

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CNC KESİM MAKİNASI İÇİN MÜKEMMEL OLMAYAN ÖNLEYİCİ BAKIM
POLİTİKASININ GELİŞTİRİLMESİ VE EN İYİLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meltem KOÇER

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU

ARALIK 2017

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Anabilim Dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151311002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Meltem KOÇER**' in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**CNC KESİM MAKİNASI İÇİN MÜKEMMEL OLMAYAN ÖNLEYİCİ BAKIM POLİTİKASININ GELİŞTİRİLMESİ VE EN İYİLENMESİ**” başlıklı tezi **07.12.2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Fikri GÖKPINAR (Başkan)**
Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Salih TEKİN
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Meltem KOÇER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CNC KESİM MAKİNASI İÇİN MÜKEMMEL OLMAYAN ÖNLEYİCİ BAKIM POLİTİKASININ GELİŞTİRİLMESİ VE EN İYİLENMESİ

Meltem KOÇER

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU

Tarih: Aralık 2017

Tez çalışmasında savunma ve havacılık sanayinde kullanılan zamanla rassal yıpranan tezgah için uzun dönem birim operasyonel maliyeti en küçükleyen mükemmel olmayan sıralı önleyici bakım modeli oluşturulmuştur. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.(TUSAŞ)' den temin edilen 2013-2016 yılları arasındaki arıza veri setleri analitik yöntemlerle analiz edilerek Markov özelliğe sahip bir bakım algoritması geliştirilmiştir. Literatürdeki ve mevcut uygulamadaki klasik periyodik bakım planlarından farklı olarak sürekli gözlemlenerek sistem durumunun anlık takip edildiği güvenilirlik merkezli önleyici bakım politikası geliştirilmiştir. Sistem güvenilirliği belirli seviyeye düştüğünde sistem durumunu iyileştirecek mükemmel olmayan bakım uygulaması ile sistemi mevcut durumundan daha iyi duruma getirerek kullanılabilir olduğu süreyi arttırmak, beklenmeyen arıza sayısını azaltmak ve ürün kalite teminatının sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca tezgahın kullanım ve yaşa bağlı yıpranma süreci arıza oranı artış faktörü ve yaş indirgeme faktörü olarak tanımlanmış ve bu değişkenler kombine edilerek hibrid arıza modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen bakım yaklaşımında planlı bakım maliyetleri ve beklenmeyen arızaların tamir maliyeti zamana bağlı eklenirken , sistemin kullanım dışı kaldığı sürelerde katlanılan maliyet

sabit ve işletim maliyeti bakım devresi ve zamana bağı olarak artan değışken olarak tanımlanmıştır.

Çok bileşenli tezgah için geliştirilen mükemmel olmayan bakım algoritması sonucu minimum uzun dönem toplam birim maliyet ile optimum sistem güvenilirlik değeri, bakım sayısı ve sıralı bakım çevrimleri arasındaki süreler çıktı olarak elde edilir. Bunun yanı sıra çok bileşenli bir yapıya sahip makinanın parçaları Bayes teoremi kapsamında incelenmiş ve her bir çevrimde bakım uygulanması gereken sistem alt ekipmanı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Önleyici bakım, Güvenilirlik, Mükemmel olmayan bakım, Optimizasyon.



ABSTRACT

Master of Science

IMPROVING AND OPTIMIZING OF IMPERFECT PREVENTIVE MAINTENANCE POLICY FOR CNC CUTTING MACHINE

Meltem KOÇER

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU

Date: December 2017

In thesis study, a sequential preventive imperfect maintenance model that minimizes the long-term operational cost per unit time is improved for random degrading machining center in defence and aerospace industry. Parameters used for the proposed Markovian maintenance algorithm are gathered from real life 2013- 2016 data sets which are provided from Turkish Aerospace Industries, Inc.(TAI). In contrast the traditional maintenance plans in literature and the current application status under process, a reliability-centred preventive maintenance policy is developed by monitoring continuously and collecting instantaneous information about the system's current condition. Whenever system's reliability reaches the threshold R , imperfect repair is performed to restore the system and enhance system condition in aim to maximize the average availability, reduce the number of possible breakdowns during the system lifetime and accomplish the goal of quality assurance. Besides, the combination system's failure rate increase factor and age reduction factor is taken in consideration as variant according to system usage and age in order to build hybrid hazard model. In improved approach, as planned maintenance cost, minimal repair cost and system operating cost changes according to time and maintenance cycle, breakdown cost are assumed as constant.

In this preventive maintenance algorithm for complex equipment, the optimal system's reliability and number of maintenance cycle number, the interval time are reached under the criteria of the long term cost minimization of the system. Additionally, sub-systems are analyzed in scope of Bayesian theorem and it is determined which sub-systems are repaired at each maintenance cycle.

Keywords: Preventive maintenance, Reliability, Imperfect repair, Optimization.



TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca kıymetli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, yanında çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU'ya,

Değerli yorumları ve katkıları için jüri üyelerim Doç. Dr. Fikri GÖKPINAR'a ve Yrd. Doç. Dr. Salih TEKİN'e,

Kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve arkadaşlarıma,

Tez çalışmamın ortaya çıkmasını sağlayan Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ)'a,

Öğrenimim boyunca desteği için Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'nde yöneticim Asena KOCAKUŞAK ARSLAN'a,

Tez çalışmam süresince bilgisini ve tecrübelerini esirgemeyen TUSAŞ Tezgah Mekanik Bakım mühendisi Sn. A. Emrah UĞUR'a,

Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen annem Gülten KOÇER, babam Bahattin KOÇER ve abim Atilla KOÇER'e ve ailesine,

Öğrenimim boyunca desteği ve yardımları için dostum Kübra Nur DEMİR'e,

Anlayışı ve desteği ile yanımda olan Ümit Y. ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
RESİM LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	5
2.1. Üretim Sistemleri için Mükemmel Olmayan Önleyici Bakım Politikaları	12
3. BAKIM	17
3.1. Bakım İfadeleri ve Parametreleri.....	17
3.1.1 Güvenilirlik.....	17
3.1.2 Bakım kolaylığı.....	18
3.2. Bakım Yöntemleri	19
3.2.1. Toplam değişim bakım politikası	20
3.2.2. Kısmi değişim bakım politikası modeli.....	21
3.2.3. Yaşlanmayı dikkate alan bakım politikaları modelleri.....	22
3.2.4. En İyi Bakım Politikasını Bulmak İçin Kriterler	22
4. CNC KESİM TEZGAHI BAKIM POLİTİKASI	25
4.1. Problemin Tanımı	25
4.2. Önerilen Bakım Algoritması	28
4.3. Weibull Dağılımının Parametre Tahmini	37
4.4. Bağımsız Bileşenli Sistemler İçin Bayes Olasılık Kuramı.....	43
5. VERİLERİN İNCELENMESİ VE SAYISAL ANALİZİ	47
5.1. Verilerin İncelenmesi	47
5.2. Verilerin Sayısal Analizi	55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77

KAYNAKLAR	79
EKLER	85
ÖZGEÇMİŞ	91



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Sistemin atıl geçirdiği süre.	9
Şekil 2.2: Bakım politikaları ve etki faktörleri.	10
Şekil 2.3: Optimum bakım değeri (Ireson ve diğ., 1996).....	11
Şekil 3.1: Toplam arıza döngüsü (Bal, 2013).	19
Şekil 3.2: Sabit zaman aralığında değişim politikası.	20
Şekil 3.3: Yaşa bağlı değişim politikası.	21
Şekil 3.4: Ekipman yaşına mükemmel olmayan önleyici bakımın etkisi.	22
Şekil 4.1: Ele alınan CNC tezgahının (635) yıllara göre arıza oranı.	27
Şekil 4.2: Yaş indirgeme faktörünün etkisi.....	31
Şekil 4.3: Yıpranan sistemler için sistem arıza oranı ve güvenilirliği arasındaki ilişki (Liao ve diğ. 2010).	32
Şekil 4.4: F(t) dağılım fonksiyonu ve f(t) olasılık yoğunluk fonksiyonu.	37
Şekil 4.5: Bakım aralıkları T_1 ve T_2 'nin $\lambda(t)$ fonksiyonu ölçek parametresi üzerindeki etkisi.....	40
Şekil 4.6: Tek ve kapılı bir hata ağacı.	46
Şekil 5.1: CNC kesim tezgahı arızalarının detaylı pareto analizi.	49
Şekil 5.1: (devam) CNC kesim tezgahı arızalarının detaylı pareto analizi.	50
Şekil 5.2: CNC kesim makinası alt parçalarına ait arıza adetleri dağılımı.	52
Şekil 5.3: CNC kesim makinası alt parçalarına ait arıza süreleri dağılımı.	52
Şekil 5.4: CNC kesim tezgahı arızalarının pareto grafiği.	54
Şekil 5.5: Önerilen bakım algoritması genel akışı.	60

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Belotti CNC kesim tezgahının mevcut bakım planı.....	28
Çizelge 5.1: Sistem arızaları arası ortalama süresi.....	56
Çizelge 5.2: Sistem verilerine ait Weibull Dağılımı parametre değerleri.....	56
Çizelge 5.3: CNC kesim makinasına ait maliyet değerleri.....	57
Çizelge 5.4: Her bir bakım çevrim sayısı a ve b değerleri.....	59
Çizelge 5.5: Uzun dönem toplam birim maliyeti en küçükleyen algoritma sonuçları.....	62
Çizelge 5.6 : CNC kesim makinası bakım çevrimleri arasında geçen süreler.....	63
Çizelge 5.7: Bakım çevrimleri arası süreler (Ti), A ve B değerleri.....	66
Çizelge 5.8: CNC kesim makinası k alt bileşenleri Weibull parametreleri.....	66
Çizelge 5.9: İlk bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	67
Çizelge 5.10: İkinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	68
Çizelge 5.11: Üçüncü bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	68
Çizelge 5.12: Dördüncü bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	69
Çizelge 5.13: Beşinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	70
Çizelge 5.14: Altıncı bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	70
Çizelge 5.15: Yedinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	71
Çizelge 5.16: Sekizinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	71
Çizelge 5.17: Dokuzuncu bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri...	72
Çizelge 5.18: Onuncu bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	73
Çizelge 5.19: On birinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.....	73
Çizelge 5.20: Önerilen bakım planı ve mevcut durum planının karşılaştırılması...	74
Çizelge 5.21: CNC kesim tezgahı için önerilen bakım çizelgesi.....	75

KISALTMALAR

ABR	: Yaş Bağı Değişim (Age Based Replacement)
CBM	: Durum Esaslı Bakım (Condition Based Maintenance)
CIR	: Sabit Zaman Aralığında Değişim (Constant Interval Replacement)
CM	: Düzeltici Bakım (Corrective Maintenance)
CNC	: Bilgisayar Sayımlı Yönetilen (Computer Numerical Control)
CPT	: Koşullu Olasılık Tablosu (Conditional Probability Tables)
CR	: Düzeltici Değişim (Corrective Replacement)
DAG	: Yönlü Dönüşsüz Grafik (Directed Acyclic Graph)
MLE	: En Büyük Olabilirlik Tahminlemesi (Maximum Likelihood Estimation)
MLH	: Bakım işçilik saati (Maintenance Labor Hours)
MR	: Minimal Tamir (Minimal Repair)
MTBF	: Arızalar arası ortalama süre (Mean Time Between Failures)
PAS	: Kısmi Yaş İndirgeme (Proportional Age Setback)
PM	: Önleyici Bakım (Preventive Maintenance)
PR	: Önleyici Değişim (Preventive Replacement)
PPR	: Kısmi Önleyici Değişim (Partial Preventive Replacement)
RCM	: Güvenirlik Merkezli Bakım (Reliability Centered Maintenance)
TBM	: Zaman Esaslı Bakım (Time Based Maintenance)
TKY	: Toplam Kalite Yönetimi
TVB	: Toplam Verimli Bakım

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
N	Bakım sayısı
i	Bakım çevrim sırası
$\lambda(t)$	Arıza oranı fonksiyonu
T_i	Bakım çevrimleri arasında geçen süre
R	Güvenilirlik değeri
C_{mr}	Minimal tamir maliyeti
C_{ir}	Mükemmel olmayan bakım maliyeti
C_r	Yenileme veya mükemmel bakım maliyeti
C_o	Operasyonel maliyet
C_{bd}	Plansız durma maliyeti
a_i	Yaş indirgeme faktörü
b_i	Arıza oranı artış faktörü
ETC	Uzun dönem beklenen maliyet
α	Weibull ölçek parametresi
β	Weibull şekil parametresi

RESİM LİSTESİ

Sayfa

- Resim 4.1: Eksen işleme merkezi ve CNC su jetli kesim tezgahı dış görünümü. 26
Resim 4.2: Eksen işleme merkezi ve CNC su jetli kesim tezgahı iç görünümü. 26



1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ile makineleşen endüstri sayesinde ihtiyaç duyulan ürünler kolaylıkla üretilebilmektedir. Ticari ürünlerin üretiminde kullanılan sistemler ve ekipmanlar ise endüstri işletmelerindeki yatırımların önemli kısmını oluşturmaktadır. Bu sistemler kullanım koşullarına ve yaşa bağlı olarak yıpranmaktadır (Valdez-Flores ve Feldman, 1989). Günümüzde gelişmiş teknolojiye sahip bu sistemlerin, özellikle savunma sanayinde kullanılan uçaklar, denizaltılar, roket ve füze gibi ürünlerde güvenilirliği çok kritik öneme sahiptir. Olası arızalanma durumu yüksek maddi ve stratejik kayıplara yol açmaktadır. Bir işletmenin, üretim sistemi büyüdükçe ve üretilen ürün miktarı arttıkça bakım ve tamir faaliyetlerinin önemi daha çok ortaya çıkar. Birden fazla tezgâhtan oluşan bir üretim sisteminde bir makinenin arızalanması, zincirleme etkilerle bütün sistemi durduracaktır. Bu sebeple bakım çalışmasına verilen önemin artması yıpranan sistemlerin hata oranını azaltan, bakım maliyetlerini düşüren ve sistem güvenilirliğini artıran uygun değer bakım stratejisinin oluşturulması hususunda dikkatlerin artmasına yol açmıştır (Wang 2011).

Küreselleşen ekonomi ortamı ve artan rekabet düzeyi işletmeleri tesislerini en verimli şekilde çalışır durumda tutmaya yönlendirmektedir. İşletmelerin sözleşme takvimine uygun kalite oranı yüksek ürün sağlamaları müşteri memnuniyeti ve yüksek karlılık oranı için önemlidir. Yaşanacak en küçük bir aksaklık, işletmelerin üretim planlarından şaşmasına sebep olacaktır. Bu kapsamda verimli bir şekilde hattın bakım faaliyetlerini gerçekleştirmeleri beklenmektedir. Bakım ve ürün kalitesinin artırılması ve aynı zamanda homojenliğin temini, üretim faaliyetlerinin önemli bir görevidir. Ekipmanın durumu, kalitenin sağlanmasını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu kapsamda önleyici bakım çalışmaları ile Toplam Kalite Yönetimi (TKY) felsefesinin birleştirilmesi ile Toplam Verimli Bakım (TVB) kavramı oluşmaktadır. TVB, bir makinenin veya sürecin genel çalışma koşullarını en iyi düzeyde tutabilmek için süreç öncesinde, süreç esnasında ve sonrasında oluşabilecek kayıpları sıfır düzeyine getirmeye odaklanmıştır (Chaneski, 2002, Chan ve diğ., 2005). Endüstriyel alanlarda

bakım faaliyetlerinin artan önemi ve gerekliliği sonucu zamanla rassal yıpranan parçalar ve sistemler için bakım modelleri geliştirilmektedir. Birçok araştırmacı farklı sistem yapıları için bakım modelleri oluşturmuştur. Önleyici bakımın (Preventive maintenance) temelleri 1960lı yıllarda araştırmacı Richard Barlow tarafından atılmıştır. Sonrasında optimum bakım politikasının oluşturulması için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, üretim sistemleri faaliyetleri ile kombine edilmiş ve üretim sürecinde uygulanmıştır.

Bu çalışmada savunma sanayi sektöründe üretim yapan bir uçak fabrikasında zamanla rassal yıpranan tamir edilebilir beş eksenli su jeti bilgisayar sayımlı yönetilen (Computer Numerical Control (CNC)) kesim tezgahı için ideal önleyici bakım çizelgesi hazırlanmıştır. İşletmenin hazırladığı arıza oranı yüksek kritik durumdaki tezgah listesinde olması sebebiyle bu tezgah seçilmiştir. Belirli güvenilirlik seviyesinde sistemin uzun dönem operasyonel ve bakım maliyetlerini en küçüklemeyi amaçlayan bir bakım politikası oluşturulmuştur. Çalışma için Ocak 2013- Aralık 2016 tarihleri arasındaki gerçek arıza verileri ve maliyet bilgisi kullanılmıştır. Makine arıza sürelerinin Weibull dağılıma uygunluğu kabul edilmiştir. Makinanın operasyonel maliyeti ve hata oranı fonksiyonu bakım sürecine ve sistem durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Bakım çevrimleri arasındaki süre kullanıma ve yaşa bağlı olarak azalmaktadır, literatürde mükemmel olmayan sıralı bakım politikası başlığı altında incelenmiştir. Bakım çevrimleri arasında meydana gelen beklenmedik durdurucu arızalar minimal bakım ile onarılır ve parça arızalanmadan hemen önceki durumuna getirilir. Çalışmada, sistemin durmasına sebep olan arıza verileri ele alınmıştır. CNC tezgahının arızaya sebep olan ekipmanlarını ve alt parçalarını sınıflandırmak ve nispeten daha önemli olan arıza türlerini diğerlerinden ayırabilmek için istatistiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi yapılmıştır. Durdurucu etkiye sahip olmayan arızaların sonraki bakım çevriminde tamir edildiği varsayılmaktadır.

Güvenilirlik (reliability) konusu ile ilgili literatür taramasında bakım modelleri üzerine birçok çalışma olduğu görülmüştür. Gelişen teknoloji ile birlikte parça üzerlerine yerleştirilen kablosuz sensörler yardımıyla sistem durumu hakkında güncel bilgiye ulaşılabilmektedir. Böylelikle sistem güvenilirliğinin hareketi takip edilebilir. Bu bilgi ışığında ekipman arızalanmadan bakım faaliyetleri yapılabilir veya tamamen yenisiyle

değiştirilebilir. Arızalanmadan kaynaklı maliyet, işgücü ve zaman kaybının önüne geçilebilir.

Önerilen planda bakım çevrimleri arasındaki süre, sistemin bir önceki bakım zamanından sonrasındaki bozulma oranı ve bakım etkisi ile makinanın yaşındaki küçülme oranı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bakım planlaması yapılırken incelenen sistem durumu bir önceki bakım sonrası duruma göre belirlenmektedir, geçmişten bağımsızdır. Bu sebeple Markov özelliği göstermektedir. Önerilen bakım politikasında kullanıma ve zamana bağlı artan bozulma oranı katsayısı (b: hazard rate increased factor) ile bakım etkisiyle ekipmanın yaşındaki azalma oranı (a: age reduction factor) kombine edilerek hibrid bir model oluşturulmuştur. T anındaki bakım öncesi sistem arıza oranı fonksiyonu $\lambda(t)$ iken bakım sonrası $b*\lambda(aT+t)$ 'dir. $b \geq 1$, $0 \leq a \leq 1$ ve $t \geq 0$ 'dır. Bu tez ile ele alınan cnc tezgahı için optimum güvenilirlik seviyesi (R), bakım çevrim süreleri (T_i) ve uzun dönem minimum maliyet değeri hesaplanmıştır. Bakım zamanında sistemin hangi alt parçasına bakım yapılacağını belirlemek için Bayes teoremi uygulanmıştır. Alt parçaların arıza verilerine ait Weibull parametreleri analitik yöntemle hesaplanmış ve sistem bozulma oranı katsayısı (b) ile bakım sonrası ekipman yaşındaki azalma oranı (a) dikkate alınarak bakım devrelerinde her bir alt sistem için güvenilirlik değeri elde edilmiştir. Güvenilirlik (R) değeri en küçük olan yani arızalanması en muhtemel parçalar kombine edilerek bakım faaliyetlerinin uygulanması planlanmıştır. Böylelikle, arızalanma olasılığı düşük olan parçalar için gereksiz bakım uygulamalarının önüne geçilecektir.



2. LİTERATÜR

Endüstriyel işletmelerde, makinaların bozulması, kırılması veya aşınması söz konusudur. Sistem devamlılığının sağlanması için bakım veya ekipman yenileme kararı verilir. Literatürde geniş yer alan bakım politikalarının temeli 1950'li yıllara dayanmaktadır. Barlow ve Proschan (1965) sistemin eskime süreci, bakım çeşitleri ve varsayımları ve sistem güvenilirliğini "*Mathematical Theory of Reliability*" kitabında incelemiştir. İlk zamanlarda basit varsayımlar üzerinden iyi ve arızalı olmak üzere iki durumu inceleyen düzeltici bakım planlamaları yapılırken, zamanla daha fazla duruma sahip sistemler için önleyici bakım kararlarını içeren bakım problemleri çalışılmıştır.

Wang (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bakım ve değişim problemleri üzerine çalışılmış ve bir literatür değerlendirmesi yapılmıştır. Literatür çalışmaları model türüne göre ve sistem yapısına göre gruplara ayrılmıştır. Sistemler; tek üniteli ve çok üniteli sistemler olarak iki ana grupta incelenmektedir. Tek üniteli sistemlerde en sık karşılaşılan model yaşa bağlı bakım politikasıdır. Bu politikada bir ünite önceden belirlenen T yaşında önleyici bakım uygulanır. Periyodik bakım kapsamında sabit T zaman aralıklarında gruplandırılarak veya blok halinde parça bakım faaliyetleri yapılır ve çevrim arası sürelerde meydana gelen arızalar için minimal bakım uygulanır. Arıza limiti stratejisinde arızanın gerçekleşme oranı ve bir takım güvenilirlik göstergeleri göz önünde bulundurularak bakım ve parça değişimleri operasyonları yapılmaktadır. Sıralı (ardışık) bakım politikasında artan yıpranmaya bağlı olarak zamanla kısalan zaman dilimlerinde bakım ve değişimler gerçekleşmektedir. Arıza limiti ve ardışık bakım politikalarında sistem bakımının değişimden maliyetli olduğu noktalarda ekipman yenilemesi yapılmaktadır.

Bakım seviyesine göre mükemmel bakım, minimal bakım, mükemmel olmayan bakım, kötü bakım ve çok kötü bakım olmak üzere farklı kategoriler altında incelenebilir.

- Mükemmel bakım: Sistemi başlangıçtaki haline, en iyi duruma geri getirir. Sistemin yenilenmesi de bu başlık altında yer alır.

- Minimal bakım: Sistemi bozulmadan önceki haline geri getirir.
- Mükemmel olmayan bakım: Sistemi başlangıç durumu ile arızalanmadan önceki durumu arasında bir noktaya getirir.
- Kötü bakım: Sistemi olduğu durumdan daha kötü bir hale getirir. Onarım esnasında parçaların hasara uğraması örnek verilebilir.
- Çok kötü bakım: Sistemin arızalanmasına sebep olan durumlardır.

Nakagawa (1986), Nguyen ve Murthy (1981), Lin ve diğ. (2000) mükemmel olmayan sıralı koruyucu bakım çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Sistem yaşlandıkça daha sık bakım uygulaması gerektirdiğini belirtmişlerdir. Bakım devrelerinin sayısı arttıkça ekipmanın arıza oranı fonksiyon değerinin eskiye göre daha kısa sürede artış göstermesi sebebiyle bir önceki bakım aralığından (T) daha kısa sürede bakım faaliyetlerinin tekrarlanması gerekmektedir. Literatürde sıralı bakım politikası olarak çalışılan bu yöntemin periyodik bakım politikasına göre gerçek üretim sistemleri için daha ideal olduğu değerlendirilir. Malik (1979), bakım faaliyetlerinin sistem üzerindeki etkisini modellemek için gelişim faktörü geliştirmiştir. Lie ve Chun (1986) ve Nakagawa (1980) gelişim faktörünü arıza oranı fonksiyonu ve bakım sonrası ekipman yaşı için çalışmıştır. Mükemmel olmayan bakım politikasına yaş indirgeme faktörü (a) ve arıza oranı artış faktörü (b) eklenerek sistem durumu analiz edilmiştir (Nakagawa 1988). Bu çalışmaya göre bir bakım çevriminde ekipman arıza oranı $\lambda(t)$ iken sonraki bakım zamanında $b\lambda(t)$, $b \geq 1$ olacağı ifade edilir. Makine arızalandığı zaman yapılan tamir belirli olasılıklar ile mükemmel bakım, minimal bakım veya mükemmel olmayan bakım özelliği taşımaktadır. Sistem kritik durumda iken yapılan önleyici bakım p_i olasılığı ile mükemmel bakım olurken; $q_i = 1 - p_i$ olasılığı ile sistemin arızalandığı ana geri dönmesini sağlayan minimal bakım olarak değerlendirilir (Nguyen ve Murthy 1981, Brown ve Proschan 1983, Sheu ve Chang 2002). Sistem yaşına bağlı önleyici bakım politikaları geliştirilmiş ve literatürde bu kural (p , q) metodu olarak da bilinmektedir. Bunun yanı sıra Block ve diğ. (1985) yaşa bağlı minimal bakım politikalarını ele almıştır. (p , q) kuralına yaş parametresini de dahil ederek ($p(t)$, $q(t)$) olarak genişletmiştir.

Literatürde, makine yaşına bağlı önleyici bakım politikası ve periyodik önleyici bakım politikası çalışmaları yaygın olarak görülmektedir. Daha az görülen çalışmalar ise; Arıza limiti, tamir limiti ve de ardışık bakım politikaları olarak sıralanabilir. Birden fazla üniteli sistemlerde eğer sistemler birbirinden bağımsız ise bütün alt sistemler için

birbirinden farklı bakım politikaları uygulanabilir. Bununla birlikte eğer alt-sistemler birbirlerine sistemsel açıdan bağlı ise bakım planları bağımsız oluşturulamaz. Literatürde en çok çalışılan alanlardan birisi grup bakım politikasıdır. Grup bakım politikasını uygulamak sistem güvenilirliği açısından en ideal yöntemdir.

Rosmaini ve Shahrul (2012) tarafından yapılan çalışmada literatürde incelenen temel iki bakım türü olan zaman esaslı bakım (TBM: Time based maintenance) ve durum esaslı bakım (CBM: Condition based maintenance) hakkında yapılan araştırmalar ele alınmıştır. Bu çalışmada TBM ve CBM'in bakım hakkında karar verme yöntemi ve iki yöntem arasındaki fark aktarılmıştır. Her iki tekniğin birbirinden farklı olan prosedürleri detaylandırılmış ve buna ek olarak pratik uygulamada karşılaşılabilecek sorunlardan bahsedilmiştir. Çalışmada yapılan değerlendirmeye göre durum esaslı bakım tekniğinin bakım konusunda gerçekçi yaklaşımlar elde etmek için daha elverişli olduğuna vurgulanmıştır. Zaman esaslı bakım tekniği ile hazırlanan bakım analiz ve modellemelerinde birçok varsayımın olduğu ve bu nedenle gerçekleştirilen uygulamaların pratikteki sonuçlarının gerçekçi bir şekilde elde edilemediği belirtilmiştir.

Das ve diğ. (2007), çalışmasında bir hücre imalat sisteminin performansını maksimize etmek amacıyla tam sayılı programlamadan faydalanılarak önleyici bakım modeli oluşturmuştur. Ekipmanların arıza süre dağılımının Weibull dağılımına uyduğu belirtilmiştir. Önerilen model önleyici bakım politikası ile toplam bakım maliyeti ve ekipmanların toplam arızalanma olasılığı minimize edilmeye çalışılmıştır. Modelde güvenilirlik ve maliyet temelli yaklaşım ile önceden belirlenmiş makine güvenilirlik seviyesinde, bakım maliyetlerinin optimum düzeyde elde edilmesi amaçlanmıştır. Makalede maliyet öncelikli, güvenilirlik öncelikli ve de her iki durumu da kapsayan birleştirilmiş model olmak üzere üç farklı model sunulmuştur. Fakat gerçekleştirilen çalışmada verilere erişilebilirlik sınırlı olduğundan dolayı, elde edilen verilerin büyük bir çoğunluğu rassal olarak üretilmiştir ve gerçek bir uygulama yapılamamıştır.

