

SERİ ÜRETİM HATLARINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ İLE DURUMSAL FARKINDALIĞIN ARTIRILMASI

Diler ÖZ¹, Rifat EDİZKAN^{2*}, Ahmet YAZICI³

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

ORCID No : [0000-0002-5125-5631](https://orcid.org/0000-0002-5125-5631)

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

ORCID No : [0000-0002-6198-976X](https://orcid.org/0000-0002-6198-976X)

³ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

ORCID No : [0000-0001-5589-2032](https://orcid.org/0000-0001-5589-2032)

Anahtar Kelimeler	Öz
Güvenilirlik Analizi Yaşam Olasılığı Durumsal Farkındalık Seri Üretim Hattı Bakım Planlaması.	<i>Bir işletmedeki üretim hatlarının performansı ve kapasitesi planlanmamış makine duruşları en aza indirilerek artırılabilir. Bu duruşların sıklıkla meydana geldiği üretim hatları için arızalar analiz edilmeli ve duruşlara neden olan sorunları azaltmak için bakım planlaması yapılmalıdır. Bu çalışmada, Minyatür Devre Kesici (MDK) üretim hattında seri olarak çalışan makinelerin bakım planlaması için güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeli önerilmiştir. Güvenilirlik analizi, üretim hattında plansız duruşları azaltmak için doğru kararların alınmasında ve planlamaların yapılmasında kullanılabilir önemli bilgiler sağlayacaktır. Önerilen model, üretim hattında operatör, bakımcı ve yönetici düzeyinde durumsal farkındalığı artıracaktır. Güvenilirlik analiz için makinelerin duruş verileri Üretim Yönetim Sistemi (ÜYS) üzerinden toplanmıştır. Güvenilirlik analizinde arızalar arası süre ve tamir süresi değerleri kullanılmıştır. Analiz yapılan zaman aralığındaki verilerden ileride darboğaz olabilecek makineler ve bu makinelerde en çok sorun oluşturan arızalar belirlenmiştir.</i>

RAISING SITUATIONAL AWARENESS WITH RELIABILITY ANALYSIS ON SERIAL PRODUCTION LINES

Keywords	Abstract
Reliability Analysis Survival Probability Situation Awareness Serial Production Line Maintenance Planning	<i>The performance and capacity of production lines in a company can be increased by minimizing unplanned machine downtime. The malfunctions should be analyzed for production lines where these stoppages frequently occur and maintenance should be planned to reduce the problems that cause downtime. In this study, a situational awareness model based on reliability analysis has been proposed for the machines running in series on a Miniature Circuit Breaker (MCB) production line. Reliability analysis will provide important information that can be used in making the right decisions and planning to reduce unplanned stoppages on the production line. The proposed model will increase situational awareness at the operator, maintainer, and manager levels in the production line. For reliability analysis, the stoppage data of the machines were collected through the Manufacturing Execution System (MES). Reliability analysis was performed using time to failure and time to repair values. From the data in the analyzed period, the machines that could be bottlenecks in the future and the malfunctions that cause the most problems in these machines were determined.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 20.10.2022

: 02.05.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 20.10.2022

: 02.05.2023

* Sorumlu yazar: redizkan@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1192034>

1. Giriş

Günümüz rekabet koşullarında işletmeler, üretim hatlarından en yüksek verimliliği sağlamak ve müşteri

taleplerini zamanında karşılamak için bakım faaliyetlerinin planlamasına ve uygulamasına önem vermek zorundadır. Bakım, makinelerin ve hatların sürekli ve verimli bir şekilde çalışması için yürütülen



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

çalışmaların bütünüdür. Bakım çalışmalarının sistematik bir şekilde yürütülebilmesi için doğru analizlerle personeldeki farkındalığın artırılması ve makinelerin ve hatların mevcut performans parametrelerinin detaylı bir şekilde çıkartılması gerekir. İşletmelerde bakım planlaması yapılırken sistemin veya alt sistemlerin güvenilirlik analizi değerleri kullanılabilir. Güvenilirlik analizi, üretim makinelerinin ve hatlarının mevcut ve gelecekteki çalışma durumları hakkında bilgi vermektedir. Güvenilirlik analizi ile birlikte arıza dağılımları, arızaların istatistiksel özellikleri, sağ kalım olasılıkları ve arıza oranları elde edilir (Atamer, 2009; Enzi ve Khan, 2022).

