao vrijednost na ordinati koja predstavlja jedinične troškove održavanja, dok vrijednost na apscisi predstavlja vremenski ciklus rada sustava do provedbe preventivnog održavanja za promatrani tehnički sustav.

Dosadašnja istraživanjima optimalne točke preventivnog održavanja na tehničkim sustavima određivane su primjenom numeričkog modela odnosno funkcijama eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja [24, 25, 26, 34, 60]. Nisu razmatrani događaji kao što je nastanak oštećenja na sustavu i provedba sanacije tih oštećenja bez zaustavljanja tehnološkog procesa. Upravo će se u nastavku ovog rada na primjerima podsustava dodavača ugljena – kućište, padnog kanala ugljena i cjevovoda ugljene prašine br. 1 odrediti optimalna točka s utjecajem sanacije oštećenja i bez njezina utjecaja. Na temelju dobivenih razlika evaluirat će se doprinos sanacije oštećenja na točku ekonomičnosti.

### 4.1. Određivanje optimalnog intervala preventivne zamjene bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja

U svrhu evaluacije doprinosa sanacije na točku ekonomičnosti nužno je odrediti optimalne vrijednosti troškova održavanja s utjecajem sanacije oštećenja i bez njega. Upravo radi toga, u nastavku se s pomoću tri primjera: podsustav dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 određuje optimalna točka uzimajući u obzir jedinične troškove preventivnog održavanja  $c_p$ , jedinične troškove korektivnog održavanja  $c_k$ , funkciju intenziteta kvara  $\lambda_{k,Re}$ , funkciju intenziteta preventivnog održavanja  $\lambda_{p,Re}(t)$ , i funkciju eksploatacijske pouzdanosti  $R_e(t)$ .

Eksploatacijska pouzdanost  $R_e(t)$  zadana je sljedećom općom relacijom [60]:

$$R_e(t) = 1 - \int_0^t f_e(t) dt \quad (4.1.)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti kvara  $f_e(t)$  opisana je numeričkim modelom i vrijednosti funkcije prikazane su za podsustav padnog kanala ugljena (tablica 3.8.), podsustav dodavača ugljena – kućište (tablica 3.9.) i podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 (tablica 3.10.).

Kao što je naglašeno u poglavlju 2., na podsustavima dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 provodi se preventivna zamjena dotrajalih dijelova nakon određenog broja sati njihova rada. U skladu s time, funkcija intenziteta preventivne zamjene dijelova na promatranom sustavu opisan je sljedećom relacijom [60]:

$$\lambda_{p,Re}(t) = \frac{1}{T_R} \left[ \frac{\text{broj preventiva}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.2.)$$

Funkcija intenziteta kvara opisana je sljedećom relacijom [60]:

$$\lambda_{k,Re}(t) = \frac{T_R - \int_0^{T_R} R_e(t) dt}{T_R \int_0^{T_R} R_e(t) dt} \left[ \frac{\text{broj korektiva}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.3.)$$

U svrhu optimizacije nužno je i definirati jedinične troškove održavanja. S obzirom na to da su troškovi u funkciji potrebnog vremena popravka i utrošenih resursa [43], u daljnjem razmatranju jediničnih korektivnih troškova, na temelju relacije 2.9. primjenjuju se pretpostavke da je za  $i$ -ti podsustav jedinični utrošak materijala po provedenoj korektivnoj aktivnosti (relacija 2.10.) konstantan te da je, kao posljedica zastoja, udio smanjenja kapaciteta proizvodnje (relacija 2.12.) konstantan, a očekivano vrijeme popravaka pri korektivnom održavanju  $E_K(T)$  i očekivano aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $E_{KA}(T)$  izračunati su numeričkim modelom za pojedini primjer podsustava u tablicama od 3.8. do 3.10. Uvažavajući prethodno navedena pojednostavljena jedinični troškovi korektivnog održavanja opisani su sljedećom relacijom:

$$c_K = c_M + c_R \cdot E_{KA}(T) + c_N \cdot E_K(T) \left[ \frac{\text{novac}}{\text{broj korektiva}} \right] \quad (4.4.)$$

Troškovi preventivnog održavanja (relacija 2.16.) opisuju ukupne troškove preventivnog održavanja za promatrani period eksploatacije. Na podsustavima dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 provodi periodično preventivno održavanje gdje prema utvrđenom stanju izvrši se: preventivno održavanje - pregled gdje se utvrdi stanje komponenti ili provede preventivno održavanje gdje se izvrši pregled stanja komponenti i zamjena dotrajalih komponenti. Radi pojednostavljenja, za i-ti podsustav na kojem je u vremenskom periodu eksploatacije proveden broj preventivnog održavanja  $Z_P$ , pri tome kumulativno utrošeno  $C_P$  novaca, jedinični troškovi preventivnog održavanja na i-tom podsustavu opisuju se sljedećom relacijom:

$$c_P = C_P / Z_P \left[ \frac{\text{novac}}{\text{broj preventiva}} \right] \quad (4.5.)$$

Sukladno tomu za potrebe određivanja točke ekonomičnosti održavanja jedinični troškovi preventivnog održavanja za podsustav dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 određeni su na temelju ukupno ostvarenog troška preventivnog održavanja i broja provedbe preventivnog održavanja u promatranom periodu eksploatacije [43].

Troškovi održavanja u funkciji vremena rada promatranog sustava bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja  $c_{U,Re}(t)$ , opisuju se sljedećom relacijom [60]:

$$c_{U,Re}(t) = c_P \lambda_{p,Re}(t) + c_K \lambda_{k,Re}(t) \left[ \frac{\text{novac}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.6.)$$

U svrhu zaštite podataka TE Plomin 2 u nastavku rada neophodno je apsolutne vrijednosti jediničnih korektivnih i preventivnih troškova (relacija 4.4. i 4.5.) iskazati u relativnim vrijednostima. Sukladno tomu, pretvorba jediničnih troškova iz apsolutnih vrijednosti u relativne za i-ti podsustav vrši se pomoću sljedećih relacija:

$$c_{p,Re,rel} = \frac{c_P}{c_P + c_K} \cdot 100 \quad (4.7.)$$

$$c_{k,Re,rel} = \frac{c_K}{c_P + c_K} \cdot 100 \quad (4.8.)$$

$$c_{u,Re,rel} = c_{p,Re,rel} + c_{k,Re,rel} = 100 \quad (4.9.)$$

Primjenom relacija (4.7., 4.8. i 4.9.) u tablici 4.1. iskazane su relativne vrijednosti jediničnih troškova bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja za podsustav dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1.

**Tablica 4.1.** Relativne vrijednosti jediničnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1

PODSUSTAV	$c_{k,Re,rel}$ [%]	$c_{p,Re,rel}$ [%]	$c_{u,Re,rel}$ [%]
Podsustav dodavač ugljena – kućište	67,6	32,4	100
Podsustav padnog kanala ugljena	71,9	28,1	100
Podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1	75,4	24,6	100

Uvrštavanjem relativnih vrijednosti jediničnih troškova umjesto apsolutnih u relaciju (4.6.), funkcija troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja s relativnim vrijednostima na  $i$ -tom podsustavu ili funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja opisana je sljedećom relacijom:

$$c_{u,Re,rel}(t) = \frac{c_{p,Re,rel}}{100} \lambda_{p,Re}(t) + \frac{c_{k,Re,rel}}{100} \lambda_{k,Re}(t) \left[ \frac{\text{broj održavanja}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.10.)$$

Gdje *broj održavanja* predstavlja broj dobiven međusobnim zbrojem broja preventivnog održavanja i broja korektivnog održavanja za promatrani period eksploatacije sustava.

Uvrštavanjem relacija 4.2. i 4.3. u relaciju 4.10. te njezinim izjednačavanjem s nulom i deriviranjem po  $T_R$  određuju se koordinate minimuma funkcije, odnosno optimalna točka održavanja ili točka ekonomičnosti bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja  $E'_{MIN}$ . U

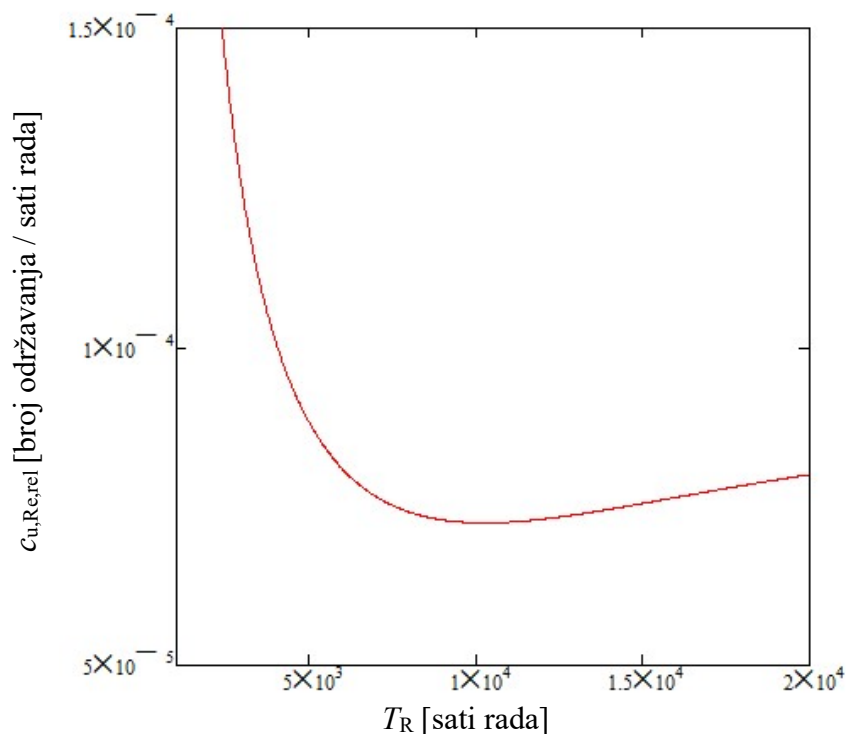
skladu s time, u nastavku rada određuju se optimalne točke održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja za podsustave dodavača ugljena – kućište, padnog kanala i cjevovoda ugljene prašine br. 1. Pri izradi grafova funkcija i izračuna točke minimuma korišten je program MathCad 15 [63].

*Određivanje točke minimuma za podsustav dodavača ugljena bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.9.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.1. odnosno 4.2. i 4.3., a potom uvrštavanjem, uz vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k,Re,rel}$  i  $c_{p,Re,rel}$  (tablica 4.1.) u relaciju 4.10., funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja,  $c_{u,Re,rel}(T_R)$  za podsustav dodavača ugljena – kućište poprima sljedeći oblik:

$$c_{u,Re,rel}(T_R) = 0,324 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,676 \cdot \frac{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{7794,52}\right)^{1,75114}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{7794,52}\right)^{1,75114}} dt} \quad (4.11.)$$

Na slici 4.1. prikazana je funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja ovisno o satima rada podsustava dodavača ugljena – kućište.



**Slika 4.1.** Graf funkcije relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja  $c_{u,Re,rel}(T_R)$  za podsustav dodavača ugljena – kućište



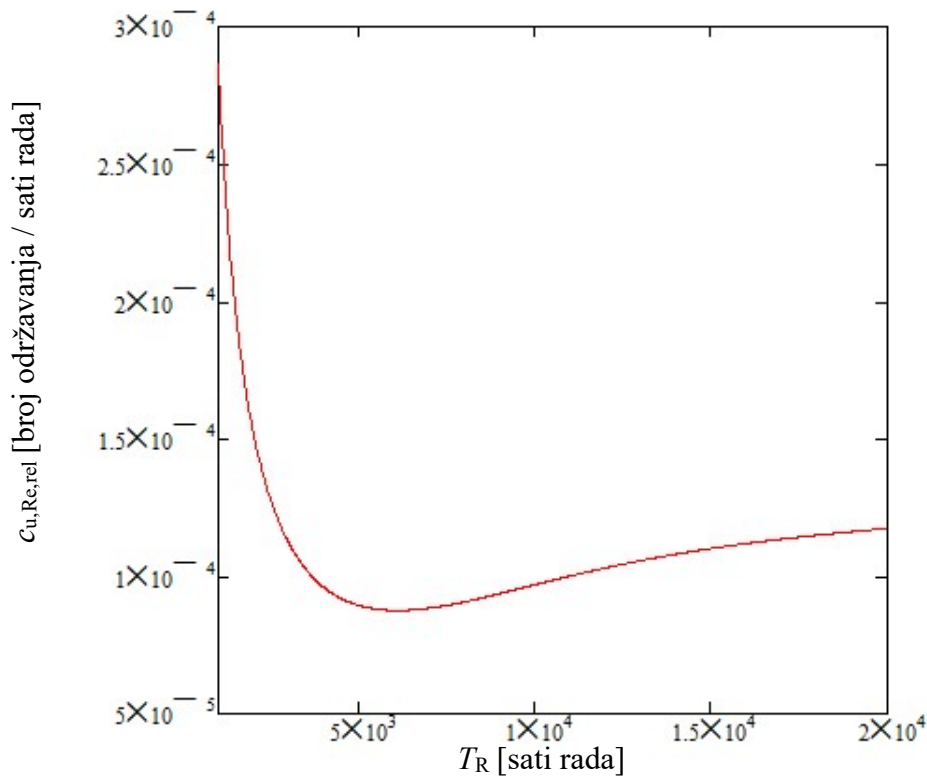
Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.11., pri čemu je točka minimuma ujedno i točka ekonomičnosti održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja, opisana je koordinatama  $E_{\text{MIN}}$  ( $1,025 \times 10^4$ ;  $7,236 \times 10^{-5}$ ). U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno vrijeme provedbe preventivnog održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja na podsustavu dodavača ugljena – kućište  $T_{\text{R,MIN}}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 10 250 radnih sati.

*Određivanje točke minimuma za podsustav padnog kanala ugljena bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.8.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.1. odnosno 4.2. i 4.3., a potom uvrštavanjem, uz vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k,\text{Re,rel}}$  i  $c_{p,\text{Re,rel}}$  (tablica 4.1.) u relaciju 4.10., funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja,  $c_{u,\text{Re,rel}}(T_{\text{R}})$  za podsustav padnog kanala ugljena ima sljedeći oblik:

$$c_{u,\text{Re,rel}}(T_{\text{R}}) = 0,281 \cdot \frac{1}{T_{\text{R}}} + 0,719 \cdot \frac{T_{\text{R}} \int_0^{T_{\text{R}}} e^{-\left(\frac{t}{5827,92}\right)^{2,14271}} dt}{T_{\text{R}} \int_0^{T_{\text{R}}} e^{-\left(\frac{t}{5827,92}\right)^{2,14271}} dt} \quad (4.12.)$$

Na slici 4.2. prikazana je funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja ovisno o satima rada podsustava padnog kanala ugljena.



**Slika 4.2.** Graf funkcije relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja  $c_{u,Re,rel}(t)$  za podsustav padnog kanala ugljena

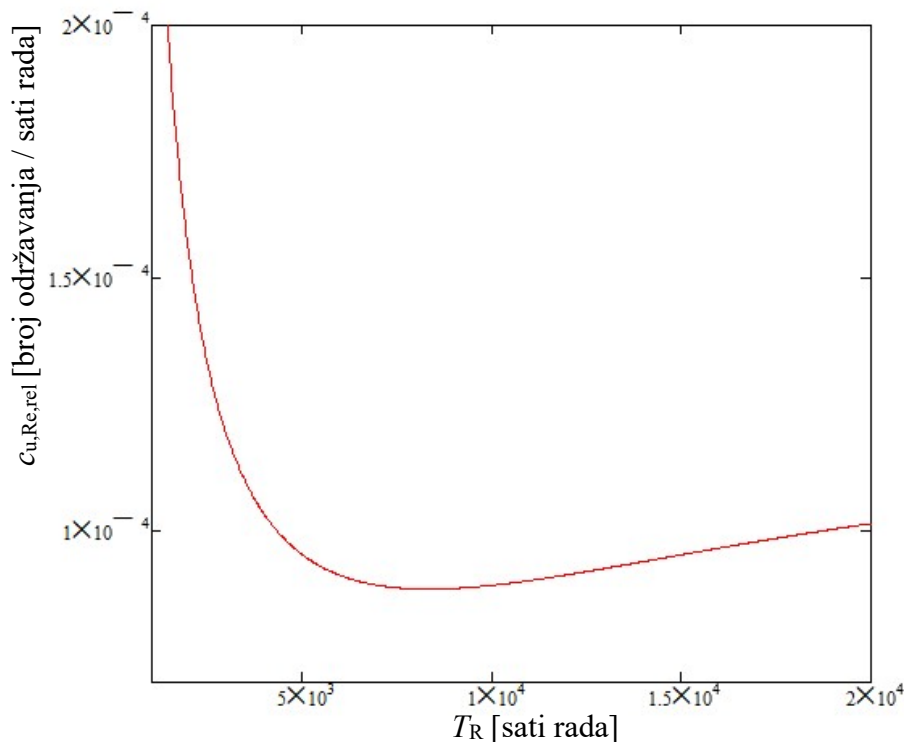
Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.12., pri čemu je točka minimuma ujedno i točka ekonomičnosti održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja, opisana je koordinatama  $E_{MIN}(6,083 \times 10^3; 8,759 \times 10^{-5})$ . U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno vrijeme provedbe preventivnog održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja na podsustavu padnog kanala ugljena  $T_{R,MIN}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 6083 radnih sati.

*Određivanje točke minimuma za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.10.), uvrštavanjem parametara raspodjele relacije 4.1. odnosno 4.2. i 4.3., a potom uvrštavanjem, uz vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k,Re,rel}$  i  $c_{p,Re,rel}$  (tablica 4.1.) u relaciju 4.10., funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja  $c_{u,Re,rel}(T_R)$  za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 ima sljedeći oblik:

$$c_{u,Re,rel}(T_R) = 0,246 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,754 \cdot \frac{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{6548,38}\right)^{1,39630}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{6548,38}\right)^{1,39630}} dt} \quad (4.13.)$$

Na slici 4.3. prikazana je funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja ovisno o satima rada podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1.



**Slika 4.3.** Graf funkcije relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja  $C_{u,Re,rel}(t)$  za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1

Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.13., pri čemu je točka minimuma ujedno i točka ekonomičnosti održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja, opisana je koordinatama  $E'_{MIN}(8,308 \times 10^3; 8,844 \times 10^{-5})$ . U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno vrijeme provedbe preventivnog održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1  $T_{R,MIN}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 8308 radnih sati.

## 4.2. Određivanje optimalnog intervala preventivne zamjene na temelju funkcije hipotetske eksploatacijske pouzdanosti

Analiza vremena rada sustava između dvaju događaja, koji mogu biti događaj kvar ili događaj sanacija oštećenja, u ovom se radu naziva funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti  $R_{e,Hip}(t)$ . Ta funkcija, analogno teoriji pouzdanosti, prikazuje vjerojatnost rada sustava bez nastanka događaja (kvar ili sanacija oštećenja) za promatrano razdoblje eksploatacije.

Funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti  $R_{e,Hip}(t)$  zadana je sljedećom općom relacijom:

$$R_{e,Hip}(t) = 1 - \int_0^t f_{e,Hip}(t) dt \quad (4.14.)$$

Gdje je  $f_{e,Hip}(t)$  funkcija hipotetske gustoće vjerojatnosti kvara, te za podsustav dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 određena numeričkim modelom (tablica 3.8. do 3.10.)

Razmatrajući upravo hipotetski, ako događaji nastanka oštećenja nije moguće sanirati tijekom rada, tada je funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti jednaka funkciji eksploatacijske pouzdanosti sustava jer nastala oštećenja propagirati će do statusa kvara i provođenja korektivnog održavanja.

Funkcija hipotetskog intenziteta preventivnog održavanja, jednak je relaciji 4.2.:

$$\lambda_{p,Hip}(t) = \frac{1}{T_R} \left[ \frac{\text{broj preventiva}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.15.)$$

Analogno, uvrštavanjem funkcije hipotetske eksploatacijske pouzdanosti umjesto funkcije eksploatacijske pouzdanosti u relaciju 4.3. određuje se relacija funkcije hipotetskog intenziteta kvara:

$$\lambda_{k,Hip}(t) = \frac{T_R - \int_0^{T_R} R_{e,Hip}(t) dt}{T_R \int_0^{T_R} R_{e,Hip}(t) dt} \left[ \frac{\text{broj korektiva}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.16.)$$

Istovjetno relaciji 4.6., funkcija hipotetskih troškova održavanja opisana je sljedećom relacijom:

$$c_{u,Hip}(t) = c_P \lambda_{p,Hip}(t) + c_K \lambda_{k,Hip}(t) \left[ \frac{\text{novac}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.17.)$$

S obzirom na zaštitu podataka TE Plomin 2, transformacijom vrijednosti jediničnih troškova iz apsolutnih u relativne vrijednosti te uvrštavanjem relativnih vrijednosti jediničnih troškova umjesto apsolutnih u relaciju 4.17., funkcija hipotetskih troškova održavanja s relativnim

vrijednostima na  $i$ -tom podsustavu ili funkcija relativnih hipotetskih troškova održavanja opisana je sljedećom relacijom:

$$c_{u,Hip,rel}(t) = \frac{c_{p,Re,rel}}{100} \lambda_{p,Hip}(t) + \frac{c_{k,Re,rel}}{100} \lambda_{k,Hip}(t) \left[ \frac{\text{broj održavanja}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.18.)$$

Gdje *broj održavanja* predstavlja broj dobiven međusobnim zbrojem broja preventivnog održavanja i broja aktivnosti (korektivno održavanje ili sanacija oštećenja) za promatrani period eksploatacije sustava.

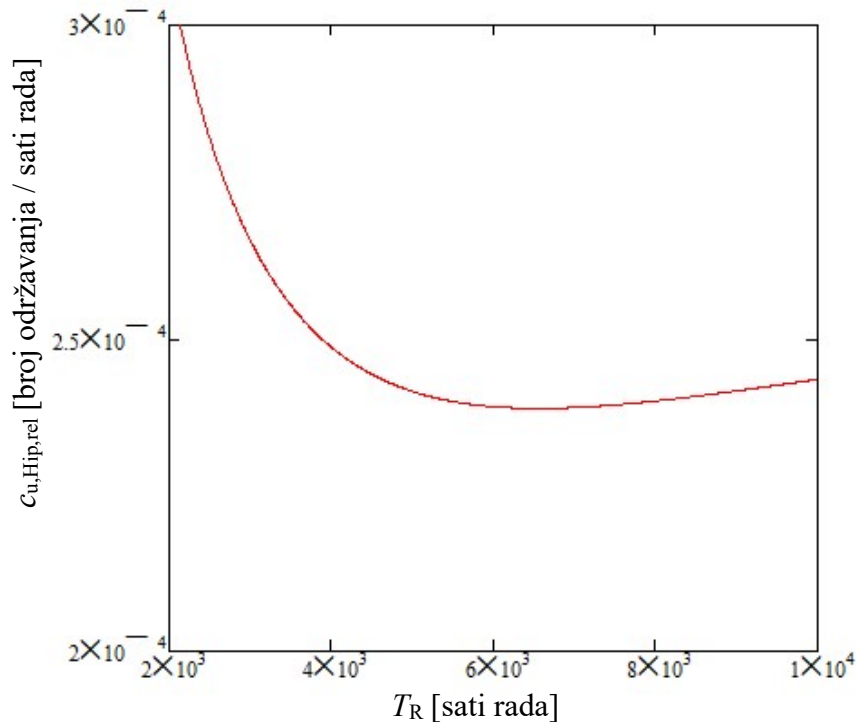
Uvrštavanjem vrijednosti relativnih troškova (tablica 4.1.) i relacija 4.15. i 4.16. u relaciju 4.18. te njezinim izjednačivanjem s nulom i deriviranjem po  $T_R$  određuju se koordinate minimuma funkcije. Minimum funkcije predstavlja hipotetsku točku ekonomičnosti  $E_{MIN,Hip}$ . U skladu s time, u nastavku rada određuju se hipotetske točke ekonomičnosti za podsustave dodavača ugljena – kućište, padnog kanala i cjevovoda ugljene prašine br. 1. Pri izradi grafova funkcija i izračuna točke minimuma korišten je program MathCad 15.