Abdul-Nour ve diğ. (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir tesisin kritik olarak değerlendirilen makinelerinin seçilmesi ve de seçilen makineler esas alınarak bakım politikalarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda FMEA analizleri yapılmış ve dört kriter esas alınarak kritik makineler belirlenmiştir. Bu kriterler: Üretim sürecinde makinenin arızalanmasının etkisi, makinenin kullanım oranı, makine arızasının çevreye ve güvenliğe etkisi, makinenin teknik karmaşıklığı ve bakıma

duyduğu ihtiyaçtır. Yapılan çalışma neticesinde makinelerin çoğunun küvet eğrisinde olgunluk döneminde olduğu ve diğerlerinin yaşlılık döneminde olduğu tespit edilmiştir. Proje neticesinde bakım planları revize edilmiş ve uygulama neticesinde makinaların performansında büyük başarı sağlanmıştır (Bal, 2013).

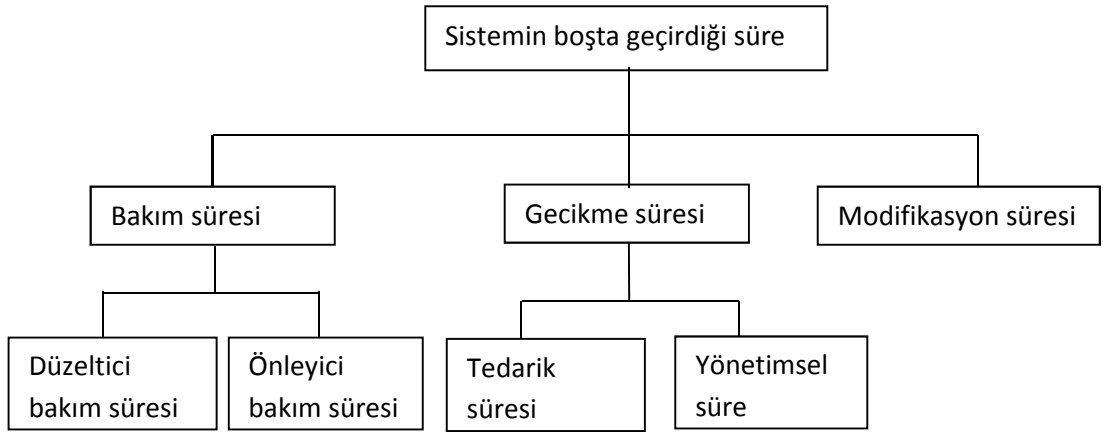
Savsar (2008), gerçekleştirdiği çalışmada birden fazla kademe bulunan bir üretim hatlarında gerçekleştirilebilecek olan düzeltici ve önleyici bakım çalışmalarını ele almıştır. Rassal arızaların sebep olduğu sorunlara düzeltici bakımlar uygulanmak zorundadır, tezgâh bileşeni eskimelerinden kaynaklanan arızalar ise önleyici bakım ve parça değişimi yapılarak giderilebilir olduğu savunulur. Yapılan varsayıma göre önleyici bakım faaliyetleri yıpranmalardan kaynaklanan arızalar ortadan kaldırılmaktadır. Bunun sebebi yıpranan parçaların önleyici bakım faaliyetleri ile ekipman arızalanmadan müdahale edilip onarılması veya yenileri ile değiştirilmesidir.

Gürler ve Kaya (2002) çalışmalarında sistem ve ekipmanlar için yıpranma sürecini dikkate alarak bakım ve kalite değerlendirmesi yapmışlardır. Farklı ömür süresine sahip bileşenlerden oluşan bir sistem için bakım politikası çalışılmıştır. Sistem alt ekipmanlarının durumu “iyi”, “şüpheli”, “önleyici bakım süreci” ve “bozuk” olmak üzere tanımlanmaktadır. N tane bileşenin durumu şüpheli durumda veya bozuk durumunda ise alt parçanın değiştirilmesini öneren model mevcut duruma göre uzun dönem maliyet fonksiyonunu en küçüklemeyi amaçlamaktadır.

Literatürde bakım önleyici (kestirimci) ve düzeltici olmak üzere ikiye ayrılır. Düzeltici bakım makina arıza yaptığında sistemi operasyonel olarak çalışır duruma getirmek için gerçekleşir. Bu yöntem; yedek tezgahın kolayca bulunabildiği, tamir edilme süreci zor olmayan ve yeni tezgah yatırımı fazla olmayan makineler ile üretimini gerçekleştiren tesislerde uygulanır. İşletmede arıza gerçekleştiğinde bakım yapılmasından dolayı, onarım sebepli duruşlarda yüksek oranda üretim kaybı meydana gelmeyecektir. Düzeltici bakım faaliyetleri parça arızaları ayrıntılı olarak anlaşıldıktan sonra uygulanmalıdır. Amaç ilgili ekipmanın kullanıcının sorunsuz şekilde çalışmasını istediği fonksiyonları arıza meydana gelmeden hemen önceki haline geri gelmesini sağlamaktır. Bu sistem anında ve ertelenmiş düzeltici bakım olarak ikiye ayrılmaktadır. Anında düzeltici bakım: sistemi çalışır durumda tutabilmek için arıza teşhisi konulduktan hemen sonra gerçekleştirilen bakım faaliyetleridir. Literatürde minimal bakım olarak da bilinmektedir. Diğer bakım faaliyeti olan ertelenmiş önleyici

bakım ise Durdurucu etkiye sahip olmayan arızaların planlı bakım altında tamir edilmesi için belirli bir süre ertelenen bakım faaliyetleridir.

Önleyici bakım ise, ekipmanların sahip olduğu fiziksel özelliklerinin ve tezgahın çalışma esnasında gerçekleştirilmesinin beklendiği işlevlerinin gerektirdiği durumlara göre, belirlenmiş ölçme ve değerlendirme tekniklerine göre gerçekleştirilen arıza oluşumunu arıza meydana gelmeden engelleyen öngörmeli bir bakım uygulamasıdır. Kestirimci bakım konu olan cihazın arıza yapmak üzere olduğunu ya da durumunun genel olarak hangi safhada olduğunu belirtmek amacıyla teknik bilgilerin analizini sağlar. Bu şekilde meydana gelebilecek olan problemler daha pahalı ve işletme için daha büyük arızalara dönüşmeden düzeltilirler. Uygulamada çalışan bir sistemi takip ederek sistemde meydana gelebilecek olası arızaların tespit edildiği için sistemin durmasına ve gereksiz kayıplara engel olmaktadır. Şekil 2.1 'de sistemin atıl kalmasına sebep olan kayıplar gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Sistemin atıl geçirdiği süre.

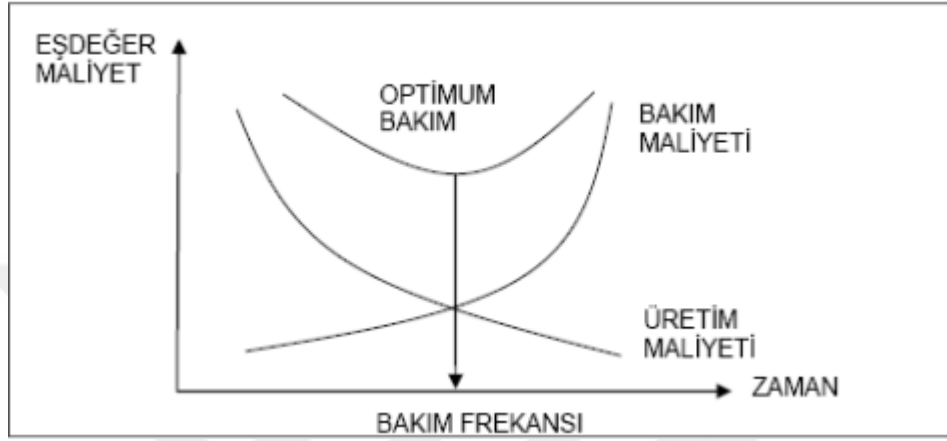
Önleyici bakım “önceden belirlenmiş” ve “şarta bağlı” olarak ikiye ayrılmaktadır. Periyodik önleyici bakım: Belirlenmiş birbiriyle eş zaman aralıklarının içinde gerçekleştirilen değerlendirme ile ya da mevcut durumda kullanılmakta olan birimlerin sayısından yola çıkılarak gerçekleştirilen arıza önleyici bakımdır. Bakım öncesinde parça durumlarının takibinin gerçekleştirilmesi gerekmemektedir. Şarta bağlı önleyici bakım: Belirli performans kriterine ya da izlenen parametrelere bağlı olarak planlanan, talep üzerine veya kullanıma bağlı değişen zaman aralıklarında gerçekleştirilen önleyici bakımdır. Toplanan verilerin analiz edilerek değerlendirilmesine dayanarak yapılan tahminlere göre uygulanan şarta bağlı önleyici bakım faaliyetleridir.

Literatürdeki bakım politikaları; optimizasyon kriteri, sistemin sürekli veya periyodik olarak gözlemlenmesi ve makina yıpranma süreci gibi faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Genel olarak belirlenen optimizasyon kriterleri makina tamir maliyetlerinin minimizasyonu, sistem kullanılabilirlik süresinin maksimizasyonu ve makine arıza süresinin en küçüklenmesidir. Şekil 2.2’de literatürdeki temel bakım politikaları ve etki faktörleri gösterilmiştir. Chan ve Asgarpoor (2006), bir ekipman için Markov Süreçleri ile durum olasılıkları hesaplanmış ve sistemin kullanılabilirliğini arttıran koruyucu bakım planlaması üzerine çalışmıştır. Chiang ve Yuan (2011) ise, sistemin periyodik olarak muayene edilmesi ve arızalı bulunan makinalar için maliyeti en küçükleyen çok durumlu sürekli zamanlı Markov Süreçleri altında optimum bakım politikasını belirlemektedir. Sistem durumu 0 (başlangıç durumu) $\leq 1 \leq 2 \leq \dots \leq L$ (bozulma durumu) ve $R_{ij}(T, N, a)$ olarak verilmiştir. Eğer, periyodik kontrol esnasında iyi durumda olan sistem değişmediyse a olarak ifade edilir. Tamir ve makina yenileme kararları ise $0 \leq a \leq i - 1$, $i \leq a \leq L-1$, $i < j$ kısıtlarına ve tamiri mümkün olmayan bozulma durumuna (L) göre verilir (Kalashnikov ve Roussignol, 1996). Gözlem süreleri arasındaki sürenin eşit olduğu periyodik bakım problemleri geniş yer bulmaktadır (Noortwijk ve Klatter 1999, Vaurio 1999, Derman ve Sacks 1960).

<i>BAKIM POLİTİKASI</i> Yaşa bağlı bakım Blok bakım Periyodik bakım Sıralı Bakım Kontrol limit	<i>SİSTEM KONFIGÜRASYONU</i> Tek sistem Çok sistemli Paralel sistem (iki durumlu) Seri sistemler (çok durumlu)	<i>BAKIM SEVİYESİ</i> Mükemmel olmayan bakım Minimal bakım Mükemmel bakım Kötü bakım Çok kötü bakım
<i>BAKIM MALİYETİ</i> Sabit Rassal Bileşik	<i>OPTİMİZASYON KRİTERİ</i> Maliyet ve güvenilirlik Arıza sıklığını azaltmak Kullanılabilirlik en iyilemesi Maliyet minimizasyonu	<i>MODEL ARACI</i> Yenileme Teorisi Markov Zinciri Olasılık Poisson Süreci
<i>PLANLAMA SÜRESİ</i> Sürekli Ayrık Sonlu Sonsuz	<i>BAGIMLILIK</i> Ekonomik Olasılık Arıza Durum	<i>SİSTEM BİLGİSİ</i> Eksik bilgi Tam bilgi

Şekil 2.2: Bakım politikaları ve etki faktörleri.

Literatürde bozulan sistemler için sürekli gözlem prosedürü ile koruyucu bakım politikaları da çalışılmıştır. Sistem durumu kritik olarak gözlemlenir ise önleyici bakım planlanır; sistem arızaları ise anında fark edilir ve tamir işlemi başlatılır (Bloch-Mercier 2002, Klein 1962). Barlow ve Hunter (1960), optimum gözlem prosedürlerini incelemiştir. Makine arızası fark edilene kadar geçen süreden kaynaklı maliyeti en küçükleme üzerine çalışılmıştır (Barlow ve diğ., 1963).



Şekil 2.3: Optimum bakım değeri (Ireson ve diğ., 1996).

Yukarıdaki şekilde gösterilen kuvvet eğrisinde sistem hata oranı başlarda yüksek olup zamanla azalan bir eğilim göstermektedir. Bunun sebebi kusurlu üretilen parçalardır. Bir süre hata oranı sabit kalır. Çünkü ilk kısımda arızalanan parçalar çıkarıldığında geriye sağlam parçalar kalır ve bu parçalar belli bir süre sorunsuz çalışır, o yüzden bu bölgeye kullanışlı ömür periyodu da denir. Zamanla hata oranı artan bir görünüm sergiler. Bu bölgede zamanla parçalar yıpranır ve hata oranı yavaşça artar (Hoyland ve Rausand, 1995).

Bakım faaliyetlerinin amacı şöyle listelenebilir:

- Üretim maliyetini düşürmek, tezgahların verimini arttırmak ve de tesiste üretilen ürünün kalitesini arttırmak,
- Makine kaynaklı imalat hattı duruşlarını azaltarak üretimin sürekliliğini sağlamak,
- Şirketin kaynaklarının yönetimini sağladığı üretim planlaması çizelgelerin uymasını sağlamak,
- Boşa harcanan kapasiteleri minimize ederek kapasite kullanım oranının maksimum düzeyde tutulmasını sağlamak,

- Her türlü tesis, makine ve ekipmanın faydalı ömrünü uzatmak ve böylece bu yatırımlar için harcanan sermayeden daha fazla verim elde edilmesini sağlamak,
- Arıza kaynaklı iş güvenliği ihmallerinin ve risklerinin minimize edilmesini sağlamak,
- Bakım ve onarım için harcanan masrafların azaltılmasını sağlamak.

2.1. Üretim Sistemleri için Mükemmel Olmayan Önleyici Bakım Politikaları

Makine teçhizat ve üretim sistemlerine bakıldığında bakım, tüm üretim sistemini veya belirli donanımı faal durumda bulundurmak için yapılan faaliyetlerdir.

Önleyici bakım, malzemelerin veya hareketli sistemlerin fiziksel özellikleri ile işlevlerinin gerektirdiği durumlara göre, belirli ölçme ve değerlendirme tekniklerine göre yapılan, arıza oluşumunu engelleyen öngörmeli bir bakım uygulamasıdır. Bu bakım planlamaları için işletmelerdeki makinalar belli noktalardan izlemeye alınır. Belirli bir zaman aralığında alınan ölçüm sonuçları değerlendirilir. Elde edilen ölçüm değerlerinin eğilimi incelenerek, sistemde oluşabilecek arızalar makina iyi durumdayken bile önceden tespit edilir. Önleyici bakım bir cihazın durumunun genel olarak hangi safhada olduğunu belirtmek amacıyla teknik bilgilerin analizini sağlar. Arıza nedenleri ve süreleri analiz edilerek bir planlı önleyici bakım programı hazırlanır (Khatab, 2013).

Önleyici bakımın faydaları şöyledir: Bazı parça değişimlerinin makinenin çalışmadığı zamanlara planlaması olası hale gelir ve böylece toplam maliyeti azaltır. Bakım için gerekli işgücü, alet ve yedek parçalar planlanan duruş zamanında kullanıma hazır olur ve bakım onarım işlemleri için harcanan süre kısaltılmış olur. Önleyici bakım, gerçekleşecek arızaların diğer sistemleri yıpratmasını da engellemekte ve ayrıca tamirden sonraki durum hakkında güncel veri sağlamaktadır. Makina için çok önemli arızalar minimum düzeye indirilir. Bakım süresi, dolayısıyla makinenin duruşu minimum düzeye indirilir (Lin ve diğ., 2015).

Literatürdeki klasik koruyucu bakım politikaları ile beklenmeyen arızaları önlemek ve yüksek kullanım maliyetlerini azaltmak mümkündür. Ancak bu klasik önleyici politikalar bakım faaliyetleri arasında geçen süreyi sabit T zamanı kabul eder ve sistem güvenilirliğini göz ardı eder. Sistemler kullanıma ve yaşa bağlı olarak yıpranır ve bozulur. Bu çalışmada, sürekli gözlemlenen tamir edilebilir sistemler için güvenilirlik

merkezli sıralı koruyucu bakım modeli geliştirilmiştir. Bakım planlaması yapılırken incelenen sistem durumu bir önceki bakım sonrası duruma göre belirlenmektedir. Yani, geçmişten bağımsızdır. Bu sebeple Markov özelliği göstermektedir (Berenguer ve diğ., 1997).

Tamir edilebilir ekipmanlar için planlı bakım politikaları daha etkin bir yöntemdir. Makinanın çalışma şartlarında meydana gelebilecek bir değişikliğin anında tespit edildiği ve sistem durumunun hemen belirlendiği varsayılmaktadır. Ekipman güvenilirlik seviyesinin sürekli gözlem ile anlık ve tam olarak bilindiği varsayılmaktadır. Sistem, önceden belirlenmiş R güvenilirlik seviyesine düştüğünde mükemmel olmayan bakım işlemleri yapılmakta ve sistem daha iyi duruma gelmektedir, belirli bir güvenilirlik seviyesine ulaşmaktadır (Nguyen ve Murthy, 1981). Makinede arıza meydana geldiği anda sistemin uyarı vermesi gerekmektedir. Bunun için üretim hattından verilerin sürekli toplanması ve tesis için optimum hale getirilmiş yazılım algoritmaları oluşturulmalıdır. Arıza verilerinin yanı sıra cihazlara ait sıcaklık, titreşim, yağ kalitesi, gürültü, basınç, güç, açılma hızı, akım gibi ölçütler kablosuz veri aktarma özelliğine sahip sensörler yardımıyla depolanmaktadır. Böylelikle gerçekçi göstergeler ile verimli bir bakım yönetimi sağlanabilir. (Khatab 2013, Liao ve diğ. 2010).

Mükemmel olmayan bakım sistemin hata oranını değiştirir. Önleyici bakım sayısı arttıkça sistem güvenilirliği belirli oranda azalır ve hata oranı artar. Bu bakım modelinde, sistem durumundan etkilenen arıza oranı ve işletim maliyeti, optimum güvenilirlik seviyesi ve koruyucu bakım çevrim sayısına karar vermek için kullanılmıştır (Segawa ve diğ., 1992, Boland 1982).

Bakım faaliyetleri arasında geçen süre T çok uzun olursa bakım için harcanan süre ve maliyetler düşebilir ancak sistem güvenilirliği azalır, hata oranı artar ve daha yüksek bozulma maliyetlerine sebep olur. Eğer T süresi çok kısa olursa, sistem iyi durumda kalmaya devam edebilir ancak sık uygulanan bakım faaliyetlerinin maliyeti çok yüksek olur. Bu sebeple, bakım modelleri geliştirirken sistem durumunun anlık takip edilebilir olması ve optimum bakım aralığının (T) belirlenmesi önemlidir (Graham ve diğ., 1979).

Bu önleyici bakım politikasında optimum güvenilirlik seviyesini (R), toplam bakım sayısını (N), bakım çevrimleri arasında geçen süreyi (T) ve bakım devrelerinde

onarılacak parçaları belirlerken sistem uygunluğunun artırılması ve uzun dönem maliyetlerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii (TUSAŞ) firmasında alüminyum ve kompozit parçaların kesiminde kullanılan 5 eksenli su jeti CNC işleme merkezi için optimum bakım politikası oluşturulmuştur. Bu çalışmada bakım çevrimleri arasındaki süre, sistemin bir önceki bakım zamanından sonrasındaki bozulma oranı ve bakım etkisi ile makinanın yaşındaki küçülme oranı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Önerilen bakım politikasında kullanıma ve zamana bağlı artan bozulma oranı katsayısı (b) ile bakım etkisiyle ekipmanın yaşındaki azalma oranı (a) kombine edilerek hibrid bir model oluşturulmuştur. Makinanın operasyonel maliyeti ve hata oranı fonksiyonu bakım sürecine ve sistem durumuna göre değişken olarak ele alınmıştır.

Sistem verileri analiz edilerek arızaların Weibull dağılıma uygunluğu kabul edilmiştir. Coria ve diğ.(2015) çalıştığı analitik parametre tahminleme yöntemi ile sisteme ait arıza verileri analiz edilmiş ve şekil ve ölçek parametreleri elde edilmiştir.

Planlanan bakım çevrimleri arasında durdurucu etkiye sahip beklenmedik arıza gerçekleşirse sistemi çalışır duruma getirebilmek için minimal bakım uygulanmıştır. Minimal bakım ile sistem durumunda herhangi bir iyileşme gerçekleşmez, ekipman arızalanmadan hemen önceki durumuna geri döner ve minimal tamir için harcanan süre göz ardı edilir.

İncelenen CNC tezgahı için (N-1) adet mükemmel olmayan bakım planlanmıştır. N. çevrimde ise sistemi başlangıçtaki iyi durumuna getirebilmek için mükemmel bakım politikaları çalışılmıştır. Mükemmel olmayan bakım çevrimlerinde bakım uygulanacak sistem alt bileşenlerine karar vermek için Bayes olasılık kuramı kullanılmıştır. Karmaşık, tamir edilebilen sistemlerin bakım optimizasyonu için Bayes modeli literatürde tercih edilen bir yöntemdir. Son yıllarda, Bayes teorisi ve ağları sezgisel uygulaması sayesinde ve software araçları nedeniyle genetik, ekonomi ve uzay araştırmaları gibi geniş alanda uygulanabilir hale gelmiştir. Bilinmeyen değişkenleri bulmak gerektiği durumlarda kullanılabilir. Bilinmeyen

Bayes ağı birbirleriyle koşulsal bağımlılıklara sahip bir rassal değişkenler kümesini yönlü dönüşsüz çizge (directed acyclic network) şeklinde tanımlar. Bayes ağları, her düğümü bir rassal değişkeni ifade eden yönlü dönüşsüz çizgelerdir (Mokhtar ve diğ. 2016). Gözlemlenebilir nicelikler, gizli değişkenler, bilinmeyen parametreler ya da

hipotezler birer Bayes rassal değişkeni olabilirler. Bakım optimizasyon çalışmalarında dđęümler sistem alt bileşenlerini ifade etmektedir. Birbirine herhangi bir şekilde bağlı olmayan dđęümler birbirlerinden koşulsal bağımsızdırlar. Her dđęüm, girdi olarak ebeveyn dđęümlerinin değerlerini alan ve çıktı olarak o dđęümün ifade ettiği değişkenin alabileceği değerlerin olasılıklarını (duruma göre olasılık dağılımını) veren bir olasılık fonksiyonu ile ilişkilendirilmiştir. Bayes modelinin en önemli özelliği istatistiksel ağlar olmaları ve dđęümler (nodes) arası geçiş yapan kolların (edges) istatistiksel kararlara göre seçilmesidir (Duta ve Addouche, 2012).

Bayes teoremi, karmaşık sistem bakım modellemesinde farklı etkinlikteki ve farklı Weibull parametrelerine sahip önleyici bakım tiplerini bir arada değerlendirmeye olanak sağlar. Mokhtar ve diğ. (2016) alışmalarında sistem uygunluğunu (availability) ve güvenilirlik (reliability) değerlendirmek için karmaşık bağlı sistemlerin yapısını Bayes ağları ile incelemişlerdir. Sistem alt parçalarına ait veriler incelenerek alt bileşenler arasındaki ilişkiye göre hata ağacı oluşturulmuştur. Bu hata ağacına göre belirlenen öncelik ve koşullu olasılık ile bağımsız dđęümler arasındaki olasılık değerleri hesaplanır.

Bu çalışmada önerilen güvenilirlik temelli sıralı mükemmel olmayan önleyici bakım modelinde Bayes olasılık kuramı ile tek ve kapılı kantitatif hata ağacı oluşturularak bağımsız bileşenli alt sistemlere ait bakım izelgesi oluşturulmuştur.



3. BAKIM

3.1. Bakım İfadeleri ve Parametreleri

Nicel bakım gereklilikleri belirlenmiş sistem kısıtları, makine atıl süresi, bakım işçilik saati veya sistem kullanılabilir oranına bağlıdır. Arızalar arası ortalama süre (mean time between failures (MTBF)) temel bakım ölçütlerinden biridir. Bakım işçilik saati (maintenance labor hours (MLH)), sistemin operasyonel işleminin devamlılığını sağlamak için planlanan düzenleyici ve önleyici bakım işlemlerine harcanan yıllık işçilik saatidir. Bir sistemin herhangi bir anda kullanılabilir durumda olma olasılığı bu parametreler yardımıyla ölçülmektedir. Bakım parametreleri üç başlık altında sınıflandırılabilir: Süre temelli parametreler, toplan işçilik parametreleri ve sistem uygunluk parametreleri. Ekipmana ait arıza oranı ise şu şekilde ifade edilir:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (3.1)$$

3.1.1 Güvenilirlik

Bakım bir tesisin üretkenliğinde ve de verimliliğinde önemli rol oynayan, dolayısıyla işletmenin büyümesi için olmazsa olmaz bir unsurdur. Gerçekleştirilen bakım çalışmalarının sistemde nasıl bir etki yaparak ne kadar fayda sağlayacağı parametreler ile ölçülebilir ancak bakım faaliyetlerindeki temel hedef ele alınan sistemi mümkün olduğunca güvenilir bir halde tutmak ve arıza ihtimalini en düşük seviyede gözlemlemektir.

Güvenilirlik, bir sistemin arzu edilen işlemi belirli faaliyet koşulları altında, belirli bir zaman dilimi içerisinde yerine getirme olasılığı olarak tanımlanır (Ebeling, 1997).

Bir parçanın belli şartlar altında en az t süresi boyunca işlevini yerine getirme olasılığı güvenilirliktir. Bir başka deyişle, bir sistemin/bileşenin gerçekleşen arızaları arası geçen sürenin t'den büyük olma olasılığıdır. Güvenilirliği R(t) ve kümülatif dağılım fonksiyonunu F(t) ile gösterilir.

$$R(t) = \Pr\{T \geq t\} \quad (3.2)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = \Pr\{T < t\} \quad (3.3)$$

Olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$ arıza dağılımının şeklini göstermektedir. Oyf $f(t)$, iki özelliği vardır:

$$f(t) \geq 0 \text{ ve } \int_0^{\infty} f(t)dt \quad (3.4)$$

Belirtilen oyf $f(t)$ ' ye göre:

$$F(t) = \int_0^t f(t')dt' \quad (3.5)$$

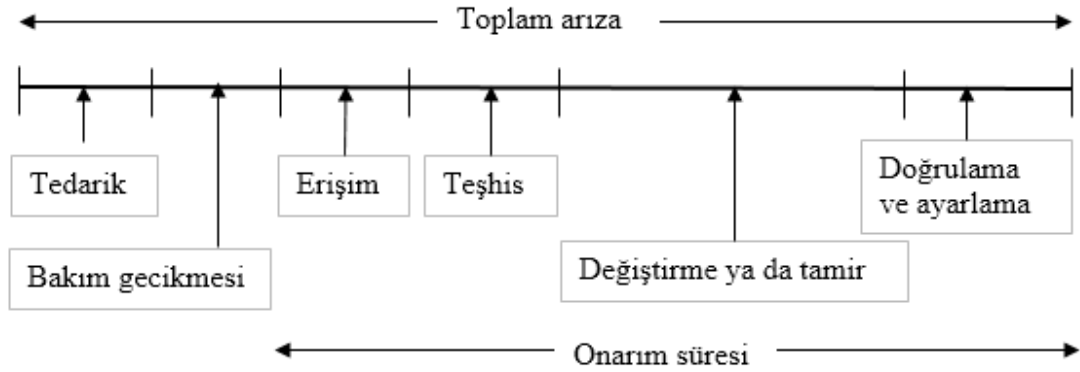
$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t')dt' \quad (3.6)$$

Güvenilirlik $R(t)$ ve kümülatif dağılım fonksiyonu $F(t)$, olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(t)$ altındaki alanı ifade etmektedir. Eğri altında kalan alan 1'e eşit olduğundan dolayı güvenilirlik ve kümülatif dağılım fonksiyonunu aşağıdaki gibi belirtmek mümkündür: $0 \leq R(t) \leq 1$ ve $0 \leq F(t) \leq 1$.