Üretim ekipmanlarından en yüksek oranda yararlanmak ve üretim kapasitesini artırmak için plansız duruşları en düşük seviyeye indirmek gerekir. Üretimde meydana gelen duruşlar, üretim oranını düşürerek verimliliğin azalmasına neden olurlar. Ayrıca, plansız duruşlar üretim planlamasını zorlaştırır (Seifoddini ve Djassemi, 2001). Üretim duruşlarının çoğunluğu hat veya makine kaynaklı teknik problemlerdir. Özellikle plansız duruşların çok sık olduğu üretim tesislerinde etkili bir bakım planlamasıyla duruşların büyük çoğunluğu önlenir. Plansız bir arıza, planlı bir bakım veya onarımdan daha yüksek onarım maliyetlerine neden olabilir. Plansız arızalar; duruş sırasındaki üretim kaybı, tamir ve ürün kalitesinin düşmesi gibi etkenlerden dolayı maliyetleri artırmaktadır. Bakım sistemlerinin temel amacı; işletme kaynaklarının verimli ve etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak, bakım personelinin verimini yükseltmek ve plansız duruşları sifıra yaklaştırmaktır. Bakım planlaması yapılmadan önce mevcut durumun iyi analiz edilmesi gerekir. Bakım planlamasının doğru yapılması ile verimlilik artışı sağlanabilir. Bu amaç için güvenilirlik analizinden yararlanılabilir ve güvenilirlik merkezli bakım politikası uygulanabilir. Güvenilirlik merkezli bakım; periyodik, önleyici ve kestirimci bakım uygulamalarının harmanlanmış halidir (Kuldaşlı, 2009). Ürün ve üretim yöntemlerindeki karmaşıklığın artması, rekabet, maliyetler, müşteri talepleri ve plansız arızalar gibi faktörlerden dolayı güvenilirlik analizinin endüstride kullanımı artmaktadır (Atamer, 2009).

Güvenilirlik, ürün güvenilirliği ve sistem güvenilirliği olarak iki ana başlıkta incelenebilir (Uzuner, 2015). Ürün güvenilirliği, bir ürünün belirli bir süre boyunca düzgün çalışabilme olasılığıdır (Omondi, 2017). Sistem güvenilirliği ise bir sistemin belirli bir süre boyunca işlevini düzgün şekilde yerine getirebilme olasılığıdır. Sistem, birden fazla alt bileşenden oluşan yapılardır. Üretim makineleri ve hatları birden fazla alt bileşenden oluşabilecekleri için sisteme örnek olarak gösterilebilir. Bir sistemde güvenilirliği en düşük olan alt bileşenin tespiti güvenilirlik analizi ile mümkündür ve bu şekilde darboğazlar belirlenebilir (Barabady ve Kumar, 2008). Güvenilirlik değeri, sistemde meydana gelebilecek

plansız arızaların sayısına bağlıdır ve plansız arızaların nedenlerinin ortadan kaldırılmasıyla artmaktadır. Düşük güvenilirlik seviyesi, üretim sisteminde plansız arızaların fazla olduğu anlamına gelir ve bu da düşük kullanılabilirlik oranına neden olur.

Durum farkındalığı, algılanan olaylarla ilgili bilgileri anlamlandırmayı amaçlar ve dinamik ortamlarda karar vermenin temelini oluşturur (Ghimire, Luis-Ferreira, Nodehi ve Jardim-Goncalves, 2016). Durumsal farkındalık üç zihinsel seviyeden oluşmaktadır: algılama, anlama ve tahmin (Endsley, 2000). Yeni üretim uygulamalarında artan karmaşıklık ve üretim hızı ile birlikte operatörler için durumsal farkındalığın artırılması gereklidir (Lall, Torvatn ve Seim, 2017).