#### *Određivanje točke minimuma za podsustav dodavača ugljena – kućište primjenom funkcije hipotetske pouzdanosti*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.9.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.14. odnosno 4.15. i 4.16., a potom uvrštavanjem, uz vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k,Re,rel}$  i  $c_{p,Re,rel}$  (tablica 4.1.) u relaciju 4.18., funkcija relativnih hipotetskih troškova održavanja  $c_{u,Hip,rel}(t)$  za podsustav dodavača ugljena opisuje se sljedećom relacijom:

$$c_{u,Hip,rel}(T_R) = 0,324 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,676 \cdot \frac{T_R - \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{2501,81}\right)^{1,04546}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{2501,81}\right)^{1,04546}} dt} \quad (4.19.)$$

Na slici 4.4. prikazana je funkcija hipotetskih troškova održavanja ovisno o satima rada podsustava dodavača ugljena – kućište.



**Slika 4.4.** Graf funkcije relativnih hipotetskih troškova održavanja  $c_{u,Hip,rel}(t)$  za posustav dodavača ugljena – kućište

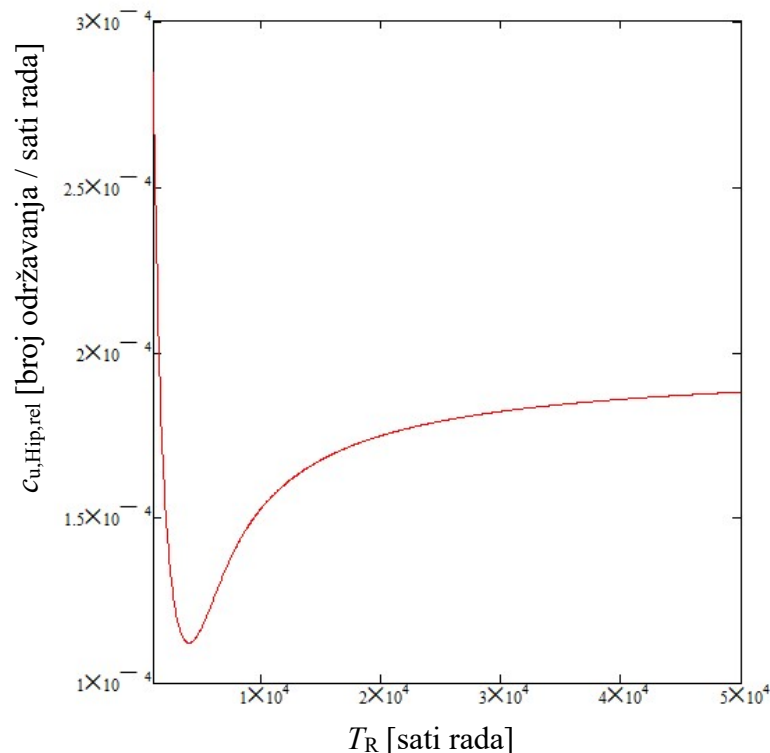
Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.19., pri čemu je točka minimuma ujedno i hipotetska točka ekonomičnosti održavanja  $E_{MIN,Hip}(6,555 \times 10^3; 2,388 \times 10^{-4})$ . U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno hipotetsko vrijeme rada sustava do preventivnog pregleda na podsustavu dodavača ugljena – kućište  $T_{R,MIN,Hip}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 6555 radnih sati.

#### *Određivanje točke minimuma za podsustav padnog kanala ugljena primjenom funkcije hipotetske pouzdanosti*

U skladu s vrijednostima zadanog numeričkog Weibullova modela (tablica 3.8.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.14. odnosno 4.15. i 4.16., a potom uvrštavanjem, uz vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k,Re,rel}$  i  $c_{p,Re,rel}$  (tablica 4.1.) u relaciju 4.18., funkcija relativnih hipotetskih troškova održavanja  $c_{u,Hip,rel}(t)$  za podsustav padnog kanala ugljena opisuje se sljedećom relacijom:

$$c_{u,Hip,rel}(T_R) = 0,281 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,719 \cdot \frac{T_R - \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{4102,02}\right)^{2,84283}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{4102,02}\right)^{2,84283}} dt} \quad (4.20.)$$

Na slici 4.5. prikazana je funkcija relativnih hipotetskih troškova održavanja ovisno o satima rada podsustava padnog kanala ugljena.



**Slika 4.5.** Graf funkcije relativnih hipotetskih troškova održavanja  $c_{u,Hip,rel}(t)$  za podsustav padnog kanala ugljena

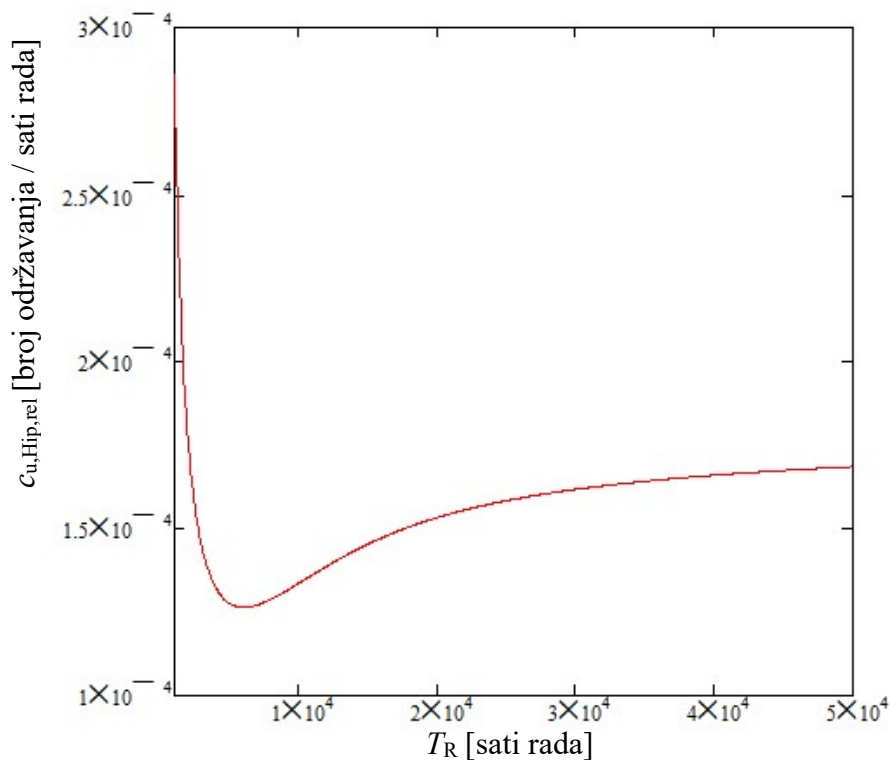
Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.20., pri čemu je točka minimuma ujedno i hipotetska točka ekonomičnosti održavanja  $E_{MIN,Hip}$  ( $3,961 \times 10^3$ ;  $1,122 \times 10^{-4}$ ). U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno hipotetsko vrijeme rada sustava do preventivnog pregleda na podsustavu padnog kanala ugljena  $T_{R,MIN,Hip}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 3961 radnih sati.

*Određivanje točke minimuma za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 primjenom  
funkcije hipotetske pouzdanosti*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.10.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.14. odnosno 4.15. i 4.16., a potom uvrštavanjem, uz vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $C_{k,Re,rel}$  i  $C_{p,Re,rel}$  (tablica 4.1.) u relaciju 4.18., funkcija hipotetskih troškova održavanja  $c_{u,Hip,rel}(t)$  za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 opisuje se sljedećom relacijom:

$$c_{u,Hip,rel}(T_R) = 0,246 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,754 \cdot \frac{T_R - \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{4611,98}\right)^{1,36754}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{4611,98}\right)^{1,36754}} dt} \quad (4.21.)$$

Na slici 4.6. prikazana je funkcija hipotetskih troškova održavanja ovisno o satima rada podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1.



**Slika 4.6.** Graf funkcije relativnih hipotetskih troškova održavanja  $c_{u,Hip,rel}(t)$  za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1



Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.21., pri čemu je točka minimuma ujedno i hipotetska točka ekonomičnosti održavanja  $E_{\text{MIN,Hip}}$  ( $5,993 \times 10^3$ ;  $1,264 \times 10^{-4}$ ). U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno hipotetsko vrijeme rada sustava do preventivnog pregleda na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1  $T_{\text{R,MIN,Hip}}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 5993 radnih sati.

### 4.3. Određivanje optimalnog intervala preventivne zamjene sagledavajući doprinos sanacije oštećenja

Analizom vremena rada sustava do događaja sanacije oštećenja u radu i izradom numeričkog modela za podsustav dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 (tablice od 3.8. do 3.10.) potvrđeno je da se događaji sanacije oštećenja na predmetnim primjerima ravnaju prema Weibullovoj raspodjeli. Sukladno tomu, u ovom radu uvodi se funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja  $S_e(t)$ . Ta funkcija, analogno teoriji pouzdanosti, prikazuje vjerojatnost rada sustava bez događaja sanacije oštećenja za promatrano razdoblje eksploatacije.

Analogno funkciji pouzdanosti, funkcija rada sustava bez sanacije oštećenja  $S_e(t)$  opisana je sljedećom relacijom:

$$S_e(t) = 1 - \int_0^t f_g(t) dt \quad (4.22.)$$

Gdje je  $f_g(t)$  funkcija gustoće vjerojatnosti sanacije oštećenja, te za podsustav dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 određena numeričkim modelom (tablica 3.8. do 3.10.)

Analogno, uvrštavanjem funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja umjesto funkcije pouzdanosti u relaciju 4.3. dobiva se relacija za funkciju intenziteta saniranih oštećenja:

$$\lambda_s(t) = \frac{T_R - \int_0^{T_R} S_e(t) dt}{T_R \int_0^{T_R} S_e(t) dt} \left[ \frac{\text{broj sanacija oštećenja}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.23.)$$

U svrhu optimizacije nužno je i definirati jedinične troškove sanacije oštećenja za *i*-ti podsustav. S obzirom da su troškovi u funkciji potrebnog vremena sanacije i utrošenih resursa [43], u daljnjem se razmatranju jediničnih troškova sanacije oštećenja po relaciji 2.13. pretpostavlja da je jedinični trošak materijala pri *i*-tom podsustavu konstantan po provedbi jedne sanacijske aktivnosti, a očekivana aktivna vremena sanacije oštećenja  $E_{SA}(T)$  zadana su numeričkim modelom za podsustav dodavača ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 u tablicama od 3.8. do 3.10. Unošenjem pojednostavnjenja jedinični troškovi sanacije oštećenja zadani su sljedećom relacijom:

$$c_S = c_M + c_R \cdot E_{SA}(T) \left[ \frac{\text{novac}}{\text{broj sanacija oštećenja}} \right] \quad (4.24.)$$

Sagledavajući događaj sanacije oštećenja, funkcija troškova održavanja promatranog tehničkog sustava, ovisi o jediničnim troškovima preventivnog održavanja i funkciji intenziteta preventivnog održavanja, jediničnim troškovima korektivnog održavanja i funkciji intenziteta kvara te jediničnim troškovima sanacije oštećenja i funkciji intenziteta saniranih oštećenja za promatrani period eksploatacije, odnosno opisana je sljedećom relacijom:

$$c_U(t) = c_P \lambda_{p, Hip}(t) + c_K \lambda_{k, Re}(t) + c_S \lambda_s(t) \left[ \frac{\text{novac}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.25.)$$

U svrhu zaštite podataka TE Plomin 2 u nastavku rada neophodno je apsolutne vrijednosti jediničnih preventivnih i korektivnih troškova i jediničnih troškova sanacije oštećenja (relacija 4.4., 4.5. i 4.24.) iskazati u relativnim vrijednostima. Sukladno tomu, pretvorba jediničnih troškova iz apsolutnih u relativne vrijednosti za *i*-ti podsustav vrši se pomoću sljedećih relacija:

$$c_{p-s,rel} = \frac{c_P}{c_P + c_K + c_S} \cdot 100 \quad (4.26.)$$

$$c_{k-s,rel} = \frac{c_K}{c_P + c_K + c_S} \cdot 100 \quad (4.27.)$$

$$c_{s,rel} = \frac{c_S}{c_P + c_K + c_S} \cdot 100 \quad (4.28.)$$

$$c_{u,rel} = c_{p,rel} + c_{k,rel} + c_{s,rel} = 100 \quad (4.29.)$$

Primjenom relacija 4.26. do 4.29. u tablici 4.2. iskazani su udjeli relativnih jediničnih troškova za podsustave dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1.

**Tablica 4.2.** Relativne vrijednosti jediničnih troškova održavanja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1

PODSUSTAV	$c_{k-s,rel}$ [%]	$c_{p-s,rel}$ [%]	$c_{s,rel}$ [%]	$c_{u,rel}$ [%]
Podsustav dodavač ugljena	62,7	30,1	7,2	100
Podsustav padni kanal ugljena	63,1	24,7	12,2	100
Podsustav cjevovod ugljene prašine br. 1	64,6	21,1	14,3	100

Uvrštavanjem relativnih vrijednosti jediničnih troškova umjesto apsolutnih u relaciju (4.25.), funkcija troškova održavanja s relativnim vrijednostima na  $i$ -tom podsustavu ili funkcija relativnih troškova održavanja opisana je sljedećom relacijom:

$$c_{u,rel}(t) = c_{p-s,rel}\lambda_{p,Hip}(t) + c_{k-s,rel}\lambda_{k,Re}(t) + c_{s,rel}\lambda_s(t) \left[ \frac{\text{broj održavanja}}{\text{sati rada}} \right] \quad (4.30.)$$

Gdje *broj održavanja* predstavlja broj dobiven međusobnim zbrojem broja preventivnog održavanja, broja korektivnog održavanja i broja sanacija oštećenja za promatrani period eksploatacije sustava.

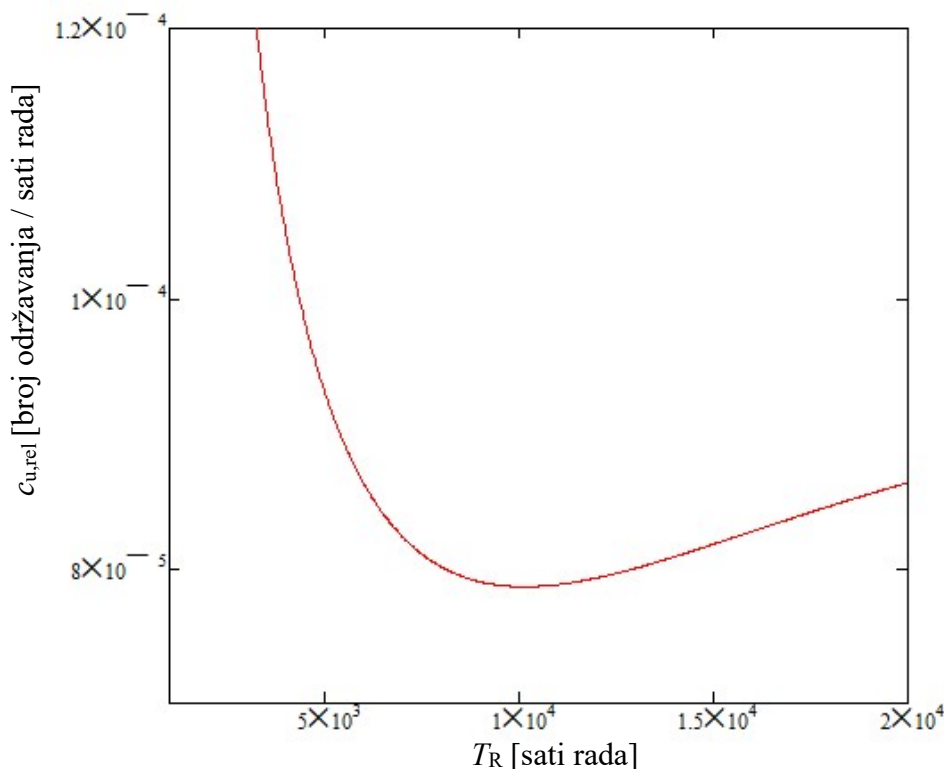
Uvrštavanjem relacija 4.3., 4.15. i 4.23. u relaciju 4.30. te izjednačavanjem relacije s nulom i deriviranjem po  $T_R$  određuju se koordinate minimuma funkcije, odnosno optimalna točka održavanja ili točka ekonomičnosti održavanja  $E_{MIN}$ . U skladu s time u nastavku rada određuju se optimalne točke održavanja za podsustave dodavača ugljena – kućište, padnog kanala ugljena i cjevovoda ugljene prašine br. 1. Pri izradi grafova funkcija i izračuna točke minimuma korišten je program MathCad 15.

*Određivanje točke ekonomičnosti održavanja za podsustav dodavača ugljena – kućište*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.9.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.3., 4.15. i relacije 4.22. odnosno 4.23., a potom uvrštavanjem uz, vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k-s,rel}$ ,  $c_{p-s,rel}$  i  $c_{s,rel}$  (tablica 4.2.) u relaciju 4.30., funkcija relativnih troškova održavanja  $c_{u,rel}(t)$  za podsustav dodavača ugljena – kućište ima sljedeći oblik:

$$c_{u,rel}(T_R) = 0,301 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,627 \cdot \frac{T_R - \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{T_R}{7794,52}\right)^{1,75114}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{T_R}{7794,52}\right)^{1,75114}} dt} + 0,072 \cdot \frac{T_R - \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{4243,01}\right)^{0,798922}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{4243,01}\right)^{0,798922}} dt} \quad (4.31.)$$

Na slici 4.7. prikazana je funkcija relativnih troškova održavanja ovisno o satima rada podsustava dodavača ugljena – kućište.



**Slika 4.7.** Graf funkcija relativnih troškova održavanja  $c_{u,rel}(t)$  za podsustav dodavač ugljena – kućište

Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.31., pri čemu je točka minimuma ujedno i točka ekonomičnosti održavanja te opisana je

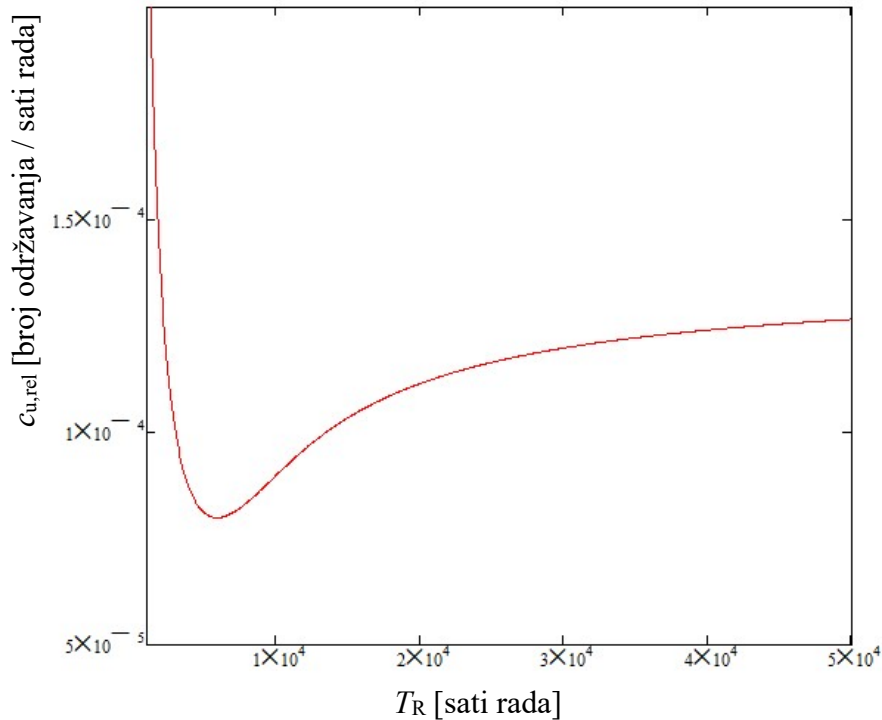
$E_{\text{MIN}}(1,013 \times 10^4; 7,863 \times 10^{-5})$ . U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno vrijeme rada sustava do preventivnog pregleda na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1  $T_{\text{R,MIN}}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 10130 radnih sati.

*Određivanje točke ekonomičnosti održavanja za podsustav padnog kanala ugljena*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.8.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.3., 4.15. i relacije 4.22. odnosno 4.23., a potom uvrštavanjem uz, vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k-s,rel}$ ,  $c_{p-s,rel}$  i  $c_{s,rel}$  (tablica 4.2.) u relaciju 4.30., funkcija relativnih troškova održavanja  $c_{u,rel}(t)$  za podsustav padnog kanala ugljena poprima sljedeći oblik:

$$c_{u,rel}(T_R) = 0,247 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,631 \cdot \frac{T_R - \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{5827,92}\right)^{2,14271}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{5827,92}\right)^{2,14271}} dt} + 0,122 \cdot \frac{T_R - \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{9505,21}\right)^{1,88971}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{9505,21}\right)^{1,88971}} dt} \quad (4.32.)$$

Na slici 4.8. prikazana je funkcija relativnih troškova održavanja ovisno o satima rada podsustava padnog kanala ugljena.



**Slika 4.8.** Graf funkcije relativnih troškova održavanja  $c_{u,rel}(t)$  za podsustav padnog kanala ugljena

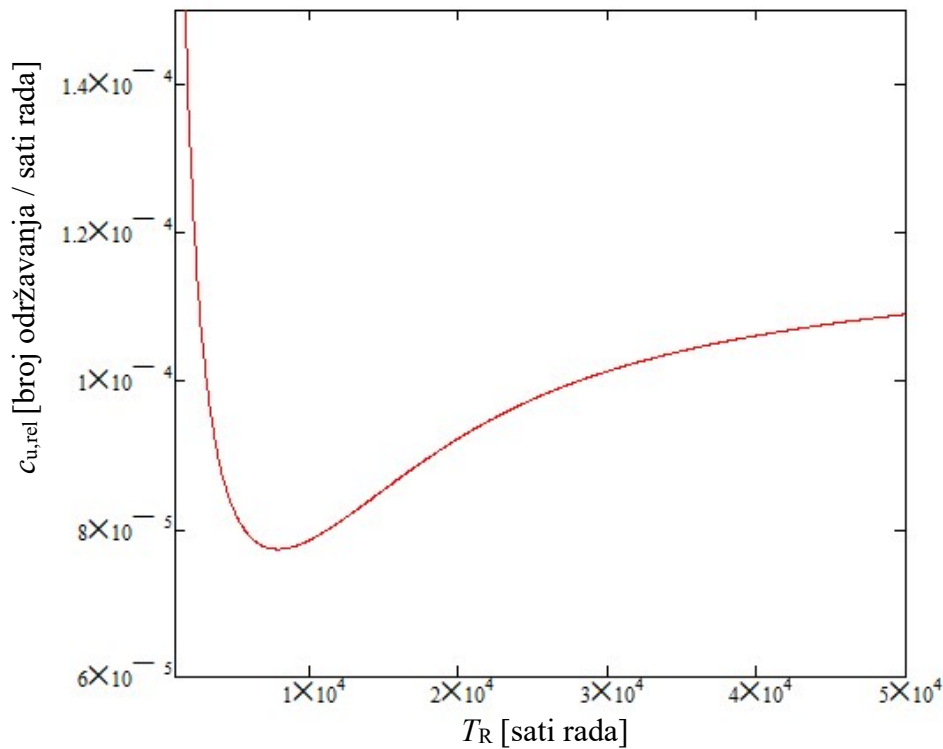
Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.32., pri čemu je točka minimuma ujedno i točka ekonomičnosti održavanja  $E_{MIN}(5,886 \times 10^3; 7,992 \times 10^{-5})$ . U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno vrijeme rada sustava do preventivnog pregleda na podsustavu padnog kanala ugljena  $T_{R,MIN}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 5886 radnih sati.

#### *Određivanje točke ekonomičnosti održavanja za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1*

U skladu s vrijednostima numeričkog Weibullova modela (tablica 3.10.), uvrštavanjem parametara raspodjele u relacije 4.3., 4.15. i relacije 4.22. odnosno 4.23., a potom uvrštavanjem uz, vrijednosti jediničnih troškova iskazanim u relativnim vrijednostima  $c_{k-s,rel}$ ,  $c_{p-s,rel}$  i  $c_{s,rel}$  (tablica 4.2.) u relaciju 4.30., funkcija relativnih troškova održavanja  $c_{u,rel}(t)$  za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 dobiva sljedeći oblik:

$$c_{u,rel}(T_R) = 0,211 \cdot \frac{1}{T_R} + 0,646 \cdot \frac{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{6548,38}\right)^{1,3963}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{6548,38}\right)^{1,3963}} dt} + 0,143 \cdot \frac{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{13047,1}\right)^{2,55615}} dt}{T_R \int_0^{T_R} e^{-\left(\frac{t}{13047,1}\right)^{2,55615}} dt} \quad (4.33.)$$

Na slici 4.9. prikazana je funkcija relativnih troškova održavanja ovisno o satima rada podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1.