3.1.2 Bakım kolaylığı

Bakım kolaylığı (Maintainability), bakım faaliyetleri önceden belirlenmiş olan tezgah bazlı bakım prosedürlerine uygun şekilde gerçekleştirildiğinde, arızalanmış sistem ya da parçanın, belirli bir zaman dilimi içerisinde, yenilenmesi ya da tamir edilmesi olasılığıdır (Bal, 2013). Kısaca bakım kolaylığı, belirtilen zaman içerisinde onarma olasılığıdır. Bakım kolaylığı genellikle, sadece arızalanmış ürünün üzerinde geçen onarım zamanı ve herhangi bir yönetimsel ya da kaynak gecikme zamanını içermeyecek şekilde, sadece esas tamir süresinin saat zaman cinsinden ifade edilmesidir (Ebeling, 1997). Bakım prosedürleri sadece tamir işlemini değil, aynı zamanda iş gücü, yedek parça, ve kullanım kılavuzu gibi bakım kaynaklarının erişilebilirliğini, önleyici bakım programını ve personelin yetkinliğini de içerir. Şekil 3.1'de bir sisteme ait toplam arıza döngüsü şematik olarak anlatılmıştır. Tezgah arıza döngüsü tamamlanana kadar geçen süre boyunca atıl kalmaktadır. Bu sebeple, üretim planından sapmalar yaşanmakta ve zaman, maliyet kayıpları yaşanmaktadır. Planlı

bakım faaliyetleri öncesinde gerekli iş gücü ve donanımı hazırlanması mümkün olacağı için makine arıza sıklığını azaltacak bakım çizelgeleri kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 3.1: Toplam arıza döngüsü (Bal, 2013).

Tamir süresini ölçmek için: T , arızalanan birim için zamanı gösteren sürekli rassal değişken ve $h(t)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak alınır, kümülatif dağılım fonksiyonu $H(t)$:

$$Pr\{T \leq t\} = H(t) = \int_0^t h(t') dt' \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklem t süresi içerisinde arızalanma olasılığını göstermektedir.

Ortalama tamir süresi:

$$MTTR = \int_0^{\infty} th(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - H(t)) dt \quad (3.8)$$

Tamir dağılımının varyansı:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - MTTR)^2 h(t) dt \quad (3.9)$$

Bakım faaliyetlerinin sürdürülebilirliğini ölçmek için aşağıdaki değerlerin bilinmesi gerekmektedir: Ortalama tamir süresi, belirli olasılıklarda gerçekleşebilecek en uzun tamir süresi, ortalama olarak sistemin arıza süresi, çalışma zamanının bakım zamanına oranı.

3.2 Bakım Yöntemleri

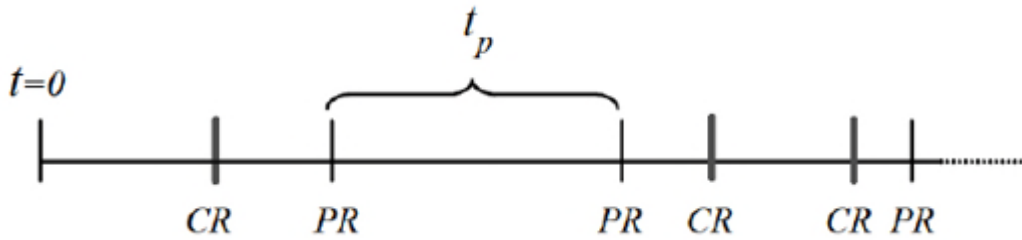
Bu bölümde bakım modellemesinde kullanılan farklı yaklaşımlar özetlenmiştir.

3.2.1. Toplam değişim bakım politikası

Sistem alt bileşenlerinin her zaman tamamen değiştii ve bu değişimlerin anında yapıldığı varsayılmaktadır. İki çeşit temel değişim seçeneği vardır: Önleyici değişim (PR) ve Düzeltici değişim (CR).

Toplam Değişim Bakım Politikalarının dikkate aldığı önleyici değişim politikaları aşağıda sıralanmıştır:

- *Sabit Zaman Aralığında Değişim (CIR: Constant interval replacement)*: Ekipman değişimi önceden belirlenmiş sabit bir zaman aralığı geçtikten sonra yapılır. Değişim, arıza gerçekleştikten sonra düzeltici veya sabit zaman aralığında t_p önleyici değişim yapılır. Model iki parça değişimi arasındaki en iyi zaman aralığını bulmaya çalışır. Amaç fonksiyonu birim parça-zaman başına toplam beklenen maliyeti minimum yapmaktır.



Şekil 3.2: Sabit zaman aralığında değişim politikası.

Kullanılan notasyonlar:

C_p : PR birim maliyeti

C_c : CR birim maliyeti

T_p : PR zamanı

$F(t)$: Arızaya kadar geçen zaman olasılık dağılım fonksiyonu

$f(t)$: Arızaya kadar geçen zaman olasılık yoğunluk fonksiyonu

$N(t_p)$: Belirli zaman aralığında öngörülen arıza sayısı $(0, t_p)$

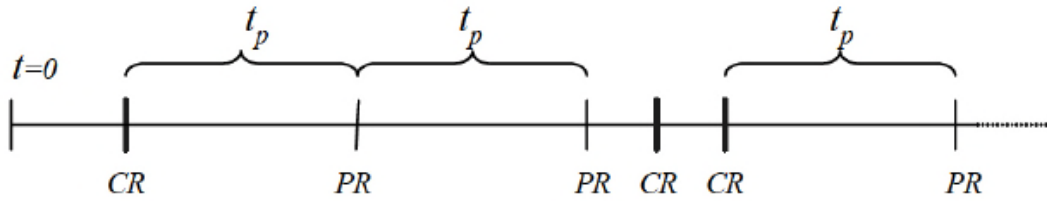
$TEC(t_p)$: Birim parça-zaman başına toplam beklenen maliyet

Arıza oluştuğunda, $(0, t_p)$ zaman aralığında meydana gelecek ve t_p aralığı için birim parça-zaman başına toplam beklenen maliyet (TEC) şöyle hesaplanır:

$$TEC(t_p) * TEC(0, t_p) / Süre(0, t_p) = [C_p + C_c N(t_p)] / t_p \quad (3.10)$$

Bu bakım politikasında zamanla yüksek miktarda arıza gerçekleştiğinde ekipmanların çalışma süresi içerisinde birçok kez yenilenmesi gerekecektir. Bu açıdan değerlendirildiğinde bu bakım yönteminin verimli olmadığı söylenebilir.

-*Yaşa Bağlı Değişim (ABR: Age based replacement)*: Önleyici parça değişimi ekipman belirli bir çalışma zamanını aşınca ya da yaşa gelince gerçekleştirilir. Bir düzeltici değişim yapılmasının ardından bir sonraki önleyici yenileme t_p birim zaman sonra gerçekleştirilir. Optimizasyon kriteri en iyi t_p için $TEC(t_p)$ 'yi en küçük yapmaktır.



Şekil 3.3: Yaşa bağlı değişim politikası.

Kullanılan notasyonlar:

t_p : Ekipmanın önleyici değişime (PR) ulaşma zamanı

$R(t_p)$: Önleyici değişim olma olasılığı

$F(t_p)$: Önleyici değişim zamanından önce arıza olasılığı

$(0, t_p)$ aralığında beklenen maliyet $C_p R(t_p) + C_c F(t_p)$ 'ye eşittir.

Arıza çevriminin uzunluğu aşağıda belirtildiği şekilde hata dağılımının beklenen değerinin hesaplanması ile bulunur:

$$M(t_p) = \int_{-\infty}^{t_p} \frac{tf(t)dt}{F(t_p)} \quad (3.11)$$

$$TEC(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_c F(t_p)}{t_p R(t_p) + M(t_p) F(t_p)} \quad (3.12)$$

3.2.2. Kısmi değişim bakım politikası modeli

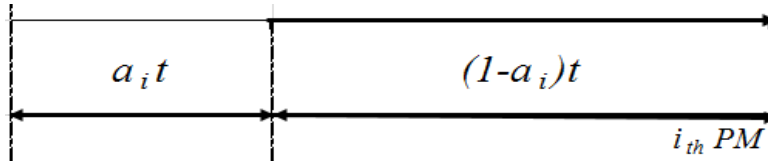
Bu modeller yukarıda bahsedilen toplam ikame modelinin alt seviyede incelenmesidir.

Bu modellerin formülü sistemlerin alt parça seviyelerinde muhtemel kısmi önleyici

değişim (partial preventive replacement (PPR)) düşüncesiyle oluşturulmuştur. Bu modellerde; ekipmanların başlangıç arıza seviyelerine (iyi duruma) gelebilmeleri hedefiyle, T_i belirli operasyon zamanında, üst montaj parçalarının alt ekipman seviyelerinde kısmi önleyici değişimler yapılmaktadır. Ancak belirlenmiş bir PPR sayısına ulaşıldıktan sonra, bütün önleyici ekipman yenilemesi daha verimli olacaktır.

3.2.3. Yaşlanmayı dikkate alan bakım politikaları modelleri

Parçalara önleyici yenileme yapıldıktan sonra, sistemin başlangıç durumu gibi sorunsuz olduğu varsayımı yapılmaktadır. Bu bakım politikasında önleyici bakım faaliyetleri gerçekleştirildikten sonra sistemin durumunun yaşlanmaya bağlı olarak biraz daha kötü olduğu kabul edilmektedir. Literatürde “Mükemmel Olmayan Önleyici Bakım” (Imperfect Preventive Maintenance) olarak geçmektedir. Ben-Daya ve diğ. (2006) ve Khatab (2013) tarafından öne sürülen bu modelde bakım faaliyetleri sabit zaman aralıklarında ($i=1,2,\dots,N-1$) gerçekleştirilir ve parça değişimi $N-1$ bakım faaliyetinden sonra yapılır. Ekipmana i 'nci bakım t zamanında uygulandığında ekipman ömrü $a_i t$ kadar değiştirilir.



Şekil 3.4: Ekipman yaşına mükemmel olmayan önleyici bakımın etkisi.

Bu modelde bakım t_1, t_1+t_2, \dots , zamanlarında yapılır. Burada t_i 'ler i 'nci zaman aralığının ($i=1,2,\dots,N-1$) uzunluğu olup önleyici değişimler N zaman aralığında gerçekleştirilmektedir. Modelde amaç en küçük maliyet ile bakım çevrim sayısını ve zaman aralıklarının uzunluğunu (t_i) bulmaktır.

y_i , i 'nci bakım sonrası ekipman yaşı şöyle hesaplanır:

$$y_i = t_i + (a_i - 1)(y_i - 1) \quad (3.13)$$

3.2.4. En İyi Bakım Politikasını Bulmak İçin Kriterler

Bakım, sistemin uygunluğunu arttırmayı ve iki arıza arası sürenin optimum olmasını hedefler. Bunun yanında bakım maliyetlerini küçükmek de önemli bir etmendir (Wang 2008). En iyi bakım politikasını bulmak için dikkat edilen özellikler şöyledir: Bakım maliyetlerini en küçükmek, sistemin güvenilirliğini en iyilenmesi, sistem

güvenilirliği tatmin edici bir noktada iken bakım maliyetlerini minimum yapmak, bakım maliyetleri kabul edilebilir bir noktada iken güvenilirliği en iyi seviyede tutmak.

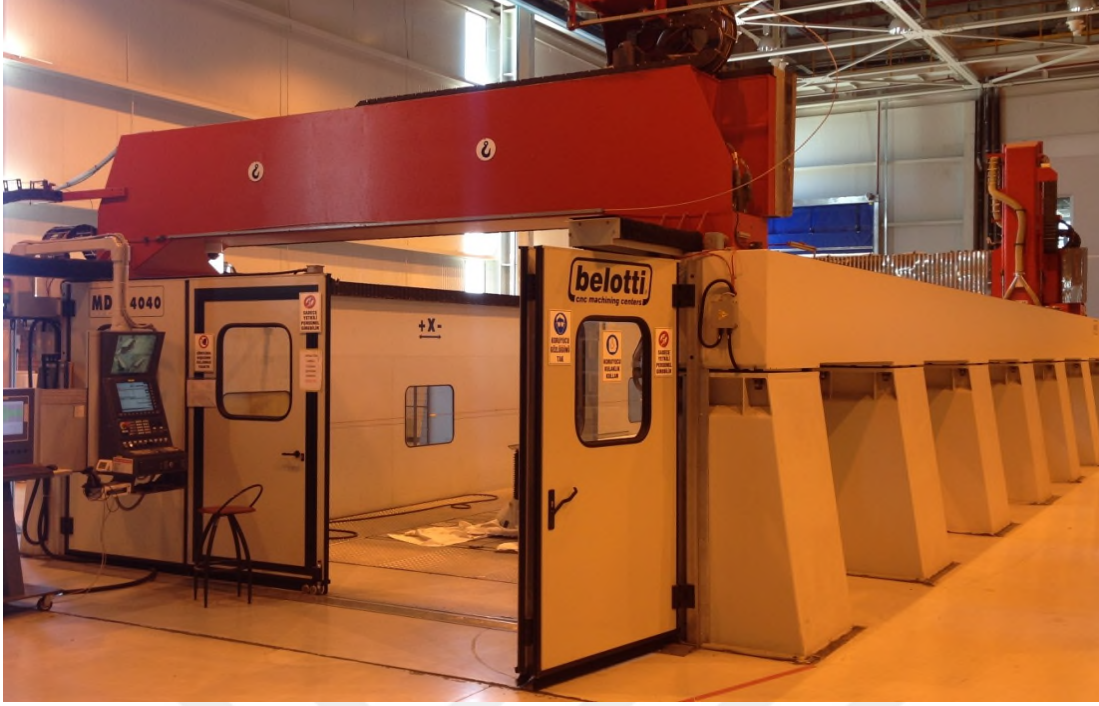
4. CNC KESİM TEZGAHI BAKIM POLİTİKASI

Havacılık sektöründe kullanılan CNC beş eksenli işleme merkezi ve su jetli kesim tezgahının geçmiş arıza verileri incelenerek durum bazlı sıralı önleyici bakım politikası oluşturulmuştur. Optimum güvenilirlik aralığında uzun dönem bakım ve operasyonel maliyetini en küçükleyen bakım modeli ile çevrim zamanları tespit edilmiştir. Problemin kapsamlı tanımı ve oluşturulan bakım algoritması alt başlıklarda incelenmiştir.

4.1. Problemin Tanımı

Tusaş üretim sistemlerinin sınıflandırması proje ve parça gereksinimine göre değişkenlik göstermektedir. Uçak fabrikasında temel olarak Atölye Tipi (Job-shop), Proje Tipi (Project-shop) ve Hücre Tipi Üretim sistemi (Cellular Manufacturing System) kullanılmaktadır. Talep üzerine iş emri oluşturulan işler uygun bölüm ve iş istasyonlarını takip ederek çıktı haline gelmesi atölye tipi üretim sistemi uygulandığını göstermektedir. Üretim sistemlerinde birden fazla amaç için kullanılan tezgah ve ekipmanlar özelliklerine ve atandıkları işe göre gruplanarak tesis içi yerleşimi yapılmaktadır. Örneğin, NC tezgahları için ayrı bir bölümde torna ve freze işi için atanan makineler ayrı bir bölümde düzenlenmiştir. Hareket özelliği olmayan uçak gövdesi, kokpiti ve kuyruğu gibi ürünler için proje tipi üretim yöntemleri uygulanmaktadır. Birden fazla çeşitte yüksek miktarda sistem girdisi tek bir iş merkezinde tek amaca yönelik işlem görmektedir. Hücre tipi üretim yöntemleri ise benzer üretim özelliklerine sahip parçalar, üretim için gerekli iş gören, makine ve ekipmanlar gruplarından oluşmaktadır. Uçak üretimi için belirli miktarlarda üretim gereken küçük boyutlu parçaların üretiminde bu tip kullanılmaktadır.

Bakım çalışmasında ele alınan Belotti MDL 14040 model yüksek hızlı beş eksenli işleme ve kesim makinası, havacılık sektöründe kompozit ve alüminyum büyük boyutlu parçaların işlendiği CNC (635) tezgahı Resim 4.1 ve Resim 4.2’de verilmiştir.

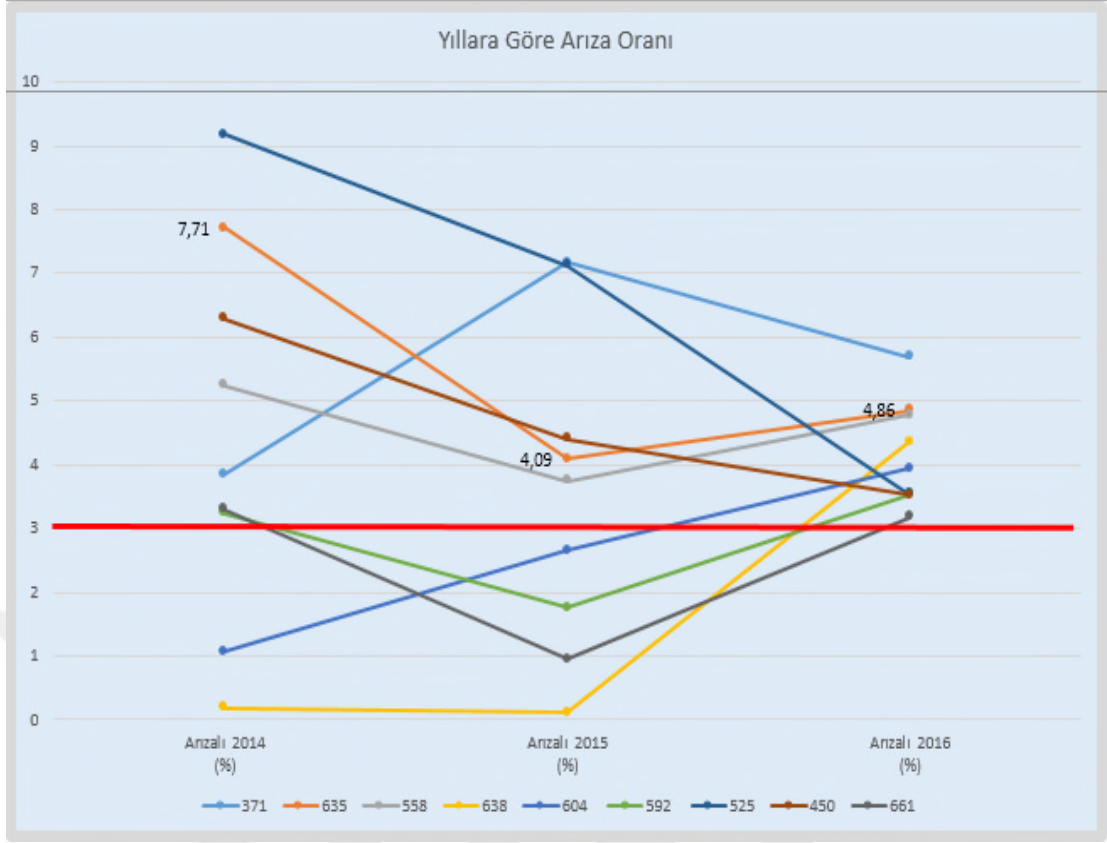


Resim 4.1: Eksen işleme merkezi ve CNC su jeti kesim tezgahı dış görünümü.



Resim 4.2: Eksen işleme merkezi ve CNC su jetli kesim tezgahı iç görünümü.

Bu tezgahın geçmiş arıza verileri kayıt altına alınmış ve yıllara göre arıza oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Bakım bölümü tarafından belirlenmiş kabul edilebilir arıza oranı olan %3 değerinin üstünde kalması sebebiyle bu işleme merkezine ait bakım planının revize edilmesine karar verilmiştir. Şekil 4.1’de ele alınan CNC kesim makinasının yıllara göre arıza oranı gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Ele alınan CNC tezgahının (635) yıllara göre arıza oranı.

Mevcut bakım planında geleneksel periyodik bakım politikası uygulanmaktadır. Belirli eş zaman aralıklarında kontrol bakım faaliyetleri yapılmaktadır. Kontrol bakım faaliyetleri; Eksen ayarları, vibrasyon, termal akış, çekme gerilimi ve hidrolik sistemlerdir. Her üç ayda bir sekiz saatlik süreyle gerçekleştirilen periyodik bakım aktiviteleri ile sistem çalışmaktadır. Bunun yanında yılda bir defa olmak üzere ballbar ve lazer kontrol bakımı uygulanmaktadır. Çizelge 4.1’de kesim tezgahına ait mevcut bakım planı gösterilmiştir. Klasik periyodik bakım uygulamaları sistem güvenilirliğini, kullanıma ve yaşa bağlı yıpranmayı göz ardı eder. Ancak fabrika ortamındaki pratik uygulamalar göstermiştir ki makinanın yaşı ve kullanım şekli arıza oranı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

Periyodik planlı bakım çevrimleri arasında gerçekleşen beklenmedik arızalar için anında iş emri açılmaktadır. Arıza detayı tespit edilmesi, arıza tamiri için gerekli iş gücü ve ekipman tedarik edilmesi, modifikasyon süresi ve yeniden kullanıma alınması için geçen yönetimsel süre boyunca makina çalışmamaktadır. Arıza oranındaki artış, makinanın atıl kaldığı süre ve arıza tamir maliyeti sistem verimliliğini düşürmektedir. Yüksek arıza oranı sebebiyle üretim planında aksaklıklar yaşanmakta ve çıkan ürün

kalitesi düşmektedir. Satın alma ve kurulum maliyeti dikkate alındığında cnc kesim makinasının kısa zaman aralığında ikame edilmesi mümkün değildir. Bu etkenler değerlendirildiğinde bakım planının güncellenmesi gerekliliği kaçınılmazdır. Bakım faaliyetleri ile ekipmanlar arızalanmadan önce bakım yapılarak beklenmedik arıza sayısını azaltmak, planlı bakım çalışmaları için öncesinde gerekli hazırlık yapılarak sistemin atıl kaldığı süreyi azaltmak ve sistem kullanılabilirliğini arttırmak amaçlanmaktadır.

Çizelge 4.1: Belotti CNC kesim tezgahının mevcut bakım planı.

Bakım Faaliyetleri	Bakım Frekansı	Bakım süresi (saat)
Kontrol bakımı (eksen ayarları, vibrasyon, termal akış, çekme gerilimi, hidrolik sistemler)	Her 3 ayda bir periyodik bakım	8
CNC ballbar kontrol bakımı	Yılda bir periyodik bakım	8
CNC lazer kontrol bakımı	Yılda bir periyodik bakım	8
Mükemmel Bakım	Yılda bir periyodik bakım	8

Sıralı mükemmel olmayan bakım ile sistem arızalanmadan hemen önceki durumunda “daha iyi” ancak başlangıçtaki yeni halinden “daha kötü” bir noktaya ulaşacaktır. İlgili kriterler incelendiğinde bakım etkinliğinin oranı belirlenebilir. Sonsuz süreli planlanan mükemmel olmayan önleyici bakım bir süre sonra sistem üzerindeki pozitif etkisini kaybedecektir. Bakım ve onarım maliyetleri ekipmanın ikame maliyetinden fazla ise parça yenileme veya mükemmel bakım uygulanmalıdır. (N-1). mükemmel olmayan bakım çevriminden sonra N. çevrim, mükemmel bakım veya ekipman yenilemedir.

4.2. Önerilen Bakım Algoritması

Tez çalışması kapsamında sürekli gözlemlenen zamanla rassal yıpranan bir cnc kesim tezgahı için güvenilirlik merkezli sıralı önleyici bakım algoritması oluşturulmuştur. Sistem durumu kablosuz sensör yardımıyla anlık ve eksiksiz takip edilmektedir. Sistem güvenilirliği R , önceden belirlenmiş minimum seviyeye ulaştığında planlı mükemmel olmayan bakım faaliyetleri uygulanmaktadır.

Sistem arıza oranı kullanıma ve yaşa bağlı olarak artış göstermektedir ve sistem daha sık bakıma ihtiyaç duymaktadır. Bakım faaliyetleri ve kullanımdan etkilenen arıza oranı fonksiyonu sistem durumuna göre değişkendir. Bakım aktiviteleri sonrası sistem yaşındaki iyileşmeyi ölçebilmek için Malik (1979) tarafından geliştirilen “iyileşme faktörü” konsepti kullanılmıştır. Bu konseptte göre iyileşme faktörü k ($1 \leq k \leq \infty$), sistem yaşı t iken bakım yapıldığında ekipman t/k yaşına dönmektedir. $k=1$ iki çevrim arasındaki minimal bakımı, $k=\infty$ ise mükemmel bakımı ifade etmektedir. Sistemin yaş indirgeme faktörü (a : age reduction factor, $0 < a \leq 1$), $a = 1/k$ değerine eşittir. Bakım öncesi sistem arıza oranı fonksiyonu $\lambda_i(t)$, $t \in (0, T_i)$, iken i. bakım sonrası sistem arıza oranı:

$$\lambda_{i+1}(t) = \lambda_i \left(t + \frac{T_i}{k} \right) = \lambda_i(t + a_i T_i) \quad (4.1)$$

$t \in (0, T_{i+1})$, $0 < a \leq 1$, $i=1, 2, \dots, N$ şeklinde hesaplanır (Malik, 1979).

Eğer $a_i=0$ ise mükemmel bakım özel durumunu, $a_i=1$ ise minimal bakımı ifade etmektedir.

Bakım frekansının etkisini ölçebilmek için Nakagawa (1979, 1988) ve Ben-Daya, Hariga (2000) çalışmasında geliştirilen başka bir iyileştirme faktörü olan arıza oranı artış faktörü (b : failure rate increase factor, $b \geq 1$) ifadesinden faydalanılmıştır. Bu faktör dikkate alındığında i. bakım çevrimi sonrası arıza oranı fonksiyonu $b_i \lambda_i(t)$, $t \in (0, T_{i+1})$, şeklinde ifade edilir. Arıza oranı artış katsayısının birden büyük olması ($b_i > 1$), sistemin yıpranmaya bağlı olarak arıza oranının arttığını göstermektedir.

Bu çalışmada, yaş indirgeme faktörü (a) ve arıza oranı artış faktörü (b) kombinasyonu ile kullanıma ve yaşa bağlı olan yıpranmayı dikkate alan bir hibrid model oluşturulmuştur. Bu durumda sistem arıza oranı fonksiyonu şu şekilde ifade edilir (Liao ve diğ., 2010):

$$\lambda_{i+1}(t) = b_i \lambda_i \left(t + \frac{T_i}{k} \right) = b_i \lambda_i(t + a_i T_i) \quad (4.2)$$

$t \in (0, T_{i+1})$, $i=1, 2, \dots, N$, ($b_i \geq 1$) ve ($0 < a_i \leq 1$)

Ekipman yıprandıkça sistem güvenilirliği azalır ve arıza oranı artış gösterir. Eğer, a ve b iyileştirme faktörleri dikkate alınmazsa her bakım çevrimi için sistem arıza fonksiyonu aynı olacaktır ve makina yıpranma süreci göz ardı edilmiş olacaktır. Bu durumda sistem gerçek durumu yansıtılmadığı için bakım faaliyetleri efektif

olmayacaktır. Bu çalışmada, önleyici bakım aktivitelerinin sistem yaşını düşürdüğü yani, sistemi gençleştirdiği belirtilmektedir. Böylelikle bakım çevrimleri sonrasında sistem güvenilirliği artmaktadır. Martorell ve diğ. (1999) tarafından geliştirilen kısmi yaş indirgeme (Proportional age setback (PAS)) modeli ile zamanla yıpranan sistemler üzerindeki mükemmel olmayan bakım etkisiyle ekipman yaşındaki iyileşme ifade edilmektedir.

Sistem yaşam süreci boyunca zamanla rassal yıpranan ekipmanların yaş indirgeme (a_i) ve arıza oranı artış faktörü (b_i) her bakım devresinde farklıdır. Mevcut sistem arıza verileri ve uzman değerlendirmesi ile bakım uygulamalarına ait a_i ve b_i faktörlerinin oranı belirlenmiştir. Bakım etkinliğine ve çevrim sayısına göre değişkenlik gösteren bu faktörlerin gösterimi bakım devre sayısı $i= 1,2\dots N$ iken şu şekildedir (Khatab, 2013):

$$a_i = \frac{i}{7i + 1} \quad (4.3a)$$

$$A_i = \sum_{k=1}^{i-1} a_k T_k \quad (4.3b)$$

$$b_i = \frac{12i + 1}{11i + 1} \quad (4.4a)$$

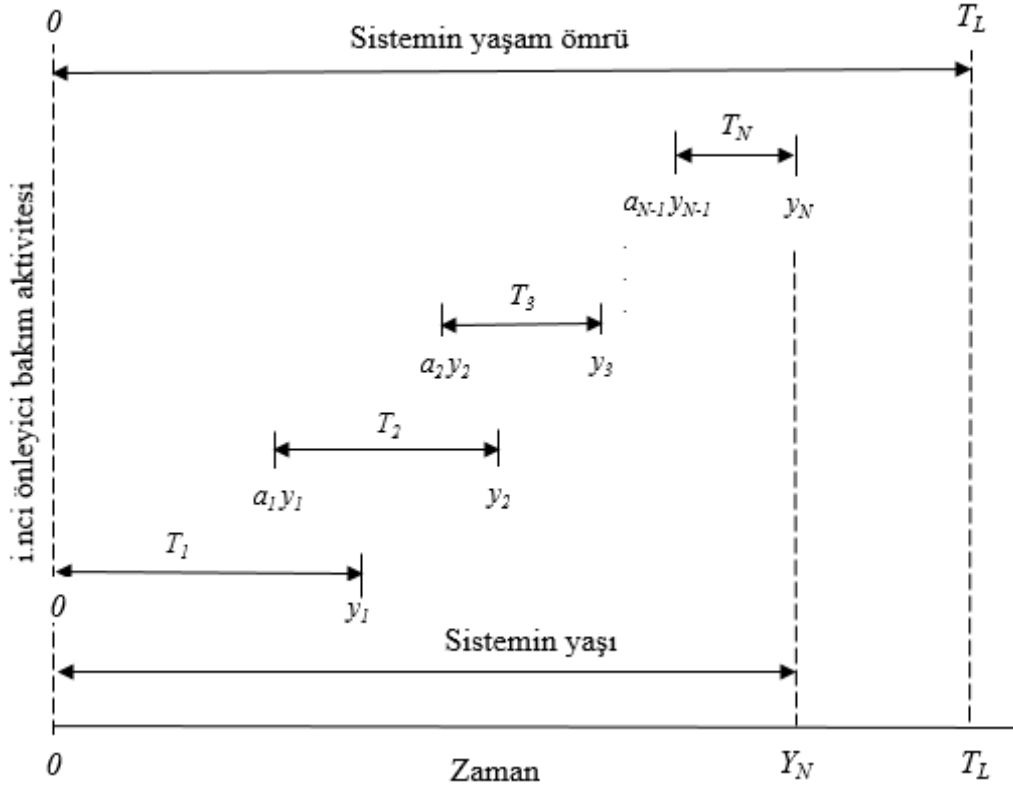
$$B_i = \prod_{k=1}^{i-1} b_k \quad (4.4b)$$

Bu durumda, ilk bakım çevrimi için $A_1=0$ ve $B_1=1$ 'dir. (4.3) ve (4.4) eşitlikleri dikkate alınarak arıza oranı fonksiyonunu yeniden yazmak gerekirse,

$$\lambda_i(t) = B_i \lambda_1(A_i + t) \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir.

Şekil 4.2'de kısmi yaş indirgeme modelinin konsepti gösterilmiştir. Her bakım aktivitesinin sistem yaşını a_i kadar azalttığı ve bakım sonrası sistem etkinliğini ölçmek için yaş indirgeme faktörünün dikkate alınması gerektiği söylenebilir. Aksi halde, ekipmanın çevre koşullarına, kullanıma ve yaşa bağlı yıpranması göz ardı edilmesi söz konusu olur. Gerçek üretim sistemlerinin durumunu yansıtabilmek için yaş indirgeme faktörü önemlidir.



Şekil 4.2: Yaş indirgeme faktörünün etkisi.

Bu durumda i . bakım çevrimi öncesi sistem yaşı $i=1,2,\dots,N$, iki bakım çevrimi arasında geçen süre T_i , $0 < a_1 < a_2 < \dots < 1$ ve $y_0 = 0$, $y_1 = T_1$ iken şu şekilde elde edilir (Lin ve diğ., 2015):

$$\begin{aligned}
 y_i &= T_i + a_{i-1}y_{i-1} \\
 &= T_i + a_{i-1}T_{i-1} + \dots + a_{i-1}a_{i-2} \dots a_1T_1 \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

Teorik olarak sistem arıza oranı fonksiyonu ve sistem güvenilirliği arasındaki ilişki şöyledir:

$$\exp \left[- \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right] = R_i \quad (4.7)$$

Bu önleyici bakım modeli çalışması için sistem durumu, gerçek arıza verilerinden elde edilmiştir. Bu veriler ışığında tamir edilebilen ekipmanın güvenilirliğinin de anlık olarak bilindiği varsayılmaktadır. Güvenilirlik seviyesi önceden belirlenmiş R_{th} (threshold R) değerine düştüğünde mükemmel olmayan bakım faaliyetlerinin uygulanması planlanmıştır. R_{th} kriteri altında, her bakım çevrimi için sistem güvenilirlik eşitliği şöyledir:

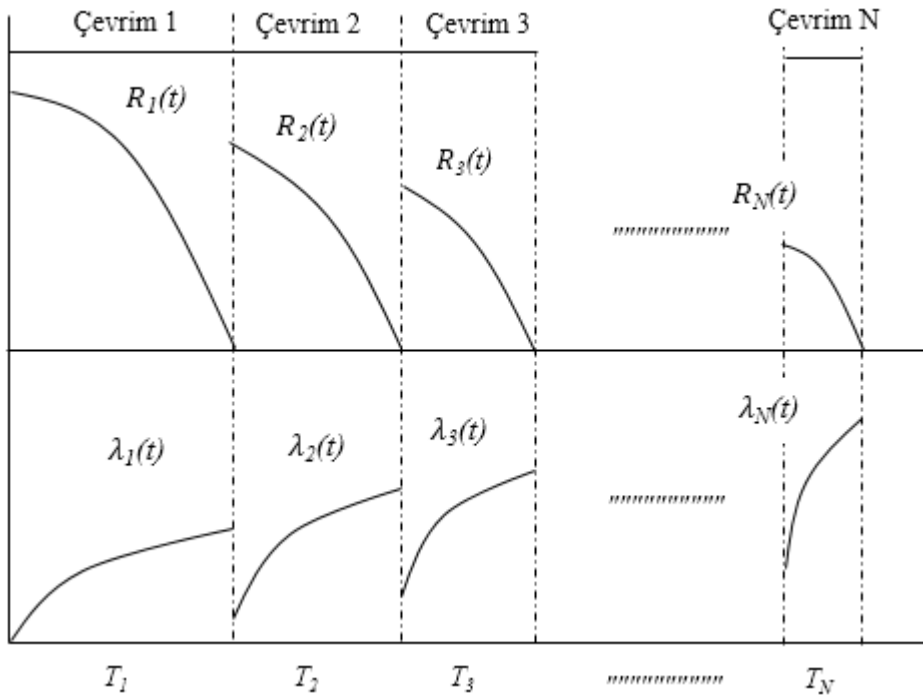
Bakım çevrim sayısı i , $i \in \{1,2,\dots,N\}$ iken,

$$\exp \left[- \int_0^{T_1} \lambda_1(t) dt \right] = \dots = \exp \left[- \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right] = \dots = \exp \left[- \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt \right] = R_{th} \quad (4.8)$$

Eşitlik (4.8) sistem arıza oranı fonksiyonu, sistem güvenilirliği ve bakım çevrimleri arasında geçen süre T_i arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Başka bir düzenleme ile şu şekilde yazılabilir (Liao ve diğ., 2010):

$$\int_0^{T_1} \lambda_1(t) dt = \dots = \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt = \dots = \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt = - \ln R_{th} \quad (4.9)$$

Bu formül her bakım çevriminde sistem arızasının kümülatif riskini ifade eder. Zamanla rassal yıpranan sistemler için arıza oranı ve güvenilirlik arasındaki ilişki aşağıdaki Şekil 4.3’de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.3: Yıpranan sistemler için sistem arıza oranı ve güvenilirliği arasındaki ilişki. (Liao ve diğ. 2010).

(4.8) ve (4.9) Denklemleri dikkate alındığında, i . önleyici bakım çevrimi için sistem güvenilirliği $R_i(t)$ ve arıza oranı fonksiyonu arasındaki ilişki şöyle gösterilir:

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(x) dx\right) \quad (4.10)$$

$$R_i(t) = \exp\left(-B_i \int_{A_i}^{t+A_i} \lambda_1(x) dx\right) \quad (4.11)$$

Planlı önleyici bakım zamanları T_i ($i=1, \dots, N$) sistem güvenilirliği önceden belirlenmiş R_{th} seviyesine ulaştığında gerçekleşmektedir. Bu durumda:

$$R_{th} = \exp\left(-\int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt\right) \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilir. i . bakım faaliyetlerinin zamanı T_i ise yukarıdaki (4.12) denklemi kullanılarak elde edilir (Khatab, 2013):

$$T_i = \lambda_1^{-1}\left(\frac{\lambda_1(A_i) - \log(R_{th})}{B_i}\right) - A_i \quad (4.13)$$

Burada; $\lambda_1(t) = \int_0^t \lambda_1(x) dx$ kümülatif arıza oranı ve $\lambda_1^{-1}(t)$ ifadesi ise $\lambda_1(t)$ fonksiyonun tersidir.

Bu çalışmada ele alınan Belotti CNC kesme tezgahının geçmiş dört yıla ait arıza verileri incelendiğinde Weibull dağılımına uygunluğu kabul edilmiştir. Bakım çevrimleri arasında geçen süre T_i ve sistem güvenilirliğini ($R_i(t)$) hesaplarken, Weibull şekil (β) ve ölçek (α) parametrelerini hibrid model içerisinde incelenirse önerilen mükemmel olmayan önleyici bakım politikası için aşağıdaki eşitlikler elde edilecektir (Khatab, 2013):

$$T_i = \alpha \left(\left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta - \frac{\log(R_{th})}{B_i} \right)^{1/\beta} - A_i \quad (4.14)$$

$$R_i(t) = \exp \left[B_i \left(\left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{t + A_i}{\alpha} \right)^\beta \right) \right] \quad (4.15)$$

Bakım faaliyetleri, sistemi olduğu noktadan daha iyi duruma taşır ancak başlangıçtaki $\lambda_1(0)$ durumuna getirmez. Bakım çevrim sayısının üst sınırı olmaz ise makul bir tamir maliyeti ile N sonsuz bir değer alır ancak gerçek üretim sistemlerinde sonlu bir sürede sonsuz bakım sayısı uygulanamaz. Bu sebeple, ikame olmadan sonsuz sayıda bakım

uygulamasından kaçınmak için bu bakım modelinde bakım çevrim sayısı üst sınırı belirlenmiştir. Bakım çevrim sayısı üst sınırına elimizdeki veriler incelenerek karar verilmiştir. Bu sınır, maliyet amaç fonksiyonu için de bir kısıtlama getirmektedir.

Bu tez çalışmasında amaçlanan faktörlerden biri uzun dönem bakım, tamir ve operasyonel maliyetlerin en küçülenmesidir. Sıralı bakım politikalarında maliyet amaç fonksiyonu ile ilgili parametreleri belirlemek önemlidir. Operasyonel maliyetler, sistemin çalıştığı süre boyunca oluşan işletim maliyetidir. Bazı araştırmacılar operasyonel maliyeti sabit değer kabul eder ancak gerçek üretim süreçlerinde uzun yıllar sonra sistem yıpranır ve buna bağlı olarak işletim maliyeti artış gösterir. Sistem durumu kötü yönde ilerledikçe işletim maliyeti çok yüksek değerlere ulaşır ve maliyet kriteri göz önüne alındığında bakım ve onarım faaliyetleri avantajlı olmaz, ekipman yenileme daha ekonomik ve pratik bir yöntem olarak tercih edilir. Önerilen bakım modelinde, operasyonel maliyet bakım aktivitelerine ve kullanıma bağlı olarak değişen bir değer olarak belirlenmiştir. Operasyonel maliyet; Sabit işletim maliyeti (C_{oo}), bakım çevrim sayısına göre değişken maliyet ($C_{vi.i}$) ve zamana göre değişken maliyet ($C_{vt.t}$) toplamıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$C_o = C_{oo} + C_{vi} i + C_{vt} t \quad (4.16)$$

Karmaşık sistemler arızalandığında ekipman durduğu için sebep olduğu bir üretim ve zaman kaybı vardır. Kayıp nedeniyle katlanılan bu maliyet, bozulma maliyeti (C_{bd}) olarak ifade edilir. Bu bakım modelindeki diğer maliyet faktörleri şöyledir: minimal tamir maliyeti (C_{mr}), mükemmel olmayan bakım maliyeti (C_{ir}), yenileme ve/veya mükemmel bakım maliyeti (C_r).

Uzun dönem sistem toplam maliyetini en küçülemek için maliyet fonksiyonu eksiksiz tanımlanmalıdır. Her bir çevrim için olası minimal tamir maliyeti, onarım maliyeti, önceden belirlenen sistem güvenilirliği ve T_i çevrim aralığında arızalanma olasılığı ise $C_{mr} \left(\int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right) R_{th}$ şeklinde hesaplanır. Her bir çevrim için planlı mükemmel olmayan bakım maliyeti C_{ir} toplam maliyet fonksiyonuna zaman ile orantılı olarak eklenir çünkü T_i süresinde bir adet bakım planlanmıştır. Operasyonel maliyet fonksiyonu zamana ve çevrim zamanına göre değişkenlik göstermesi sebebiyle $\int_0^{T_i} C_o(i, t) dt$ olarak ifade edilir. Sistem minimal onarım veya planlı bakım çalışması esnasında duracağı için bozulma maliyeti (C_{bd}) olasılığı bir olarak kabul edilir ve

beklenen toplam maliyete zaman ile orantılı eklenir. Bu durumda sistem beklenen toplam maliyeti $0 < i < N$ için:

$$ETC_i = \frac{\left[C_{mr} \left(\int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right) \exp \left(- \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right) + (C_{ir}) + \left(\int_0^{T_i} C_0(i, t) dt \right) + C_{bd} \right]}{T_i} \quad (4.17)$$

$$\int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt = - \ln(R_{th}) \quad (4.18)$$

$$\exp \left(- \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \right) = R_{th} \quad (4.19)$$

$$\int_0^{T_i} C_0(i, t) dt = \int_0^{T_i} (C_{oo} + C_{vi}i + C_{vt}t) dt = (C_{oo} + C_{vi}i)T_i + C_{vt} \frac{T_i^2}{2} \quad (4.20)$$

(4.18) ve (4.19) Eşitlikleri sistem beklenen toplam maliyet (ETC_i) formülüne yerleştirildiğinde şu eşitlik elde edilecektir:

$$ETC_i = \frac{C_{mr} \left(- \ln(R_s) R_s + C_{ir} + ((C_{oo} + C_{vi}i)T_i) + \left(C_{vt} \frac{T_i^2}{2} \right) + C_{bd} \right)}{T_i} \quad (4.21)$$

Bu bakım modelinde, sistem güvenilirliği N . kez R_{th} değerine ulaştığında yani $i=N$ olduğunda sisteme mükemmel bakım veya ekipman ikamesi uygulanır ve sistem başlangıçtaki iyi durumuna ulaşır. N . bakım çevrimi için beklenen toplam maliyet şu şekilde hesaplanır ($i=N$):

$$ETC_N = \frac{\left[C_{mr} \left(\int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt \right) \exp \left(- \int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt \right) + (C_r) + \left(\int_0^{T_N} C_0(N, t) dt \right) + C_{bd} \right]}{T_N} \quad (4.22)$$

(4.18) ve (4.19) Eşitlikleri N . çevrim beklenen toplam maliyet (ETC_N) formülüne yerleştirildiğinde ise şu eşitlik elde edilecektir:

$$ETC_N = \frac{C_{mr} \left(-\ln(R_s) R_s + C_r + ((C_{oo} + C_{vi}N)T_N) + \left(C_{vt} \frac{T_N^2}{2} \right) + C_{bd} \right)}{T_N} \quad (4.23)$$

Sistemin kurulumundan ekipman yenileme süreci boyunca ($0 < i \leq N$), beklenen uzun dönem toplam maliyet formülü şöyledir (Liao ve diğ., 2010):

$$ETC = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} ETC_i \cdot T_i + ETC_N \cdot T_N}{\sum_{i=1}^N T_i} \quad (4.24)$$

N , bakım çevrim sayısının üst limit olarak belirlenmiştir. Sistem için kabul edilebilir güvenilirlik aralığındaki farklı R_{th} değeri için local optimum uzun dönem toplam maliyeti karşılaştırmalı olarak minimum maliyet değeri, optimum güvenilirlik seviyesi, bakım çevrim sayısı ve zamanları belirlenir. Algoritma adımları şöyle sıralanır:

- **Adım 1:** Mevcut verilere göre bakım çevrim sayısı üst limiti (upper bound) N_{up} belirle,
- **Adım 2:** N_{up} çevrimi maliyetinin ötesinde olacak kadar büyük mükemmel olmayan bakım maliyeti C_{ir} değeri belirle,
- **Adım 3:** Başlangıç değeri olarak yüksek bir ETC^* değeri belirle, (ETC^* , local beklenen toplam maliyetlerin en küçüğüdür.)
- **Adım 4:** Sistem için kabul edilebilir güven aralığında $[R_1, R_2]$, $R_1 < R_2$ iken $R_{th} = R_1$ kabul et,
- **Adım 5:** (4.24) formülüne göre ETC değerini hesapla ve beklenen toplam maliyetin en düşük olduğu N değerini belirle,
- **Adım 6:** (4.14) formülüne göre $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ zaman aralıklarını hesapla,
- **Adım 7:** Eğer adım 5'te hesaplanan ETC değeri mevcut ETC^* 'den küçük ise küçük olan değeri geçerli say ve $ETC^* = ETC$ olarak güncelle, ilgili $N^* = N$ bakım çevrim sayısını local optimum değeri olarak güncelle,
- **Adım 8:** $R_{th} = R_{th} + \Delta r$ olarak güncelle (Yerel en iyi değeri bulmak için $\Delta r = 0.05$ ya da 0.01). Eğer $R_{th} \leq R_2$ ise Adım-5'e geri dön, aksi halde algoritmayı sonlandır.

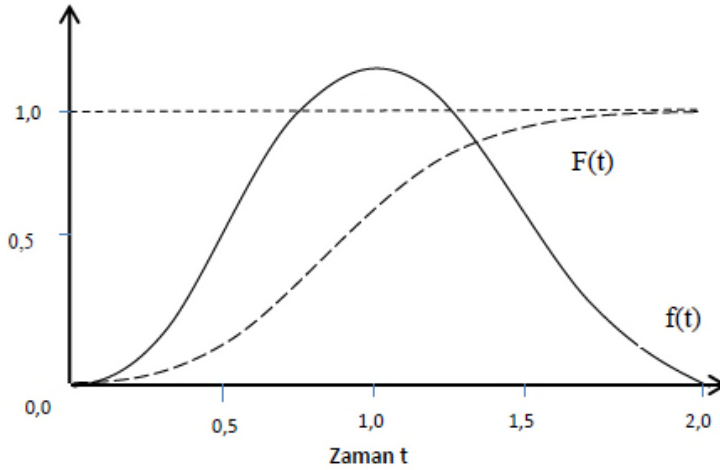
Algoritma çıktısı olarak optimum ETC^* , ilgili sistem güvenilirliği ve bakım çevrim sayısı (R_{th}^*, N^*) ve iki çevrim arasında geçen süreler $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ elde edilir.

4.3. Weibull Dağılımının Parametre Tahmini

Bakım politikası optimizasyonu için sistem mevcut arıza verilerinin incelenir ve uygun dağılım parametresi belirlenir. Zamanla rassal yıpranan ekipmanlar için iki parametrelili Weibull dağılımı en yaygın kullanılan dağılımdır. Çünkü farklı arıza verilerine uyum sağlayan esnekliği gösterir. Bu dağılımda güvenilirlik fonksiyonunu ve diğer fonksiyonları tahmin etmek için işlemde geçen süreyi ve hata sürelerini gözlemlemek yeterlidir. Bir parçanın çalışmaya başlamasından, ilk arızasına kadar geçen süre hata zamanı olarak tanımlanır. Hata zamanı süreksiz bir değişken olarak kabul edilir ve T ile gösterilir. Süreksiz bir değişkene, sürekli bir değişken yardımıyla da yaklaşılabilirdiği için hata zamanı, $f(t)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu ve $F(t)$ dağılım fonksiyonu olan sürekli bir değişken olarak kabul edilir. Şekil 4.4'de dağılım fonksiyonu ve olasılık yoğunluk fonksiyonu gösterilmiştir. $F(t)$, parçanın $(0,t]$ aralığında arızalanma olasılığıdır ve $F(t)$ dağılım fonksiyonu,

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(x)dx, \quad t > 0 \quad (4.25)$$

olarak tanımlanır.



Şekil 4.4: $F(t)$ dağılım fonksiyonu ve $f(t)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu.

$f(t)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu ise,

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (4.26)$$

şeklinde tanımlanır. Δt çok küçük bir değer ise,

$$P(t < T \leq t + \Delta t) \approx f(t) \cdot \Delta t \quad (4.27)$$

olasılığı tanımlanmaktadır (Hoyland ve Rausand, 1995).

Güvenilirlik fonksiyonu ise bir parçanın $(0, t]$ aralığında arızalanmama olasılığıdır. Yani, t anı geldiğinde bu parçanın çalışmaya devam etmesidir. Bu fonksiyon genelde $R(t)$ ile gösterilir ve şu şekilde hesaplanır:

$$R(t) = 1 - F(t) = Pr(T > t), \quad t > 0 \quad (4.28)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx = \int_0^{\infty} f(x) dx \quad (4.29)$$

Bir parçanın t anında çalışır olması şartı ile bu parçanın $(t, t+\Delta t]$ aralığında arızalanma olasılığı,

$$P(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \quad (4.30)$$

şeklinde hesaplanır. Bu olasılık Δt zaman aralığına bölünürse ve $\Delta t \rightarrow 0$ olursa hata oranı fonksiyonu $\lambda(t)$ elde edilir.

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (P(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t))}{\Delta t} = \frac{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (F(t + \Delta t) - F(t))}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Hata oranı fonksiyonunun diğer eşitliklerle ilişkisi incelenirse,

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} (1 - R(t)) = -R'(t) \quad (4.32)$$

$$\lambda(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (4.33)$$

$R(0)=1$ olduğu için,

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t) \quad (4.34)$$

eşitliği elde edilir. Gerekli dönüşümler yapıldığında güvenilirlik ve hata oranı fonksiyonu arasındaki bağlantı şu şekilde elde edilir:

$$R(t) = e^{\int_0^t \lambda(x) dx} \quad (4.35)$$

(4.35) Eşitliği yardımıyla da görülmektedir ki $R(t)$ güvenilirlik fonksiyonu ve $F(t)=1-R(t)$ dağılım fonksiyonu, $\lambda(t)$ hata oranı fonksiyonu yardımıyla belirlenebilmektedir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu belirli bir aralıkta arızalanan parçaların sayısıdır. Hata oranı fonksiyonu ise belirli bir aralıkta arızalanan parçaların, aralığın başlangıcında çalışır vaziyette olan parçalara oranıdır (Hoyland ve Rausand, 1995).

Güvenilirlik analizinde en sık kullanılan dağılımlardan birisi olan Weibull dağılımı, esnek bir dağılım olduğu için, parametrelerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla, çok farklı tipte hata oranı davranışlarını modelleyebilir.

Mevcut verilerin analizinin yapılması ve Weibull dağılımı şekil (β) ve ölçek (α) parametrelerinin tahmini için Coria ve diğ. (2015) tarafından geliştirilen analitik metot kullanılmıştır. Bu analitik yöntem, En Büyük Olabilirlik Tahminlemesi (Maximum Likelihood Estimation (MLE)) ile elde edilen şekil parametresinin kapalı formunu çalışmaktadır. Ölçek parametresinin kapalı formu ise şekil parametresinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

Weibull dağılımı β ve α parametreleri ile arıza oranı fonksiyonu $\lambda(t, T)$ tanımı şöyledir:

$$t \sim W(\beta, \alpha)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (4.36)$$

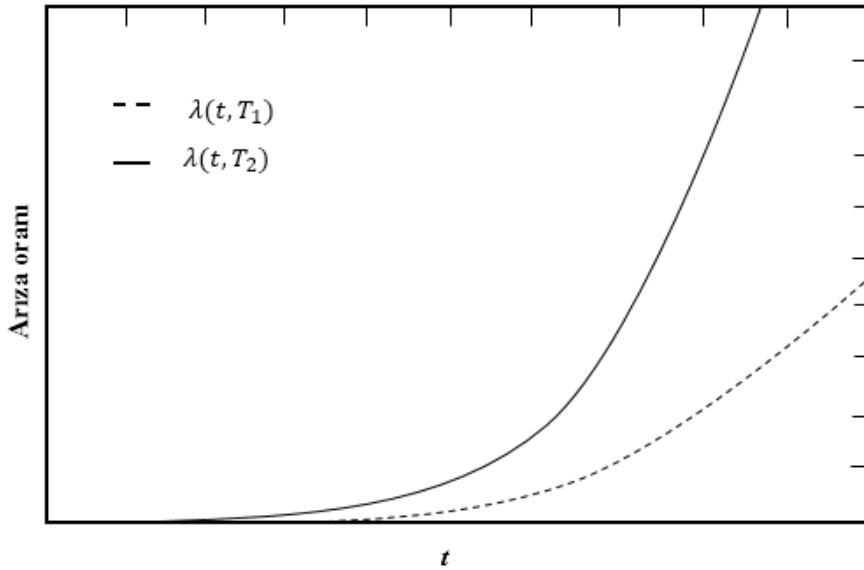
Bakım çevrimleri arasında geçen zaman aralığı T 'nin arıza oranı fonksiyonu üzerindeki etkisini gözlemlerken şu kriterler değerlendirilmelidir:

- Arızalanma olasılığını azaltmak için sistem yıpranma sürecinin yavaşlatılması amacıyla önleyici bakım uygulanması,
- β parametresinin sistem yaşlanma özelliğinin karakterize edilmesi için arıza oranı fonksiyonunun şeklini etkilemesi,
- Ölçek parametresinin α 'nın sistem yaşlanma seviyesine göre arıza zamanının tanımlanması için arıza oranı fonksiyonunu uzatması ya da kısaltması,

Böylece arıza oranı fonksiyonunun $\lambda(t)$ bakım zaman aralığı T 'nin bir fonksiyonu olabilmesi ölçek parametresi bağlantısı ile sağlanır. Eğer bakım frekansı artarsa yani, T değeri azalır, bu değişimin arıza zamanlarının davranışı üzerindeki etkisi ölçek parametresindeki artış ile gözlemlenir. Ölçek parametresindeki artış, $\lambda(t)$ fonksiyonunun uzamasına sebep olur. Bu durum, sistem yaşlanma oranında azalma dolayısıyla da bozulma ihtimalinde azalma olarak yorumlanır. Aksine bakım frekansı azalır ve bakım çevrim aralığı T değeri artarsa, bu değişimin arıza zamanlarının davranışı üzerindeki etkisi ölçek parametresindeki azalma olarak belirlenir. Ölçek parametresindeki azalma, $\lambda(t)$ fonksiyonunu kısaltır. Sonuç olarak, sistem yaşlanma oranında ve arızalanma olasılığında artış olacağı yorumlanır. Şekil 4.5'de bu ilişki gösterilmiştir.

Farklı bakım aralıkları T_1 ve T_2 'nin $\lambda(t)$ fonksiyonu ölçek parametresi üzerindeki etkisi şu şekildedir:

$$T_1 < T_2 \text{ iken } \alpha(T_2) < \alpha(T_1)$$



Şekil 4.5: Bakım aralıkları T_1 ve T_2 'nin $\lambda(t)$ fonksiyonu ölçek parametresi üzerindeki etkisi.

Önleyici bakım politikasında geçmiş arıza verileri (4.25) eşitliğine göre modellenir ve arıza verileri mevcut bakım aralığı T_0 'dan etkilenir. Arıza verileri analiz edilirken iki hata arasındaki ortalama süre incelenir. Bu süre bir donanım ürününün, bileşenin veya sistemin güvenilirliğinin bir ölçüsüdür. Bu tanıma göre tamir edilmeden bırakılabilen veya değiştirilmeyen veya sistem dışı bırakılmayan hatalar gerçek arıza olarak dikkate

alınmaz. Buna ek olarak, rutin planlı bakım veya envanter kontrolü için sistem dışına alınan birimler hata tanımı içinde kabul edilmez.