**Slika 4.9.** Graf funkcije relativnih troškova održavanja  $c_{u,rel}(t)$  za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1

Primjenom računalnog programa MathCad 15 izračunana je točka minimuma funkcije 4.33., pri čemu je točka minimuma ujedno i točka ekonomičnosti  $E_{MIN}(7,884 \times 10^3; 7,726 \times 10^{-5})$ . U skladu s dobivenim vrijednostima, optimalno vrijeme rada sustava do preventivnog pregleda na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1  $T_{R,MIN}$  vrijednost je koja je dobivena nakon 7884 radnih sati.

#### 4.4. Evaluacija doprinosa sanacije oštećenja na točku ekonomičnosti

U cilju evaluacije doprinosa sanacije oštećenja u tablici 4.3. sintetizirani su rezultati za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 dobiveni istraživanjem i optimizacijom.

**Tablica 4.3.** Sinteza dobivenih rezultata za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1

Oznaka \ Podsustav	Podsustav dodavača ugljena - kućište	Podsustav padnog kanala ugljena	Podsustav cjevovoda ugljene prašine broj 1
$E_R(T)$ [sati rada]	6942	5161	5971
$E_G(T)$ [sati rada]	4812	8436	11583
$E_N(T)$ [sati rada]	2458	3655	4220
$c_{u,Re,rel}(T_{R,MIN})$ [broj održavanja / sati rada]	$7,236 \times 10^{-5}$	$8,759 \times 10^{-5}$	$8,844 \times 10^{-5}$
$T_{R,MIN}$ [sati rada]	10250	6083	8308
$c_{u,Hip,rel}(T_{R,MIN,Hip})$ [broj održavanja / sati rada]	$2,388 \times 10^{-4}$	$1,122 \times 10^{-4}$	$1,264 \times 10^{-4}$
$T_{R,MIN,Hip}$ [sati rada]	6555	3961	5993
$c_{u,rel}(T_{R,MIN})$ [broj održavanja / sati rada]	$7,863 \times 10^{-5}$	$7,992 \times 10^{-5}$	$7,726 \times 10^{-5}$
$T_{R,MIN}$ [sati rada]	10130	5886	7884
$T_{R,FIX}$ [sati rada]	2000	2000	2000

Kao što je prethodno navedeno, poboljšanje točke ekonomičnosti održavanja tehničkog sustava moguće je postići djelovanjem više aspekata no suštinski ili povećanjem razine eksploatacijske pouzdanosti za promatrani vremenski interval uz optimalne troškove održavanja ili zadržavanje razine eksploatacijske pouzdanosti uz smanjenje troškova održavanja određivanjem optimalnog vremena provedbe preventivnog održavanja u funkciji radnih sati promatranog sustava. Upravo primjenom sanacijskog održavanja tehničkog sustava kao jedna od alternativa poboljšanju ekonomičnosti održavanja, u nastavku se na primjeru podsustava dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 a svi kao dio sustava mlina br. 1 TE Plomin 2 određuje koliko je opravdano provođenje sanacije oštećenja bez obustave tehnološkog procesa i koliki je njegov doprinos na točku ekonomičnosti održavanja.



Relativni doprinos primjene sanacijskog održavanja na eksploatacijsku pouzdanost odrediti će se pomoću sljedeće relacije:

$$d_S = \frac{E_R(T) - E_N(T)}{E_N(T)} \cdot 100 \quad (4.34.)$$

Uvrštavanjem podataka iz tablice 4.3. u relaciju 4.34. izračunat je relativni doprinosi utjecaja sanacijskog održavanja na eksploatacijsku pouzdanost  $d_S$ , te su rezultati za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 iskazani u tablici 4.4.

Pri određivanju relativnog doprinosa primjene sanacijskog održavanja na troškove održavanja, polazeći od činjenice da točka ekonomičnosti održavanja određena koordinatama odnosno dviju veličinama, neophodno je komparaciju sa i bez utjecaja sanacije oštećenja izvršiti s dva aspekta gdje prvi predstavlja kompariranje vrijednosti vremena rada sustava do početka preventivnog održavanja, a drugi aspekt predstavlja kompariranje vrijednosti broja održavanja po satima rada sustava. Sukladno navedenom doprinos se određuje pomoću sljedeće relacije:

$$d_C = \left( k \cdot \frac{c_{u,rel}(T_{R,MIN})}{c_{u,Hip,rel}(T_{R,MIN,Hip})} - 1 \right) \cdot 100 \quad (4.35.)$$

Gdje faktor  $k$  predstavlja međusobni omjer optimalnog hipotetskog vremena rada sustava do preventivnog održavanja  $T_{R,MIN,Hip}$  i optimalnog vremena rada sustava do preventivnog održavanja  $T_{R,MIN}$ .

$$k = \frac{T_{R,MIN,Hip}}{T_{R,MIN}} \quad (4.36.)$$

Uvrštavanjem podataka iz tablice 4.3. u relaciju 4.35. izračunat je relativni doprinos na troškove održavanja  $d_C$ , te su rezultati za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 iskazani u tablici 4.4.

**Tablica 4.4.** Doprinos sanacijskog održavanja na točku ekonomičnosti održavanja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1

Oznaka \ Podsustav	Podsustav dodavača ugljena - kućište	Podsustav padnog kanala ugljena	Podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1
$d_S$	182%	41%	42%
$d_C$	-78%	-52%	-54%

Interpretirajući rezultate iz tablice 4.4., doprinos sanacijskog održavanja na razinu eksploatacijske pouzdanosti pri podsustavu dodavača ugljena – kućište iznosi 182 %, dok su troškovi održavanja smanjeni za 78 %. Jednakim se postupkom interpretiraju rezultati doprinosa sanacijskog održavanja na razinu eksploatacijske pouzdanosti na podsustavu padnog kanala ugljena koji iznose 41 %, a troškovi održavanja smanjeni su za 52 %. Također, doprinos sanacijskog održavanja očituje se i u slučaju podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 gdje je razina eksploatacijske pouzdanosti povećana za 42 %, te su troškovi održavanja smanjeni za 54 %.

Sagledavajući drugi aspekt poboljšanja ekonomičnosti određivanjem optimalnog vremena rada podsustava do provedbe preventivnog održavanja  $T_{R,MIN}$  i uspoređujući sa trenutačnim ciklusom provedbe preventivnog održavanja  $T_{R,FIX}$  za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, relativni doprinos pri provedbi ciklusa preventivnog održavanja određen je sljedećom relacijom:

$$d_T = \frac{T_{R,MIN} - T_{R,FIX}}{T_{R,FIX}} \cdot 100 \quad (4.37.)$$

Uvrštavanjem podataka iz tablice 4.3. u relaciju 4.37. izračunani su relativni doprinosi utjecaja optimalnog vremena rada podsustava do provedbe preventivnog održavanja u usporedbi s postojećim ciklusom preventivnog održavanja (tablica 4.5.).

**Tablica 4.5.** Doprinos optimalnog vremena rada podsustava do preventivnog održavanja u usporedbi s postojećim ciklusom preventivnog održavanja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1

Oznaka \ Podsustav	Podsustav dodavača ugljena - kućište	Podsustav padnog kanala ugljena	Podsustav cjevovoda ugljene prašine broj 1
$d_T$	401%	194%	294%

Doprinos optimalnog vremena rada do preventivnog održavanja u usporedbi s trenutačnim ciklusom provedbe preventivnog održavanja ukazuje na to da se vrijeme rada podsustava dodavača ugljena – kućište u usporedbi sa trenutačnim može povećati za 401 % uz zadržavanje jednake razine eksploatacijske pouzdanosti, dok će se troškovi preventivnog održavanja smanjiti na 20 % vrijednosti sadašnjih troškova. U slučaju podsustava padnog kanala ugljena, vrijeme rada između preventivnog održavanja u usporedbi s trenutačnim može se povećati za 194 % uz zadržavanje jednake razine eksploatacijske pouzdanosti, dok će se troškovi preventivnog održavanja smanjiti na 34 % vrijednosti sadašnjih troškova. Također, doprinos je

---

ostvaren i u slučaju podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1, gdje se vrijeme rada između preventivnog održavanja u usporedbi s trenutnim može povećati za 294 % uz zadržavanje jednake razine eksploatacijske pouzdanosti, a troškovi preventivnog održavanja smanjit na 25 % vrijednosti sadašnjih troškova.

Interpretacijom dobivenih rezultata potvrđuje se ukupni doprinos održavanja na točku ekonomičnosti za podsustave dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1, a samim time i glavna hipoteza ovog rada kojom se pretpostavlja da se optimizacijom procesa održavanja TE Plomin 2 s jedne strane povećava rentabilnost i radni vijek tehnološke opreme, a s druge strane smanjuju ukupni troškovi održavanja čime TE Plomin 2 kao proizvodni i poslovni objekt ostvaruje manje rashode.

---

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom je radu istražen učinak sanacijskog održavanja na točku ekonomičnosti održavanja na primjeru sustava mlinova u TE Plomin 2. U svrhu navedenog razvijen je model kojom se procjenjuje doprinos sanacijskog održavanja na točku ekonomičnosti održavanja iz dva aspekta; prvi predstavlja doprinos sanacijskog održavanja na eksploatacijsku pouzdanost i troškove održavanja promatranog tehničkog sustava, dok drugi aspekt predstavlja doprinos sanacijskog održavanja pri optimizaciji vremena provedbe preventivnog održavanja za promatrani tehnički sustav. U skladu s time, bilo je nužno analizirati složeni tehnički sustav u kojem se provodi sanacijsko održavanje uz postojanje relevantne baze podataka o karakterističnim događajima. Slijedom toga, istraživanja su provedena na primjeru sustava mlinova u termoelektrani TE Plomin 2.

U cilju evaluacije doprinosa sanacijskog održavanja bilo je nužno analizirati makro i mikro tehničko - ekonomski koncept termoelektrane, pri čemu makrokonceptom sagledavaju sve prihodovne i rashodovne strane te ukupna raspoloživost, dok se mikrokonceptom razmatraju sklop, podsustav i sustav s pripadajućom razinom eksploatacijske pouzdanosti, pogodnosti održavanja, raspoloživosti, troškova održavanja koji obuhvaćaju posljedične troškove zbog neisporučene električne energije termoelektrane. Analizirajući makrokoncept na primjeru TE Plomin 2 troškovi održavanja čine 18 % ukupnih poslovnih rashoda TE Plomin 2, od kojih su fiksni troškovi održavanja 62 %, a varijabilni 38 % uz prosječnu razinu radne raspoloživosti od 94 %. Pri analizi mikrokoncepta odabran je sustav mlinova čija je uloga opskrbljivanje ložišta ugljenom prašinom, a taj sustav čini ukupno šest identičnih mlinova. S obzirom na to da je ugljena prašina primarni energent pri obavljanju tehnološkog procesa proizvodnje električne energije kao finalnog proizvoda, razina kvalitete rada mlinova izravno utječe na kvantitativne pokazatelje uspješnosti termoelektrane, kao što su pogonska učinkovitost, radna i vremenska raspoloživost te eksploatacijska pouzdanost. Također, diskontinuiranost pri opskrbi ugljenom prašinom sustava ložišta kotla zbog zastoja pojedinog mlina prouzročenog kvarom kao posljedicu ima rad elektrane sa smanjenim kapacitetom, odnosno nastanak radne neraspoloživosti elektrane.

Koncept strategije održavanja sustava mlinova zastupa primjenu korektivnog i preventivnog održavanja. Preventivno održavanje provodi se po vremenskom ciklusu i održavanju po stanju, no na onim podsustavima gdje je to primjenjivo, provodi se i sanacijsko održavanje. Slijedom navedenog, u svrhu analize ekonomičnosti u radu je određen Spearmanov koeficijent korelacije između dviju skupina podataka te je potvrđeno sljedeće:

- korektivno održavanje pojedinog mlina u sustavu mlinova TE Plomin 2 pridonijelo je održavanju visoke razine operativne raspoloživosti;
- postoji povezanost između provedbe broja remonta i broja zastoja zbog kvara, odnosno provedba većeg broj remonata pridonosi smanjenju broja zastoja zbog kvara i obratno;
- postoji povezanost između sati rada sustava mlina i broja zastoja zbog kvara na mlinovima, odnosno veći broj radnih sati sustava mlina pridonosi većem broju zastoja zbog kvara i obratno;
- ne postoji bitna povezanost broja provedbe preventivnog održavanja-pregleda i broja zastoja radi korektivnog održavanja;
- ne postoji bitna povezanost broja zastoja mlina zbog vanjskih čimbenika (razina kvalitete ugljena) i broja zastoja radi korektivnog održavanja.

Postavljanjem modela u svrhu provedbi analiza mikro tehničko-ekonomskog koncepta na sustavu mlinova, osim izrade funkciograma, definirani su statusi promjene stanja: objekt održavanja je u točki ispravnosti, objekt održavanja je u radu uz prisutnost oštećenja, objekt održavanja je u kvaru, objekt održavanja je u zastoju radi provedbe preventivnog održavanja ili prisutan je zastoj ispravnog objekta održavanja. Navedeni statusi uzimaju u obzir i događaj sanacije oštećenja, pri čemu se oštećenje definira kao neusklađenost objekta održavanja u usporedbi s normalnim stanjem uz zadržavanje performansi procesa u okviru specificiranih granica te može poprimiti sljedeća dva statusa: bez mogućnosti sanacije ili s mogućnošću sanacije. Ako nastalo oštećenje nije u mogućnosti sanirati tijekom rada sustava, tada ono prelazi u događaj kvara; ako se sanira bez obustavljanja tehnološkog procesa, to nazivamo događaj sanacije oštećenja. Slijedom navedenog, postavljenim modelom za predmetni sustav obuhvaćaju se dva događaja, događaj kvara ili događaj sanacije oštećenja na promatranom tehničkom sustavu, uz napomenu da su to statistički neovisni događaji. No, za potrebe određivanja ekonomičnosti potrebno je za svaki nastali događaj prikupiti i pojedine atribute događaja: vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava, vrijeme korektivnog održavanja, vrijeme aktivnog korektivnog održavanja, vrijeme logističkog korektivnog održavanja, vrijeme sanacijskog održavanja, vrijeme logističkog sanacijskog održavanja, vrijeme aktivnog sanacijskog održavanja, vrijeme preventivnog održavanja, vrijeme rada sustava te troškove provedbe korektivnog održavanja, sanacijskog i preventivnog održavanja. Upravo je zbog toga osmišljen posebni oblik za prikupljanje podataka, odnosno za stvaranje relevantne baze podataka te su na primjeru sustava mlina TE Plomin 2 prikupljeni podaci za razdoblje

eksploatacije od osam godina. Uspoređujući broj potrebnih podataka po pojedinom podsustavu sustava mlina u svrhu određivanja numeričkog modela s ukupnim brojem njegovih podsustava i u svrhu racionalizacije, a u cilju potvrđivanja postavljenih radnih hipoteza, provedba istraživanja bila je usmjerena na tri karakteristična podsustava sustava mlina br. 1: podsustav dodavač ugljena-kućište, podsustav padni kanal ugljena i podsustav cjevovod ugljene prašine br. 1. Provedbom statističke analize karakterističnih podataka predmetnih podsustava uz upotrebu programskog alata Minitab 16 potvrđeno je:

- da se funkcija eksploatacijske pouzdanosti na sva tri podsustava ravna po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli;
- da se funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja na sva tri podsustava ravna po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli;
- da se funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti na sva tri podsustava ravna po dvoparametarskoj Weibullovoj raspodjeli;
- da se funkcija pogodnosti održavanja na sva tri podsustava ravna po log-normalnoj raspodjeli;
- da se funkcija logističkog korektivnog održavanja na sva tri podsustava ravna po log-normalnoj raspodjeli;
- da se funkcija aktivnog korektivnog održavanja na sva tri podsustava ravna po log-normalnoj raspodjeli;
- da se funkcija pogodnosti sanacijskog održavanja na sva tri podsustava ravna po log-normalnoj raspodjeli;
- da se funkcija logističkog sanacijskog održavanja na sva tri podsustava ravna po log-normalnoj raspodjeli;
- da se funkcija aktivnog sanacijskog održavanja na sva tri podsustava ravna po log-normalnoj raspodjeli.

Dobivene funkcije s egzaktno određenim parametrima opisuju vjerojatnosne događaje eksploatacije predmetnih podsustava, odnosno predstavljaju njihove numerički model. Integracijom numeričkog modela i troškova određene su jedinične funkcije troškova tijekom eksploatacije, pri čemu minimum funkcije predstavlja optimalnu točku, odnosno točku ekonomičnosti. Optimalna točka opisana je koordinatama: vrijednost na ordinati predstavlja

troškove održavanja, dok vrijednost na apscisi predstavlja optimalno vrijeme provedbe preventivnog održavanja za promatrani tehnički sustav. S obzirom na to da se u dosadašnjim istraživanjima optimalne točke preventivnog održavanja na tehničkim sustavima primjenjivao numerički model eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja, a događaji kao što su nastanak oštećenja na sustavu i provedba sanacije nisu razmatrani, u ovom je radu na predmetnim primjerima podsustava određena optimalna točka s utjecajem sanacije oštećenja i bez njega. Na temelju dobivenih razlika određena je evaluacija doprinosa sanacije oštećenja na točku ekonomičnosti. Slijedom toga, u skladu s prvim aspektom točke ekonomičnosti utvrđeni doprinosi ukazuju na sljedeće: doprinos sanacijskog održavanja eksploatacijskoj pouzdanosti za podsustav dodavača ugljena – kućište iznosi 182 %, dok su ukupni troškovi održavanja podsustava smanjeni za 72 %; doprinos sanacijskog održavanja eksploatacijskoj pouzdanosti za podsustav padnog kanala ugljena iznosi 41 %, dok su ukupni troškovi održavanja podsustava smanjeni za 52 %; doprinos sanacijskog održavanja eksploatacijskoj pouzdanosti za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 iznosi 42 %, dok su ukupni troškovi održavanja podsustava smanjeni za 54 %.

Doprinos se očituje razmatrajući i drugi aspekt – pri optimizaciji ciklusa provedbe preventivnog održavanja uzima se u obzir i doprinos sanacijskog održavanja te je tako ukupni doprinos sljedeći: u slučaju podsustava dodavača ugljena – kućište, doprinos optimalnog vremena rada do preventivnog održavanja u usporedbi s trenutačnim ciklusom provedbe može se povećati za 401 % uz zadržavanje jednake razine eksploatacijske pouzdanosti, dok će se troškovi preventivnog održavanja smanjiti na 20 % vrijednosti sadašnjih troškova; u slučaju podsustava padnog kanala ugljena, vrijeme rada između preventivnog održavanja u usporedbi s trenutačnim može se povećati za 194 % uz zadržavanje jednake razine eksploatacijske pouzdanosti, dok će se troškovi preventivnog održavanja smanjiti na 34 % vrijednosti sadašnjih troškova; doprinos je ostvaren i u slučaju podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 pri čemu se vrijeme rada između preventivnog održavanja u usporedbi s trenutačnim može povećati za 294 % uz zadržavanje jednake razine eksploatacijske pouzdanosti, dok će se troškovi preventivnog održavanja smanjiti na 25 % vrijednosti sadašnjih troškova. Također važno je naglasiti da u ovom radu optimizacija troškova održavanja provedena je za podsustave kao dio sustava pri kojem se odvija tehnološki proces. S obzirom da provedba preventivnog održavanja na i-tom podsustavu iziskuje planiranu obustavu sustava odnosno tehnološkog procesa, neophodno je, primjenom identičnog postupka prikazanog u ovom radu, izvršiti optimizaciju troškova održavanja za preostale podsustave te tada odrediti ciklus provedbe preventivnog održavanja

---

na sustavu gdje će se za vrijeme obustave provoditi istovremeno aktivnosti preventivnog održavanja na svim i-tim podsustavima obustavljenog sustava.

Interpretacijom dobivenih rezultata potvrđuje se ukupni doprinos na točku ekonomičnosti održavanja za podsustav dodavač ugljena-kućište, podsustav padni kanal ugljena i podsustav cjevovod ugljene prašine br. 1, a samim time i glavna hipoteza ovog rada kojom se pretpostavilo da se optimizacijom procesa održavanja TE Plomin 2 s jedne strane povećava rentabilnost i radni vijek tehnološke opreme, a s druge strane smanjuju ukupni troškovi održavanja čime TE Plomin 2 kao proizvodni i poslovni objekt ostvaruje manje rashode.

Rezultati dobiveni provedenim istraživanjem svoju bi primjenu trebali pronaći u sljedećem:

- u predviđanju kvarova komponenti, sklopova, podsustava i sustava u TE Plomin 2, u boljem alociranju intenziteta preventivnog održavanja i financijskih sredstva te u nabavci pričuvnih dijelova;
- kao bitni podaci pri donošenju odluka u TE Plomin 2, osim u primjeni dobivenih rezultata za predmetne podsustave, i u primjeni potvrđenog modela za poboljšanje točke ekonomičnosti na ostalim sustavima;
- u primjeni modela u svim tehnološkim procesima u kojima su visoki troškovi zastoja prouzročenoga kvarom u cilju poboljšanja točke ekonomičnosti;
- u analizi opravdanosti ulaganja u razvoj strategije održavanja iz aspekta sanacije oštećenja u radu, odnosno analizi opravdanosti pri ulaganju u uobličavanje tima održavatelja sa specijalnim alatima, postupcima i obrazovanjem u industrijama.

Buduća istraživanja usmjerit će se na istraživanju ukupne ili makrooptimizacije provedbe preventivnog održavanja termoelektrane u skladu s novim zahtjevima tržišta električne energije koje je uvjetovano razvojem i zastupljenošću obnovljivih izvora električne energije.



---

**LITERATURA**

- [1] AE&E: *Poglavlje B1-B16 – Pogonski priručnici (BHB)*, Austrian Energy & Environment, Wien 2000.
- [2] Aleksić M., Stanojević P.: *Prilog definisanju održavanja prema stanju u mornarici*, Tehnička dijagnostika (BROJ 1), str. 27–35, 2007.
- [3] Arora N., Kumar D.: *Stochastic analysis and maintenance planning of the ash handling system in the thermal power plant*, Microelectron. Reliab., Vol. 37, No. 5, pp. 819-824, 1997.
- [4] Azadeh A, Asadzadeh SM, Salehi N, Firoozi M.: *Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system-A combined Markovian simulation model*, Reliability Engineering & System Safety, Oct 31; 142:357-68, 2015.
- [5] Bareiß J., Buck P., Matschecko B., Jovanovic A., Balos D., Perunicic M.: *RIMAP demonstration project. Risk-based life management of piping system in power plant Heilbronn*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 81, pp. 807–813, 2004.
- [6] Basri E., Abdul R., Izatul H., Ab-Samat H., Kamaruddin S.: *Preventive Maintenance (PM) planning: a review*, Journal of Quality in Maintenance Engineering. 23. 10.1108/JQME-04-2016-0014, 2017.
- [7] Batelić J., Matika D., Fabić M.: *Izrada baze podataka u svrhu provedbe statističke analize složenog tehničkog sustava*, 3. konferencija „Održavanje” 2014, Zenica, lipanj 11-13, pp. 257-264, 2014.
- [8] Batelić J., Matika D., Fabić M.: *Osnovni pojmovi i nazivlje pri određivanju vjerojatnosti promjene stanja složenog tehničkog sustava u termoelektrani*, 20. Međunarodno savjetovanje, HDO, 2014.
- [9] Batelić J.: *Analiza pogonske učinkovitosti TE Plomin 1 i 2*, Interni izvještaj TE Plomin br.: IZV06/2015, Plomin Luka, 2015.
- [10] Bilić B., Jurjević M., Brale J.: *Procjena pouzdanosti tehničkog sustava primjenom Markovljevih modela i sustavne dinamike*, Strojarstvo 52 (3), str. 271–281, 2010.