Weibull şekil ve ölçek parametrelerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf):

$$f(t | \alpha, \beta) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4.37)$$

Eğer sistem $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ zamanlarında arızalanırsa n tane bozulmanın olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplanırken;

$$\tau = \left[\prod_{k=1}^n t_k \right]^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad (4.38)$$

$$\theta(\beta) = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n t_k^\beta \right]^{\left(\frac{1}{\beta}\right)} \quad (4.39)$$

olduğu biliniyorken log-olabilirlik işlevi,

$$\phi(\alpha, \beta) = \left(\frac{\theta(\beta)}{\alpha} \right)^\beta + \frac{\beta \ln \alpha}{\tau} - \ln \beta \quad (4.40)$$

elde edilir ve oyf,

$$f(t_1 \dots t_n | \alpha, \beta) = \prod_{k=1}^n f(t_k | \alpha, \beta) = \tau^{-n} e^{-n\phi(\alpha, \beta)} \quad (4.41)$$

En Büyük Olabilirlik Tahmin (MLE) yöntemine göre şekil ve ölçek parametrelerin alabileceği değerler (4.41) formülünün global minimum değerine eşit olacaktır.

$$\frac{\partial \phi(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} = 0 \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial \phi(\alpha, \beta)}{\partial \beta} = 0 \quad (4.43)$$

Matematiksel dönüşümler ile α ve β kapalı form eşitlikleri elde edilir.

$$\alpha = \theta(\beta) \quad (4.44)$$

$$Z(\beta) \equiv \frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta} - r(\beta) = 0 \quad (4.45)$$

$$r(\beta) = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) t_k^\beta}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta} = \ln(t_n) - \frac{\sum_{k=1}^n (\ln(t_k) t_k^\beta)}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta} \quad (4.46)$$

$$\frac{1}{\beta_1} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\ln t_n}{t_k} = \frac{\ln t_n}{\tau} \quad (4.47)$$

Şekil parametresi β^* , (4.45) numaralı eşitlik ile belirtilen $Z(\beta)$ çözülmesi ile tahminlenir. Ölçek parametresi α^* ise MLE yöntemi parametre hesabı kapalı formunda ifade edildiği gibi (4.44) numaralı formül ile hesaplanır.

Coria ve diğ. (2015), $Z(\beta)$ kapalı form çözümü için analitik metot geliştirmiştir. Sistem arıza zamanları $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ ve $\exists m \in \{1, n-1\}: t_m < t_n$ ve $t_{m+1} = t_n$ 'dir. Bu durumda $\exists ! \beta^* > 0 : z(\beta^*) = 0$ kabul edilir ve β^* eşitsizliği şöyle elde edilir:

$$\frac{1}{\beta_1} - r(\beta_1) < \frac{1}{\beta^*} < \frac{1}{\beta_1} \quad (4.48)$$

$r(\beta)$ sürekli ve monoton olarak azalan bir fonksiyondur. $\beta > 0$ iken,

$\lim_{\beta \rightarrow 0} r(\beta) = \frac{1}{\beta_1}$ ve $\lim_{\beta \rightarrow +\infty} r(\beta) = 0$, $z(\beta^* = 0)$ için tek bir β^* çözümü vardır ve aralık eşitsizliği şu şekilde belirtilir:

$$\beta_1 < \beta^* < \frac{\beta_1}{1 - \beta_1 r(\beta_1)} \quad (4.49)$$

Bu eşitsizlik kullanılarak β^* kapalı formu, (4.51) formülüne göre ise α^* parametresi kapalı formu elde edilir.

$$\beta^* = \beta_1 \frac{1 - \frac{1}{2} \beta_1 r(\beta_1)}{1 - \beta_1 r(\beta_1)} \quad (4.50)$$

$$\alpha^* = \theta(\beta^*) \quad (4.51)$$

Bu bölümde Weibull parametresini elde etmek için önerilen analitik yöntemin ispatı Ek-1'de verilmiştir. Ele alınan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) şöyledir:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \right) \exp \left(- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right) \quad (4.52)$$

4.4. Bağımsız Bileşenli Sistemler İçin Bayes Olasılık Kuramı

Bayes olasılık teoremi, bir matematiksel istatistik kuramıdır ve bu kuram; belirsiz herhangi bir durumun modelini kurarak, bu durumla ilgili verilere ve gerçek gözlemlere göre belirli sonuçlar çıkarır. Olasılık kuramının en önemli kavramlardan biri olan ‘Koşullu Olasılık’ kuramına göre birbiri ile ilişki halinde olan iki düğüm arasında oluşabilecek olasılık değerleri elde edilir. Bir bağıntı ile bir diğerine bağlı olan düğümlerin etkileşim seviyesi, koşullu olasılık değerleri ile oluşturulur. Bayes teoremi belirsiz durumlar ile ilgili karar vermek için çok ideal bir yöntemdir. Kullanılan terimlerin anlamları şöyledir:

x : Belirsizlik taşıyan durum,

y : Kanıt,

$P(x | y)$: x ‘in y kanıtından sonraki olasılığı,

$P(x)$: x ‘in y kanıtından önceki olasılığı,

$P(y | x)$: y kanıtının x olayının gerçekleşmesi için oluşma ihtimalinin en büyük olasılık değeri.

Bu durumda Bayes Kuramı şu şekilde ifade edilir:

$$P(x \cap y) = P(x, y) = P(x|y)P(y) = P(y|x)P(x)$$

Olasılık grafik modellerinin bir üyesi olan Bayes ağları, ilgilenilen sistemin kesin olmayan önerme ile ilgili bilgiyi ifade etmek için kullanılır. Bayes ağları çoğunlukla çizgi olarak oluşturulur ve çizgedeki düğüm olarak tanımlanan raslantı değişkenleri, koşullu bağıntılar ile birbirine bağlanır.

Bayes ağları, Yönlü Dönüşsüz Grafik (Directed Acyclic Graph (DAG)) grafiksel model yapısındadır. Bu ağlar, raslantı değişkenleri kümesi birden fazla değişkene sahip olasılık dağılımının etkin bir gösterimini ve bu gösterime bağlı olarak çeşitli hesaplamaların yapılmasını mümkün hale getirir. Bayes kuramı, uzman görüşlerini de sisteme dahil edebilen önemli bir yöntemdir. DAG yapısını oluşturan alt kümeler şöyledir: Düğümler kümesi ve yönlendirilmiş bağlar kümesi. Düğümler, raslantı değişkenler kümesini temsil eder ve çember biçiminde gösterilir. Bağlar ise, düğümler arasındaki direkt bağımlılıkları anlatır ve değişkenler arasında çizilen oklar ile gösterilir (Pearl, 1988). x_i ve x_j , ağdaki iki düğüm olmak üzere, x_i değişkeninden diğer

x_j düğümüne doğru çizilen bir bağ, düğümler arasındaki istatistiksel ilişkinin bir göstergesidir. Bu durumda; x_j düğümü x_j düğümünün ebeveyni; x_j düğümü ise x_j düğümünün çocuğu denir. Ayrıca, ağdaki bir düğümden çıkan bağ üzerinde bulunan diğer düğümlerin oluşturduğu kümeye soy düğümler, bir düğüme gelen yol üzerindeki değişkenlerin bulunduğu kümeye ise ata düğümler denilmektedir. Dönüşsüz grafik yapısı gereği bir düğüm, kendisinin soy ya da ata düğümü olması mümkün değildir.

Koşullu bağımsızlık, bir değişkenin ebeveynlerinin durumu bilindiğinde, bu değişkenin, kendi soy değişkenleri dışındaki değişkenlerden bağımsız olduğu yorumu yapılır. Bu özellik, değişkenlerin çok değişkenli olasılık dağılımı hesaplanırken dikkate alınan parametre sayısını azaltmaktadır.

x, y, z raslantı değişkenlerinin tanım kümeleri sırayla U_x, U_y, U_z 'dir. Bu raslantı değişkenlerinin çok değişkenli olasılık fonksiyonu $P(x,y,z)$ ve bu değişkenlerin aldığı tüm $x \in U_x, y \in U_y, z \in U_z$ değerleri için,

$$P_{xyx}(xyz) = P_{x|z}(x | z) P_{y|z}(y | z) P_z(z) \quad (4.53)$$

denklemini yazılabiliyorsa, z bilindiğinde x ve y 'nin koşullu bağımsız olduğu söylenir ve $x \perp y | z$ biçiminde gösterilir. Bu durumda $P_{y|z}(y | z) > 0$ ve $P_z(z) > 0$ eşitsizliklerini sağlayan tüm $x \in U_x, y \in U_y, z \in U_z$ değerleri için $P_{x|yz}(x | yz) = P_{x|z}(x | z)$ 'dir.

Bayes ağlarının nitel kısmı olarak tanımlanan DAG yapısına ek olarak, bu ağların nicel kısmı olarak ele alınan parametrelerin belirlenmesi önemlidir. Bu parametreler, ağdaki her bir düğüme karşılık gelen koşullu olasılık dağılımlarıdır. Her bir dağılıma ait bu koşullu olasılık kendi ebeveyn değişkenine bağlı olarak ifade edilir ve tablo biçiminde gösterilir. Koşullu olasılık tablosu (Conditional probability tables (CPT)) adı verilen bu tablolarda her bir değişkenin aldığı değerler ve bu değerleri alma olasılıkları listelenmektedir.

Bayes modelinde yapılan çıkarımlar, ilgilenilen değişkenlerin marjinal dağılımları hesaplanarak yani, ilgisiz değişkenler üzerinden çok değişkenli olasılık dağılımının toplamı alınarak yapılır. Bayes ağlarında çıkarsamalar en genel anlamda iki şekilde yapılır: bir düğüme ebeveyn düğümleri aracılığıyla ilişkili olan bilgi düğümlerinden yararlanılarak gerçekleştirilmesi "yukarıdan aşağıya çıkarsama" ve bir düğüme çocuk düğümleri aracılığıyla ilişkili olan bilgi düğümlerinden faydalanılarak hesaplanması "aşağıdan yukarıya çıkarsama" dır. Bayes teoreminde ağda yer alan değişkenlerin

koşullu olasılık dağılımlarının çarpımı ağın birleşik olasılık dağılımını oluşturur. N ağdaki değişken sayısını gösterirken ağın olasılık dağılımı şu şekilde hesaplanır:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_N) = \prod_{i=1}^N P(X_i | Ebeveyn(X_i)) \quad (4.54)$$

Bayes ağ yapısının oluşturulması ve değişken parametresinin belirlenmesi için veri setleri ve uzman görüşleri kullanılır. Değişkenler arası bağımlılık ilişkilerinin mevcudiyetinin ve ilişkinin yönünün neden-sonuç çerçevesinde uzman görüşüne göre belirlendiği süreçlere ait ağlar “Nedensel Bayes Ağları” olarak tanımlanır (Laskey ve Mohaney, 1997). Diğer bir yaklaşım ise ağ yapısı mevcut algoritmalar aracılığı ile veri setlerinde öğrenilir ve değişkenler arasındaki oklar nedenselliğe göre değil olasılıksal bağımlılık ilişkisine göre oluşturulur. Değişkenler arasındaki ilişkinin sayısal ve istatistik yöntemlere dayanması sebebiyle veri setlerinden elde edilen Bayes ağlarının nedensel ağlara göre tahmin etme kapasitesi açısından daha iyi sonuçlar vermesi beklenmektedir.

Makine alt parçaları söz konusu olduğunda 1’den n ’ye kadar ardışık olarak numaralandırılmış n tane bileşenden oluşan sisteme n boyutlu sistem denir. i bileşenin durumu, ikili bir değişken olan Y_i ile tanımlanır ($i=1,2,\dots,n$). Ayrıca, n tane bileşenin tümünün durumu bilindiğinde sistemin de çalışır durumda olup olmadığı bilinebilir.

Durum değişkenleri ise $i=1,2,\dots,n$ için,

$$Y_i(t) = \begin{cases} 1, & i \text{ temel olayı } t \text{ anında oluşursa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

şeklindedir. $Y(t)=(Y_1(t),Y_2(t),\dots,Y_n(t))$, yapı için t anındaki durum vektörlerini ifade eder. Bir hata ağacının kantitatif analizinin amacı genelde esas olayların (sistem hatası) olasılığını belirlemektir. Durum değişkenleri bağımsız oldukları için bir bileşenin arızalanması, başka bir bileşenin arızalanmasına yol açmaz ya da daha iyi çalışmasını sağlamaz. Ayrıca bir bileşenin t anındaki çalışma durumu da tesadüfidir.

t anındaki esas olayın durumu, $\psi(Y(t))$ ikili değişkeniyle açıklanabilir. Bu değişken,

$$\psi(Y(T)) = \begin{cases} 1, & \text{esas olay } t \text{ anında oluşursa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

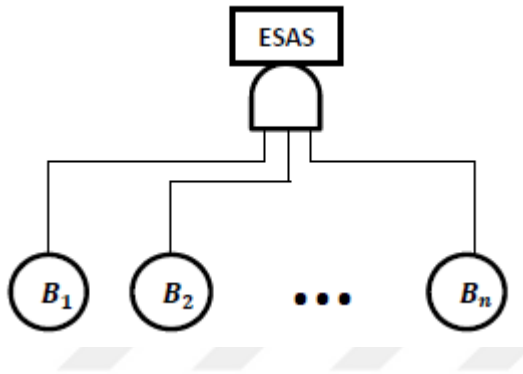
$q_i(t)$, i temel olayının t anında oluşma olasılığı olmak üzere $i=1,2,\dots,n$ için

$$P(Y_i(t) = 1) = E(Y_i(t)) = q_i(t) \quad (4.55)$$

eşitliği yazılabilir. Burada olay, sistemin t anındaki çalışma durumudur. Olayın oluşması ise duruma göre çalışma ya da çalışmamadır. Eğer i temel olayı sistemdeki i bileşenin hatalı durumda olması olayı ise ($i=1,2,\dots,n$) için,

$$P(Y_i(t) = 1) = q_i(t) = 1 - p_i(t) \quad (4.56)$$

eşitliği yazılabilir. Burada $p_i(t)$, i bileşenin t anında hala çalışır vaziyette olması olasılığıdır. $p_i(t)$ 'ye, kısaca, i bileşenin t anındaki güvenilirliği, $q_i(t)=1-p_i(t)$ 'ye de i bileşenin t anındaki güvenilmezliği denir.



Şekil 4.6: Tek ve kapılı bir hata ağacı.

Literatürde Tek Ve Kapılı hata ağacı olarak geçen bu yapıda esas olay ancak ve ancak B_1, B_2, \dots, B_n temel olaylarının tamamının eş zamanlı olarak gerçekleşmesiyle meydana gelebilir. Bu çalışmada ele alınan Belotti CNC tezgahı alt bileşenlerinin tamamı çalışırsa sistem çalışır durumdadır. Eğer, herhangi bir alt parça arızalanırsa sistem durmaktadır. Bu sebeple Bayes modeli kurulurken Tek Ve Kapılı hata ağacı oluşturulmuştur.

Temel olayların bağımsız olduğu varsayıldığından, sistemin güvenilmezliği,

$$\begin{aligned} Q(t) &= E(\psi(Y(t))) = E(Y_1(t) \cdot Y_2(t) \dots Y_n(t)) \\ &= E(Y_1(t)) \cdot E(Y_2(t)) \dots E(Y_n(t)) \\ &= q_1(t) \cdot q_2(t) \dots q_n(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t) \end{aligned} \quad (4.57)$$

şeklindedir (Hoyland ve Rausand, 1995).

5. VERİLERİN İNCELENMESİ VE SAYISAL ANALİZİ

Bu bölümde önerilen bakım algoritması ve parametre tahminleme yöntemi yardımıyla CNC işlem merkezini için bakım planı geliştirilmiştir. Planlı bakım çizelgesi sistem geçmiş verileri analiz edilerek oluşturulmuştur. Mevcut bakım planı ve geliştirilen bakım planı karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

5.1. Verilerin İncelenmesi

Üretim sürecinde Belotti CNC beş eksenli işleme merkezi ve su jetli kesim tezgahına ait 2013-2016 yılları arıza verileri çalışmıştır. Ekipmana ait tutulan arıza verileri detayları şöyledir: Arıza gerçekleşme zamanı, arıza kategorisi ve alt detay arıza bilgisi, sistemin arızalı geçirdiği süre, arızanın sistem üzerinde durdurucu etkiye sahip olup olmadığı bilgisi, ekipmanı kullanan personelin ve bakım uzmanının görüşü, arıza tamiri için atanan personel bilgisi, arıza tamir süresi, aynı anda gerçekleşen arızaların tamir sırasını belirleyebilmek için önceliklendirme bilgisi.

Tezgaha ait arıza verileri yardımıyla iki arıza arasında geçen süre, arıza tamir edilene kadar geçen süre yani sistemin atıl kaldığı süre bilgisine ulaşılabilmektedir.

CNC tezgahı dört yıllık arıza türlerini sınıflandırmak ve nispeten daha önemli olan arıza türlerini diğerlerinden ayırabilmek için istatistiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi yapılmıştır.

Pareto analizi ile Belotti CNC kesim tezgahının arızaya sebep olan ekipmanları ve alt parçaları listelenmiştir. Bir üründe bulunması ihtimal dahilinde olan hataların tamamının aynı önem derecesine sahip olması beklenemez. Pareto analizi farklı sayıdaki önem derecesi yüksek nedenleri, daha az önemde olan sebeplerden ayırt edebilmek için kullanılır. Böylelikle, sistem duruşuna sebep olan en önemli arıza türü belirlenir, tüm arıza türlerinin oranları ve önem dereceleri tespit edilir ve arızaya sebep olan ekipman ve alt parçaları listelenir. Pareto analizi mevcut verileri sınıflandırarak karar alma sürecini kolaylaştıran bir yöntemdir. Pareto prensibinin uygulanabilmesi

üzerinde değerlendirme yapılacak verinin listelenebilir olması ve yeterli miktarda veri içermesi gerekir.

Bu yöntemle göre; sebeplerin en önemli %20'si, sonuçların %80'ini sonra gelen %30 dilimdeki sebepler, sonuçların %15'ini ve sonraki %50 sebep ise sonuçların sadece %5'ini oluşturduğu belirtilir. Bu oranlar sebebiyle Pareto yöntemine literatürde “80-20”, “90-10 “ kuralı veya “70-30 “ kuralı da denilmektedir. Özellikle teknik bakım, kalite kontrol ve kalite geliştirme bölümleri problemin nedenlerini tespit ederken hangi ekipmanların arızaya neden olduğu ve diğer tüm arızalar arasında sahip olduğu yüzde değeri bu teknik yardımıyla kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

Sistemi oluşturan parçaların hata oranlarına göre pareto grafiği şu sırayla oluşturulmuştur:

- Üzerinde çalışılacak parçalar doğru olarak belirlenmesi ve listelenmesi,
- Parçalardan kaynaklı arızaları analiz edebilmek için belirli bir zaman aralığında karşılaşılma sıklığının ölçülmesi,
- Parçaların sebep olduğu sistem arıza verileri en büyük değerden en küçük değere doğru sıralanması,
- Her bir değer için toplam arıza verisi içerisindeki yüzde değerinin ve bu yüzdelerin kümülatif (birikimli) toplamalarının hesaplanması,
- Listelenmiş veriler kullanılarak pareto grafiğinin çizilmesi.

Pareto grafiğinin amacı, bir sisteme ait alt parçaların ve arıza türlerinin önem derecesine göre tespit edilip işletmedeki kalite kontrol ve bakım bölümlerine yol göstererek doğru karar alınmasında ve iyileştirme çalışmalarının hangi alanda yoğunlaştırılacağına belirlenmesinde yardımcı olmaktır.

Bu metot ile direk işçilik giderleri ve maliyetin ne kadarının değişik parçalardan kaynaklı üretim hatalarından oluştuğu tespit edilebilmektedir. Pareto grafiği yardımıyla hangi parçaların sistem uygunluğunu etkilemesi açısından daha önemli olduğu tespit edilir ve bakım çalışmaları yoğun olarak belirlenen parçalar için planlanır. Diğer parçalar için kritik parça olmadığı sürece çok sık olmayan aralıklarla onarılır.

PARETO ANALİZ (DETAY)						
		ADET	ADET YÜZDE %	KÜMÜLATİF YÜZDE	ARIZALI STATÜ SÜRESİ (SAAT)	SÜRE YÜZDE %
	TOPLAM	368			1465,44	
Pogo Sistemi		85,00	23,10	23,10	273,66	18,67
	Hedefe ulaşamama - Clamp sorunu	35	9,51		93,48	6,38
	Kart problemi	27	7,34		111,98	7,64
	Vakumlama sorunu	15	4,08		45,75	3,12
	Güç ünitesi arızası	8	2,17		22,45	1,53
Kontrol Sistemi		72,00	19,57	42,66	291,70	19,91
	Yazılımsal sorun	38	10,33		199,09	13,59
	Güç ünitesi arızası	10	2,72		25,59	1,75
	Güvenlik sistemi arızası	8	2,17		25,08	1,71
	Buton/tuş arızası	5	1,36		11,5	0,78
	PLC kart arızası	5	1,36		4,11	0,28
	Sürücü arızası	3	0,82		12,97	0,89
	Ayar yapma problemi	2	0,54		10,49	0,72
	Kontaktör arızası	1	0,27		2,87	0,20
Su Besleme Sistemi		50,00	13,59	56,25	174,31	11,89
	Yüksek basınç keçeleri arızası	32	8,70		116,9	7,98
	Intensifier arızası	10	2,72		26,55	1,81
	Su Tahliye Pompası arızası	5	1,36		28,72	1,96
	Pompa arızası	3	0,82		2,14	0,15
Manuel Arıza Statüsü		27	7,34	63,59	90,61	6,18
	Manuel Arıza Statüsü	27	7,34		90,61	6,18
Nozul ve Nozul Pistonları		22	5,98	69,57	72,03	4,92
	Sızdırmazlık elemanı arızası	12	3,26		48,92	3,34
	Nozul aşınması	10	2,72		23,11	1,58
Vakum Sistemi		21	5,71	75,27	112,99	7,71
	Vakum kaçağı	12	3,26		35,68	2,43
	Vakum pompası filtre tıkanıklığı	4	1,09		46,97	3,21
	Valf arızası	4	1,09		24,25	1,65
	Vakum motoru arızası	1	0,27		6,09	0,42
Aşındırıcı Kum Sistemi		14	3,80	79,08	63,1	4,31
	Ayar valfi arızası	7	1,90		51,93	3,54
	Kumun ıslanması	7	1,90		11,17	0,76
Pnömatik Sistem		14	3,80	82,88	22,4	1,53
	Hava kaçağı	5	1,36		7,31	0,50
	Valf arızası	4	1,09		6,83	0,47
	Filtre tıkanması	2	0,54		1,42	0,10
	Basınç yükseltici pompa arızası	2	0,54		5,25	0,36
	Manometre arızası	1	0,27		1,59	0,11

Şekil 5.1: CNC kesim tezgahı arızalarının detaylı pareto analizi.

PARETO ANALİZ (DETAY)						
		ADET	ADET YÜZDE %	KÜMÜLATİF YÜZDE	ARIZALI STATÜ SÜRESİ (SAAT)	SÜRE YÜZDE %
	TOPLAM	368			1465,44	
Kesme Sıvısı Sistemi		14	3,80	86,68	48,42	3,30
	Su kaçağı	9	2,45		23,54	1,61
	Elektrik motoru arızası	2	0,54		4,02	0,27
	Nozul tıkanması	2	0,54		7,69	0,52
	Valf arızası	1	0,27		13,17	0,90
Eksenler		12	3,26	89,95	150,87	10,30
	Ölçü/dayama ayarsızlığı	10	2,72		138,97	9,48
	Eksen motoru arızası	1	0,27		8	0,55
	Kızak arızası	1	0,27		3,9	0,27
Ölçüm Sistemi		9	2,45	92,39	31,97	2,18
	Ayar bozukluğu	7	1,90		28,99	1,98
	Ölçme prop arızası	2	0,54		2,98	0,20
Hava Emiş Sistemi		7	1,90	94,29	53,78	3,67
	Filtre tıkanması	6	1,63		52,57	3,59
	Fan problemi	1	0,27		1,21	0,08
Talaş Toplama Sistemi		6	1,63	95,92	14,28	0,97
	Vakum sistemi arızası	6	1,63		14,28	0,97
Hidrolik Sistem		4	1,09	97,01	18,06	1,23
	Basınç yükseltici pompa arızası	2	0,54		6,29	0,43
	Piston arızası	1	0,27		8,65	0,59
	Yağ kaçağı	1	0,27		3,12	0,21
Otomatik Kızak Yağlama Ünitesi		2	0,54	97,55	5,85	0,40
	Yağ kaçağı	2	0,54		5,85	0,40
Magazin		2	0,54	98,10	2,45	0,17
	ATC ayar bozukluğu	1	0,27		0,78	0,05
	Takım Seçme / Değiştirme	1	0,27		1,67	0,11
Fan Sistemi		1	0,27	98,37	0,46	0,03
	Motor arızası	1	0,27		0,46	0,03
İklimlendirme Ünitesi		1	0,27	98,64	2,94	0,20
	Filtre tıkanması	1	0,27		2,94	0,20
Yağ Soğutma Sistemi		1	0,27	98,91	1,39	0,09
	Expansion valf arızası	1	0,27		1,39	0,09
Besleme Sistemi		1	0,27	99,18	4,14	0,28
	Sürücü arızası	1	0,27		4,14	0,28
Aydınlatma		1	0,27	99,46	5,9	0,40
	Lamba / Ampul arızası	1	0,27		5,9	0,40
Basma Sistemi		1	0,27	99,73	9,27	0,63
	Hareket pistonu arızası	1	0,27		9,27	0,63
Chiller Ünitesi		1	0,27	100,00	14,86	1,01
	Fan arızası	1	0,27		14,86	1,01

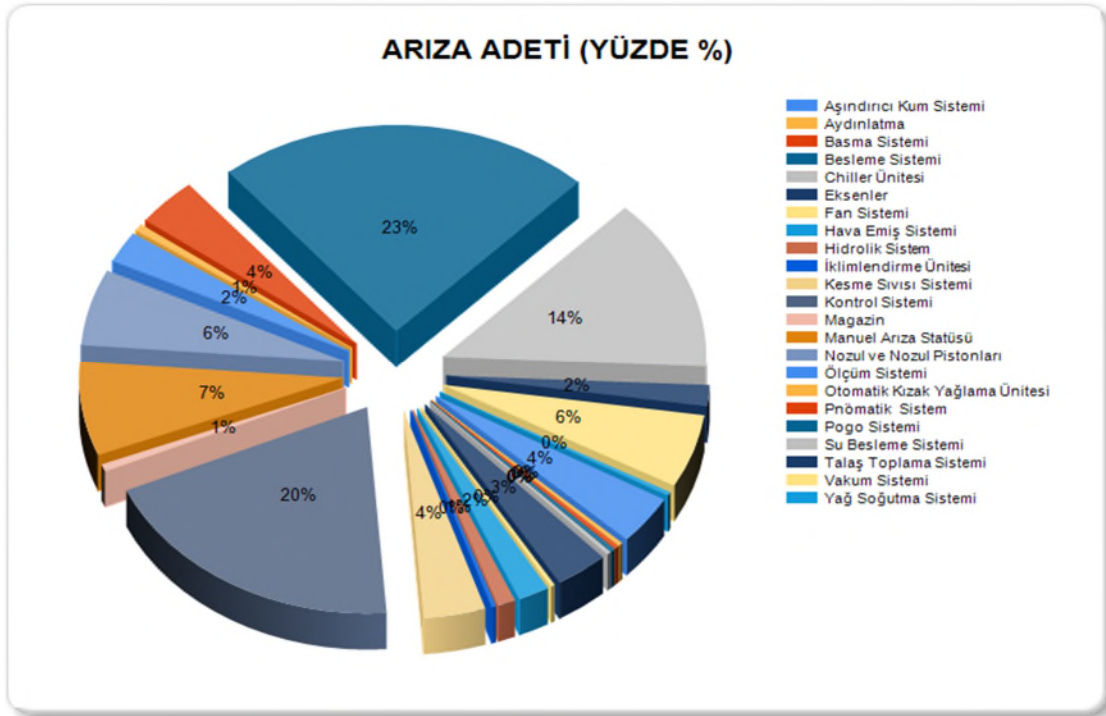
Şekil 5.1: (devam) CNC kesim tezgahı arızalarının detaylı pareto analizi.

Belotti CNC tezgahının 2013-2016 yılları arasındaki arıza verileri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Arıza verileri incelendiğinde arızaya sebep olan ekipmanlar ve alt parçaları belirlenmiştir. Şekil 5.1'de söz konusu parçalar listelenmiştir. İşleme ve kesim tezgahının sistemi durdurucu etkiye sahip arızaya sebep olan parçalarının dört yıllık arıza miktarı ve arızalı geçirdiği süreler listelenmiştir. En çok arızaya sahip parçalar ve alt sistemleri miktar ve yüzde değerlerine göre sıralanmıştır. Bunun yanı sıra sistemin durmasına sebep olan arızaların süreleri de tabloda yer almaktadır. Böylelikle sistemin hangi parçaya ait arıza sebebiyle ne kadar süre kullanım dışı kaldığı görülebilmektedir.