- 
- [11] Bredthauer C., sur./at al.: *Begriffe der Versorgungswirtschaft/Teil B: Elektrizität und Fernwärme/ Heft 3: Grundlagen und Systematik der Verfügbarkeitsermittlung für Wärmekraftwerke*, VGB Technische, Essen 2008.
- [12] Carazas F., J., G., Martha de Souza G.,F.: *Availability Analysis of Gas Turbines Used in Power Plants*, Int. J. of Thermodynamics, Vol. 12 (No. 1), pp. 28-37, March 2009.
- [13] Čala I.: *Prilog istraživanju elemenata organizacijske strukture održavanja strojarske opreme*, FSB, Zagreb 1998.
- [14] D'Agostino R. B., Stephens M. A.: *Goodness of Fit Techniques*, Marcel Dekker, NewYork Basel, 1986.
- [15] Deshpande V.S., Modak J.P.: *Maintenance strategy for tilting table of rolling mill based on reliability Considerations*, Reliability Engineering and System Safety 80 1–18, 2003.
- [16] Eti, M.C., Ogaji S.O.T., Probert S.D.: *Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station*, Applied Energy 84, 202–221, 2007.
- [17] HEP: *Dnevni izvještaj pogona*, HEP - Proizvodnja, TE Plomin 1999. - danas.
- [18] HEP: *Mjesečni izvještaj proizvodnje*, TE Plomin 2, 2000. -danas
- [19] HEP: *Pravilnik o održavanju postrojenja*, HEP - Proizvodnja, Zagreb 2006.
- [20] HEP: *Pravilnik za odjel smjene*, HEP - Proizvodnja, Zagreb 2000.
- [21] HEP: *Bilten 192*, HEP d.d., Zagreb 2000.
- [22] HRN EN 13306:2011: *Održavanje - Nazivlje u održavanju (EN 13306:2010)*, Hrvatski zavod za norme, 2011.
- [23] HRN EN 15341:2009 - *Održavanje -- Pokazatelji ključnih značajki održavanja*, Hrvatski zavod za norme, 2009.
- [24] HRN EN 60300-3-11:2010 - *Upravljanje pouzdanošću -- Dio 3-11: Upute za primjenu - održavanje s naglaskom na pouzdanost (IEC 60300-3-11:2009; EN 60300-3-11:2009)*, Hrvatski zavod za norme, 2010.

- 
- [25] HRN EN 60300-3-14:2008 - *Upravljanje pouzdanošću -- Dio 3-14: Upute za primjenu - održavanje i podrška održavanja (IEC 60300-3-14:2004; EN 60300-3-14:2004)*, Hrvatski zavod za norme, 2008.
- [26] HRN EN 61703:2008 - *Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms (IEC 61703:2001; EN 61703:2002)*, Hrvatski zavod za norme, 2008.
- [27] <http://ppe/> (pokazatelj proizvodnje elektrana – web baza podataka od 2001.g.)
- [28] [http://szg01wl12cadf01:7005/cim/faces/spring?\\_adf.no-new-window-redirect=true#!0](http://szg01wl12cadf01:7005/cim/faces/spring?_adf.no-new-window-redirect=true#!0) (*CIM - Coal Information Management*), baza podataka od 2015.
- [29] Jaturonnatee, J., Murthy, D.N.P. and Boondiskulchok, R.: *Optimal preventive maintenance of leased equipment with corrective minimal repairs*, European Journal of Operational Research, Vol. 174 No. 1, pp. 201-15, 2006.
- [30] Klarin M., Misita M., Spasojević-Brkić V.: *Savremene tendencije u upravljanju održavanjem – pristup održavanju zasnovan na riziku*, Tehnička dijagnostika br. 3 str. 17-22, 2008.
- [31] Khatab A., Rezg N., Ait-Kadi D.: *Optimal replacement with minimal repair policy for a system operating over a random time horizon*, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 17 Issue: 4, pp. 415-423, 2011.
- [32] Lecomte T., sur./at al.: *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*; EUR 28836 EN; doi:10.2760/949, 2017.
- [33] Lim, J.H. and Park, D.H.: *Optimal periodic preventive maintenance schedules with improvement factors depending on number of preventive maintenances*, Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol. 24 No. 1, pp. 111-24, 2007.
- [34] Majdandžić N.: *Strategije održavanja i informacijski sustavi održavanja*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod 1999.
- [35] Matika D., Batelić J., Nasser A.: *Statistical analysis for power plant maintenance*, 7. međunarodna znanstveno-stručna konferencija: Dani kriznog upravljanja, Velika Gorica, Svibanj 22-23, pp. 1095-1110, 2014.

- 
- [36] Matika D., Batelić J.: *Određivanje eksploatacijske pouzdanosti termoelektrane Plomin 2 u svrhu vrednovanja kritične nacionalne infrastrukture*, III. međunarodna znanstveno-stručna konferencija: „Nove sigurnosne ugroze i kritična nacionalna infrastruktura”, Zagreb, Rujan 12-13, Pp. 218-227, 2013.
- [37] Mikuličić, V., Šimić, Z.: *Modeli pouzdanosti, raspoloživosti i rizika u elektroenergetskom sustavu*, I dio, Kigen d.o.o., Zagreb, 2008.
- [38] Milovanović Z., N., Milanović D.: *The current condition assessment and forecast of behavior features of complex power-process plants*, Communications in Dependability and Quality Management, vol. 12, br. 2, pp. 19-26, 2009.
- [39] Milovanović, Z., N.: *The algorithm of activities for improvement of competitiveness of power-process plants*, Communications in Dependability and Quality Management, 12(3), pp. 18-28, 2009.
- [40] Montgomery, D., Runger, G.: *Applied Statistics and Probability for Engineers*, USA, 2003.
- [41] Obradović M.: *Research and comparison of the influence of low rank coals characteristics on their grindability and milling process parameters*, Faculty of Mechanical Engineering, Beograd, 2015.
- [42] Sunday O., Olayiwola F. R.: *A Study of Implementation of Preventive Maintenance Programme in Nigeria Power Industry—Egbin Thermal Power Plant*, Case Study. Energy and Power Engineering. 03. 10.4236/epe.2011.33027, 2011.
- [43] Programski alat: *Sustav upravljanja poslovanjem održavanja*, Ekonerg, Zagreb 2001.
- [44] Ramnarayan S., Tiwari A.C., Anupama Y.: *Implementation of preventive maintenance program in thermal power station: A review and case study*, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), ISSN 0976 –6340, Volume 3, Issue 2, pp. 685-692, 2012.
- [45] Sculli D., Choy S.K.: *Power plant boiler feed system reliability: A case study*, Computers in Industry 21, pp. 93-99, 1993.
- [46] Sheng Su H, qiang Kang Y, di Li J.: *Control Strategy Analysis on Preventive Maintenance*, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 12(9):6711-24, 2014.

- 
- [47] Sima Z., .Ghaedi-Kajuei P.: *Evaluation of Various Maintenance Strategies for Reliability Assessment of Thermal Power Plants*, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 7, No. 3, pp. 617- 624, 2017.
- [48] Gupta S., Tewarib P. C.: *Simulation Model for Stochastic Analysis and Performance Evaluation of Condensate System of a Thermal Power Plant*, Bangladesh J. Sci. Ind. Res. 44(4), pp. 387-398, 2009.
- [49] Sturm A.: *Efficient Operations - Intelligent Diagnosis And Maintenance Of Plants*, VGB Power Tech Service GmbH, Essen 2003.
- [50] Šegulja I., Bukša A.: *Održavanje broskog pogona*, Pomorstvo, god. 20, br. 2, str. 105-118, 2006.
- [51] Šošić I.: *Primijenjena statistika*, Školska knjiga, Zagreb 2006.
- [52] TE Plomin: *Godišnji financijski izvještaj TE Plomin d.o.o.*, Plomin, od 2002 do 2015.g.
- [53] TE Plomin: *Godišnji poslovni izvještaj TE Plomin d.o.o.*, Plomin, od 2002 do 2015.
- [54] TE Plomin: *Interne analize ugljena*, Kemijski laboratorij Plomin, baza podataka od 2005 do 2017.
- [55] Tomas V., Šegulja I., Čišić D.: *Mogućnosti i problemi primjene suvremenih strategija održavanja u pomorstvu*, Pomorstvo, str. 29-41, 2005.
- [56] T-3000 – Siemens: *Uputstva za rad*, TE – Plomin 2, Siemens d.d., Zagreb, 2015.
- [57] Udovičić B.: *Elektroenergetski sustav*, Kigen, Zagreb 2005.
- [58] Udovičić M., sur./at al.: *Što treba znati kada izračunavamo koeficijent korelacije?*, Biochemia Medica,17(1):10-5, 2007.
- [59] VGB Power Tech: *KKS Designation System for Power Plants*, VGB Power Tech Service GmbH, Essen 1990.
- [60] Vujanović N.: *Teorija pouzdanosti tehničkih sistema*, Vojno izdavački i novinski centar, Beograd, 1990.
- [61] Vukelić I.: *Prezentacija TE Plomin 2*, Plomin, 2002.
- [62] www.minitab.com, preuzeto 10.1.2016. godine

[63] [www.ptc.com/en/products/mathcad](http://www.ptc.com/en/products/mathcad) , preuzeto 10.10.2018. godine

[64] [www.ibm.com/analytics/spss-statistics-software](http://www.ibm.com/analytics/spss-statistics-software) , preuzeto 4.5.2018. godine

[65] Yang, S.K.: *A condition-based preventive maintenance arrangement for thermal power plants*, Electric Power Systems Research 72, pp. 49–62, 2004.

**POPIS KRATICA I OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\mu$	–	Srednja vrijednost (engl. <i>scale parameter</i> ) – log-normal
$a$	–	Parametar skaliranja (engl. <i>scale parameter</i> ) – Weibull
$c$	–	Parametar oblika (engl. <i>shape parameter</i> ) – Weibull
$c_E$	Novac / MWh	Ugovoreno utvrđena jedinična cijena neisporučene električne energije
$c_K$	Novac / broj korektiva	Jedinični troškovi korektivnog održavanja
$C_K$	Novac	Troškovi korektivnog održavanja
$c_{k,Re,rel}$	%	Jedinični trošak korektivnog održavanja iskazan u relativnim vrijednostima bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$c_{k-s,rel}$	%	Jedinični trošak korektivnog održavanja iskazan u relativnim vrijednostima
$c_M$	Novac / (broj održavanja)	Jedinični troškovi utrošenog materijala pri održavanju
$C_M$	Novac	Troškovi utrošenog materijala
$C_{MD}$	Novac	Troškovi ugrađenih pričuvnih dijelova ili komponenti
$C_{MM}$	Novac	Troškovi utrošenog potrošnog materijala
$c_N$	Novac / ((sati) x (broj korektiva))	Jedinični troškovi smanjenog kapaciteta proizvodnje elektrane
$C_N$	Novac	Troškovi nastali kao posljedica neraspodivnosti elektrane
$c_P$	Novac / broj preventiva	Jedinični troškovi preventivnog održavanja
$C_P$	Novac	Ukupni troškovi preventivnog održavanja
$c_{p,Re,rel}$	%	Jedinični trošak preventivnog održavanja iskazan u relativnim vrijednostima bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$C_{PP}$	Novac	Troškovi provedbe preventivnog održavanja – pregled
$C_{PR}$	Novac	Troškovi provedbe preventivnog održavanja – remont
$c_{p-s,rel}$	%	Jedinični trošak preventivnog održavanja iskazan u relativnim vrijednostima

Oznaka	Jedinica	Opis
$c_R$	Novac / ((sati) x (broj preventive ili korektive))	Jedinični troškovi radne snage
$C_R$	Novac	Troškovi radne snage
$C_{RK}$	Novac	Troškovi kvalificiranih radnika
$C_{RS}$	Novac	Troškovi specijalista
$C_{RV}$	Novac	Troškovi visokokvalificiranih radnika
$C_S$	Novac	Troškovi sanacije oštećenja tijekom rada tehnološkog procesa
$c_S$	Novac / broj sanacija oštećenja	Jedinični troškovi sanacije oštećenja
$c_{s,rel}$	%	Jedinični trošak sanacije oštećenja iskazan u relativnim vrijednostima
$C_{SM}$	Novac	Troškovi utrošenog materijala za sanaciju
$C_{SM}$	Novac	Troškovi materijala utrošenog za sanaciju na sustavu mlina
$c_U$	Novac / broj održavanja	Ukupni jedinični troškovi održavanja ili jedinični troškovi održavanja
$C_U$	Novac	Ukupni troškovi održavanja ili troškovi održavanja
$c_U(t)$	Novac / sati rada	Funkcija troškova održavanja
$c_{u,Hip}(t)$	Novac / sati rada	Funkcija hipotetskih troškova održavanja
$c_{u,Hip,rel}(t)$	Broj održavanja / sati rada	Funkcija relativnih hipotetskih troškova održavanja
$C_{U,Re}$	Novac	Ukupni troškovi održavanja bez provedbe sanacije oštećenja
$c_{U,Re}(t)$	Novac / sati rada	Funkcija troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije
$c_{u,Re,rel}$	%	Jedinični trošak održavanja iskazan u relativnim vrijednostima bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$c_{u,Re,rel}(t)$	Broj održavanja / sati rada	Funkcija relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$c_{u,rel}$	%	Jedinični trošak održavanja iskazan u relativnim vrijednostima
$c_{u,rel}(t)$	Broj održavanja / sati rada	Funkcija relativnih troškova održavanja



Oznaka	Jedinica	Opis
$d_C$	%	Relativni doprinos primjene sanacijskog održavanja na troškove održavanja
$D_E$	Novac	Troškovi naknade za zaštitu okoliša
$D_{EL}$	Novac	Prihodi iz prodaje električne energije
$D_G$	Novac	Troškovi goriva
$D_{NUS}$	Novac	Prihodi iz prodaje nusprodukata
$D_O$	Novac	Ostali troškovi poslovanja elektrane
$D_{OK}$	Novac	Troškovi korektivnog održavanja elektrane
$D_{OP}$	Novac	Troškovi preventivnog održavanja elektrane
$D_{OPT}$	Novac	Troškovi tekućeg preventivnog održavanja
$D_{OR}$	Novac	Troškovi preventivnog održavanja – remont
$D_{OS}$	Novac	Troškovi održavanja elektrane
$D_{PP}$	Novac	Poslovni prihodi termoelektrane
$D_{PR}$	Novac	Poslovni rashodi elektrane
$d_S$	%	Relativni doprinos primjene sanacijskog održavanja na eksploatacijsku pouzdanost
$d_T$	%	Relativni doprinos zbog optimalnog ciklusa provedbe preventivnog održavanja
EES	-	Elektroenergetski sustav
$E'_{MIN}$	Novac / sati rada	Točka ekonomičnosti održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$E_G(T)$	Sati rada	Očekivano vrijeme rada sustava do nastanka sanacije oštećenja
$E_K(T)$	Sati rada	Očekivano vrijeme popravka pri korektivnom održavanju
$E_{KA}(T)$	Sati	Očekivano aktivno vrijeme korektivnog održavanja
$E_{KL}(T)$	Sati	Očekivano logističko vrijeme pri korektivnom održavanju
$E_{MIN}$	Novac / sati rada	Točka ekonomičnosti održavanja
$E_{MIN,Hip}$	Novac / sati rada	Hipotetska točka ekonomičnosti održavanja
$E_N(T)$	Sati rada	Očekivano vrijeme rada sustava do nastanka događaja kvar ili sanacija oštećenja
$E_R(T)$	Sati rada	Očekivano vrijeme rada sustava do nastanka kvara
$E_S(T)$	Sati rada	Očekivano vrijeme provedbe sanacijskog održavanja
$E_{SA}(T)$	Sati	Očekivano aktivno vrijeme sanacije oštećenja
$E_{SL}(T)$	Sati	Očekivano logističko vrijeme sanacije oštećenja
$f_e(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti kvara
$f_{e,Hip}(t)$	-	Funkcija hipotetske gustoće vjerojatnosti kvara
$f_g(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti sanacije oštećenja
$G_M$	–	Pojedinačno opterećenje mlina
$H_d$	MJ/kg	Ogrjevne vrijednosti ugljena
$HGI$	–	Indeks tvrdoće ugljena

Oznaka	Jedinica	Opis
$K_E$	–	Skupina elektroenergetskih objekata održavanja
$K_G$	–	Skupina betonsko konstrukcijskih objekata održavanja
$K_I$	–	Skupina instrumentacijskih ili mjerno, regulacijski i upravljački objekti održavanja
$K_S$	–	Skupina strojarskih objekata održavanja
$L_E$	–	Oznaka tehnologa elektroenergetike za elektroenergetske objekte
$L_G$	–	Oznaka tehnologa za građevinske objekte za objekte održavanja betonskih konstrukcija
$L_I$	–	Oznaka tehnologa instrumentacije za objekte održavanja u funkciji mjerenja, regulacije i upravljanja sustavom mlina pri provedbi procesa održavanja
$L_S$	–	Oznaka tehnologa strojarstva za objekte održavanja mehaničkog dijela sustava mlina
$O_{GK}$	–	Status bez mogućnosti sanacije
$O_{GP}$	–	Status mogućnost sanacije
$P$	–	Razina signifikantnosti
$P_{MIN}$	MW	Snaga elektrane pri tehničkom minimumu
$P_N$	MW	Nazivna električna snaga elektrane
$P_N$	MW	Nazivna snaga na generatoru elektrane
$R_e(t)$	–	Funkcija eksploatacijske pouzdanosti
$R_{e,el}(t)$	–	Funkcija eksploatacijske pouzdanosti TE Plomin 2
$R_{e,Hip}(t)$	–	Funkcija hipotetske eksploatacijske pouzdanosti
$r_s$	–	Spearmanov koeficijent
$R_{UP}$	10 % pri R90 $\mu\text{m}$	Granulacije ugljene prašine
$s$	–	Standardna devijacija (engl. <i>loc parameter</i> ) – log-normal
$S_e(t)$		Funkcija vjerojatnosti rada bez sanacije oštećenja
$S_I$	–	Status – zastoj ispravnog sustava mlina
$S_K$	–	Status – sustav mlina u zastoju radi provedbe korektivnog održavanja
$S_{KO}$	–	Status – objekt održavanja je u kvaru
$S_P$	–	Status – sustav mlina u zastoju radi provedbe preventivnog održavanja
$S_{PO}$	–	Status – objekt održavanja je u zastoju radi provedbe preventivnog održavanja
$S_R$	–	Status – sustav mlina u radu
$S_{RG}$	–	Status – objekt održavanja je u radu uz prisutnost oštećenja

Oznaka	Jedinica	Opis
$S_{RN}$	–	Status – objekt održavanja je u točki ispravnosti
$S_{ZO}$	–	Status – zastoj ispravnog objekta održavanja
$T_{R,MIN}$	Sati rada	Optimalno vrijeme rada sustava do preventivnog pregleda bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$T_I$	Sati	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava
$T_K$	Sati	Vrijeme korektivnog održavanja
$T_{KA}$	Sati	Aktivno vrijeme korektivnog održavanja
$T_{KL}$	Sati	Logističko vrijeme korektivnog održavanja
$T_P$	Sati	Vrijeme preventivnog održavanja
$T_{PA}$	Sati	Aktivno vrijeme za preventivnog održavanja
$T_{PL}$	Sati	Logističko vrijeme preventivnog održavanja
$T_{PP}$	Sati	Vrijeme provedbe preventivnog održavanja - pregled
$T_{PR}$	Sati	Vrijeme provedbe remonta
$T_{PS}$	Sati	Vrijeme provedbe održavanja po stanju
$T_R$	Sati rada	Vrijeme rada sustava
$T_{R,FIX}$	Sati rada	Fiksni ciklus između dva preventivna održavanja
$T_{R,MIN}$	Sati rada	Optimalno vrijeme rada sustava do preventivnog održavanja
$T_{R,MIN,Hip}$	Sati rada	Optimalno hipotetsko vrijeme rada sustava do preventivnog održavanja
$T_{RI}$	Sati rada	Vrijeme između dva događaja (kvar ili sanacija oštećenja)
$T_{RK}$	Sati rada	Vrijeme između dva kvara
$T_{RO}$	Sati rada	Vrijeme između dvije sanacije oštećenja
$T_S$	Sati	Vrijeme sanacijskog održavanja
$T_{SA}$	Sati	Aktivno vrijeme sanacijskog održavanja
$T_{SL}$	Sati	Logističko vrijeme sanacijskog održavanja
$X$	-	Udio smanjenja kapaciteta proizvodnje električne energije zbog kvara
$Z'_{P-OPT}$	Broj	Optimalan broj provedbi preventivnog održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$Z_{P-OPT}$	Broj	Optimalan broj provedbi preventivnog održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja
$Z_I$	Broj	Broj zastoja mlina zbog vanjskih čimbenika
$Z_K$	Broj	Broja zastoja radi korektivnog održavanja
$Z_P$	Broj	Broj provedbi preventivnog održavanja

Oznaka	Jedinica	Opis
$Z_{P-OPT}$	Broj	Optimalan broj provedbi preventivnog održavanja uz sagledavanje doprinosa sanacije oštećenja
$Z_{PP}$	Broj	Broj provedbi preventivnog održavanja - pregled
$Z_{PR}$	Broj	Broj provedbi remonata
$\alpha$	–	Granica signifikantnosti
$\lambda_{k, Hip}(t)$	Hipotetski broj korektiva / sati rada	Funkcija hipotetskog intenziteta kvara
$\lambda_{k, Re}(t)$	Broj korektiva / sati rada	Funkcija intenziteta kvara
$\lambda_{p, Hip}(t)$	Hipotetski broj preventiva / sati rada	Funkcija hipotetskog intenziteta preventivnog održavanja
$\lambda_{p, Re}(t)$	Broj preventiva / sati rada	Funkcija intenziteta preventivnog održavanja
$\lambda_s(t)$	Broj sanacija oštećenja / sati rada	Funkcija intenziteta saniranih oštećenja
$m_K(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti pogodnosti održavanja
$m_{KL}(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti logističkog vremena korektivnog održavanja
$m_{KA}(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti aktivnog vremena korektivnog održavanja
$m_S(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti pogodnosti sanacijskog održavanja
$m_{SL}(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti logističkog vremena sanacijskog održavanja
$m_{SA}(t)$	-	Funkcija gustoće vjerojatnosti aktivnog vremena sanacijskog održavanja

**POPIS SLIKA**

<b>Slika 1.1.</b> Kuglasti mlin TE Plomin 2 .....	1
<b>Slika 1.2.</b> Sustav mlinova povezan sa kotlom i ložištem TE Plomin 2 [61].....	2
<b>Slika 1.3.</b> a) i b) Ložište TE Plomin 2 [61].....	2
<b>Slika 1.4.</b> Model TE Plomin 2 – osnovni tehnološki proces [61].....	3
<b>Slika 2.1.</b> Udio poslovnih rashoda TE Plomin 2 [53].....	17
<b>Slika 2.2.</b> Udjeli troškova održavanja TE Plomin 2 [53].....	18
<b>Slika 2.3.</b> Statusi termoelektrane i logični slijed promjene statusa .....	21
<b>Slika 2.4.</b> Usporedba ostvarene i nazivne pogonske učinkovitosti u razdoblju eksploatacije od 1.03.2015. do 31.03.2015., pri nazivnom opterećenju na primjeru TE Plomin 1 i TE Plomin 2 [9] .....	23
<b>Slika 2.5.</b> Radna raspoloživost TE Plomin 2 za razdoblje eksploatacije od 2005. do 2014. godine [18] .....	24
<b>Slika 2.6.</b> Aproksimativni prikaz temperature ugljene prašine ovisno o sadržaju grube vlage u ugljenu i pojedinom opterećenju mlina pri konstantnom sadržaju granulacije ugljene prašine $\leq 10\%$ pri $R90\ \mu\text{m}$ .....	27
<b>Slika 2.7.</b> Aproksimativni prikaz ovisnosti indeksa tvrdoće ugljena o pojedinačnom opterećenju mlina pri konstantnom sadržaju granulacije ugljene prašine $\leq 10\%$ pri $R90\ \mu\text{m}$ .....	28
<b>Slika 2.8.</b> Prikaz sustav mlinova za ugljen u TE Plomin 2 .....	30
<b>Slika 2.9.</b> Tehnološki proces proizvodnje ugljene prašine [2].....	31
<b>Slika 2.10.</b> Udio zastupljenosti pojedine skupine objekata održavanja u sustavu mlina.....	32
<b>Slika 2.11.</b> Dijagram tijeka procesa pri provedbi korektivnog održavanja.....	34
<b>Slika 2.12.</b> Prikaz vremena korektivnog održavanja u eksploataciji sustava [22].....	37
<b>Slika 2.13.</b> Operativna raspoloživost pojedinog mlina u TE Plomin 2 za period eksploatacije od 2005. do 2013. godine [17] .....	38
<b>Slika 2.14.</b> Preventivno održavanje na sustavu mlinova TE Plomin .....	39
<b>Slika 2.15.</b> Dijagram tijeka procesa pri provedbi preventivnog održavanja - pregleda sustava mlina.....	40
<b>Slika 2.16.</b> Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava mlinova TE Plomin 2 u trenutku zastoja.....	42
<b>Slika 2.17.</b> Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava mlina 1 u TE Plomin 2 u trenutku zastoja.....	43

<b>Slika 2.18.</b> Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava transporta ugljene prašine mlina u trenutku zastoja .....	43
<b>Slika 2.19.</b> Vizualizacija upravljačkog i nadzornog sustava elektromotora i hidraulike na sustavu mlina u trenutku zastoju .....	44
<b>Slika 2.20.</b> Prikaz vremena preventivnog održavanja u eksploataciji sustava.....	45
<b>Slika 2.21.</b> Dijagram tijeka procesa u slučaju sanacije oštećenja na objektu održavanja.....	46
<b>Slika 2.22.</b> Optimizacija troškova održavanja .....	54
<b>Slika 3.1.</b> Područje rada sustava uz prisutnost oštećenja objekta održavanja.....	58
<b>Slika 3.2.</b> Promjena statusa iz ispravnog rada u kvar i obrnuto .....	59
<b>Slika 3.3.</b> Promjena statusa od ispravnog rada u oštećenje i sanacija oštećenja u radu .....	59
<b>Slika 3.4.</b> Promjena statusa iz ispravnog rada u status oštećenja bez progresije njegova razine oštećenja uz popravak tijekom zastoja prouzročenog neovisnim događajem.....	60
<b>Slika 3.5.</b> Promjena statusa iz ispravnog rada u status oštećenja uz njegovu progresiju do statusa kvara .....	60
<b>Slika 3.6.</b> Dodavač ugljena – skica .....	62
<b>Slika 3.7.</b> a) Podsustav dodavača ugljena-kućište b) Primjer sanacije oštećenja .....	63
<b>Slika 3.8.</b> a) Padni kanal ugljena, b) Skica padnog kanala .....	64
<b>Slika 3.9.</b> a) Propuštanja ugljene prašine na kompenzatoru b) Postavljanje platna u svrhu sanacije propuštanja .....	65
<b>Slika 3.10.</b> Skica podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 na sustavu mlina br. 1 .....	66
<b>Slika 3.11.</b> a) Prikaz propuštanja ugljene prašine na dijelu cjevovoda ugljene prašine b) Prikaz zavarene pločice na cjevovodu ugljene prašine .....	67
<b>Slika 3.12.</b> Provedba korektivnog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine.....	67
<b>Slika 3.13.</b> Primjer evidencije događaja za objekt održavanja u funkciji.....	68
kalendarskog vremena.....	68
<b>Slika 3.14.</b> Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja kvara .....	75
<b>Slika 3.15.</b> Parametri Weibullove raspodjele.....	75
<b>Slika 3.16.</b> Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja sanacije oštećenja .....	76
<b>Slika 3.17.</b> Parametri Weibullove raspodjele.....	76
<b>Slika 3.18.</b> Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja događaja.....	77
<b>Slika 3.19.</b> Parametri Weibullove raspodjele.....	77
<b>Slika 3.20.</b> Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti održavanja.....	78
<b>Slika 3.21.</b> Parametri log-normalne raspodjele.....	78

<b>Slika 3.22.</b> Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena korektivnog održavanja .....	79
<b>Slika 3.23.</b> Parametri log-normalne raspodjele.....	79
<b>Slika 3.24.</b> Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena korektivnog održavanja .....	80
<b>Slika 3.25.</b> Parametri log-normalne raspodjele.....	80
<b>Slika 3.26.</b> Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti sanacijskog održavanja .....	81
<b>Slika 3.27.</b> Parametri log-normalne raspodjele.....	81
<b>Slika 3.28.</b> Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena sanacijskog održavanja .....	82
<b>Slika 3.29.</b> Parametri log-normalne raspodjele.....	82
<b>Slika 3.30.</b> Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena sanacijskog održavanja .....	83
<b>Slika 3.31.</b> Parametri log-normalne raspodjele.....	83
<b>Slika 4.1.</b> Graf funkcije relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja $c_{u,Re,rel}(T_R)$ za podsustav dodavača ugljena – kućište .....	96
<b>Slika 4.2.</b> Graf funkcije relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja $c_{u,Re,rel}(t)$ za podsustav padnog kanala ugljena.....	98
<b>Slika 4.3.</b> Graf funkcije relativnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja $c_{u,Re,rel}(t)$ za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 .....	99
<b>Slika 4.4.</b> Graf funkcije relativnih hipotetskih troškova održavanja $c_{u,Hip,rel}(t)$ za posustav dodavača ugljena – kućište.....	102
<b>Slika 4.5.</b> Graf funkcije relativnih hipotetskih troškova održavanja $c_{u,Hip,rel}(t)$ za podsustav padnog kanala ugljena.....	103
<b>Slika 4.6.</b> Graf funkcije relativnih hipotetskih troškova održavanja $c_{u,Hip,rel}(t)$ za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 .....	104
<b>Slika 4.7.</b> Graf funkcija relativnih troškova održavanja $c_{u,rel}(t)$ za podsustav dodavač ugljena – kućište.....	108
<b>Slika 4.8.</b> Graf funkcije relativnih troškova održavanja $c_{u,rel}(t)$ za podsustav padnog kanala ugljena .....	110
<b>Slika 4.9.</b> Graf funkcije relativnih troškova održavanja $c_{u,rel}(t)$ za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 .....	111

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 2.1.</b> Podjela ciljeva održavanja [49] .....	15
<b>Tablica 2.2.</b> Vrijednosti karakterističnih parametara ovisno o vrsti ulaska TE Plomin 2 u pogon [1] .....	20
<b>Tablica 2.3.</b> Udio troškova karakterističnih resursa ovisno o vrsti ulaska TE Plomin 2 u pogon [9] .....	20
<b>Tablica 2.4.</b> Karakteristične granične vrijednosti ugljena te utjecaj čimbenika na kvalitetu [28, 41] .....	25
<b>Tablica 2.5.</b> Granične vrijednosti ugljene prašine i utjecaj čimbenika na kvalitetu [1] .....	26
<b>Tablica 2.6.</b> Broj objekata održavanja na sustavu mlina [19] .....	32
<b>Tablica 2.7.</b> Nazivlje vremena trajanja pojedinog statusa mlina [22] .....	34
<b>Tablica 2.8.</b> Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli $Z_{PR}$ i $Z_K$ .....	49
<b>Tablica 2.9.</b> Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli $T_{RM}$ i $Z_K$ .....	50
<b>Tablica 2.10.</b> Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli $Z_{PP}$ i $Z_K$ .....	50
<b>Tablica 2.11.</b> Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta o povezanosti između varijabli $Z_I$ i $Z_K$ .....	51
<b>Tablica 3.1.</b> Status i vrijeme trajanja pojedinog statusa objekta održavanja.....	57
<b>Tablica 3.2.</b> Vremena između dva kvara objekta održavanja.....	69
<b>Tablica 3.3.</b> Vremena između dvije sanacije oštećenja objekta održavanja.....	69
<b>Tablica 3.4.</b> Vremena između dva događaja (kvar ili sanacija oštećenja) objekta održavanja.....	69
<b>Tablica 3.5.</b> Empirijski podaci za statističku analizu na podsustavu padnog kanala ugljena .	72
<b>Tablica 3.6.</b> Empirijski podaci za statističku analizu na podsustavu dodavača ugljena – kućište.....	73
<b>Tablica 3.7.</b> Empirijski podaci za statističku analizu na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1.....	74
<b>Tablica 3.8.</b> Numerički model podsustava padnog kanala ugljena – prikaz teorijskih funkcija gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja i očekivana vremena do njihova nastanka ....	84
<b>Tablica 3.9.</b> Numerički model podsustava dodavača ugljena – kućište – prikaz teorijskih funkcija gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja i očekivana vremena do njihova nastanka.....	86



---

<b>Tablica 3.10.</b> Numerički model podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 – prikaz teorijskih funkcija gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja i očekivana vremena do njihovih nastanka.....	89
<b>Tablica 4.1.</b> Relativne vrijednosti jediničnih troškova održavanja bez sagledavanja doprinosa sanacije oštećenja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 .....	95
<b>Tablica 4.2.</b> Relativne vrijednosti jediničnih troškova održavanja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 .....	107
<b>Tablica 4.3.</b> Sinteza dobivenih rezultata za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 .....	112
<b>Tablica 4.4.</b> Doprinis sanacijskog održavanja na točku ekonomičnosti održavanja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1. ....	113
<b>Tablica 4.5.</b> Doprinis optimalnog vremena rada podsustava do preventivnog održavanja u usporedbi s postojećim ciklusom preventivnog održavanja za podsustav dodavač ugljena – kućište, padni kanal ugljena i cjevovod ugljene prašine br. 1 .....	114

## PRILOG A

**Tablica A.1.** Vrijednosti karakterističnih varijabli za sustav mlina ostvarenih u pojedinoj kalendarskoj godini (2005. - 2012.)

BROJ SUSTAVA MLINA		M1	M2	M3	M4	M5	M6
GODINA:2005. (1.1.2005. - 31.12.2005.)	Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	7802	7814	7871	7141	7992	7699
	Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]	8177	8177	8177	8177	8177	8177
	Kalendarska godina, $T_g$ [h]	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]	695	803	728	1513	577	767
	Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]	29	31	34	27	26	32
	Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]	0	0	0	0	0	0
	Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]	234	112	127	79	165	262
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$	3	3	3	3	3	3
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$	0	0	0	0	0	0
	Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$	10	8	11	6	8	18
	Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$	13	13	15	70	14	13
	Broj ukupnih zastoja, $Z$	26	24	29	79	25	34
GODINA:2006. (1.1.2006. - 31.12.2006.)	Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	8413	8336	7968	7930	8289	8358
	Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]	8619	8619	8619	8619	8619	8619
	Kalendarska godina, $T_g$ [h]	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]	174	185	507	607	282	156
	Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]	42	44	41	39	38	42
	Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]	0	0	0	0	0	0
	Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]	131	195	244	184	151	204
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$	4	4	4	4	4	4
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$	0	0	0	0	0	0
	Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$	9	13	15	11	6	11
	Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$	5	6	11	29	6	5
	Broj ukupnih zastoja, $Z$	18	23	30	44	16	20

Nastavak tablice A.1.

BROJ SUSTAVA MLINA		M1	M2	M3	M4	M5	M6
GODINA:2007. (1.1.2007. - 31.12.2007.)	Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	7515	7331	7499	7376	7578	7437
	Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]	7621	7621	7621	7621	7621	7621
	Kalendarska godina, $T_g$ [h]	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]	1041	1070	1046	1128	983	1085
	Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]	28	26	31	32	24	31
	Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]	120	120	120	120	120	120
	Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]	56	213	64	104	55	87
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$	3	3	3	3	3	3
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$	1	1	1	1	1	1
	Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$	4	11	5	6	6	5
	Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$	12	14	15	27	12	13
	Broj ukupnih zastoja, $Z$	20	29	24	37	22	22
	GODINA:2008. (1.1.2008. - 31.12.2008.)	Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	8258	8284	8083	7604	8271
Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]		8514	8514	8514	8514	8514	8514
Kalendarska godina, $T_g$ [h]		8784	8784	8784	8784	8784	8784
Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]		284	255	539	1030	426	449
Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]		33	36	38	32	39	44
Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]		0	0	0	0	0	0
Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]		209	209	124	118	48	143
Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$		3	3	3	3	3	3
Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$		0	0	0	0	0	0
Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$		6	5	6	6	5	7
Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$		5	5	5	38	5	7
Broj ukupnih zastoja, $Z$		14	13	14	47	13	17
GODINA:2009 (1.1.2009. - 31.12.2009.)		Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	4397	4403	4327	3949	4462
	Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]	4542	4542	4542	4542	4542	4542
	Kalendarska godina, $T_g$ [h]	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]	4165	4145	4245	4568	4081	4342
	Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]	17	21	19	18	22	16
	Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]	120	120	120	120	120	120
	Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]	61	71	49	105	75	108
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$	2	2	2	2	2	2
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$	1	1	1	1	1	1
	Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$	4	5	4	5	3	3
	Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$	7	7	9	37	8	7
	Broj ukupnih zastoja, $Z$	14	15	16	45	14	13

Nastavak tablice A.1.

BROJ SUSTAVA MLINA		M1	M2	M3	M4	M5	M6
GODINA:2010 (1.1.2010. - 31.12.2010.)	Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	8234	8282	7789	7541	8218	8254
	Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]	8393	8393	8393	8393	8393	8393
	Kalendarska godina, $T_g$ [h]	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]	382	384	798	1091	408	401
	Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]	32	36	34	38	29	31
	Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]	0	0	0	0	0	0
	Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]	144	94	173	128	134	105
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$	4	4	4	4	4	4
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$	0	0	0	0	0	0
	Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$	10	9	11	9	8	7
	Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$	5	5	17	40	7	5
	Broj ukupnih zastoja, $Z$	19	18	32	53	19	16
	GODINA:2011. (1.1.2011. - 31.12.2011.)	Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	8148	8189	7977	8020	8151
Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]		8367	8367	8367	8367	8367	8367
Kalendarska godina, $T_g$ [h]		8760	8760	8760	8760	8760	8760
Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]		423	398	625	612	353	363
Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]		32	36	34	38	29	31
Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]		0	0	0	0	0	0
Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]		189	173	158	128	147	202
Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$		3	3	3	3	3	3
Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$		0	0	0	0	0	0
Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$		12	16	12	11	12	9
Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$		8	9	8	25	7	7
Broj ukupnih zastoja, $Z$		23	28	23	39	22	19
GODINA:2012. (1.1.2012. - 31.12.2012.)		Vrijeme rada sustava mlina, $T_{RM}$ [h]	7331	7355	6986	6341	7391
	Ostvareno vrijeme rada elektrane, $T_R$ [h]	7585	7585	7585	7585	7585	7585
	Kalendarska godina, $T_g$ [h]	8784	8784	8784	8784	8784	8784
	Vrijeme nefunkcioniranja ispravnog sustava mlina, $T_I$ [h]	1231	1228	1629	2299	1265	1375
	Vrijeme preventivnog održavanja - pregled $T_{PP}$ [h]	17	16	18	15	16	17
	Vrijeme preventivnog održavanja - remont $T_{PR}$ [h]	120	120	120	120	120	120
	Vrijeme korektivnog održavanja $T_K$ [h]	85	185	151	129	112	97
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - pregled, $Z_{PP}$	2	2	2	2	2	2
	Broj zastoja radi preventivnog održavanja - remont, $Z_{PR}$	1	1	1	1	1	1
	Broj zastoja radi korektivnog održavanja, $Z_K$	6	8	8	10	9	8
	Broj zastoja radi vanjskih čimbenika, $Z_I$	8	8	12	34	8	8
	Broj ukupnih zastoja, $Z$	17	19	23	47	20	19

## PRILOG B

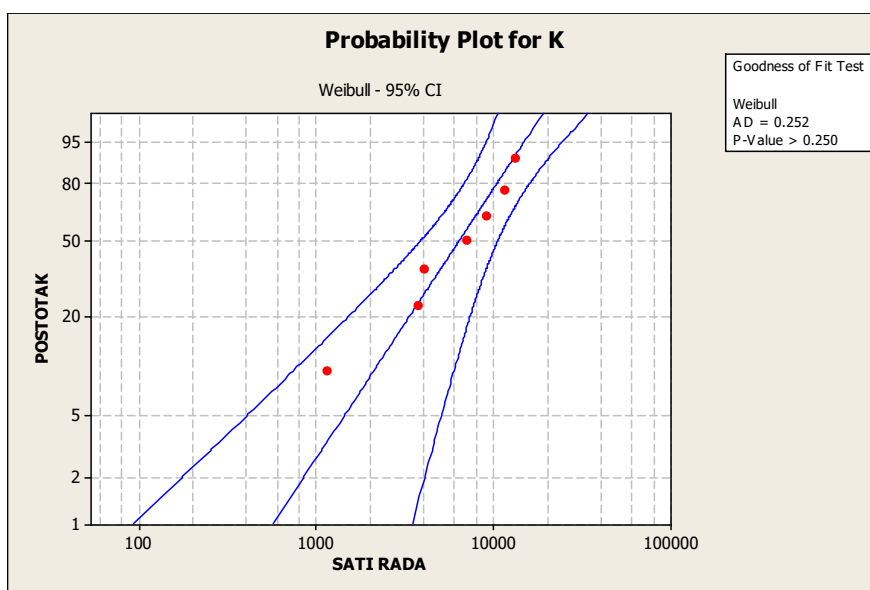
**Tablica B.1.** Obrazac za prikupljanje podataka o karakterističnim događajima u svrhe statističke analize

OPIS STAVKE	KOREKTIVNO ODRŽAVANJE	SANACIJSKO ODRŽAVANJE
REDNI BR. DOGAĐAJA	1	19
OZNAKA PODSUSTAVA SUKLADNO FUNKCIOGRAMU	A1.1.	A1.1.
BR. ZAHTEVA ZA RAD	05-0004798	11-0003600
BR. RADNOG NALOGA	05-0004798	11-0003600
STATUS DOGAĐAJA	KVAR	SANACIJA OŠTEĆENJA U RADU
SKUPINA OBJEKTA ODRŽAVANJA	STROJARSKI OBJEKT	STROJARSKI OBJEKT
VRIJEME RADA SUSTAVA IZMEĐU DVA ISTA DOGAĐAJA [SATI]	1127	2012
VRIJEME RADA SUSTAVA IZMEĐU DVA DOGAĐAJA [SATI]	1127	2012
DATUM I VRIJEME PRIJAVE KVARA ILI OŠTEĆENJA (IZRADA ZAHTEVA ZA RAD U PROGRAMU SUPO)	8.11.2005. 11:04	4.7.2011. 15:05
DATUM I VRIJEME OTVARANJA DOZVOLE ZA RAD	11.11.2005. 11:00	5.7.2011. 7:30
DATUM I VRIJEME ZATVARANJA DOZVOLE ZA RAD	11.11.2005. 14:00	5.7.2011. 14:00
VRIJEME OBUSTAVE ISPRAVNOG SUSTAVA OD ZADNJEG DOGAĐAJA [SATI]	237	82
BROJ UKLJUČENJA / ISKLJUČENJA SUSTAVA MLINA OD ZADNJEG DOGAĐAJA	2	5
OPIS DOGAĐAJA	JAKO PROPUŠTANJE UGLJENA NA OPLATI DODAVAČA HFB10 ISTI ZAUSTAVLJEN	MANJE PROPUŠTANJE UGLJENE PRAŠINE NA OPLATI DODAVAČA HFB10
SUDIONICI OT KLANJANJA KVARA / OŠTEĆENJA	STROJOBRAVAR I VARIOC	STROJOBRAVAR I VARIOC
OPIS IZVEDE NIH AKTIVNOSTI	DOPREMA ALATA I UREĐAJA ZA ZAVARIVANJE, ZAMJENA BOČNE PLOČE NA ULAZU U KORITO DODAVAČA STROJOBRAVARSKE RADOVE IZVELI: BOŠNJAK, VITOLIĆ, ŠAFAR VARIOC: VALJETIĆ	IZRADA FLEKE (250 x 15 mm), ZAVARIVANJE FLEKE STROJOBRAVARSKE RADOVE IZVELI: BOŠNJAK, VITOLIĆ VARIOC: VALJETIĆ
BROJ RADNIKA	4	3

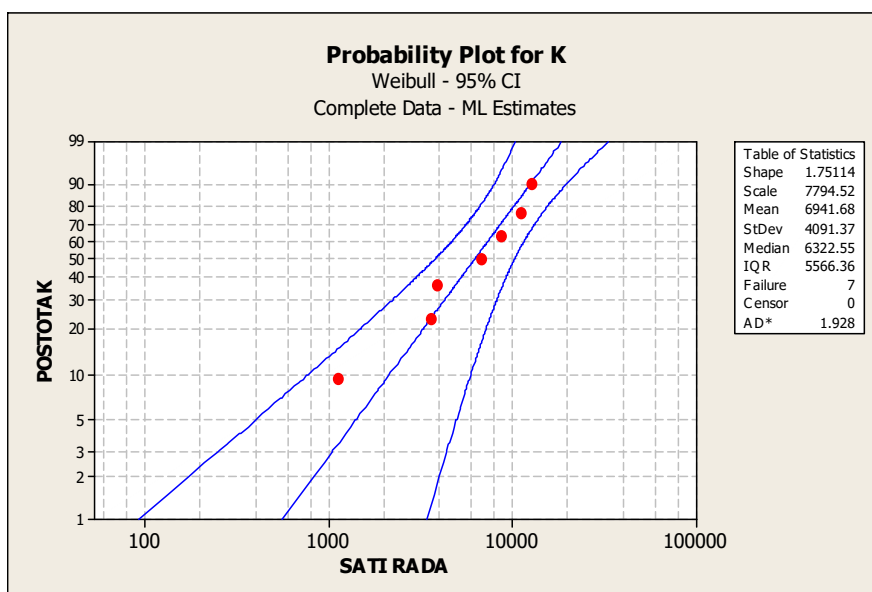
## PRILOG C

### C.1. Statistička obrada podataka za podsustav dodavač ugljena – kućište

Statistička obrada podataka, jednakim postupkom kao u prethodnom poglavlju, provedena je na temelju tablice 3.6. za podsustav dodavača ugljena – kućište uz korištenje programskim alatom Minitab 16. Prva statistička obrada provedena je na slučaju događaja kvara ( $K = S_{KO}$ ) i prikazana je na slici C.1. Njome se potvrđuje da vjerojatnost pojave kvara najbolje opisuje Weibullova raspodjela, a na slici C.2. zadani su parametri raspodjele.



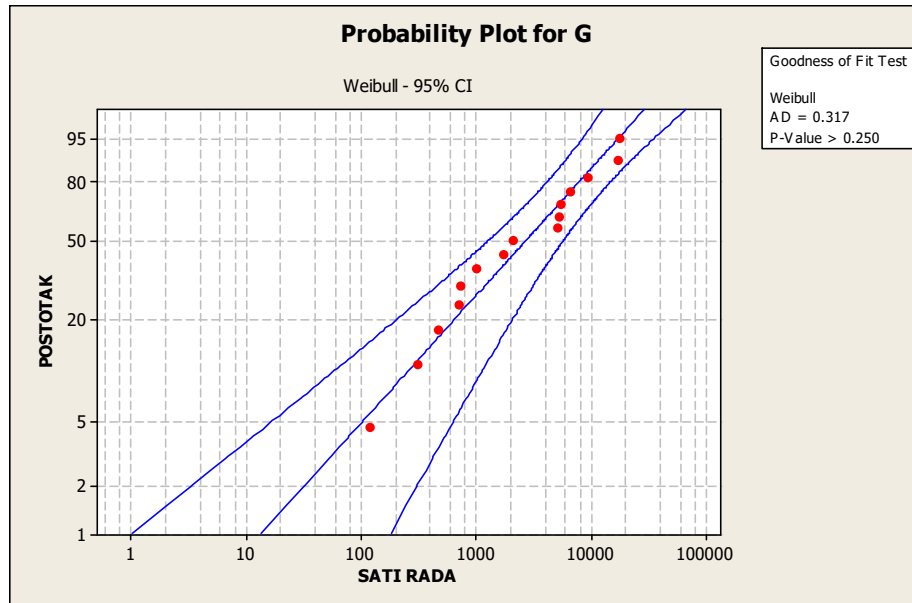
Slika C.1. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja kvara



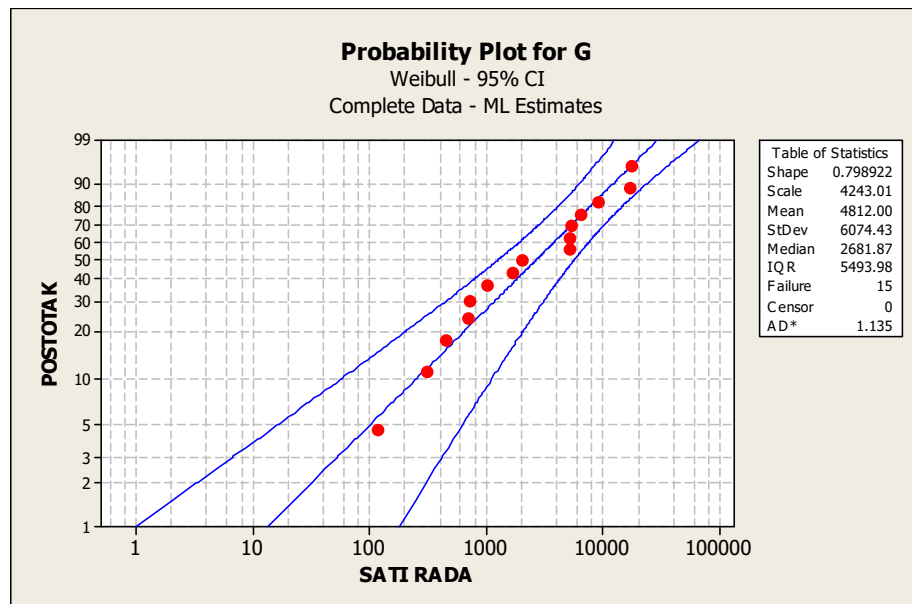
Slika C.2. Parametri Weibullove raspodjele

U skladu s dobivenim rezultatima analize očekivano vrijeme rada podsustava dodavača ugljena – kućište do nastanka kvara je  $E_R(T) = 6941,68$  sati = 289,23 dana.