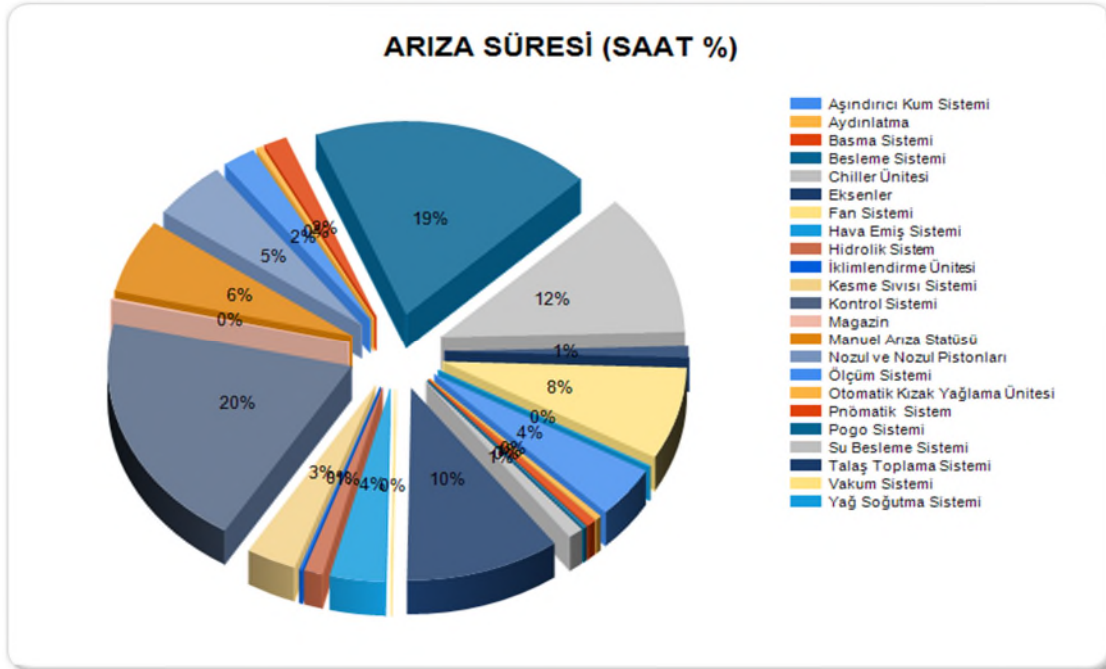
Arıza sıklığı genel olarak sistemin atıl kaldığı süre ile orantılıdır. Ancak her zaman doğru orantılı ilerlemesi beklenemez. Bazı arıza türleri sıklıkla meydana geliyor iken gerekli tamir süresi kısa olabilir. Tamir süresi, parçanın tekrar kullanılabilir hale gelene kadar harcanan süreyi ifade etmektedir. Onarım çalışmaları için gerekli parça ve işgücü tedariki, tamir planlamasının hazırlanması için harcanan süre de sistemin atıl kaldığı zaman aralığına dahildir.

Belotti tezgahının arıza verileri analiz edildiğinde arıza sıklığının en yüksek olduğu parça pogo sistemidir; arıza adedi yüzdesi %23,10 ve arızalı statü süresine ait yüzde değeri %18,67'dir. Pogo sisteminin arızaya sebep olan alt parçalarının da arıza miktarına orantılı olarak yüzde değerleri Şekil 5.2'de paylaşılmıştır. Pogo sisteminden kaynaklı sıklıkla yaşanan arızalar şunlardır: Hedefe ulaşamama – Clamp sorunu, kart problemi, vakumlama sorunu ve güç ünitesi arızası. Bakım zamanları arasında gerçekleşen beklenmeyen bu arızalar sistemin sıklıkla kullanılamaz durumda olmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple tezgah için planlanan üretim çizelgesinde sapmalar yaşanmakta ve zaman, maliyet kayıpları oluşmaktadır. Arıza adedinin en yüksek olduğu diğer ekipmanlar kontrol sistemine aittir. Kontrol sisteminden kaynaklı arızalar sıklığına göre şöyle sıralanmıştır: yazılımsal sorun, güç ünitesi arızası, güvenlik sistemi arızası, buton/tuş arızası, PLC kart arızası, sürücü arızası, ayarsızlık, kontaktör arızası. Bir sonraki arıza oranı yüksek alt ekipman ise su besleme sistemidir. Su besleme sisteminin sebep olduğu arıza çeşitleri şöyledir: Yüksek basınç keçeleri arızası, intensifier arızası, su tahliye pompası arızası ve pompa arızası. Bu arızalardan kaynaklı duruş süreleri değişiklik göstermektedir. Her bir arıza için gerekli donanım, iş gücü ve tamir süresi farklıdır. Arızaların sayısı ve süresi analiz edilerek arıza

sıklığını azaltacak önleyici faaliyetlerin belirlenmesi üretim sistemlerinin daha etkin kullanımını için önemlidir.



Şekil 5.2: CNC kesim makinası alt parçalarına ait arıza adetleri dağılımı.



Şekil 5.3: CNC kesim makinası alt parçalarına ait arıza süreleri dağılımı.

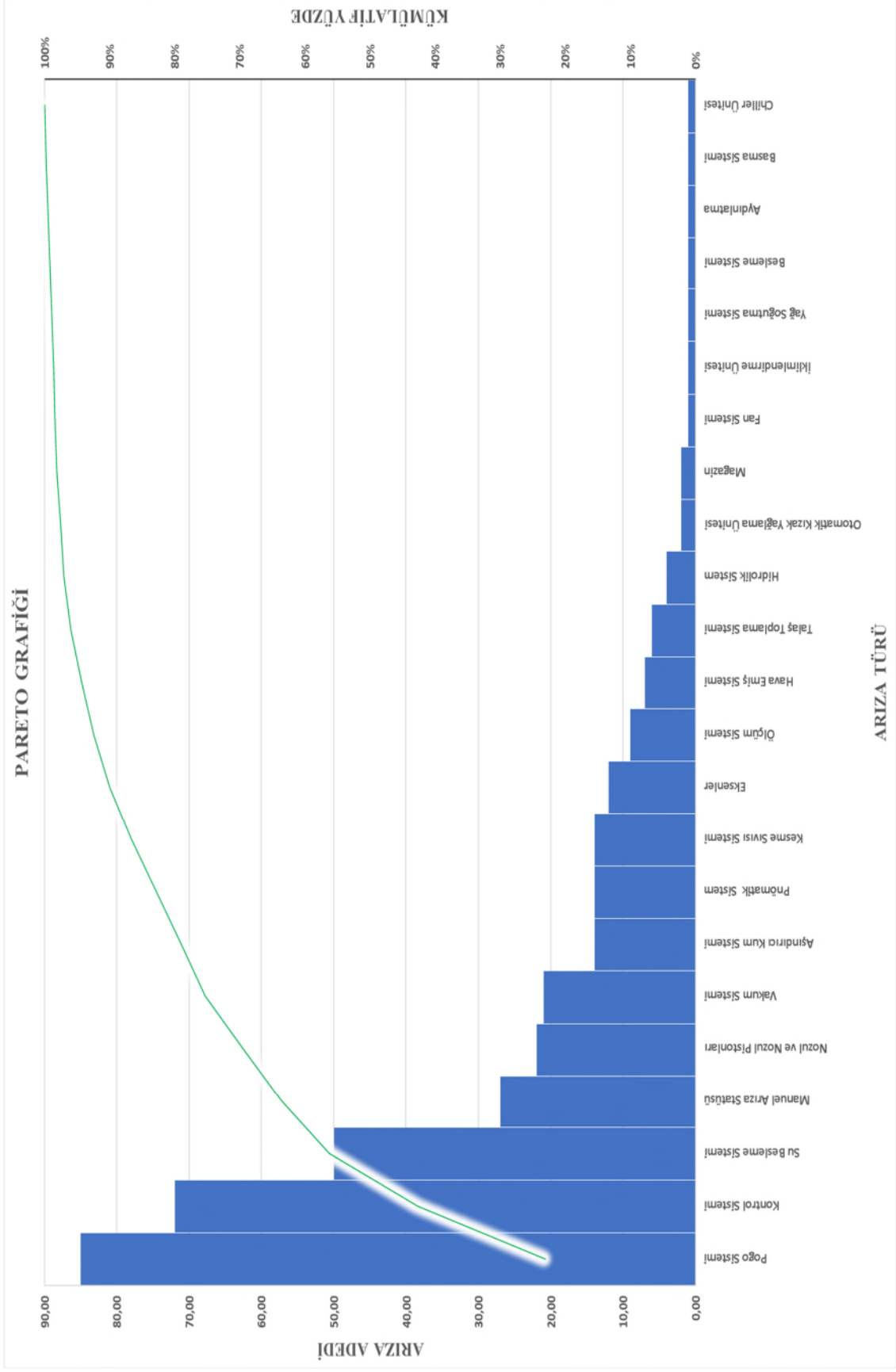
Kontrol sisteminin arıza adedi yüzdesi %19,57 iken arızalı statü süresi %19,91'dir. Arıza miktarı pogo sistemlerinden az olmasına rağmen tamir süresi daha fazla yani

sistemin kullanım dışı kaldığı süre daha uzundur. Kontrol sistemini takip eden arızalar ise su besleme sistemi, manuel arıza türü, nozul ve nozul pistonları, vakum sistemi olarak sıralanır. Sonrasında ise aşındırıcı kum sistemi, pnömatik sistem ve kesme sıvısı sistemi eşit arıza miktarına sahiptir ancak arıza yüzdeleri eşit %3,80 olmasına rağmen arızalı statü süreleri yüzdeleri farklılık göstermektedir ve %4,31, %1,53 ve %3,30 olarak sıralanır. Belotti CNC beş eksenli işleme merkezi ve su jeti kesim makinasının ileri teknoloji özellikleri ile üretim yapımında en önemli parçalarından biri eksenlerdir. Geçmiş verilerin analizine göre eksenlere ait arıza miktarı yüzdesi %3,26 iken sistem durmasına sebep olduğu süre %10,30'dur. Eksenler sık arızalanmıyor olsa bile onarım yapılıp kullanıma alınana kadar geçen süre oldukça yüksektir. Eksenlerden kaynaklı arızalar ölçü/dayama ayarsızlığı, eksen motoru arızası ve kızak arızalarıdır. Ölçüm sistemi, hava emiş sistemi, talaş toplama sistemi, hidrolik sistem, otomatik kızak yağlama ve magazin ekipmanları sıralı olarak diğer arıza türlerini oluşturmaktadır. Fan sistemi, iklimlendirme ünitesi, yağ soğutma sistemi, besleme sistemi, aydınlatma, basma sistemi, ve chiller ünitesi ise %0,27 değerinde eşit ve en düşük arıza miktarına sahiptir.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de tezgahın tüm parçaları için arıza miktarı ve arızalı geçirdiği süre gösterilmiştir. Bu veriler ışığında hazırlanmış olan pareto grafiği ile sistem parçalarının hangilerine bakım yapılmasının daha büyük oranda fayda sağlayacağı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak sistemin kullanıma uygun olduğu sürenin daha uzun olması sağlanacaktır. Pareto grafiğinde, belirlenmiş olan arıza türlerinin yüzdelik oranları yatay eksen üzerinde eşit aralıklı sütunlar ile gösterilmiştir, her sütun farklı kategorideki arızayı temsil etmektedir. Sıklıkla karşılaşılan arızalar soldan sağa doğru sıralanmıştır. Yüzdeyi aşağıdaki formülü kullanarak bulmak oldukça basittir. Grafiğin sağ tarafındaki hata yüzdesi aşağıdaki formül kullanarak hesaplanır:

$$Hata\ yüzdesi = \frac{Sütundaki\ hata\ miktarı}{Toplam\ hata\ miktarı} \times 100 \quad (5.1)$$

Dikey eksen boyunca sayısal bir ölçüt gerçek büyüklükleri belirler. Pareto grafiğinde çizgi ile gösterilen bir toplam eğri yer alır. Toplam eğri esas olarak öncesi ve sonrası karşılaştırmalarında yardımcı olması için kullanılır (Oakland ve Followell, 1990). Şekil 5.4'de CNC kesim tezgahına ait arızaların pareto grafiği paylaşılmıştır. Sisteme ait arıza dağılımını etkileyen alt ekipmanların belirlenmesi mümkündür.



Şekil 5.4: CNC kesim tezgahı arızalarının pareto grafiği.

Şekil 5.4'e göre en uzun sütun pogo sistemi üzerinde çalışmakla genelde daha küçük sütunlar üzerinde çalışmaktan daha fazla kazanç elde edebileceği yorumu yapılır. Fakat her zaman en büyük sütun en büyük maliyeti, iş gücünü veya süreyi göstermez. Hata oranı esas alındığında önemsiz görülen bir sorun, grafik diğer faktörlere göre yeniden düzenlendiğinde en problemlili etken olarak görülebilir. En uzun çubuktaki hatanın çözümü için ayrılacak zaman çok uzun olabilir. Pareto grafiğinde en büyük sütun için de ayrı bir grafik çizilerek onun sebepleri araştırılabilir.

CNC tezgahı dört yıllık arıza verilerine göre toplamda 368 adet arızanın %79,08 'ni sistemi oluşturan 23 adet parçadan yalnızca 7 tanesi oluşturmaktadır. Bu parçalar; Pogo Sistemi, Kontrol Sistemi, Su Besleme Sistemi, Manuel Arıza Statüsü, Nozul ve Nozul Pistonları, Vakum Sistemi, Aşındırıcı Kum Sistemi'dir. Sonraki 3 parça Pnömatik Sistem, Kesme Sıvısı Sistemi ve Eksenler de eklenince arızaların %89,95'nin sadece bu 10 ekipmandan kaynaklandığı sonucuna varılır. Bu ekipmanların sebep olduğu arıza sayısını azaltacak şekilde planlanmış bir önleyici bakım, sistemi kullanılabilir durumda tutmak ve arıza tamir maliyetini azaltmak için önemlidir. Bu çalışmada önerilen mükemmel olmayan sıralı önleyici bakım politikası ile ekipman arıza miktarının azaltılması ve sistemin daha efektif çalışması hedeflenmiştir.

5.2. Verilerin Sayısal Analizi

Geliştirilen çözüm yaklaşımı ve elde edilen parametreler yardımıyla önerilen düşük maliyetli bakım planına ait çevrim zaman aralıkları ve optimum güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir ve mevcut durum bakım planı ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Coria ve diğ. (2015) tarafından geliştirilen analitik yöntemle parametre tahmini çalışması ile Belotti kesim tezgahının arıza verilerinin sayısal analizi yapılmıştır. Öncelikle 2013-2016 yılları arasında meydana gelmiş durdurucu etkiye sahip arıza verilerinden iki arıza arasında geçen ortalama süre hesaplanmıştır. Çizelge 5.1'de bu bilgi verilmiştir. Bu analitik yöntem, bir başka parametre tahmini yöntemi olan En Büyük Olabilirlik Tahminlemesi ile elde edilen şekil parametresinin kapalı formunu çalışmaktadır. Ölçek parametresinin kapalı formu ise şekil parametresinin bir fonksiyonu olarak tanımlanarak elde edilmektedir.

Çizelge 5.1: Sistem arızaları arası ortalama süresi.

	Arızalar arası ortalama süre
2016	8,49 gün
2015	14,38 gün
2014	9,10 gün
2013	8,64 gün

Sistem kurulum tarihi olarak 2013 yılı başından itibaren arızalar arası ortalama süreler listelenir ve birikimli olarak toplanarak arızaların meydana geldiği zamanlar (t_i) belirlenmiştir. Bu süreler üzerinden analitik yöntemle parametre tahmini yapılmıştır.

Çizelge 5.2: Sistem verilerine ait Weibull Dağılımı parametre değerleri.

Şekil parametresi β^*	1,3545
Ölçek parametresi α^*	60,387 gün

Makine Bakım bölümünden alınan bilgilere göre bu tezde ele alınan Belotti CNC tezgahının bir ayda 67 vardiya çalıştığı ve bir vardiyanın 8 saat olduğu bilinmektedir. Yani, tezgah bir ay boyunca 536 saat üretim yapmaktadır. Önerilen bakım politikası için maliyet hesabı yapılırken makinaya ait en güncel değerler olması sebebiyle 2016 yılına ait bilgiler kullanılmıştır. Bu verilere göre, arıza tamir ve planlı periyodik bakım uygulanırken birim saat işçilik maliyeti 54 TL'dir.

Tezgaha ait bir aylık sabit giderler ise şöyle sıralanır:

- Kum tüketimi = 1008 TL
- Su tüketimi = 246 TL
- Karbür takoz tüketimi = 8640 TL
- Yumuşatıcı tuz tüketimi = 1080 TL
- Elektrik tüketimi = 1450 TL

Sabit maliyet kalemlerinin bir aylık masrafı 12 424 TL'dir. Tezgahın bir ayda 536 saat çalışması dikkate alınırsa saatlik sabit maliyet değeri yaklaşık olarak 24 TL olarak hesaplanır. Sistemde meydana gelen beklenmeyen arızaların tamir edilmesi için atanan

iş gücü ve malzeme maliyeti tezgaha ait en büyük maliyet kaleminin oluşturmaktadır. Arıza tamiri malzemeye maliyeti 3363,9 TL, 864 saatlik işçilik maliyeti ise 46656 TL'dir. 2016 yılında tezgaha ait 42 adet kaydedilmiş arıza mevcuttur, bir arıza tamir maliyeti 1190,95 TL olarak hesaplanmıştır. CNC tezgaha ait mevcut periyodik bakım maliyeti ise malzeme ve işçilik maliyetleri dahil edilerek hesaplanmış ve bakım başına 910 TL olarak belirlenmiştir. Yılda bir planlanmış sistemi başlangıçtaki iyi durumuna taşıyan mükemmel bakım maliyeti ise 80000 TL'dir. Mükemmel bakım içeriği tezgah bakım kataloğu da dikkate alınarak gerektiğinde parça değişimine izin vermektedir. Sistem arızalandığında veya bakım faaliyetlerinin uygulanması için durdurulduğu zaman sabit bir kullanım dışı kalma maliyeti olarak 600 TL ödenmektedir.

Belotti tezgahına ait operasyonel maliyet değerleri ise $C_o = C_{oo} + C_{vi} i + C_{vt} t$ maliyet formülüne göre zaman ve bakım çevrimine bağımlı olarak hesaplanmaktadır. Çevrim sayısı ve geçen zamana orantılı olarak maliyet değeri artış gösterir çünkü ekipman zaman içerisinde kullanıma ve yaşa bağlı olarak yıpranacak ve operasyonel olarak sistemi idame ettirmek daha maliyetli olacaktır.

Tezgaha ait maliyet değerleri aşağıdaki Çizelge 5.3 'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.3: CNC kesim makinasına ait maliyet değerleri.

C_{mr}	1190,95 TL/tamir
C_{ir}	910 TL/mükemmel olmayan bakım
C_r	80 000 TL/mükemmel bakım
C_{bd}	600 TL
$C_o = C_{oo} + C_{vi} i + C_{vt} t$	
C_{oo}	445 TL/günlük
C_{vi}	25 TL/çevrim
C_{vt}	5 TL

Mükemmel olmayan bakım faaliyetleri, sistemi olduğu noktadan daha iyi duruma taşır ancak başlangıçtaki durumuna getirmez. Mükemmel olmayan bakım çevrim sayısının üst sınırı olmaz ise makul bir tamir maliyeti ile N sonsuz bir değer alır ancak gerçek üretim sistemlerinde sonsuz bakım uygulaması mümkün değildir. Bir süre sonra sistemi yenilemek gerekecektir. Bu sebeple, parça ikamesi olmadan sonsuz sayıda bakım uygulamasından kaçınmak için bu bakım modelinde bakım çevrim sayısı üst

sınırı N_{up} belirlenmiştir. Bu durumda sisteme N-1 adet mükemmel olmayan bakım ve N. çevrimde mükemmel bakım uygulanır. Parça yenileme ekipman durumunu başlangıç noktasına taşıyacağı için mükemmel bakım olarak değerlendirilmektedir. Mükemmel bakım faaliyetleri ile sistem başlangıçtaki hatasız durumuna geri döner ve bakım çizelgesi yeniden uygulanmaya başlanır. Bakım çevrim sayısı üst sınırına elimizdeki veriler incelenerek $N_{up} \leq 15$ olarak karar verilmiştir. Bakım maliyetlerinin sistem toplam beklenen maliyetlerini yükselttiği ve bakım etkinliğinin azaldığı çevrim üst sınır olarak kabul edilmiştir. Sistemin çalıştığı güvenilirlik değerinde beklenen toplam birim maliyet değeri on beş bakım çevriminden sonra en küçük değerine ulaşıyorsa bile N=15 çevriminde mükemmel bakım uygulanır ve sistem başlangıçtaki iyi durumuna ulaşır.

Sistem yaşam döngüsü boyunca arıza oranı fonksiyonu $\lambda(t)$ değerini gerçek üretim sistemlerine uygun parametrelerde hesaplamak için kullanıma ve yaşa bağlı yıpranmanın bakım faaliyetlerinden ne ölçüde etkilendiğini ölçebilmek için yaş indirgeme faktörü (a_i) ve arıza oranı artış faktörü (b_i) eklenerek hibrid bir model oluşturulmuştur. Bu çalışmada ele alınan Belotti CNC tezgahının geçmiş bakım aktiviteleri incelenerek $a_i = i/(7i+1)$ ve $b_i = (12i+1)/(11i+1)$ değerlerine karar verilmiştir. Bakım çevrim sayıları $i=1, \dots, N$ iken, $0 < a_i \leq 1$ ve $b_i \geq 1$ 'dir. Yaş indirgeme ve arıza oranı artış faktörünün bakım çevrim sayısına bağlı olmasının sebebi sistemin zamanla kullanıma ve yaşa bağlı yıpranma sebebiyle daha ekipman arızasının artmasıdır.

Sistem yaşı ilerledikçe daha sık bakım uygulamasına ihtiyaç olacaktır ve bakım devreleri arasındaki süre azalacaktır. Bakım devreleri arasındaki süre T_i ($i=1, \dots, N$) ile ifade ediliyorken $T_1 < T_2 < \dots < T_N$ şeklinde gösterilir.

Ele alınan tezgaha ait arıza verileri ve işletim, arıza tamir ve bakım maliyetleri girdi; optimum güvenilirlik seviyesi (R), bakım sayısı (N), bakım çevrimleri arasında geçen süreler (T_i) ve bakım yapılacak olan sistem alt bileşeni bilgisi çıktı olarak değerlendirilmiştir. Amaç, sistem bakım, arıza onarım ve işletim maliyetini en küçükleyen bakım politikasını oluşturmaktır. Böylelikle, önleyici bakım uygulamaları ile CNC kesim makinasına ait arıza sıklığının azaltılması hedeflenmiştir ve buna bağlı olarak sistemin kullanılabilir olduğu süre artacak, belirli kalite seviyesinde ürün elde edilecektir.

Çizelge 5.4: Her bir bakım çevrim sayısı a ve b değerleri.

$b_i = (12i+1)/(11i+1)$		$a_i = i/(7i+1)$	
b₁	1,083333333	a₁	0,125000
b₂	1,086956522	a₂	0,133333
b₃	1,088235294	a₃	0,136364
b₄	1,088888889	a₄	0,137931
b₅	1,089285714	a₅	0,138889
b₆	1,089552239	a₆	0,139535
b₇	1,08974359	a₇	0,140000
b₈	1,08988764	a₈	0,140351
b₉	1,09000000	a₉	0,140625
b₁₀	1,09009009	a₁₀	0,140845
b₁₁	1,090163934	a₁₁	0,141026
b₁₂	1,090225564	a₁₂	0,141176
b₁₃	1,090277778	a₁₃	0,141304
b₁₄	1,090322581	a₁₄	0,141414
b₁₅	1,090361446	a₁₅	0,141509

Bu çalışmada arıza oranı kritik seviyede olan CNC tezgahı için önerilen güvenilirlik temelli mükemmel olmayan sıralı bakım planı oluşturulurken kabul edilen varsayımlar şöyledir:

- Başlangıçta yeni bir sistem kurulmuştur,
- Sistem hataları stokastiktir ancak sistem hata oranı fonksiyonu ile tanımlanabilir.
- Sistem durumu sürekli ve doğru bir şekilde gözlemlenebilir,
- Beklenmeyen arızalar gerçekleştiği an fark edilir,
- Maliyetler arası ilişki $C_{ir} < C_r$ ve $C_{mr} < C_r$ şeklindedir,
- Arızalar bağımsızdır,
- Parça yenileme sistemi başlangıçtaki iyi durumuna taşır,
- Sistem yıpranma süreci homojen olmayan poisson süreci ile modellenir ve bu süreç için uygun durağan Weibull dağılımı kullanılmıştır,

- Bakım çevrimleri arasında geçen sürelerde sistemin aynı Weibull parametre değerleri ile yıprandığı kabul edilir,
- Arıza tamir ve planlı bakım faaliyetleri için harcanan süreler her bakım çevrimi için eşit olduğu varsayılır ve göz ardı edilir,
- Sisteme N_i-1 adet mükemmel olmayan bakım uygulanacaktır ve N_i adımımda mükemmel bakım veya parça yenileme faaliyetleri planlanacaktır.

Başla

- 1- Bakım çevrim sayısı üst limiti $N_{up}=15$; $i=1, \dots, N_{up}$ belirle,
- 2- N_{up} çevrim maliyeti ötesinde olacak kadar büyük bakım maliyeti ata, başlangıç $C_{ir} = 10^7$
- 3- Beklenen toplam maliyetlerin en küçüğü olarak başlangıç $ETC^* = 10^7$ ata,
- 4- $[R_1= 0,50; R_2= 0,99]$, $R_1 < R_2$ iken $R_{th}=R_1$ kabul et,

- 5- $\forall i \in \{1, \dots, N_{up}\}$ için $ETC = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} ETC_i \cdot T_i + ETC_N \cdot T_N}{\sum_{i=1}^N T_i}$ hesapla ve beklenen toplam maliyetin en küçük olduğu N değerini belirle (Liao ve diğ., 2010),

$$ETC_i = \frac{[C_{mr} (\int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt) \exp(-\int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt) + C_{ir} + (\int_0^{T_i} C_o(i,t) dt) + C_{bd}]}{T_i}$$

$$ETC_N = \frac{[C_{mr} (\int_0^{T_N} \lambda_N(t) dt) \exp(-\int_0^{T_N} \lambda_i(t) dt) + C_r + (\int_0^{T_N} C_o(N,t) dt) + C_{bd}]}{T_N}$$

- 6- $\forall i \in \{1, \dots, N\}$ için $T_i = \alpha \left(\left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta - \frac{\log(R_{th})}{B_i} \right)^{\frac{1}{\beta}} - A_i$ değerlerini hesapla,
- 7- Eğer, $ETC < ETC^*$ ise küçük olan değeri geçerli say ve $ETC^* = ETC$ olarak güncelle, ilgili $N^* = N$ bakım çevrim sayısını local optimum değer olarak güncelle,

Amaç Minimum maliyet

- 8- $R_{th} = R_{th} + \Delta r$ olarak güncelle (Yerel en iyi değeri bulmak için $\Delta r = 0.05$ ya da 0.01) . Eğer $R_{th} \leq R_2$ ise Adım-5'e geri dön, aksi halde algoritmayı sonlandır.

Çıktı ETC^* , (R^*, N^*) ve $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$

Bitir

Şekil 5.5: Önerilen bakım algoritması genel akışı.

Dördüncü bölümde anlatılan önerilen bakım algoritmasına göre oluşturulan genel akış Şekil 5.5’de verilmiştir. Algoritma çıktısı olarak optimum ETC^* , ilgili sistem güvenilirliği ve bakım çevrim sayısı (R_{th}^* , N^*) ve iki çevrim arasında geçen süreler $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ elde edilir. Farklı güvenilirlik değerlerinde sistem hareketini takip edebilmek için güvenilirlik başlangıç değeri $R_1=0,50$ kabul edilerek algoritma çalışılmıştır. Algoritmanın sonlanması için güvenilirlik üst değeri $R_2= 0,99$ ele alınmıştır. Sistem $[0,50; 0,99]$ aralığında Δr adım kadar ilerlemiştir. Δr katsayısı 0.05 kadar artırılırken yerel en iyi değeri bulmak için 0.01 ilerleyip sistem durumu takip edilmiştir.

Parça ikamesi olmadan sonsuz sayıda bakım uygulamasını engellemek üzere Belotti CNC tezgahı için belirlenen bakım çevrim sayısı üst sınırı $N_{up} \leq 15$ olmasına rağmen $R=0,95$ ve $R=0,99$ değerleri için beklenen minimum maliyet sırasıyla $N=17$ ve $N=20$ çevrimlerinde elde edilmiştir. Diğer güvenilirlik değerlerine göre daha yüksek maliyetli olması ve devre sayısı üst limit olarak belirlenmiş N_{up} değerini aştığı için CNC tezgahının bakım politikası içinde değerlendirilmemiştir.