Druga statistička obrada izvršena je na slučaju sanacije oštećenja i prikazana je na slici C.3. Njome se potvrđuje da vjerojatnost pojave događaja sanacije oštećenja ( $G = S_{RG}$ ) najbolje opisuje Weibullova raspodjela, a na slici C.4. dani su parametri raspodjele.



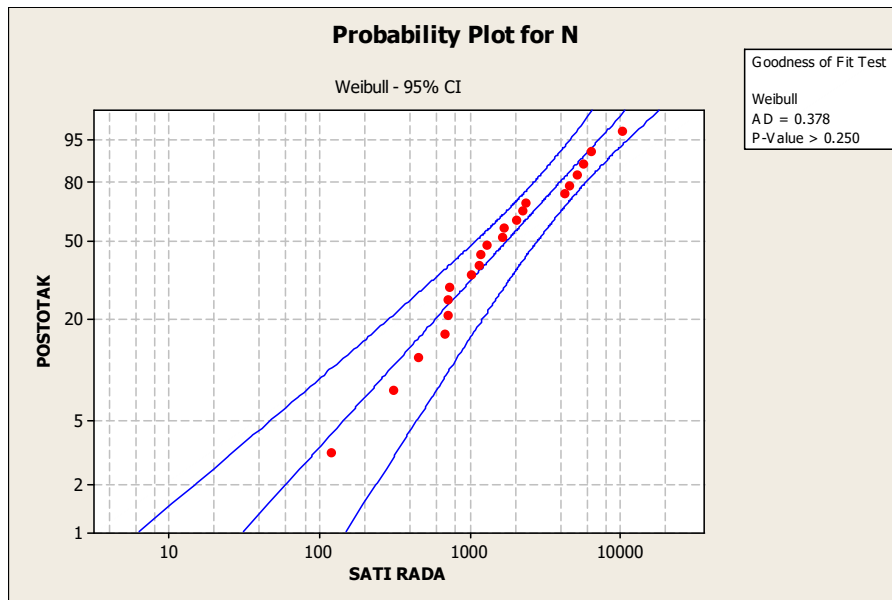
Slika C.3. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja sanacije oštećenja



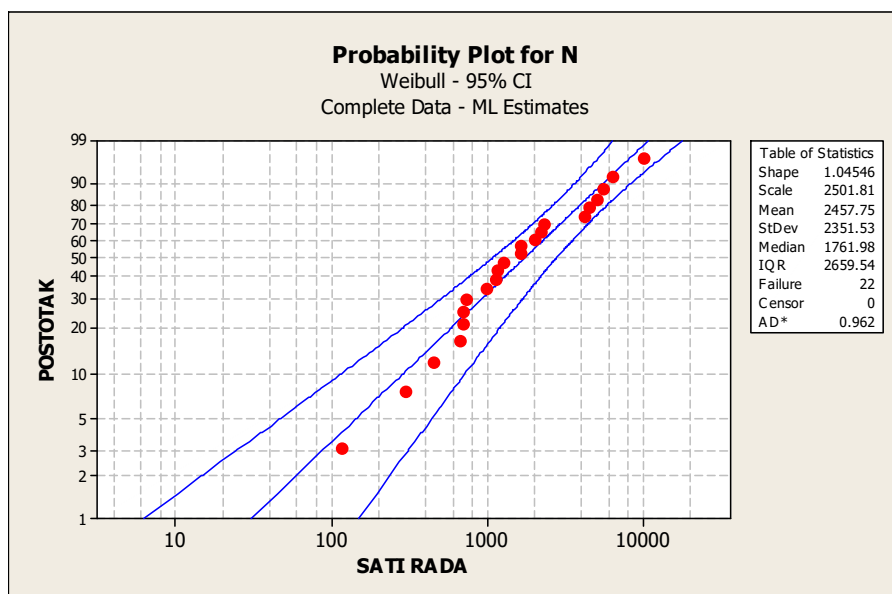
Slika C.4. Parametri Weibullove raspodjele

Očekivano vrijeme rada sustava do nastanka sanacije oštećenja na podsustavu dodavača ugljena – kućište je  $E_G(T) = 4812$  sati = 200,5 dana.

Treća statistička obrada provedena je na slučaju nastanka događaja kvara ili događaja sanacije oštećenja ( $N = S_{KO}$  ili  $N = S_{RG}$ ) i prikazana je na slici C.5. Njome se potvrđuje da vjerojatnost pojave jednog od događaja najbolje opisuje Weibullova raspodjela, a na slici C.6. zadani su parametri raspodjele.



Slika C.5. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja događaja



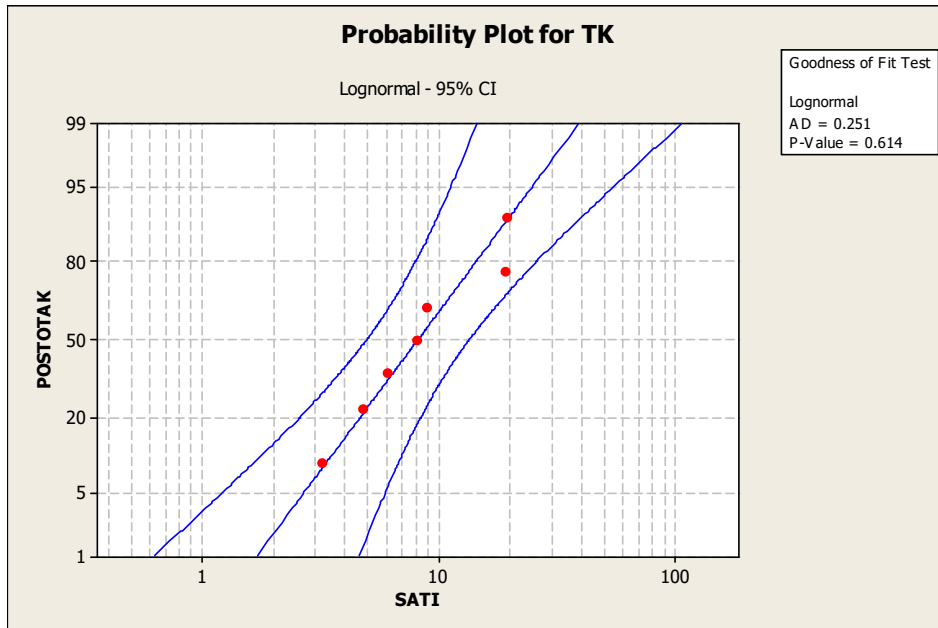
Slika C.6. Parametri Weibullove raspodjele

Očekivano vrijeme rada podsustava dodavača ugljena – kućište do nastanka događaja kvara ili sanacije oštećenja iznosi  $E_N(T) = 2457,75$  sati = 102,40 dana. U tablici 3.9. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu dodavača ugljena – kućište.

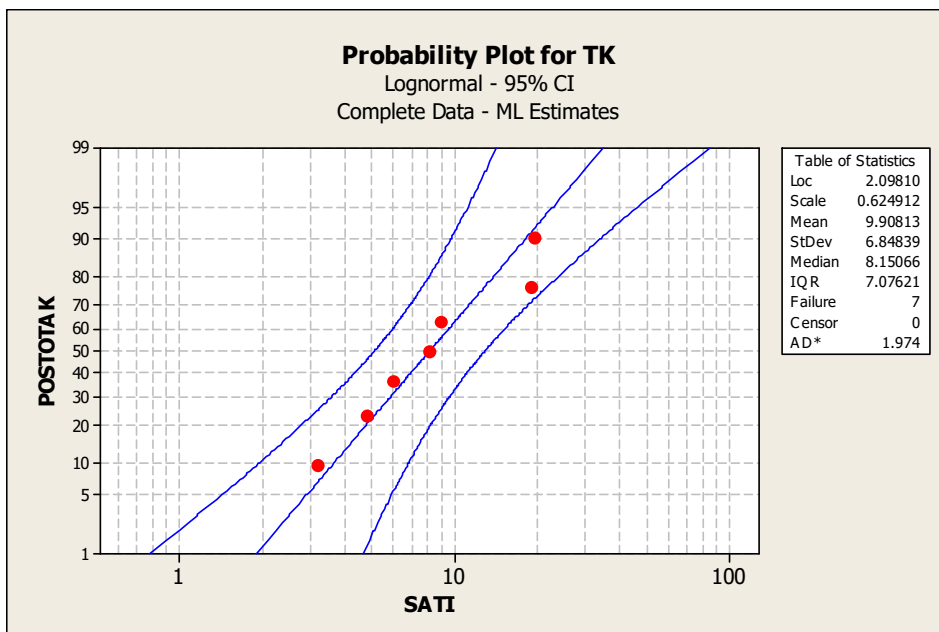


### Korektivno održavanje podsustava dodavača ugljena – kućište

Četvrta statistička obrada provedena je na slučaju određivanja funkcije pogodnosti održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište i prikazana je na slici C.7. Njome se potvrđuje da tu vjerojatnost najbolje opisuje log-normalna raspodjela, a na slici C.8. dani su parametri raspodjele.



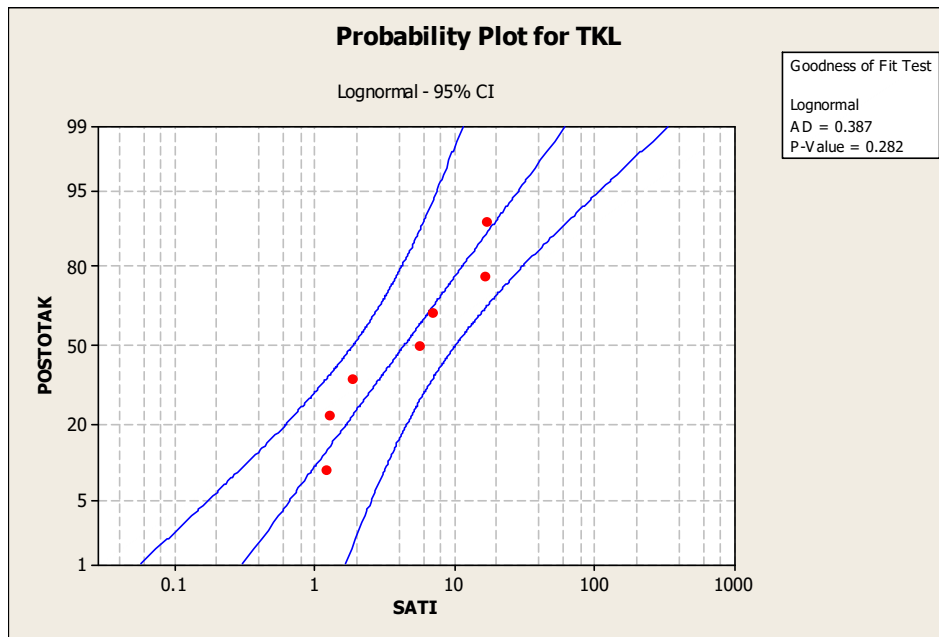
Slika C.7. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti korektivnog održavanja



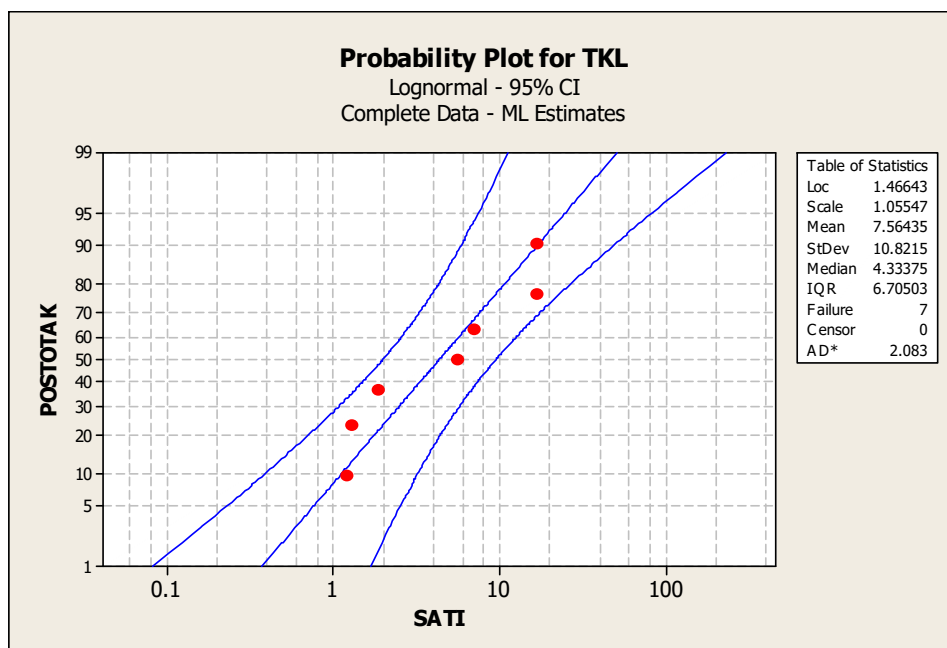
Slika C.8. Parametri log-normalne raspodjele

Očekivano vrijeme popravka kvara u slučaju korektivnog održavanja je  $E_K(T) = 9,9$  sati. Jednakim postupkom provedene su statističke obrade broj pet i šest s logističkim vremenom

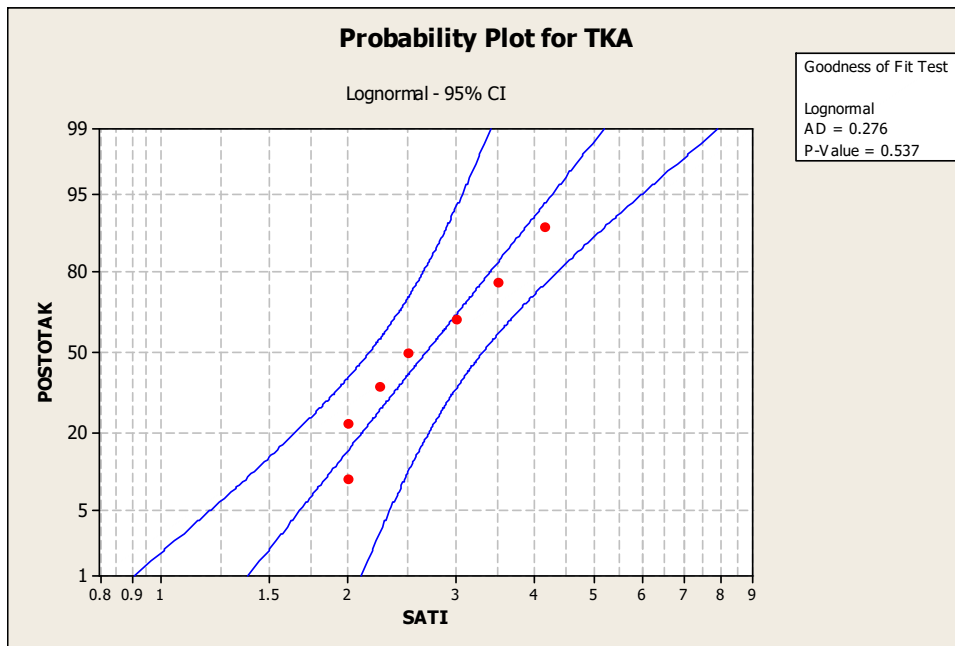
korektivnog održavanja  $T_{KL}$  i aktivnim vremenom korektivnog održavanja  $T_{KA}$ , a rezultati su prikazani na slikama od C.9. do C.12. U skladu s dobivenim rezultatima očekivano je logističko vrijeme pri korektivnom održavanju  $E_{KL}(T) = 7,56$  sati, dok je očekivano aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $E_{KA}(T) = 2,77$  sati. U tablici 3.9. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu dodavača ugljena – kućište.



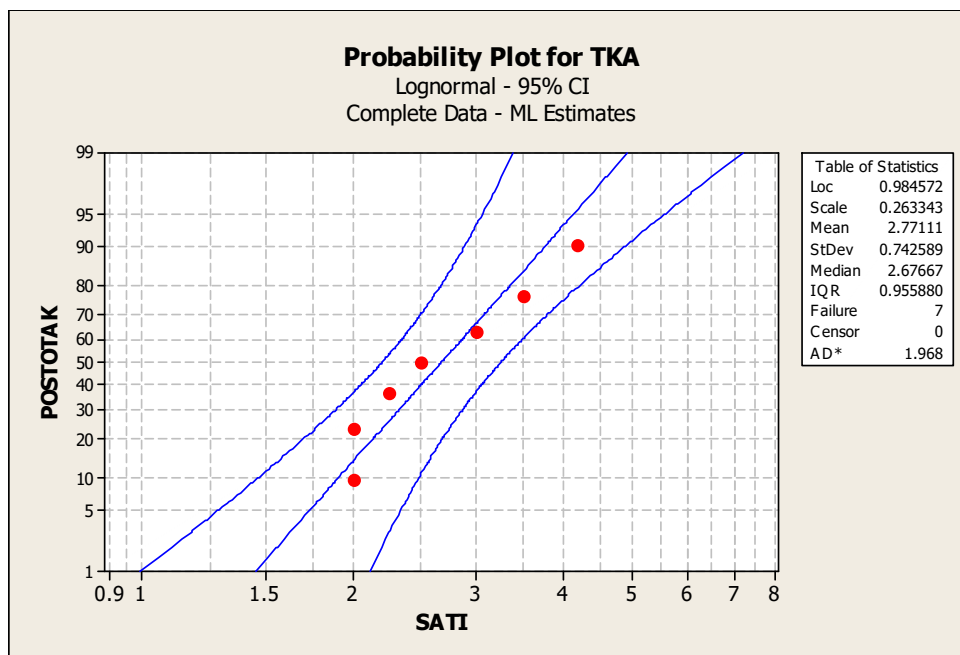
Slika C.9. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena korektivnog održavanja  $T_{KL}$  i parametri pripadajuće funkcije raspodjele



Slika C.10. Parametri log-normalne raspodjele



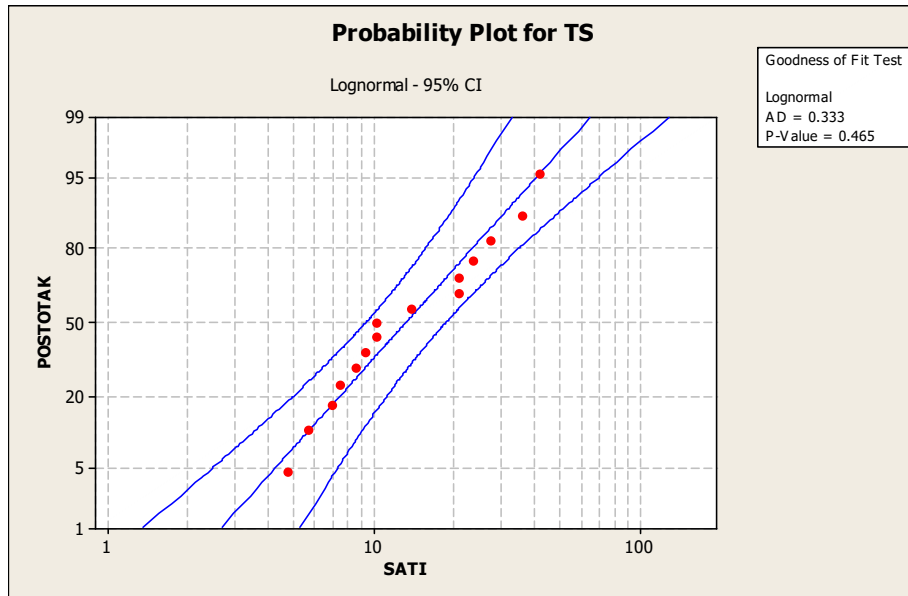
Slika C.11. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena korektivnog održavanja  $T_{KA}$  te parametri pripadajuće funkcije raspodjele



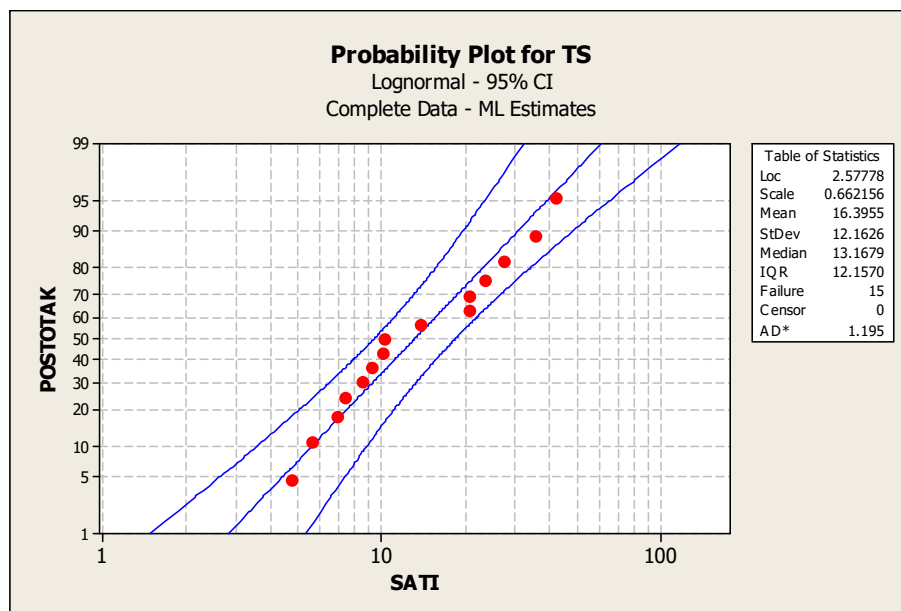
Slika C.12. Parametri log-normalne raspodjele

### Sanacijsko održavanje podsustava dodavača ugljena – kućište

Sedma statistička obrada izvršena je na slučaju pogodnosti sanacijskog održavanja pri podsustavu dodavača ugljena – kućište i prikazana je na slici C.13. Njome se potvrđuje da tu vjerojatnost najbolje opisuje log-normalna raspodjela, a na slici C.14. zadani su parametri raspodjele.



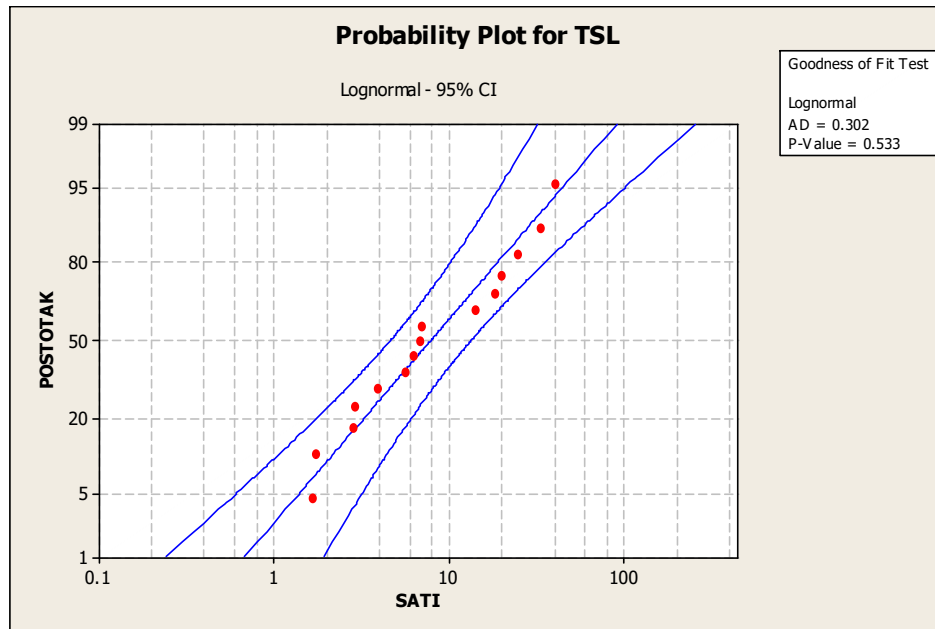
Slika C.13. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti sanacijskog održavanja



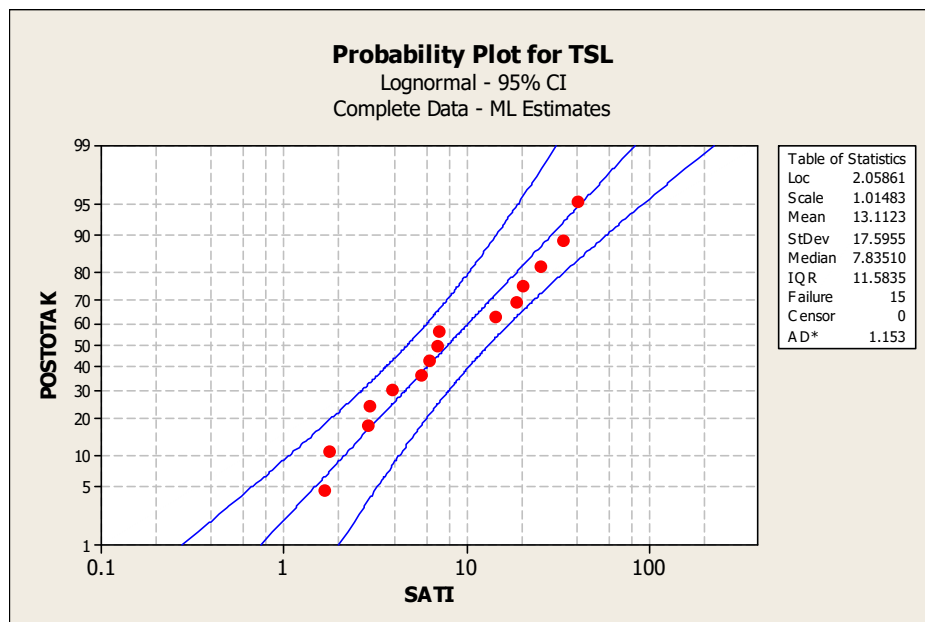
Slika C.14. Parametri log-normalne raspodjele

Očekivano vrijeme provedbe sanacijskog održavanja na podsustavu dodavača ugljena – kućište je  $E_s(T) = 16,39$  sati. Jednakim postupkom provedene su statističke obrade broj osam i devet s logističkim vremenom sanacijskog održavanja  $T_{SL}$  i aktivnim vremenom sanacijskog

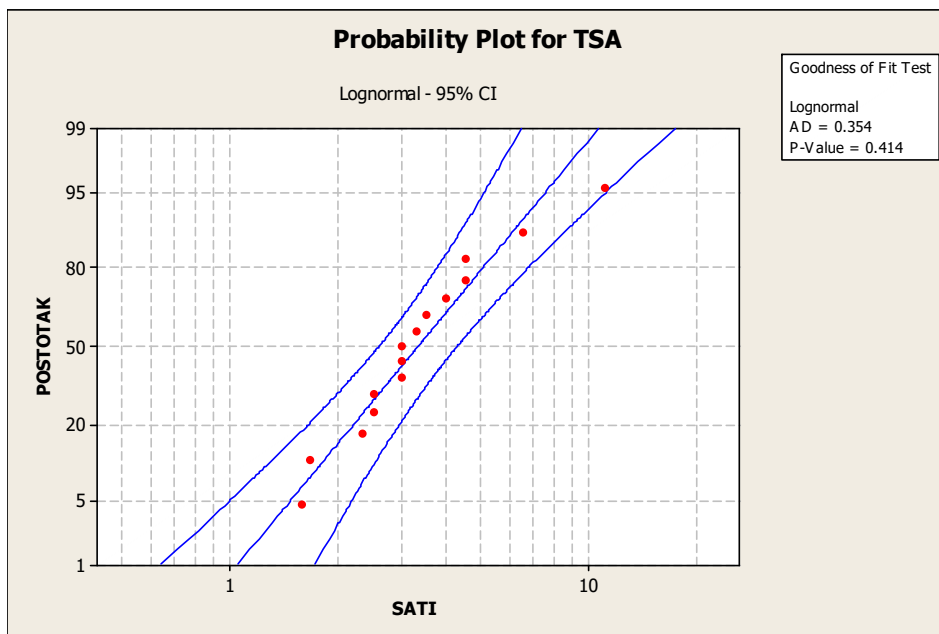
održavanja  $T_{SA}$ . Rezultati su prikazani na slikama od C.15. do C.18. U skladu s dobivenim rezultatima očekivano je logističko vrijeme sanacije oštećenja  $E_{SL}(T) = 13,11$  sati, dok je očekivano aktivno vrijeme sanacije oštećenja  $E_{SA}(T) = 3,73$  sati. U tablici 3.9. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu dodavača ugljena – kućište.



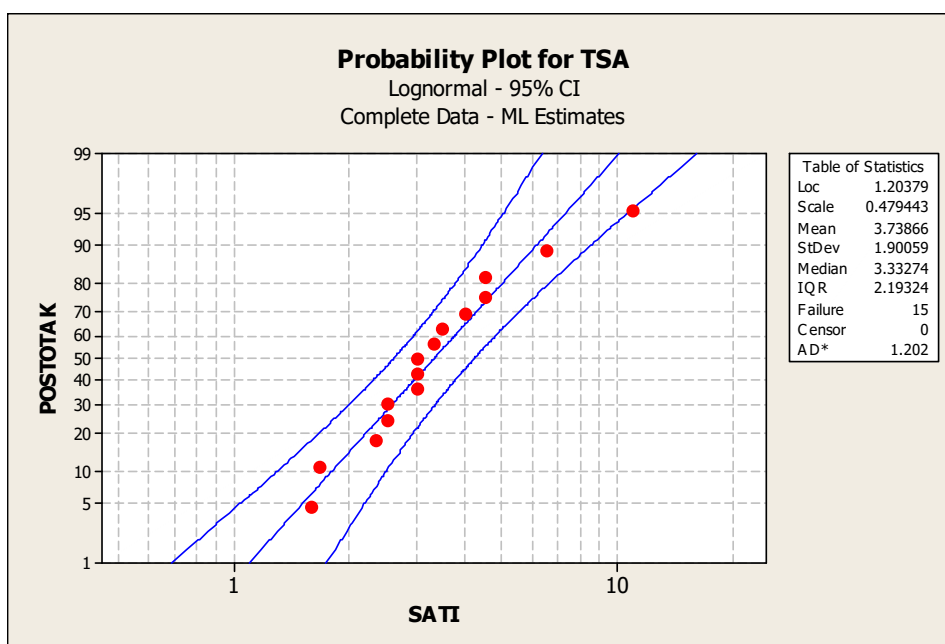
**Slika C.15.** Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena sanacijskog održavanja  $T_{SL}$  i parametri pripadajuće funkcije raspodjele



**Slika C.16.** Parametri log-normalne raspodjele



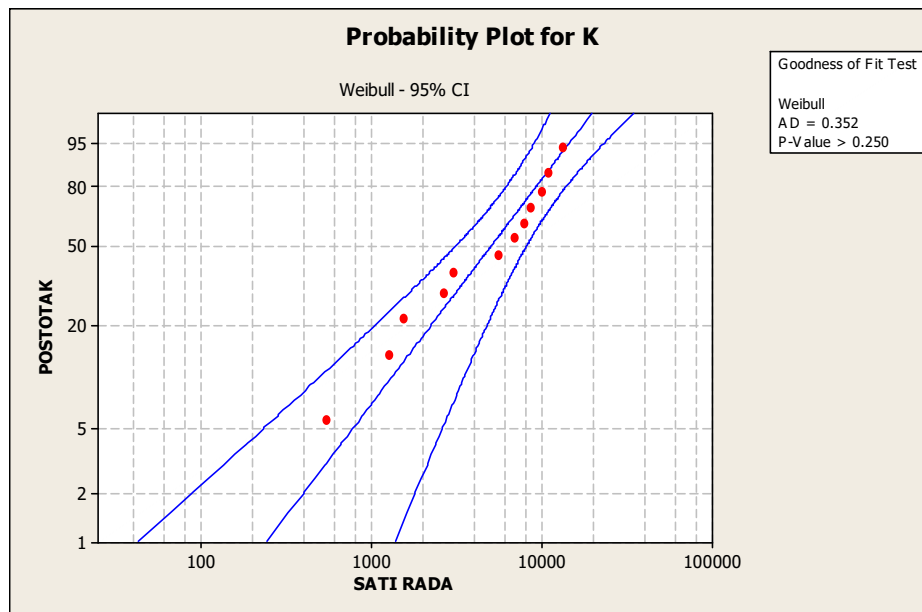
Slika C.17. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena sanacijskog održavanja  $T_{SA}$  i parametri pripadajuće funkcije raspodjele



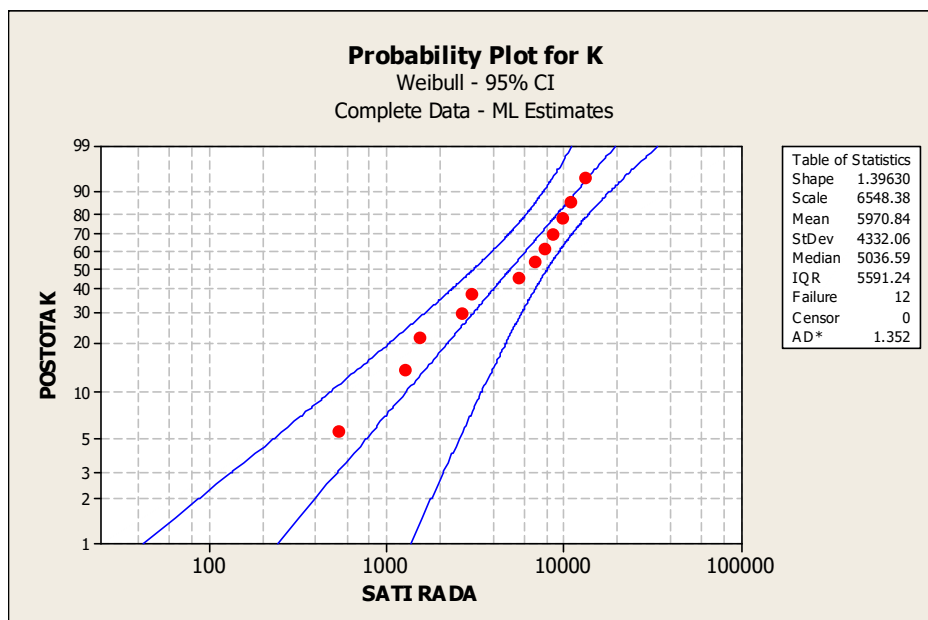
Slika C.18. Parametri log-normalne raspodjele

## C.2. Statistička obrada podataka za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1

Statistička obrada podataka provedena je na temelju tablice 3.7. za podsustav cjevovoda ugljene prašine br. 1 uz upotrebu programskog alata Minitab 16. Prva statistička obrada izrađena je na slučaju događaja kvara ( $K = S_{KO}$ ) i prikazana je na slici C.19. Njome se potvrđuje da vjerojatnost pojave kvara najbolje opisuje Weibullova raspodjela, a na slici C.20. zadani su parametri raspodjele.



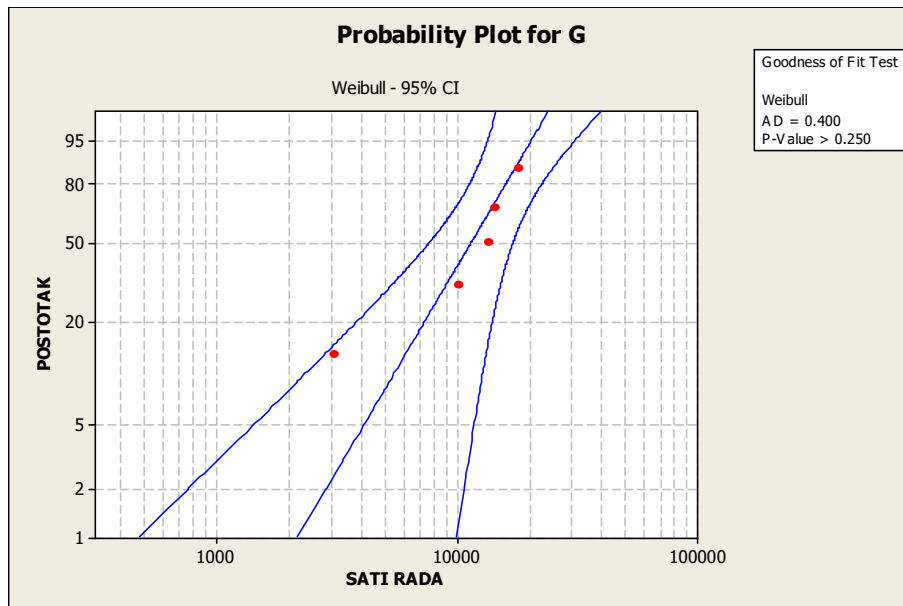
Slika C.19. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja kvara



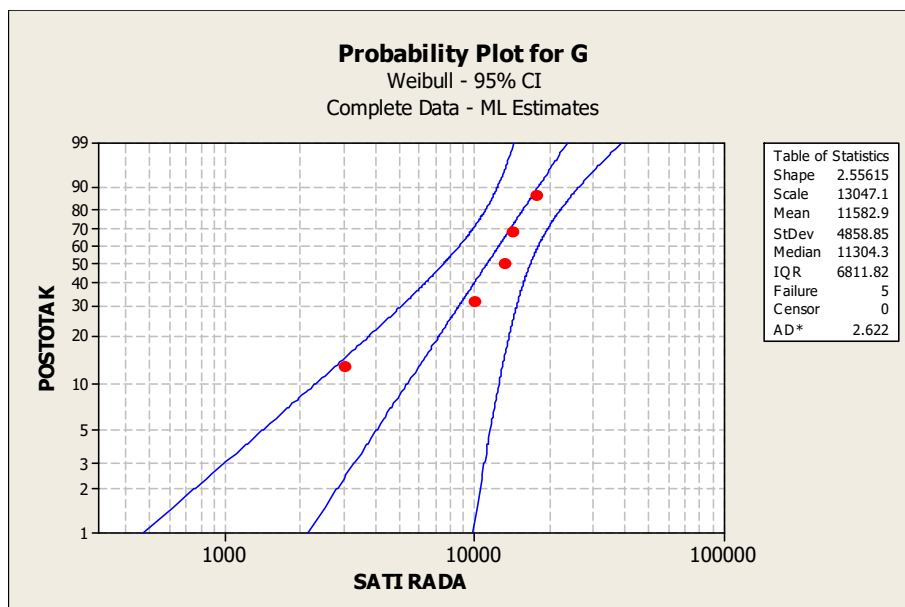
Slika C.20. Parametri Weibullove raspodjele

Na temelju dobivenih rezultata očekivano vrijeme rada podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 do nastanka kvara je  $E_R(T) = 5.970,84$  sati = 248,78 dana.

Druga statistička obrada izvršena je na slučaju sanacije oštećenja ( $G = S_{RG}$ ) i prikazana je na slici C.21. Njome se potvrđuje da vjerojatnost pojave sanacije oštećenja u radu najbolje opisuje Weibullova raspodjela, a na slici C.22. zadani su parametri raspodjele.



Slika C.21. Weibullova raspodjela vjerojatnosti pojavljivanja sanacije oštećenja



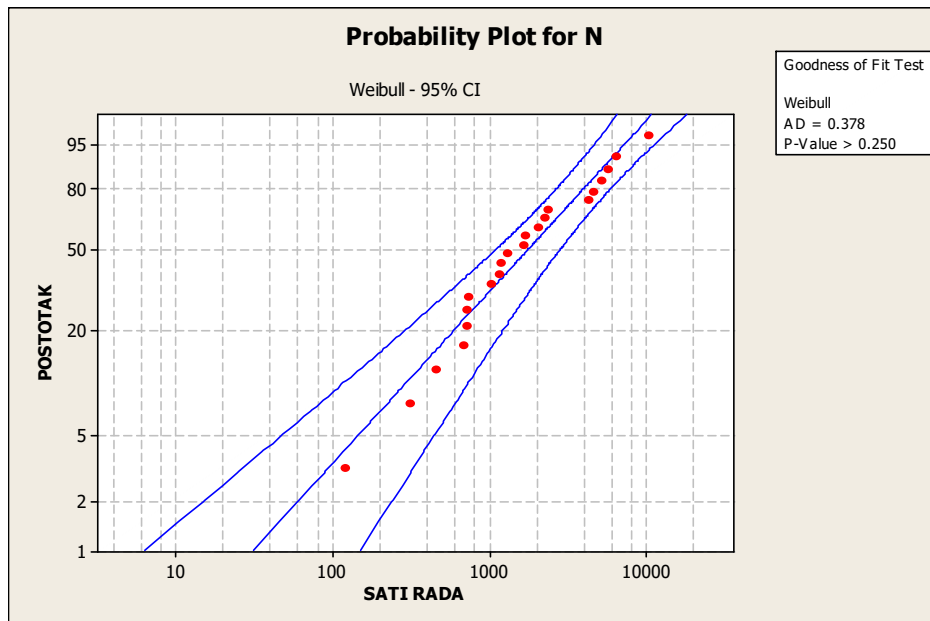
Slika C.22. Parametri Weibullove raspodjele

Očekivano vrijeme rada sustava do nastanka sanacije oštećenja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 je  $E_G(T) = 11\,582,9$  sati = 482,62 dana.

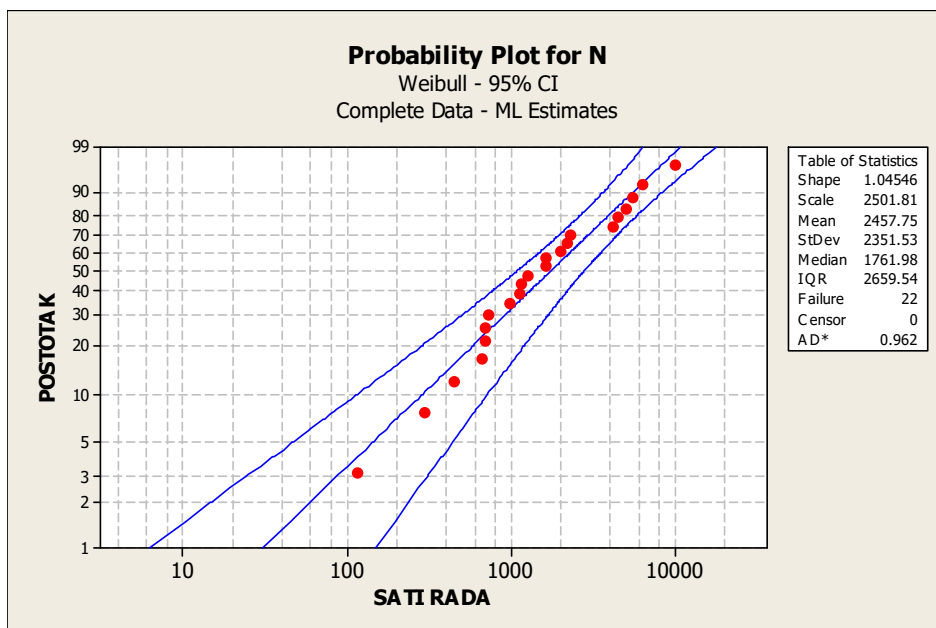
Treća statistička obrada provedena je na slučaju nastanka jednog od događaja, kvara ili sanacije oštećenja ( $N = S_{KO}$  ili  $N = S_{RG}$ ), i prikazana je na slici C.23. Njome se potvrđuje da vjerojatnost



pojave jednog od događaja najbolje opisuje Weibullova raspodjela, a na slici C.24. zadani su parametri raspodjele.



Slika C.23. Weibullova raspodjela vjerojatnosti nastanka događaja

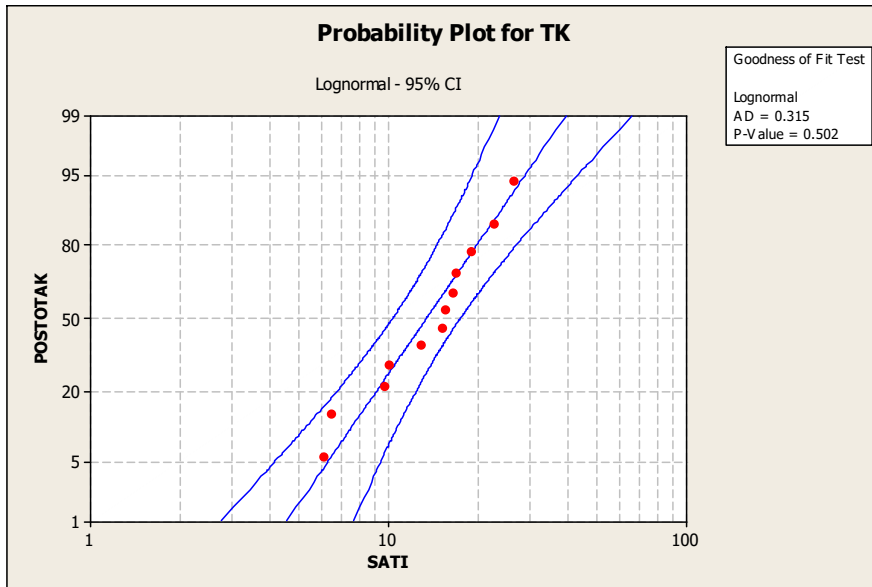


Slika C.24. Parametri Weibullove raspodjele

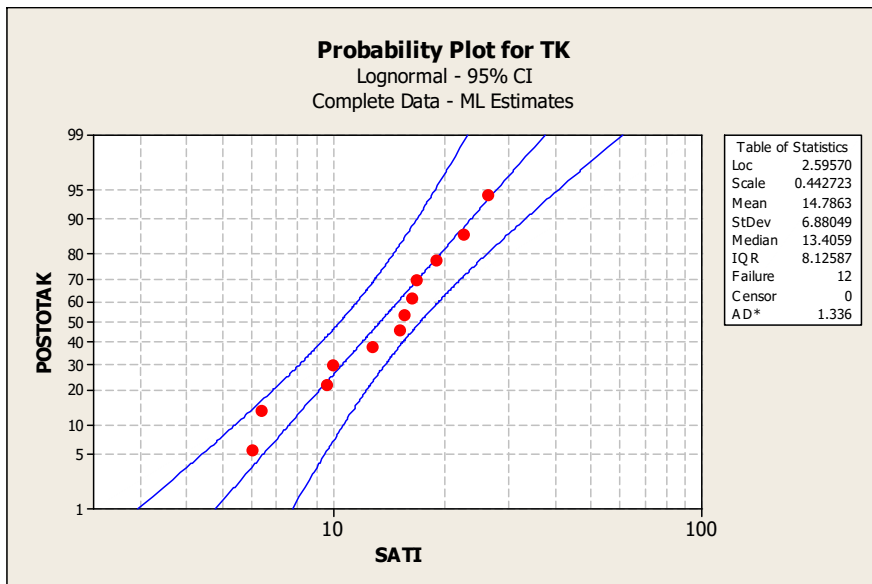
Očekivano vrijeme rada podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1 do nastanka događaja kvara ili sanacije oštećenja je  $E_N(T) = 2457,75$  sati = 102,40 dana. U tablici 3.10. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim raspodjelama vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1.

### Korektivno održavanje podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1

Četvrta statistička obrada izvršena je na slučaju određivanja funkcije pogodnosti održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 i prikazana je na slici C.25. Njome se potvrđuje da tu vjerojatnost najbolje opisuje log-normalna raspodjela, a na slici C.26. zadani su parametri raspodjele.