Şekil 5.5’de verilen algoritma Belotti CNC tezgahı için çalışılmış ve farklı güvenilirlik değerleri için beklenen minimum birim maliyetinin elde edildiği bakım sayıları Çizelge 5.5’de listelenmiştir.

Bu çalışmada, gerçek üretim sistemlerinin eksiksiz yansıtılması için operasyonel maliyet, sistemin kullanım dışı kalma maliyeti ve yıpranmaya bağlı maliyet değerleri dikkate alınmıştır. Önleyici bakım planlaması ile sisteme ait arıza tamir maliyeti, kullanım dışı kalma maliyeti ve parça ikame maliyetlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Sistem belirli güvenilirlik değerine (R_{th}) ulaştığında bakım uygulanması planlanmıştır. Eğer, R_{th} yüksek güvenilirlik değeri belirlenir ise ekipman kısa sürede bu seviyeye düşecek ve daha sık bakım uygulanacaktır. Bu durumda sistemin beklenen arıza sayısı azalacaktır ancak artan bakım sayısı ciddi bir maliyet oluşturacaktır. İdeal bakım politikası oluşturmak için sistemi kabul edilebilir güvenilirlik seviyesinde tutarak parça arızalarını düşürecek minimum maliyetli koruyucu bakım planı oluşturulmuştur.

Çizelge 5.5’de oluşturulan önleyici bakım çizelgesine ait uzun dönem toplam birim maliyeti en küçükleyen algoritma sonuçları paylaşılmıştır. Matematiksel olarak en küçük maliyet noktası ele alınan kesim tezgahı için optimum nokta olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.5: Uzun dönem toplam birim maliyeti en küçükleyen algoritma sonuçları.

Güvenilirlik (R _i)	Bakım sayısı (N)	Toplam birim operasyonel maliyet (TL)
0,50	12	906,00
0,55	12	896,43
0,60	12	889,44
0,65	12	886,49
0,66	12	886,48
0,67	12	886,69
0,68	12	887,13
0,69	12	887,83
0,70	12	888,80
0,71	12	890,06
0,72	12	891,64
0,73	12	893,58
0,74	12	895,89
0,75	12	898,63
0,80	13	920,44
0,85	13	963,51
0,90	14	1054,83
0,95	17	1311,85
0,99	20	2831,26

CNC kesim tezgahı için toplam birim maliyet değeri ($R^*=0,66$; $N^*=12$) noktasında minimum olmaktadır. Eğer sistem güvenilirlik değeri $R=0,66$ 'dan büyük olursa bakım sayısı ve buna bağlı olarak beklenen toplam maliyet değeri artmaktadır. Aynı şekilde, $R=0,66$ seviyesinin altında bir güvenilirlik değeri için de sistem maliyeti yüksek olacaktır. Çünkü, optimum güvenilirlik değeri düşük olursa sistem o noktaya ulaşana kadar geçen süre artacaktır ve bu zaman aralığında sistem arıza sayısı da artış gösterecektir. Düşük güvenilirlik seviyesinde arıza tamir maliyetindeki artış sebebiyle sistemin beklenen işletim toplam maliyeti artacaktır. Amaç fonksiyonu en iyi değeri ($R^*=0,66$; $N^*=12$) noktasında, $N-1=11$ devre mükemmel olmayan önleyici bakım, son çevrim $N=12$ zamanında mükemmel bakım veya parça ikamesi planlanmıştır. Maliyet değerindeki artışların çok küçük olması sebebiyle, işletme tarafından $R=0,65$ ve $R=0,67$ noktaları yerel en iyi sonuç olarak değerlendirilebilir. Maliyet kriteri açısından gerçek üretim sistemi üzerinde bir fark oluşturmayacak olan yerel en iyi sonucu veren güvenilirlik değerleri işletmenin kararı ile uygulanabilir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde matematiksel olarak en iyi sonucu veren $R=0,66$ güvenilirlik seviyesi dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.6 : CNC kesim makinası bakım çevrimleri

Güvenlilik (R _i)	Toplam birim operasyonel maliyet (TL)	T ₁ (gün)	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅
0,50	906,00	138,21	119,19	104,43	92,34	82,20	73,52	66,01	59,45	53,67	48,54	43,98	39,91	=	=	=
0,55	896,43	123,92	106,86	93,62	82,79	73,69	65,92	59,18	53,30	48,11	43,52	39,43	35,78	=	=	=
0,60	889,44	110,33	95,14	83,36	73,71	65,61	58,69	52,70	47,46	42,84	38,75	35,11	31,86	=	=	=
0,65	886,49	97,29	83,89	73,50	65,00	57,86	51,75	46,47	41,84	37,77	34,17	30,96	28,09	=	=	=
0,66	886,48	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35	=	=	=
0,67	886,69	92,19	79,49	69,65	61,59	54,82	49,04	44,03	39,65	35,79	32,38	29,34	26,62	=	=	=
0,68	887,13	89,66	77,31	67,74	59,90	53,32	47,69	42,82	38,56	34,81	31,49	28,53	25,89	=	=	=
0,69	887,83	87,14	75,14	65,83	58,22	51,82	46,35	41,62	37,48	33,83	30,60	27,73	25,16	=	=	=
0,70	888,80	84,63	72,98	63,94	56,54	50,33	45,02	40,42	36,40	32,86	29,72	26,93	24,43	=	=	=
0,71	890,06	82,13	70,82	62,05	54,87	48,84	43,69	39,23	35,33	31,89	28,85	26,14	23,71	=	=	=
0,72	891,64	79,64	68,68	60,17	53,21	47,36	42,37	38,04	34,26	30,92	27,97	25,34	22,99	=	=	=
0,73	893,58	77,16	66,54	58,30	51,55	45,89	41,05	36,85	33,19	29,96	27,10	24,55	22,28	=	=	=
0,74	895,89	74,68	64,40	56,42	49,90	44,41	39,73	35,67	32,12	29,00	26,23	23,77	21,56	=	=	=
0,75	898,63	72,21	62,27	54,56	48,24	42,94	38,41	34,49	31,06	28,04	25,36	22,98	20,85	=	=	=
0,80	920,44	59,86	51,62	45,23	39,99	35,60	31,84	28,59	25,75	23,24	21,02	19,05	17,28	15,70	=	=
0,85	963,51	47,37	40,85	35,79	31,65	28,17	25,20	22,62	20,37	18,39	16,64	15,07	13,68	12,42	=	=
0,90	1054,83	34,40	29,66	25,99	22,98	20,46	18,30	16,43	14,80	13,36	12,08	10,95	9,93	9,02	8,20	=
0,95	1311,85	20,22	17,43	15,28	13,51	12,02	10,76	9,66	8,70	7,85	7,10	6,43	5,84	5,30	4,82	4,39
0,99	2831,26	6,07	5,23	4,59	4,05	3,61	3,23	2,90	2,61	2,36	2,13	1,93	1,75	1,59	1,45	1,32

Sistem birim maliyetinin en küçük olduğu $C(R^*=0,66; N^*=12)$ bakım planında ilk bakım faaliyetlerinin $T_1=94,73$ gün sonra uygulanmaktadır. İlk bakımdan sonra sistem güvenilirliği belirli bir seviyeye ulaşacaktır ancak kullanıma bağlı olarak ekipman yıpranır ve güvenilirlik seviyesi $R=0,66$ seviyesine ulaştığında ikinci bakım planlanır, bu süre $T_2=81,69$ gündür. Sürekli gözlemlenen ve anlık veri takibi yapılan sistemin güvenilirliği önceden belirlenen $0,66$ seviyesine ulaştığında üçüncü bakım uygulanır, bu süre $T_3=71,57$ gündür. Çizelge 5.6'da $R=0,66$ güvenilirlik seviyesi için bakım çevrimleri arasındaki süreleri verilmiştir. Buna göre, sisteme $N-1=11$ adet mükemmel olmayan bakım uygulanır ve $N=12$ devresinde ise mükemmel bakım veya parça yenileme yapılır, son bakımı takiben $T_{12}=27,35$ gün sonra planlanır. Bakım sayısı arttıkça bakım çevrimleri arasındaki süre azalır. Bu durum, sistem kullanıma bağlı olarak $R=0,66$ seviyesine daha kısa sürede ulaştığını ifade etmektedir. Yani, CNC tezgahının zamanla yıprandığı için daha sık bakıma ihtiyaç duymaktadır.

Sistem güvenilirliği olarak daha düşük bir değer belirlenirse ekipmanın bu seviyeye kadar yıpranması daha uzun zaman alacaktır ve bakım çevrimleri arasındaki süre artacaktır. Tezgaha bakım yapılmadan daha uzun süre çalıştığı için arızalanma olasılığı daha yüksek olacaktır ve beklenmeyen arıza sayısı arttıkça sistemi idame ettirmek için yapılan tamir maliyetleri toplam birim maliyet üzerinde artışa sebep olacaktır. Ekipman güvenilirliği daha yüksek bir seviyede sabitlenirse bakım çevrimleri arasındaki süre azalacaktır, sistem daha kısa sürede belirlenen yüksek güvenilirlik seviyesine ulaşacağı için daha kısa sürede bakım uygulamak gerekecektir. Bu durumu şu şekilde özetlemek mümkündür: Aynı zaman dilimi içerisinde güvenilirlik seviyesi yüksek olan sistemin bakım sayısı daha fazla olacaktır ve buna bağlı olarak bakım maliyetleri toplam birim maliyet üzerinde artışa sebep olacaktır. Bu sebeple, makina için uzun dönem birim maliyetini en küçükleyen optimum güvenilirlik seviyesi (R), bakım sayısı (N) ve bakım zamanı (T_i) belirlemek önemlidir.

Sistem alt bileşenlerine ait verilerin analiz edilmesi ve bakım faaliyetlerinin içeriğinin belirlenmesi etkin bir bakım çizelgesi oluşturmak için gereklidir. Bu çalışmada ele alınan tamir edilebilir beş eksenli CNC kesim tezgahı çoklu alt bileşenlerden oluşmaktadır. Sistem bileşenleri 5.1. bölümünde analiz edilmiştir. Bu alt bileşenler şunlardır: Pogo Sistemi, Kontrol Sistemi, Su Besleme Sistemi, Manuel Arıza Statüsü, Nozul ve Nozul Pistonları, Vakum Sistemi, Aşındırıcı Kum Sistemi, Pnömatik Sistem, Kesme Sıvısı Sistemi, Eksenler, Ölçüm Sistemi, Hava Emiş Sistemi, Talaş Toplama

Sistemi, Hidrolik Sistem, Otomatik Kızak, Yağlama Ünitesi, Magazin, Fan Sistemi, İklimlendirme Ünitesi, Yağ Soğutma Sistemi, Besleme Sistemi, Aydınlatma, Basma Sistemi ve Chiller Ünitesi'dir.

Çok bileşenli sistemlerde her çevrimde tüm alt parçalara bakım yapılması uygulanabilirlik ve maliyet kriterlerine göre değerlendirildiğinde efektif bir yöntem olmayacaktır. Sıralı bakım zamanları bir bütün olarak sistem yıpranması ve yaş dikkate alınarak elde edilmiştir. Arıza sıklığı ve arızalar arası süreler dikkate alınarak incelendiğinde sistem alt bileşenlerine ait Weibull şekil ve ölçek parametreleri analitik yöntemle belirlenmiştir. Bu parametreler yardımıyla alt parçaların her bir bakım çevrim zamanında güvenilirlik değeri hesaplanmış ve Bayes teoremi kullanılarak güvenilirlik değeri en düşük olan yani, arızalanma olasılığı en yüksek olan alt bileşenlere bakım planlanmıştır.

Sistem alt ekipman pareto analizi ile detaylı olarak incelenmiş 2013-2016 yılları arasındaki arıza verileri analiz edilmiştir. Bu analize göre; dört yıl süresince arıza sayısı 10 ve 10'dan az olan alt bileşenler mükemmel olmayan bakım içeriğini belirlemek amacıyla çalışılan Bayes modelinde ele alınmamıştır. Arıza sayısı 10'dan az olan alt parçaların bakımı ise son çevrimde tüm tezgah parçaları için planlanan mükemmel bakım ile yapılmaktadır. 2013-2016 yılları arasında arıza sayısı 10'dan fazla olan ve Bayes teoremi kapsamında incelen alt parçalar, Weibull parametre değerleri ve sistem toplam birim maliyetinin en küçük olduğu ($R^*=0,66$; $N^*=12$) noktasındaki bakım çevrim zamanları, her bir çevrim için arıza oranı artış faktörü ve yaş indirgeme faktörü aşağıda incelenmiştir.

k : sistem alt bileşeni

i : bakım çevrim sayısı ($i = 1, \dots, 12$) olmak üzere,

Yaş indirgeme faktörü (a_i) ve her bir çevrim zamanındaki değeri (A_i) bölüm 4.2'de verilen (4.3) ve (4.4) numaralı $a_i = \frac{i}{7i+1}$; $A_i = \sum_{k=1}^{i-1} a_k T_k$ ve $b_i = \frac{12i+1}{11i+1}$; $B_i = \prod_{k=1}^{i-1} b_k$ eşitlikler ile elde edilir.

($R^*=0,66$; $N^*=12$) noktasına ait A_i ve B_i değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.7: Bakım çevrimleri arası süreler (T_i), A ve B değerleri.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_i	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
A_i	0,00	11,84	22,73	32,49	41,22	49,05	56,08	62,41	68,13	73,30	77,99	82,24
B_i	1,00	1,08	1,18	1,28	1,40	1,52	1,66	1,80	1,97	2,14	2,34	2,55

Arıza sayısı 10'dan fazla olan alt bileşenler, arıza sayıları ve Weibull parametre değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir. Bu alt bileşenler birbirinden bağımsızdır ve herhangi biri arızalanır ise sistem durmaktadır.

Çizelge 5.8: CNC kesim makinası k alt bileşenleri Weibull parametreleri.

k alt bileşenler	Arıza adedi	α_k	β_k
1 Pogo sistemi	85	131,48	2,14
2 Kontrol sistemi	72	150,88	1,85
3 Su besleme sistemi	50	168,15	1,31
4 Manuel arıza statusü	27	290,58	1,05
5 Nozul ve nozul pistonları	22	275,31	1,45
6 Vakum sistemi	21	362,33	1,35
7 Aşındırıcı kum sistemi	14	404,29	1,36
8 Pnömatik sistem	14	525,05	0,95
9 Kesme sıvısı sistemi	14	515,28	1,07
10 Eksenler	12	624,19	0,94

R_{ki} : k. alt bileşenin i. bakım çevrimindeki güvenilirlik değeri,

$$R_{ki}(t) = \exp \left[B_i \left(\left(\frac{A_i}{\alpha_k} \right)^{\beta_k} - \left(\frac{t + A_i}{\alpha_k} \right)^{\beta_k} \right) \right] \quad (5.2)$$

formülü ile hesaplanır.

Çevrim zamanlarında (T_i) bakım uygulanacak arızalanma olasılığı yüksek alt bileşenler belirlenmiştir. Bakım çevrim zamanında güvenilirlik değeri en düşük olan sistemler risk oluşturmakta ve arızalanma olasılığı yüksek alt bileşen olarak yorumlanır.

1.devre

Sistem t= 0 anında kullanılmaya başladıktan $T_1= 94,73$ gün sonra güvenilirlik değeri kabul edilebilir en düşük $R=0,66$ seviyesine ulaşır ve bakım ihtiyacı gelişir. Her bir alt sistem için $R_{k1}(T_1)$ hesaplanır.

$$R_{k1}(T_1) = 1 - F_k(T_1) = \exp \left[- \left(\frac{T_1}{\alpha_k} \right)^{\beta_k} \right] \quad (5.3)$$

Çizelge 5.9: İlk bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k1}	0,61	0,66	0,62	0,73	0,81	0,85	0,87	0,82	0,85	0,84

Güvenilirlik değeri en küçük olan $k= 1,2$ ve 3 alt bileşenleri Pogo sistemi, Kontrol sistemi ve Su besleme sistemine ilk devrede bakım uygulanır. Bu parçaların $T_1= 94,73$ gün içerisinde arızalanma olasılığı yüksektir. Eğer bakım uygulanmaz ise bir süre sonra bu parçaların sebep olduğu kelepçe sorunu, kart problemi, vakumlama sorunu, güç ünitesi arızası, yazılımsal sorun, güç ünitesi arızası, güvenlik sistemi arızası, PLC kart arızası, sürücü arızası, ayar yapma problemi, kontaktör arızası, yüksek basınç keçeleri arızası ve su tahliye pompası arızası gerçekleşmesi beklenir. Durdurucu etkiye sahip bu arızalar sistemi kullanım dışı bırakma maliyeti (C_{bd}) ve arıza tamir maliyetine (C_{mr}) sebep olur.

2.devre

Sistem ilk bakım çevriminden sonraki $T_2= 81,69$ gün sonra güvenilirlik değeri $R=0,66$ seviyesine ulaştığı için sıradaki bakım uygulaması planlanır. İlk devrede bakım uygulanan alt parçaların güvenilirlik değeri T_2 zaman aralığı için hesaplanırken sistem başlangıç anından itibaren bakım uygulanmayan bileşenlerin T_1+T_2 zaman aralığı için incelenir.

$$R_{k2} = \begin{cases} R_k(T_1 + T_2), & \text{eğer 1. devrede bakım yapılmamış ise} \\ R_k(T_2), & \text{eğer 1. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Bu durumda, ilk devrede bakım yapılan $k= 1, 2$ ve 3 alt bileşenleri için ikinci çevrimdeki güvenilirlik değeri;

$$R_k(T_2) = \exp \left[B_2 \left(\left(\frac{A_2}{\alpha_k} \right)^{\beta_k} - \left(\frac{T_2 + A_2}{\alpha_k} \right)^{\beta_k} \right) \right] \quad (5.4)$$

formülü ile hesaplanır. Bakım uygulanmamış diğer alt bileşenler $k= 4, 5, 6, 7, 8, 9$ ve 10 için ikinci devredeki güvenilirlik;

$$R_k(T_1 + T_2) = \exp \left[B_2 \left(\left(\frac{A_2}{\alpha_k} \right)^{\beta_k} - \left(\frac{T_1 + T_2 + A_2}{\alpha_k} \right)^{\beta_k} \right) \right] \quad (5.5)$$

eşitliği ile elde edilir.

Çizelge 5.10: İkinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k2}	0,60	0,65	0,63	0,55	0,59	0,69	0,72	0,70	0,73	0,74

R_{k2} değerleri incelendiğinde en küçük güvenilirlik seviyesinde olan üç alt bileşen $k= 1, 4$ ve 5 için ikinci devrede bakım planlaması yapılır. Bakım uygulanmayan alt sistemlerin güvenilirlik değeri bir sonraki çevrime kadar süre içerisinde azalmaktadır.

3.devre

Sistem üçüncü bakım çevriminde onarılacak alt parçaları belirlemek amacıyla güvenilirlik değerleri şöyle hesaplanır:

$$R_{k3} = \begin{cases} R_k(T_1 + T_2 + T_3), & \text{eğer 1. ve 2. devrede bakım yapılmamış ise,} \\ R_k(T_2 + T_3), & \text{eğer 1. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_3), & \text{eğer 2. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Sistem kurulumundan üçüncü bakım çevrimine kadar bakım faaliyeti uygulanmamış alt parçanın güvenilirlik değeri hesaplanırken $T_1+T_2+T_3$ zaman aralığındaki çalışması dikkate alınacaktır. İlk ve ikinci bakım çevriminde bakım yapılmış sistem alt parçalarının güvenilirlik değeri ise bakım uygulandıktan sonraki zaman aralığı ile ilişkilidir. Bir önceki devrede bakım uygulanan $k= 1, 4$ ve 5 alt sistemleri $R_{k3}(T_3)$, ilk devrede bakım yapılmış $k= 2$ ve 3 ise $R_{k3}(T_2+ T_3)$ ile hesaplanır. Manuel arıza statüsü $k=1$ alt sistemi hem ilk çevrim de hem de ikinci çevrimde bakım görmüştür, ancak güvenilirlik değeri hesaplanırken her zaman bakım uygulanan son çevrim zamanı dikkate alınır. Sistem başlangıcından beri bakım yapılmamış $k= 6, 7, 8, 9$ ve 10 ekipmanlarının güvenilirlik değeri ise $R_{k3}(T_1+T_2+ T_3)$ ile elde edilir.

Çizelge 5.11: Üçüncü bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k3}	0,65	0,28	0,36	0,78	0,83	0,55	0,60	0,61	0,63	0,66

Bu devredeki arızalanma olasılığı en yüksek alt bileşenler k= 2, 3 ve 6 sırasıyla Kontrol sistemi, Su besleme sistemi ve Vakum sistemi için bakım planlaması yapılır.

4.devre

Farklı devrelerde bakım uygulanmış ya da hiç bakım yapılmamış alt sistemlerin $T_4=63,29$ gün sonrasındaki güvenilirlik değeri şu şekilde hesaplanır:

$$R_{k4} = \begin{cases} R_k(T_1 + T_2 + T_3 + T_4), & \text{eğer 1., 2. ve 3. devrede bakım yapılmamış ise,} \\ R_k(T_3 + T_4), & \text{eğer 2. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_4), & \text{eğer 3. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Bir önceki üçüncü çevrimde bakım yapılan k= 2, 3 ve 6 alt parçaları güvenilirlik değeri $R_k(T_4)$, k= 1, 4 ve 5 ekipmanları güvenilirlik değeri $R_k(T_3+T_4)$ ve son olarak k= 7, 8,9 ve 10 alt sistemleri için $R_k(T_1+T_2+T_3+T_4)$ güvenilirlik seviyeleri incelenir.

Çizelge 5.12: Dördüncü bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k4}	0,23	0,68	0,67	0,61	0,65	0,89	0,50	0,54	0,56	0,60

Dördüncü bakım çevriminde k= 1, 7 ve 8 alt bileşenleri pogo sistemi, aşındırıcı kum sistemi ve pnömatik sistem güvenilirlik değerleri en düşük parçalar olduğu için bakım yapılarak arızalanma olasılığını azaltmak sistemi kullanılabilir durumda tutmak için önemlidir.

5.devre

Dördüncü devre bakım uygulamalarından $T_5= 56,34$ gün sonra sıradaki bakım çevrimi güvenilirlik değerleri $R_{k5}(t)$;

$$R_{k5} = \begin{cases} R_k(T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5), & \text{eğer hiç bakım yapılmamış ise,} \\ R_k(T_3 + T_4 + T_5), & \text{eğer 2. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_4 + T_5), & \text{eğer 3. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_5), & \text{eğer 4. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

İlk çevrimden sonra hiç bakım yapılmadan beşinci zaman aralığına ulaşan k= 9 ve 10 alt sistemleri için $R_k(T_1+T_2+T_3+T_4+T_5)$ arızalanmama olasılığı hesaplanır. Bir önceki çevrimde bakım yapılan k= 1, 7 ve 8 alt bileşenleri güvenilirlik değeri $R_k(T_5)$, k= 2, 3

ve 6 alt sistemleri için $R_k(T_4+T_5)$, en son ikinci devrede bakım uygulanmış $k= 4, 5$ parçaları güvenilirliği $R_k(T_3+T_4+T_5)$ formülü ile hesaplanır.

Çizelge 5.13: Beşinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k5}	0,61	0,36	0,42	0,49	0,50	0,77	0,92	0,88	0,50	0,55

Beşinci çevrimde bakım planı yapılan alt sistemler $k= 2, 3$ ve 4 'dür.

6.devre

Mükemmel olmayan sıralı bakım planına göre bire önceki bakımdan $T_6= 50, 39$ gün sonra altıncı bakım faaliyetleri uygulanmaktadır. Sistem alt bileşenlerinin önceki çevrimlerdeki bakım uygulamaları dikkate alınarak $R_{k6}(t)$ değerinin ihtimalleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

$$R_{k6} = \begin{cases} R_k(T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6), & \text{eğer hiç bakım yapılmamış ise,} \\ R_k(T_3 + T_4 + T_5 + T_6), & \text{eğer 2. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_4 + T_5 + T_6), & \text{eğer 3. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_5 + T_6), & \text{eğer 4. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_6), & \text{eğer 5. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

$k= 2, 3$ ve 4 alt sistemlerine bir önceki çevrimde bakım yapıldığı için o zamandan sonra geçen T_6 zaman aralığı için güvenilirlik değeri $R_k(T_6)$, $k= 6$ parçası için $R_k(T_4+T_5+T_6)$, $k= 1, 7$ ve 8 ekipmanları için $R_k(T_5+T_6)$ ve sistem başlangıcından bu yana hiç bakım yapılmamış $k= 9$ ve 10 için $R_k(T_1+T_2+T_3+T_4+T_5+T_6)$ değeri incelenir.

Çizelge 5.14: Altıncı bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k6}	0,25	0,71	0,70	0,82	0,39	0,66	0,82	0,79	0,45	0,50

Altıncı bakım devresinde $k=1, 5$ ve 9 alt parçalarına bakım uygulanması planlanmaktadır.

7.devre

Sistem alt bileşenlerinin önceki çevrimlerdeki bakım uygulamaları dikkate alınarak $T_7= 45,24$ gün sonra parçaların $R_{k7}(t)$ değerleri şöyle listelenmiştir:

$$R_{k7} = \begin{cases} R_k(T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7), & \text{eğer hiç bakım yapılmamışsa,} \\ R_k(T_4 + T_5 + T_6 + T_7), & \text{eğer 3. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_5 + T_6 + T_7), & \text{eğer 4. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_6 + T_7), & \text{eğer 5. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_7), & \text{eğer 6. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Altıncı devrede bakım uygulanan k= 1, 5 ve 9 alt parçaları güvenilirlik değerleri $R_k(T_7)$, k= 2, 3 ve 4 alt bileşenleri $R_k(T_6+T_7)$, en son dördüncü devrede bakım yapılmış k= 7 ve 8 ekipmanlarının güvenilirliği ise $R_k(T_5+T_6+T_7)$, k=6 parçası için $R_k(T_4+ T_5+T_6+T_7)$ ve sistem başlangıcından beri hiç bakım görmemiş k=10 ekipmanı için $R_k(T_1+T_2+T_3+T_4+ T_5+T_6+T_7)$ ile belirlenir.

Çizelge 5.15: Yedinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k7}	0,64	0,42	0,47	0,69	0,87	0,57	0,74	0,72	0,92	0,47

Yedinci bakım devresinde güvenilirliği en düşük k= 2, 3 ve 10 sistem alt bileşenlerine bakım uygulanması planlanmıştır.

8.devre

Sistem alt bileşenlerinin önceki çevrimlerdeki bakım uygulamaları dikkate alınarak $T_8= 40,74$ gün sonra parçaların $R_{k8}(t)$ değerleri şöyle listelenmiştir:

$$R_{k8} = \begin{cases} R_k(T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8), & \text{eğer 3. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_5 + T_6 + T_7 + T_8), & \text{eğer 4. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_6 + T_7 + T_8), & \text{eğer 5. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_7 + T_8), & \text{eğer 6. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_8), & \text{eğer 7. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Bir önceki çevrimde bakım uygulanan sistemlerin güvenilirliğinin ulaştığı değer k= 2, 3 ve 10 için $R_k(T_8)$, k= 7, 8 alt sistemleri için $R_k(T_5+T_6+T_7+T_8)$, k= 4 ekipmanı güvenilirliği $R_k(T_6+T_7+T_8)$, k=1,5 ve 9 parçaları için $R_k(T_7+T_8)$, k=6 ekipmanı için ise $R_k(T_4+T_5+T_6+T_7+T_8)$ eşitlikleri kullanılır.

Çizelge 5.16: Sekizinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k8}	0,31	0,72	0,72	0,58	0,76	0,49	0,66	0,66	0,85	0,92

Arızalanma olasılığı en yüksek olan k=1, 4 ve 6 alt bileşenlerine sekizinci devrede bakım yapılmaktadır.

9.devre

Sistem alt bileşenlerinin önceki çevrimlerdeki bakım uygulamaları dikkate alınarak $T_9= 36,78$ gün sonra parçaların $R_{k9}(t)$ değerleri şöyle listelenmiştir:

$$R_{k9} = \begin{cases} R_k(T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9), & \text{eğer 4. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_7 + T_8 + T_9), & \text{eğer 6. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_8 + T_9), & \text{eğer 7. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_9), & \text{eğer 8. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Bir önceki devrede bakım yapılan k= 1, 4 ve 6 alt sistemlerinin güncel güvenilirlik değeri $R_k(T_9)$, en son dördüncü devrede bakım yapılmış k= 7 ve 8 parçaları için $R_k(T_5+T_6+T_7+T_8+T_9)$, en son altıncı devrede bakım uygulanmış k= 5 ve 9 ekipmanlarının güvenilirliği için $R_k(T_7+T_8+T_9)$, en son yedinci devrede bakım uygulanmış k= 2, 3 ve 10 alt bileşenleri için $R_k(T_8+T_9)$ eşitliği kullanılır.

Çizelge 5.17: Dokuzuncu bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k9}	0,65	0,46	0,52	0,86	0,65	0,93	0,59	0,61	0,79	0,86

Çizelge 5.17'ye göre arızalanma olasılığı en yüksek k= 2, 3 ve 7 alt sistemlere bakım yapılması sistem güvenilirliği için daha etkilidir.

10.devre

Sistem alt bileşenlerinin önceki çevrimlerdeki bakım uygulamaları dikkate alınarak $T_{10}= 33,27$ gün sonra parçaların $R_{k10}(t)$ değerleri şöyle listelenmiştir:

$$R_{k10} = \begin{cases} R_k(T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 + T_{10}), & \text{eğer 4. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_7 + T_8 + T_9 + T_{10}), & \text{eğer 6. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_8 + T_9 + T_{10}), & \text{eğer 7. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_9 + T_{10}), & \text{eğer 8. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_{10}), & \text{eğer 9. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Onuncu devrede bakım uygulanacak alt sistemleri belirlemek için bir önceki çevrimde bakım yapılan k=2, 3 ve 7 parçaları için $R_k(T_{10})$, k=8 ekipmanı için $R_k(T_5+T_6+T_7+T_8+T_9+T_{10})$, k=5 ve 9 ekipmanı için $R_k(T_7+T_8+T_9+T_{10})$, k=10 ekipmanı

için $R_k(T_8+T_9+T_{10})$, en son sekizinci çevrimde bakım yapılmış $k= 1, 4$ ve 6 alt bileşenleri için ise $R_k(T_9+T_{10})$ değeri incelenir.

Çizelge 5.18: Onuncu bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k10}	0,35	0,74	0,75	0,74	0,55	0,85	0,95	0,57	0,73	0,81

Güvenilirlik değeri diğer alt sistemlere göre oldukça düşük olan $k=1, 5$ ve 8 alt sistemlerine bakım planlanmaktadır.

11.devre

Sistem alt bileşenlerinin önceki çevrimlerdeki bakım uygulamaları dikkate alınarak $T_{11}= 30,14$ gün sonra parçaların $R_{k11}(t)$ değerleri şöyle listelenmiştir:

$$R_{k11} = \begin{cases} R_k(T_7 + T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11}), & \text{eğer 6. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11}), & \text{eğer 7. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_9 + T_{10} + T_{11}), & \text{eğer 8. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_{10} + T_{11}), & \text{eğer 9. devrede bakım yapılmış ise,} \\ R_k(T_{11}), & \text{eğer 10. devrede bakım yapılmış ise} \end{cases}$$

Bu çevrimde bakım yapılacak alt bileşenleri belirlemek için güvenilirlik değeri $k= 1, 5, 8$ ekipmanları için $R_k(T_{11})$, $k= 9$ parçası için $R_k(T_7+T_8+T_9+T_{10}+T_{11})$, $k= 4$ ve 6 parçaları için $R_k(T_9+T_{10}+T_{11})$, en son dokuzuncu devrede bakım yapılmış $k= 2, 3$ ve 7 parçaları için $R_k(T_{10}+T_{11})$ ele alınır.

Çizelge 5.19: On birinci bakım çevriminde alt sistemlerin güvenilirlik değeri.

k alt bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{k11}	0,67	0,50	0,55	0,65	0,91	0,78	0,89	0,93	0,69	0,77

Arızalanma olasılığı en yüksek $k= 2, 3$ ve 4 alt bileşenlerine bakım uygulanır ise beklenmedik arızadan dolayı sistemi devre dışı kalması ve arıza tamir maliyeti engellenmiş olur.

12.devre

Önerilen bakım planında $N-1$ mükemmel olmayan bakım uygulamasından sonra N . devrede sistem güvenilirliği $R= 0,66$ seviyesine düştüğünde sistem durumunu başlangıç seviyesine taşıyacak mükemmel bakım ve parça ikamesi yapılır. Ele alınan

CNC kesim tezgahına ait arıza verileri ile belirlenen bakım planına göre N=12 çevriminde tüm sistem alt parçalarına mükemmel bakım uygulanır. 2013-2016 yılları arasında arıza sayısı 10'dan az olduğu için Bayes teoremi kapsamında incelenmeyen alt parçalara da on ikinci devrede bakım uygulanmaktadır.

Önerilen çizelgeye göre sistem güvenilirliği göz önünde bulundurarak eşit olmayan çevrim zamanlarında sıralı mükemmel olmayan bakım planı yapılmıştır. Bakım çevrimlerinde arızalanma olasılığı yüksek ekipmanlara bakım uygulanarak tüm sistem alt bileşenlerine gerek olmadığı halde bakım yapılmasının önüne geçilmiştir. Böylelikle, bakım faaliyetleri için gereksiz maliyet ve zaman harcamaları engellenmiştir.

Önerilen modelde, planlı önleyici bakım faaliyetleri ile ortalama arıza sayısı azalmıştır. Sistem arızalarının dağılımı $W(\beta=1,3545; \alpha=60,3877)$ parametreleri ile gerçekleştiği bilinirken EK-2'de verilen tamamlanmamış gama fonksiyonu yardımıyla önerilen bakım planında her bir çevrim aralığında beklenen arızalar arası ortalama süre ve arıza sayısı hesaplanmıştır.

Önerilen bakım çizelgesinin etkinliğini değerlendirebilmek için 2016 yılı mevcut bakım planı arıza sayıları ve maliyet değerleri aşağıda karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.20: Önerilen bakım planı ve mevcut durum planının karşılaştırılması.

	Önerilen bakım planı	2016 yılı mevcut bakım planı
Bakım çevrimlerinin toplam süresi	631,53 gün	365 gün
Beklenen ortalama arıza sayısı	24,34 adet	-
Gerçekleşen arıza sayısı	-	42 adet
Bir arızanın oluşma sıklığı	25,95 gün/arıza	8,7 gün/arıza
Toplam arıza maliyeti	28.987,72 TL	49.990,51 TL
Toplam bakım maliyeti	10.010,00 TL	12.737,12 TL

Bakım çevrimlerinde uygulanan önleyici faaliyetler ile sistem arıza sayısı azaltılmıştır. Sistemin toplam arıza ve bakım maliyetlerinde ise %56 oranında azalma beklenmektedir. Arıza sıklığındaki azalmaya bağlı olarak sistemin uzun dönem toplam birim maliyetlerinde beklenen bu azalma sayesinde sistem etkinliği artırılmıştır. Sistemin kullanılabilir olduğu süre uzatılmıştır. Çizelge 5.21'de CNC kesim makinası için önerilen bakım çizelgesi paylaşılmıştır.

Çizelge 5.21: CNC kesim tezgahı için önerilen bakım çizelgesi

	kalt sistemler	T ₁ (gün)	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
1	Pogo sistemi	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
2	Kontrol sistemi	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
3	Su besleme sistemi	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
4	Manuel arıza statüsü	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
5	Nozul ve nozul pistonları	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
6	Vakum sistemi	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
7	Aşındırıcı kum sistemi	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
8	Pnömatik sistem	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
9	Kesme sıvısı sistemi	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
10	Eksenler	94,73	81,69	71,57	63,29	56,34	50,39	45,24	40,74	36,78	33,27	30,14	27,35
11	Ölçüm Sistemi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
12	Hava Emiş Sistemi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
13	Talaş Toplama Sistemi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
14	Hidrolik Sistem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
15	Otomatik Kızak Yağlama Ünitesi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
16	Magazin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
17	Fan Sistemi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
18	İklimlendirme Ünitesi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
19	Yağ Soğutma Sistemi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
20	Besleme Sistemi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
21	Aydınlatma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
22	Basma Sistemi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35
23	Chiller Ünitesi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,35

Mükemmel olmayan önleyici bakım politikası ile beklenmeyen arıza sayısının azalacağı ve buna bağlı olarak sistemin kullanılabilir olduğu sürenin artacağı gösterilmiştir. Sistem güvenilirliğini temel alarak oluşturulan önleyici bakım stratejisi ile yıllık ortalama arıza sayısındaki bu iyileştirme ile arıza tamir maliyetleri ve sistemin kullanım dışı kaldığında katlandığı maliyet değeri orantısal olarak azalmıştır. Ayrıca, sistemin arızalı kaldığı süre azalacağı için sistem uygunluğu artmıştır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında savunma ve havacılık sanayinde kullanılan tezgah için uzun dönem işletim ve bakım maliyetini en küçükleyen mükemmel olmayan sıralı önleyici bakım politikası oluşturulmuştur. Zamanla rassal yıpranan makinanın 2013-2016 yılları arasındaki arıza verileri analitik yöntemlerle analiz edilerek Markov özelliğe sahip bir bakım algoritması geliştirilmiştir. Mevcut bakım planından tamamen farklı olarak kullanım ve yaşa bağlı yıpranma süreci her bir bakım devresi sonrasında arıza oranı artış faktörü ve yaş indirgeme faktörü olarak sistem bakım algoritmasında çalışılmıştır. Sürekli gözlemlenerek sistem alt bileşenlerine ait verilere anlık ulaşıldığı varsayılan makina için önerilen güvenilirlik merkezli önleyici bakım politikasına göre kendinden önceki bakım çevrimi ile ilişkili N-1 adet mükemmel olmayan bakım uygulaması ile sistemi mevcut durumundan daha iyi duruma getirerek kullanılabilir olduğu süreyi arttırılmış ve beklenmeyen arıza sayısı azaltılmıştır. Böylelikle, üretim sistemi kapasitesinin daha verimli kullanılması, üretim sürekliliği ve belirli kalite seviyesinde ürünler elde edilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen bakım politikasında yalnızca bakım maliyetleri değil sistemin uzun dönem operasyonel maliyetleri ele alınmıştır ve en küçüklemek amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Planlı bakım maliyetleri ve beklenmeyen arızaların tamir maliyeti zamana bağlı eklenirken , sistemin kullanım dışı kaldığı sürelerde katlanılan maliyet sabit ve işletim maliyeti sistemin kullanıma ve yaşına bağlı olarak artan değişken olarak tanımlanmıştır.

Mevcut bakım uygulamasında literatürde sıkça yer alan sistem güvenilirliğini ve zamana bağlı yıpranma sürecini dikkate almayan bu sebeple güncel işletim şartlarında beklentileri karşılamayan klasik periyodik bakım uygulanmaktadır. Tamir edilebilir tezgah için geliştirilen mükemmel olmayan önleyici bakım algoritması sonucu optimum sistem güvenilirlik değeri, bakım sayısı ve sıralı bakım çevrimleri arasındaki süreler çıktı olarak elde edilir. Bunun yanı sıra çok bileşenli bir yapıya sahip makinanın parçaları tek ve kapılı kümülatif hata ağacı gösterimi ile Bayes teoremi kapsamında incelenmiş ve her bir çevrimde bakım uygulanması gereken sistem alt ekipmanı belirlenmiştir.

Geliştirilen bakım çizelgesi için ihtiyaç duyulan veriler Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'den temin edilmiştir. Önerilen sıralı önleyici bakım politikası arıza oranı kritik seviyede olan diğer üretim tezgahları için de uygulanabilir yapıdadır.

Bu çalışma bazı konularda geliştirmeye açıktır. Literatürde arıza oranı artış faktörü ve yaş indirgeme faktörü olarak tanımlanan bu parametreler sistemin bulunduğu çevrenin çok dinamik olması sebebiyle uzman görüşü ve geçmiş durumlardan çıkarımlar yapılarak elde edilmiştir. Mevcut veriler kullanılarak analitik yöntemlerle elde edilmesi incelemeye açık bir konudur. Ayrıca, mükemmel olmayan bakım faaliyetleri için sistem alt bileşenlerinin karar verilmesi için farklı yöntemler geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Abdul-Nour, G., Beaudoin, H., Ouelet, P., Rochette, R., Lambert, S.,** (1998). A reliability based maintenance policy; a case study. *Computers Industrial Engineer*, 35, 591-594.
- Abramowitz, M., ve Stegun, I.A.,** *Handbook of Mathematical Functions*, Washington D.C., (1964).
- Bal, A.,** Üretim tesisleri için RFID destekli bakım yönetimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2013).
- Barlow, R.E., Hunter, L.C.,** (1960). Mathematical models for system reliability, *The Sylvania Technologist*, 5, 14 (1 ve 2).
- Barlow, R.E., Hunter, L.C., Proschan, F.,** (1963). Optimal checking procedures, *Journal of the Social for Industrial and Applied Mathematics*, 11 (4), 1078-1095.
- Barlow, R.E., Proschan, F.,** *Mathematical theory of reliability*, New York: Wiley, (1991).
- Ben-Daya, M., Hariga, M.,** (2000). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes, *Journal of the Operational Research Society*, 51 (7), 875-881.
- Berenguer, C., Chu, C., Grall, A.,** (1997). Inspection and maintenance planning: An application of semi-Markov decision processes, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8(5), 467-476.
- Block, H.W., Borges, W.S., Savits, T.H.,** (1985). Age-dependent minimal repair, *Journal of Applied Probability*, 22(2), 370-385.
- Bloch-Mercier, S.,** (2002). A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a Markovian deteriorating system, *European Journal of Operational Research*, 147, 548-576.

- Boland, P.J.**, (1982). Periodic replacement when minimal repair costs vary with time, *Naval Research Logistics*, 29, 541-546.
- Brown, M., Proshan, F.**, (1983). Imperfect repair, *Journal of Applied Probability*, 20(4), 851-859.
- Chan, G.K., Asgarpoor, S.**, (2006). Optimum maintenance policy with Markov processes, *Electric Power Systems Research*, 76, 452-456.
- Chan, F.T. S., Lau, H.C. W., Ip, R.W. L., Chan, H.K., and Kong, S.**, (2005). Implementation of Total Productive Maintenance: A Case Study, *International Journal of Production Economics*, 95, 71-94.
- Chaneski, W.S.**, (2002). Total productive maintenance-an effective technique, *Modern Machine Shop*, 75, 46-47.
- Chiang, J.H., Yuan, J.**, (2011). Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection, *Reliability Engineering and System Safety*, 71, 165-172.
- Coria, V.H., Maximov, S., Rivas-Davalos, F., Melchor, C.L., Guardado J.L.**, (2015). Analytical method for optimization of maintenance policy based on available system failure data, *Reliability Engineering and System Safety*, 135, 55-63.
- Das, K., Lashkari R.S., Sengupta S.**, (2007). Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems, *European Journal of Operational Research*, 183, 162-180.
- Derman, C., Sacks, J.**, (1960). Replacement of periodically inspected equipment, *Naval Research Logistics*, 7(4), 597-607.
- Duta L., Addouche, S.A.**, (2012). Dynamic bayesian network for decision aided disassembly planning, studies, *Computational Intelligence*, 402, 143-154.
- Ebeling, C.E.**, *An introduction to reliability and maintainability engineering*, Long Grove, Illionis, (1997).

- Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy, A.H.G.,** (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey, *Annals of Operations Research*, 5, 287-326.
- Gurler U., Kaya A.,** (2002). A maintenance policy for a system with multi-state components: an approximate solution, *Reliability Engineering and System Safety*, 76, 117-127.
- Hoyland, A., Rausand, M.,** *System reliability theory, models and statistical methods 2nd Edition*, London: John Wiley and Sons, 1995.
- Ireson, W.G., Coombs, C.F., Moss, R.Y.,** *Handbook of reliability engineering and management*, McGraw-Hill, 1996.
- Kalashnikov, V., Roussignol, M.,** (1996). Reliability of a system with regular inspection times, *Journal of Mathematical Sciences*, 81, 2937-2950.
- Khatab, A.,** (2013). Hybrid hazard rate model for imperfect preventive maintenance of systems subject to random deterioration, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10845-013-0819.
- Klein, M.,** (1962). Inspection maintenance replacement schedules under Markovian deterioration, *Management Science*, 9(2), 25-32.
- Laskey, K.B., Mahoney, S.M.,** (1997). Network fragments: Representing knowledge for constructing probabilistic models, *Proceedings of the Thirteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence*, Providence, Rhode Island, 1-3 August.
- Liao, W., Pan, E., Xi, L.,** (2010). Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21, 875-884.
- Lie, C.H., Chun, Y.H.,** (1986). An Algorithm for Preventive Maintenance Policy, *IEEE Transactions on Reliability*, 35, 71-75.
- Lin, Z., Huang Y., Fang, C.,** (2015). Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 136, 145-156.

- Lin, J.W.B., Neelin, J.D., Zeng, N.,** (2000). Maintenance of tropical intraseasonal variability: Impact of evaporation-wind feedback and midlatitude storms, *Journal of Atmospheric Sciences*, 57, 2793-2823.
- Malik, M.A.K.,** (1979). Reliable Preventive Maintenance Scheduling, *American Institute of Industrial Engineers*, 11(3), 221-228.
- Martorell S., Sanchez A., Serradell V.,** (1999). Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions, *Reliability Engineering and System Safety*, 64, 19–31.
- Mokhtar, A.A.B., Muhammad, M., Mulubrhan, F.,** (2016). Replacement analysis using probabilistic life cycle costing, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 22.
- Morse, P.M.,** *Queues, inventories, and maintenance*, New York: Wiley, 1958.
- Nakagawa, T.,** (1979). Optimum policies when preventive maintenance is imperfect, *IEEE Transactions on Reliability*, R-28(4), 331-332.
- Nakagawa, T.,** (1980). Modified periodic replacement with minimal repair at failure, *IEEE Transactions on Reliability*, R-30 (2), 165–168.
- Nakagawa, T.,** (1986). Modified discrete preventive maintenance policies, *Naval Research Logistics*, 33, 703-715.
- Nakagawa, T.,** (1988). Sequential imperfect preventive maintenance policies, *IEEE Transactions on Reliability*, 37 (3), 295–298.
- Nguyen, D.G., Murthy, D.N.P.,** (1981). Optimal preventive maintenance policies for repairable systems, *Operational Research*, 29(6), 1181-1194.
- Noortwijk, J.M., Klatter, H.E.,** (1999). Optimal inspection decisions for the block mats of Eastern-Scheldt barrier, *Reliability Engineering and System Safety*, 65, 203-211.
- Oakland, J.S., Followell R.F.,** *Statistical Process Control*, New York, Butterworth Hainemann, (1990).
- Pearl, J.,** *Probabilistic reasoning in intelligent systems*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, (1988).

- Rosmaini, A., Shahrul, K., (2012).** An overview of time-based and condition based maintenance in industrial application. *Computers and Industrial Engineering*, 63, 135-149.
- Savsar, M., (2008).** Modelling of multi-stage production lines with maintenance operations, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21 (4), 396-406.
- Segawa, Y., Ohnishi, M., Ibaraki, T., (1992)** Optimal minimal-repair and replacement problem with age dependent cost structure, *Computers & Mathematics with Applications*, 24, 91-101.
- Sheu, S.H., Chang, T.H., (2002).** Generalized sequential preventive maintenance policy of a system subject to shocks, *International System Science*, 33, 267-276.
- Valdez-Flores, C., Feldman, R., (1989).** A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems, *Naval Research Logistics*, 36, 419-446.
- Vaurio, J.K., (1999).** Availability and cost functions for periodically inspected preventively maintained units, *Reliability Engineering and System Safety*, 63, 133-140.
- Wang, H., Pham, H., (1996).** Imperfect maintenance, *European Journal of Operational Research*, 94, 425–438.
- Wang, H., Pham, H., (1999).** Some maintenance models and availability with imperfect maintenance in production systems. *Annals of Operation Research*, 91, 305–318.
- Wang, W., (2008).** An inspection model for a process with two types of inspections and repairs, *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 526–533.
- Wang, W., (2011)** An inspection model based on a three-stage failure process. *Reliability Engineering and System Safety*, 96, 838–848.



EKLER

EK 1: Weibull Dağılımı Parametre Tahmini

EK 2: Tamamlanmamış Gama Fonksiyonu



EK 1

Weibull Dağılımı Parametre Tahmini

$r(\beta)$ formülünün elde edilmesi şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \frac{dr(\beta)}{d\beta} &= - \frac{\left(\sum_{k=1}^n \ln(t_k)^2 t_k^\beta\right) \left(\sum_{k=1}^n t_k^\beta\right) - \left(\sum_{k=1}^n \ln(t_k) t_k^\beta\right)^2}{\left(\sum_{k=1}^n t_k^\beta\right)^2} \\ &= - [(\ln\mu)^2 - (\ln\lambda)^2] = - \frac{\sum t_i > t_j \left(\frac{\ln t_i}{t_j}\right)^2 t_i^\beta t_j^\beta}{\left(\sum_{k=1}^n t_k^\beta\right)^2} < 0 \end{aligned}$$

$r(\beta)$, $\beta > 0$ üzerinde sürekli ve monoton olarak azalan fonksiyondur. Öte yandan limit $\beta \rightarrow 0$ iken,

$$\sum_{k=1}^n t_k^\beta = \sum_{k=1}^n e^{\beta \ln t_k} = \sum_{k=1}^n (1 + O(\beta))$$

$O(\beta)$ Landau sembolü iken benzer olarak,

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) t_k^\beta = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) (1 + O(\beta))$$

Elde edilen bu sonuçlar $r(\beta) = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) t_k^\beta}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta} = \ln(t_n) - \frac{\sum_{k=1}^n (\ln(t_k) t_k^\beta)}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta}$ formülünde yerine konulursa, limit $\beta \rightarrow 0$ iken aşağıdaki asimptotik denklem elde edilir:

$$r(\beta) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) + O(\beta)$$

Bu eşitliğe göre; limit $\beta \rightarrow 0$ iken $r(\beta) \rightarrow \frac{1}{\beta_1}$ ve $\beta \rightarrow +\infty$ iken $r(\beta) \rightarrow 0$ olacaktır. $\exists m \in \{1, n-1\}$: $t_m < t_n$, $t_{m+1} = t_n$ ve tüm $k > m$ değerleri için $t_k = t_n$ olduğu düşünülürse $\beta \rightarrow +\infty$ iken $\left(\frac{t_m}{t_n}\right)^\beta \rightarrow 0$,

$$\sum_{k=1}^n t_k^\beta = t_1^\beta + \dots + t_m^\beta + (n-m)t_n^\beta = (n-m)t_n^\beta \left\{1 + O\left(\left(\frac{t_m}{t_n}\right)^\beta\right)\right\}$$

Bu sonuç $r(\beta) = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) t_k^\beta}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta} = \ln(t_n) - \frac{\sum_{k=1}^n (\ln \lfloor t_k \rfloor) t_k^\beta}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta}$ formülünde yerine yazılırsa ve $k > m$ için $\ln \left(\frac{t_n}{t_k}\right) = 0$ biliniyorken, limit $\beta \rightarrow \infty$ iken $r(\beta)$ asimptotik genişlemesi şu şekilde bulunur:

$$r(\beta) = \frac{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) t_k^\beta}{(n-m)t_n^\beta \left\{1 + O\left(\left(\frac{t_m}{t_n}\right)^\beta\right)\right\}}$$

$$= \frac{1}{n-m} \sum_{k=1}^m \left(\frac{\ln t_n}{t_k}\right) \left(\frac{t_k}{t_n}\right)^\beta \left\{1 + O\left(\left(\frac{t_m}{t_n}\right)^\beta\right)\right\} = O\left(\left(\frac{t_m}{t_n}\right)^\beta\right)$$

$r(\beta) \rightarrow 0$ olarak elde edilir.

Asimptotik $r(\beta)$ formülüne göre, $\beta > 0$ üzerinde $Z(\beta)$ sürekli ve monoton olarak artan fonksiyon ve $\beta \rightarrow 0$ ve $\beta \rightarrow \infty$ limit değerinde asimptotik davranır:

$$Z(\beta) = -\frac{1}{\beta} + O(\beta)$$

$$Z(\beta) = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta} + O\left(\left(\frac{t_m}{t_n}\right)^\beta\right)$$

Buna göre; $\beta \rightarrow 0$ iken $Z(\beta) \rightarrow -\infty$ gider ve $\beta \rightarrow +\infty$ iken $Z(\beta) \rightarrow \left(\frac{1}{\beta_1}\right) > 0$ gider. Böylelikle, öyle ki $Z(\beta^*) = 0$ olduğu için β^* benzersiz bir noktadır.

EK 2

Tamamlanmamış Gama Fonksiyonu

Önerilen bakım planına göre arızalar arası geçen ortalama süre belirlenmiştir.

Sistem güvenilirlik değeri bakım çevrimlerine bağlı olarak şu şekilde hesaplanır:

$$R_i(t) = \exp \left[B_i \left(\left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{t + A_i}{\alpha} \right)^\beta \right) \right]$$

Bu güvenilirlik eşitliğine göre arızalar arası geçen ortalama süre,

$$E(\tau_i) = \int_0^\infty \exp \left\{ B_i \left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta \right\} \exp \left\{ -B_i \left(\frac{t + A_i}{\alpha} \right)^\beta \right\} dt$$

$\exp \left\{ B_i \left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta \right\} = C_i$ olarak tanımlanırsa,

$$= C_i \int_0^\infty \exp \left\{ -B_i \left(\frac{t + A_i}{\alpha} \right)^\beta \right\} dt$$

$\frac{t+A_i}{\alpha} = x$ ise, $dt = \alpha dx$ olacaktır. Bu durumda,

$$E(\tau_i) = C_i \int_{\frac{A_i}{\alpha}}^\infty \exp(-B_i(x)^\beta) \alpha dx = \alpha C_i \int_{\frac{A_i}{\alpha}}^\infty \exp(-B_i x^\beta) dx$$

$B_i x^\beta = z$ iken $x = \left(\frac{z}{B_i} \right)^{1/\beta}$ ve $dx = \frac{1}{\beta} \left(\frac{z^{(1/\beta)-1}}{B_i^\beta} \right) dz$ elde edilir.

$$E(\tau_i) = \frac{\alpha C_i}{\beta B_i^\beta} \int_{B_i \left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta}^\infty \exp(-z) z^{(1/\beta)-1} dz$$

$D_i = B_i \left(\frac{A_i}{\alpha} \right)^\beta$ ve $C_i = \exp(D_i)$ olursa,

$$E(\tau_i) = \frac{\alpha C_i}{\beta B_i^\beta} \int_{D_i}^\infty z^{(1/\beta)-1} \exp(-z) dz$$

eşitliği elde edilir ve bu denklem tamamlanmamış gama fonksiyonu olarak tanımlanır. Abramowitz ve Stegun (1964) 'nın çalıştığı gama fonksiyonu ve asimptotik açılımına göre;

$$E(\tau_i) = \frac{\alpha C_i}{\beta B_i^\beta} \Gamma \left(\frac{1}{\beta}; D_i \right)$$

elde edilir. Burada $\Gamma\left(\frac{1}{\beta}; D_i\right)$ değeri;

$$\Gamma\left(\frac{1}{\beta}; D_i\right) = \int_{D_i}^{\infty} z^{\left(\frac{1}{\beta}\right)-1} \exp(-z) dz = \int_0^{\infty} z^{\left(\frac{1}{\beta}\right)-1} e^{-z} dz - \int_0^{D_i} z^{\left(\frac{1}{\beta}\right)-1} e^{-z} dz$$

iken,

$$\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right) = \int_0^{\infty} z^{\left(\frac{1}{\beta}\right)-1} e^{-z} dz$$

$$\int_0^{D_i} z^{\left(\frac{1}{\beta}\right)-1} e^{-z} dz \approx 2 \left(\frac{D_i}{2}\right)^{1/\beta} \exp\left(-\frac{D_i}{2}\right)$$

olduğu biliniyorsa,

$$\Gamma\left(\frac{1}{\beta}; D_i\right) = \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right) - 2 \left(\frac{D_i}{2}\right)^{1/\beta} \exp\left(-\frac{D_i}{2}\right)$$

şeklinde elde edilir.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Meltem KOÇER
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.07.1990, Iğdır
E-posta : mkocer@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans**: 2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİMLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Kalite Teminatı Sistemler Müh.
2013-2015	Anadolu Ajansı	Görsel Yayıncı

YABANCI DİL:

İngilizce, Almanca

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Kocer, M., (2017). Optimal maintenance policy for a Markov deteriorating system under reliability limit, *International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, St. Petersburg, Russia, 19-21 May, 2017.