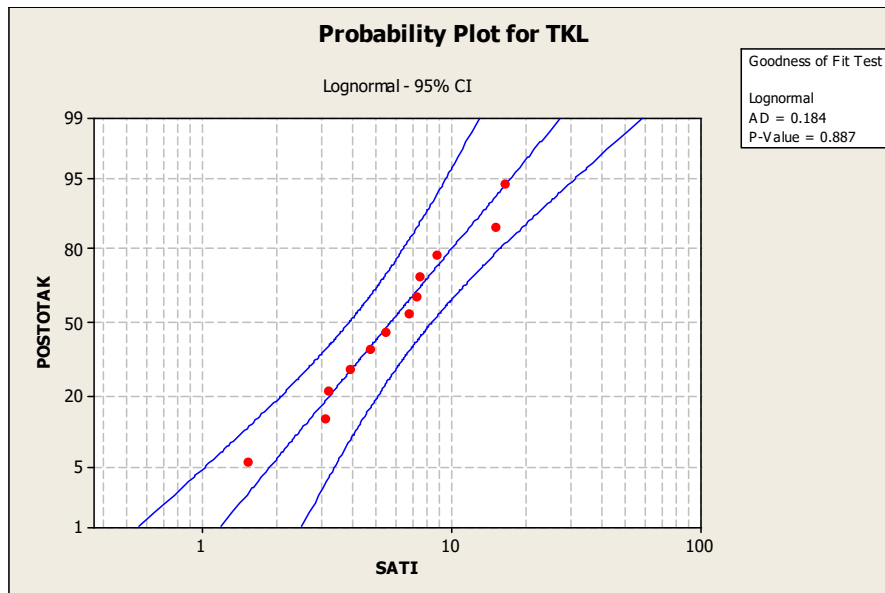
Slika C.25. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti korektivnog održavanja



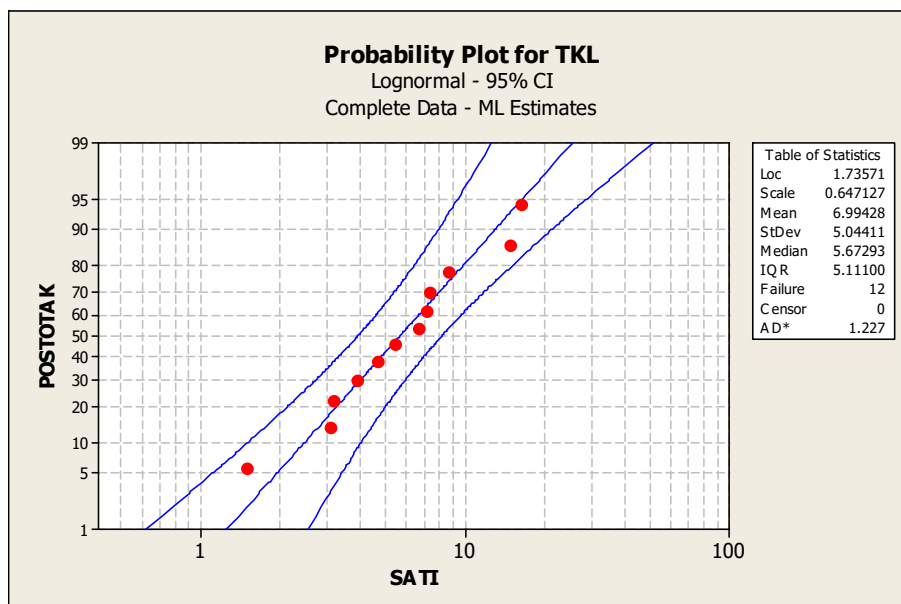
Slika C.26. Parametri log-normalne raspodjele

Očekivano vrijeme popravka kvara u slučaju korektivnog održavanja je  $E_K(T) = 14,78$  sati. Također, jednakim postupkom provedene su statističke obrade broj pet i šest s logističkim vremenom korektivnog održavanja  $T_{KL}$  i aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $T_{KA}$ . Rezultati su prikazani na slikama od C.27. do C.30. Na temelju dobivenih rezultata očekivano logističko

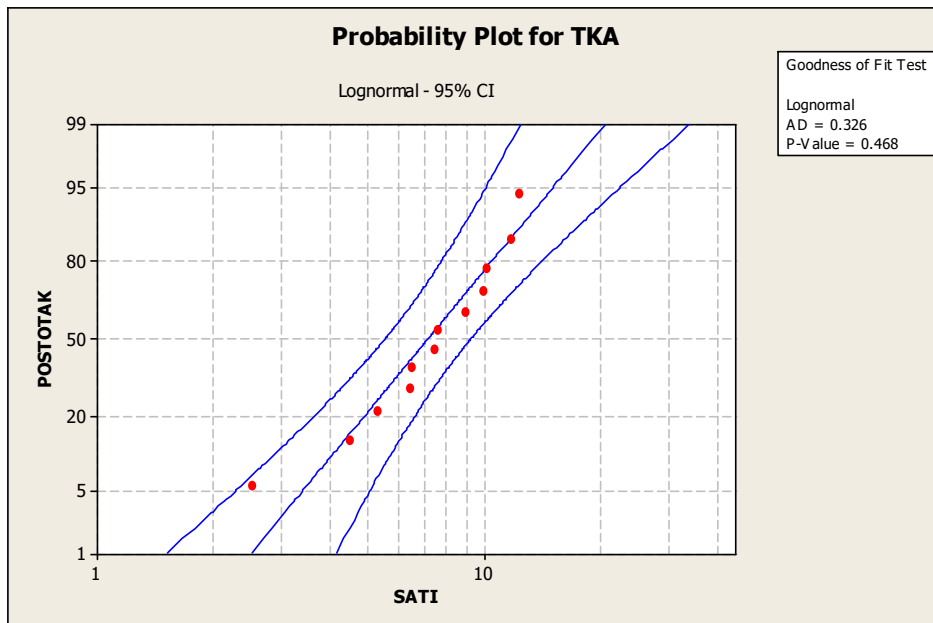
vrijeme pri korektivnom održavanju je  $E_{KL}(T) = 6,99$  sati, dok je očekivano aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $E_{KA}(T) = 7,85$  sati. U tablici 3.10. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1.



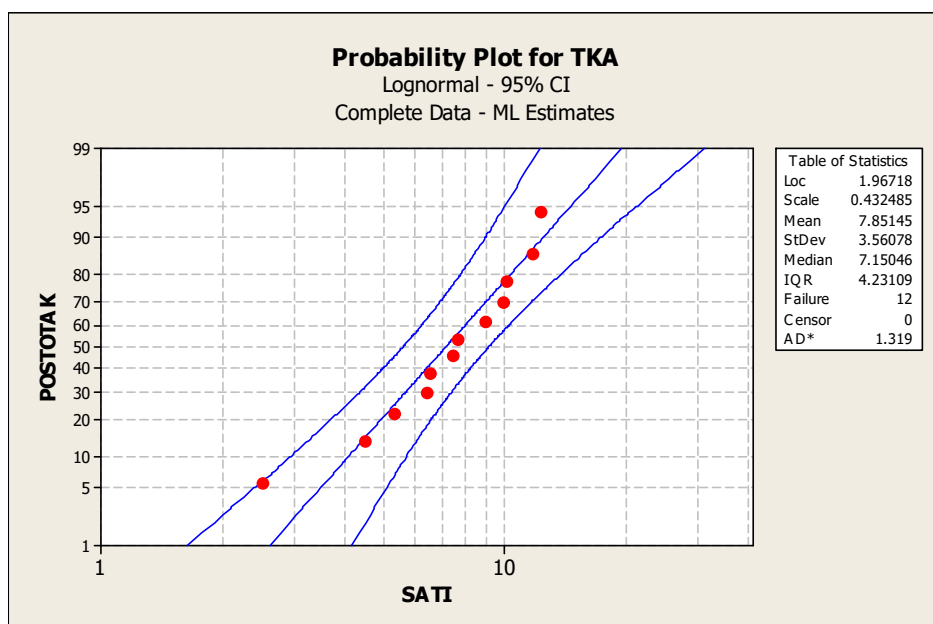
Slika C.27. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena korektivnog održavanja  $T_{KL}$  i parametri pripadajuće funkcije raspodjele



Slika C.28. Parametri log-normalne raspodjele



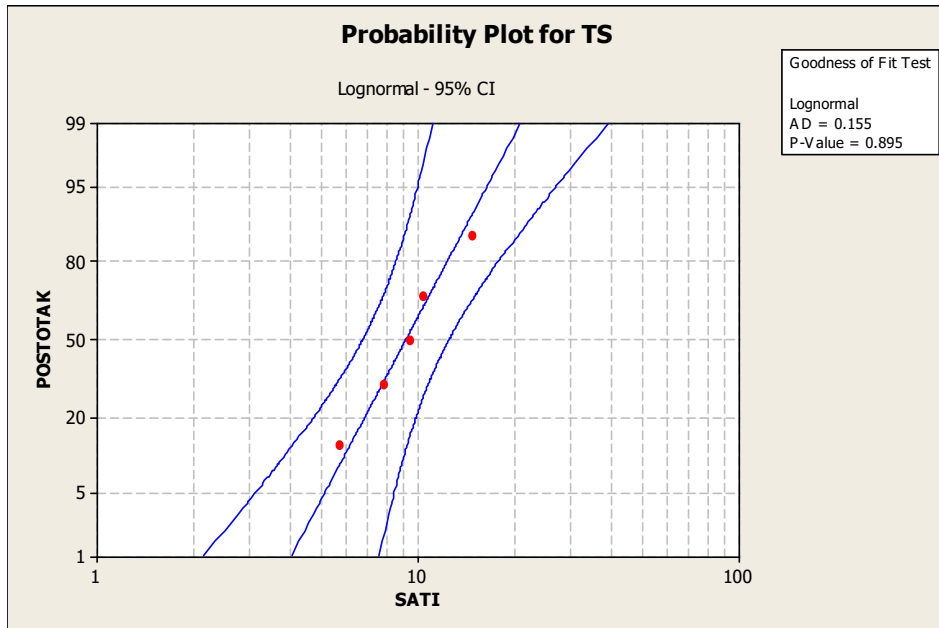
Slika C.29. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena korektivnog održavanja  $T_{KA}$  i parametri pripadajuće funkcije raspodjele



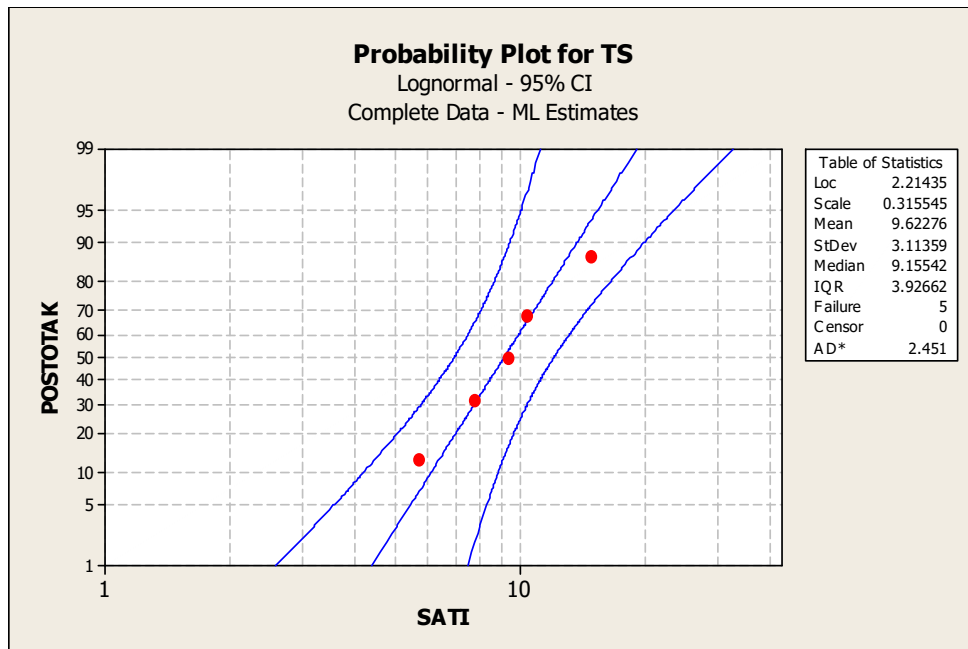
Slika C.30. Parametri log-normalne raspodjele

*Sanacijsko održavanje podsustava cjevovoda ugljene prašine br. 1*

Sedma statistička obrada provedena je na slučaju pogodnosti sanacijskog održavanja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1 i prikazana je na slici C.31. Njome se potvrđuje da tu vjerojatnost najbolje opisuje log-normalna raspodjela, a na slici C.32. zadani su parametri raspodjele.



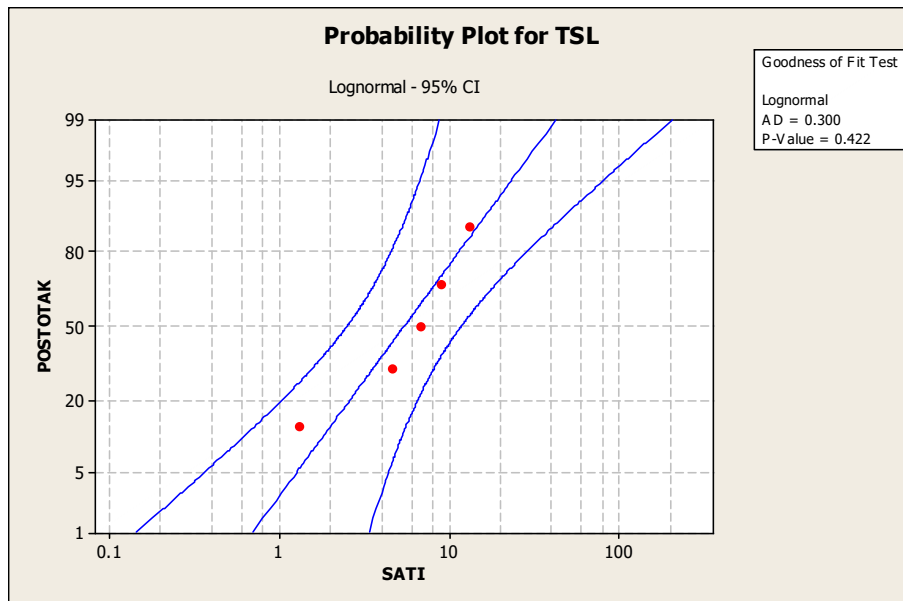
**Slika C.31.** Log-normalna raspodjela vjerojatnosti pogodnosti sanacijskog održavanja



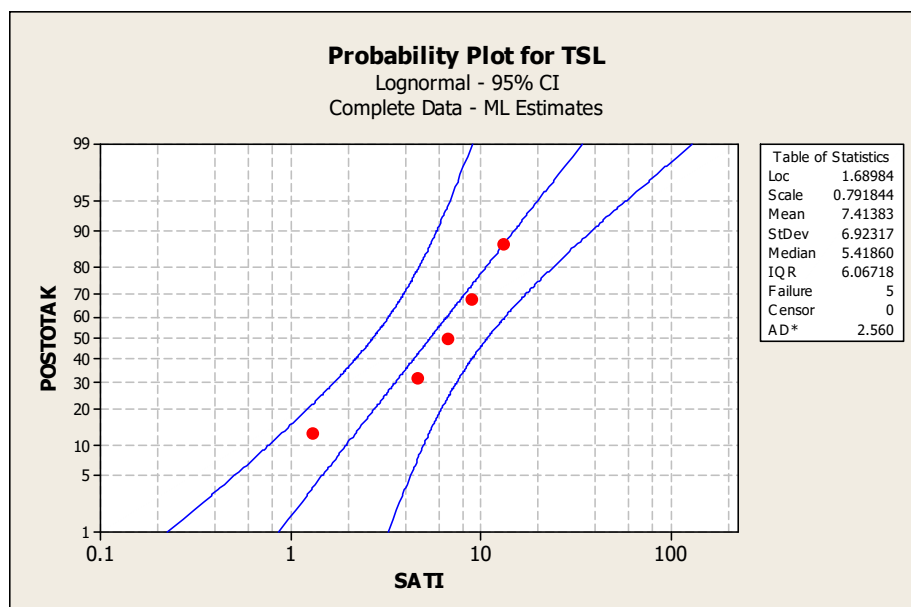
**Slika C.32.** Parametri log-normalne raspodjele

Očekivano vrijeme provedbe sanacijskog održavanja na cjevovodu ugljene prašine br. 1 je  $E_S(T) = 9,62$  sati. Jednakim postupkom provedene su statističke obrade broj osam i devet s

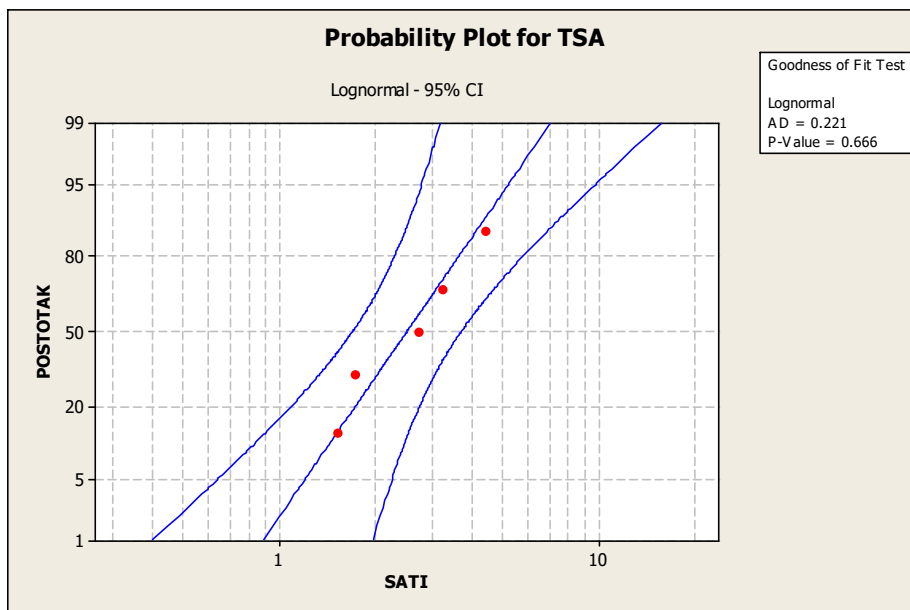
logističkim vremenom sanacijskog održavanja  $T_{SL}$  i aktivnim vremenom sanacijskog održavanja  $T_{SA}$ . Rezultati su prikazani na slikama od C.33. do C.36. Na temelju dobivenih rezultata očekivano je logističko vrijeme sanacije oštećenja  $E_{SL}(T) = 7,41$  sati, dok je očekivano aktivno vrijeme sanacije oštećenja  $E_{SA}(T) = 2,70$  sati. U tablici 3.10. sintetizirani su rezultati statističke analize te je izrađen numerički model opisan teoretskim funkcijama gustoće vjerojatnosti karakterističnih događaja na podsustavu cjevovoda ugljene prašine br. 1.



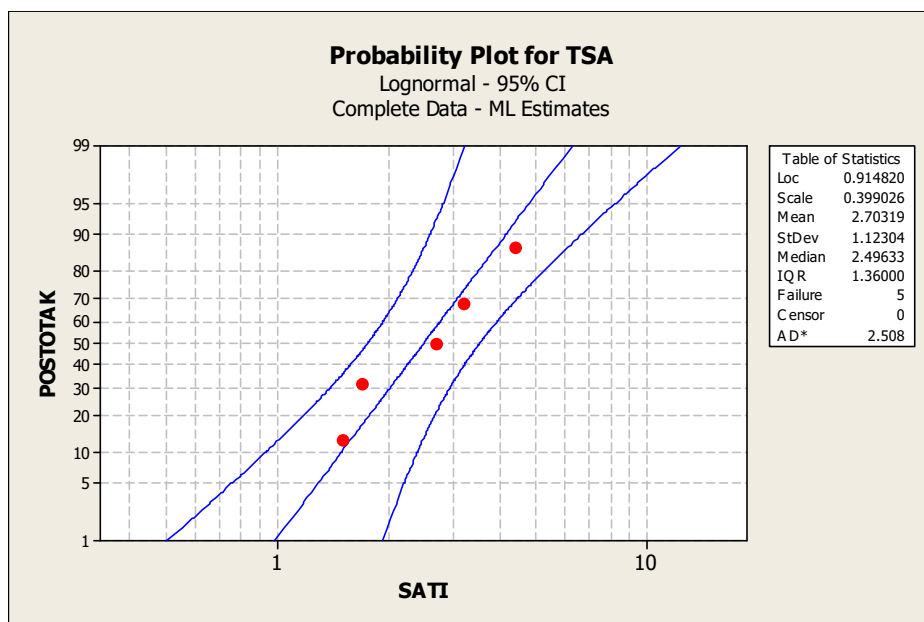
**Slika C.33.** Log-normalna raspodjela vjerojatnosti logističkog vremena sanacijskog održavanja  $T_{SL}$  i parametri pripadajuće funkcije raspodjele



**Slika C.34.** Parametri log-normalne raspodjele



Slika C.35. Log-normalna raspodjela vjerojatnosti aktivnog vremena sanacijskog održavanja  $T_{SA}$  i parametri pripadajuće funkcije raspodjele



Slika C.36. Parametri log-normalne raspodjele

## ŽIVOTOPIS

Jakov Batelić rođen je 1982. godine u Puli. Osmogodišnje školovanje i srednju školu elektrotehničkog usmjerenja završio je u Labinu. Stupanj obrazovanja diplomiranog inženjera elektrotehnike smjer elektroenergetska postrojenja stekao je 2008. godine na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Iste godine zapošljava se u HEP Proizvodnji d.o.o. TE Plomin. Od razdoblja pripravničkog staža sve do 2014. obavlja poslove rukovoditelja smjene u Službi za proizvodnju, a od 2014. godine obavlja poslove inženjera proizvodnje i zamjenika šefa proizvodnje. U okviru stručnog usavršavanja od 2013. godine stječe stručni naziv ovlaštenog inženjera elektrotehnike, a od 2017. godine stručni naziv ovlaštenog voditelja projekata, sve pri Hrvatskoj komori inženjera elektrotehnike. Od 2009. pohađa poslijediplomski doktorski studij modul „Osiguranje kvalitete i vođenje tehničkih sustava”. Kao područje znanstvenog i stručnog interesa izdvaja održavanje i vođenje složenih tehničkih sustava te je u tom području kao autor ili u koautorstvu objavio 16 znanstvenih i stručnih radova u časopisima i zbornicima domaćih i međunarodnih znanstvenih skupova. Oženjen je i otac je dvoje djece.



## POPIS RADOVA

Šumberac B., Batelić J., Licul Ž.: *Revitalizacije sinkronog generatora snage 210 MW od puštanja u pogon 1999. do danas*, 10. savjetovanje HRO – CIGRE, Cavtat, 6. – 10. 11. 2011.

Šumberac B., Batelić J., Licul Ž.: *Sanacija učvršćenja glava namota turbogeneratora 210 MW*, 11. savjetovanje HRO – CIGRE, Cavtat, 10. – 13. 11. 2013.

Matika D., Batelić J.: *Određivanje eksploatacijske pouzdanosti termoelektrane Plomin 2 u svrhu vrednovanja kritične nacionalne infrastrukture*, III. međunarodna znanstveno-stručna konferencija: “Nove sigurnosne ugroze i kritična nacionalna infrastruktura”, Zagreb, Rujan 12-13, 2013. str. 218–227.

Matika D., Klapčić S., Batelić J.: *Pouzdanost i pogodnost održavanja VOU sustava*, V. savjetovanje o morskoj tehnologiji, Rijeka, studeni 22-23, 2013. Pp. 169–180.

Matika D., Batelić J., Nasser A.: *Statistical analysis for power plant maintenance*, 7. međunarodna znanstveno-stručna konferencija: Dani kriznog upravljanja, Velika Gorica, svibanj 22-23, 2014. Pp. 1095–1110.

Batelić J., Matika D., Pavletić D.: *Model za provedbu statističke analize sposobnosti procesa pri iskrcaju ugljena iz brodova*, SORTA 2014.

Batelić J., Matika D., Mirković M.: *Model tokova resursa termoelektrane kao prilog menadžmentu pri kriznom upravljanju*, 7. međunarodna znanstveno-stručna konferencija: Dani kriznog upravljanja, Velika Gorica, Svibanj 22-23, 2014. Pp. 1159–1170.

Batelić J., Matika D., Fabić M.: *Izrada baze podataka u svrhu provedbe statističke analize složenog tehničkog sustava*, 3. konferencija “Održavanje” 2014, Zenica, Lipanj 11-13, 2014. Pp. 257–264.

Fabić M., Pavletić D., Batelić J.: *Faktori vrednovanja uspješnosti projekta remonta rafinerije nafte*, 3. konferencija: „Održavanje” 2014, Zenica, Lipanj 11-13, 2014. Pp. 313–320.

Batelić J., Matika D., Fabić M.: *Osnovni pojmovi i nazivlje pri određivanju vjerojatnosti promjene stanja složenog tehničkog sustava u termoelektrani*, 20. međunarodno savjetovanje – Održavanje 2014 Zagreb, Hrvatska, 2014.

Fabić M., Pavletić D., Batelić J.: *Elementi složenosti projekta remonta rafinerije nafte*, 20. međunarodno savjetovanje – Održavanje 2014, Zagreb, Hrvatska, 2014.

Laković I., Batelić J.: *Izrada plana praćenja emisija stakleničkih plinova TE Plomin*, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ Šibenik, 8. – 11. studenoga 2015.

Batelić J., Matika D., Svrze M.: *Joint Venture Analysis of Electric Power Plant Management From the Aspect of a Public Private Partnership in the Field of Critical Infrastructure*, International Conference RECIPE 2015, pp. 77–88.

Marušić A., Lončar D., Batelić J., Franković V.: *Increasing flexibility of coal power plant by control system modifications*, In: 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 27.9.-2.10.2015., Dubrovnik, Hrvatska

Marušić A., Lončar D., Batelić J., Franković V.: *Increasing flexibility of coal power plant by control system modifications*, Thermal science, 20 (4). pp. 1161-1169. ISSN 0354-9836 (2016.)

Lončar D., Marušić A., Batelić J., Franković V.: *Fleksibilno vođenje pogona termoelektrane*, 12. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje Energetska i procesna postrojenja, Rovinj, studeni 2016.