Bu çalışmada, Minyatür Devre Kesici (MDK) üretim hattında makinelerin güvenilirlik analizi yapılmış, güvenilirlik analizinden elde edilen sonuçlara göre bakım planlamasında öncelik verilecek duruşlar belirlenmiştir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı, üretim hattında güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modelinin bakım planlamasında nasıl kullanılacağını göstermesidir (Öz, 2021). Durumsal farkındalık seviyeleri ve güvenilirlik analizinin aşamaları kavramsal olarak ilişkilendirilmiştir. Durumsal farkındalığın artırılması ile bakım süreçlerinin daha iyi yönetilmesi mümkün olacaktır.

İkinci bölümde, güvenilirlik analizi ve durumsal farkındalık ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, güvenilirlik analizi hakkında bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde; MDK içyapısı, MKD üretim hattında veri toplama, güvenilirlik analizi uygulaması ve elde edilen bulgular anlatılmaktadır. Sonuç bölümünde çalışmanın genel sonuçlarına ve önerilere yer verilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Güvenilirlik, bir sistemin çalışma fonksiyonlarını, belirlenen çalışma koşulları altında belirli bir sürede yerine getirebilme olasılığıdır (Kuo ve Zuo, 2003). Güvenilirlik, hatasız çalışma olasılığının göstergesi olduğu için önemli bir parametredir. Güvenilirlik konusu ürün, makine, sistem veya bir makinenin veya sistemin alt bileşeni için ele alınabilir.

Topçu (2007), Kaplan-Meier tahmin yöntemini ve Greenwood formülünü çalışmada ele almıştır. Sansürlenmiş gözlemler için yaşam fonksiyonunun tahmininde Kaplan-Meier ve Greenwood tahmin yöntemini kullanmıştır. Türkan (2007), güvenilirlik analizinde kullanılan istatistiksel dağılım modelleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada istatistiksel dağılım modellerinin kullanıldığı alanları ve her dağılım modeline ait özellikleri ele almıştır. Atamer (2009), mekanik bir sistemin ve bu sisteme ait bileşenlerin tasarım ve test aşamalarındaki güvenilirlik analizini

kullanmıştır. İnceoğlu (2013), sağ kalım analiz yöntemlerinden Yaşam Tablosu Analizi, Kaplan-Meier Analizi ve Cox Regresyon Analizi yöntemlerini ele almış ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Karşılaştırma için karaciğer nakli yapılan hastalardan alınan gerçek verileri kullanmıştır.

Güvenilirlik analizi birçok üretim sürecinde makine ve hat için ele alınmaktadır. Literatürde özellikle bakım ve üretim faaliyetlerinde kullanılmak üzere güvenilirlik analizinin ele alındığı çalışmalar vardır. Liberopoulos ve Tsarouhas (2005), otomatik bir pizza hattının güvenilirlik analizini ele almıştır. Bu çalışmayla, ekmek ve unlu mamul ve gıda ürünleri makine imalatçalarına, ürettikleri ve işlettikleri üretim hatlarının tasarımını ve işletimini geliştirmeleri için rehberlik etmeyi amaçlamışlardır. Ünal (2009), yaptığı bir çalışmada güvenilirlik odaklı bakım konusunu ele almıştır. Bu çalışmada bir çimento fabrikasındaki bakım politikasına değinmiş ve güvenilirlik odaklı bakıma geçişe yönelik öneriler sunmuştur. Tsarouhas ve Arvanitoyannis (2010), ekmek üretim hatlarında güvenilirlik ve sürdürülebilirlik analizi yapmıştır. Arıza ve tamir verileri ile hat ve makine seviyesinde yaptıkları çalışmayla mevcut koşulları değerlendirmeyi ve bakım faaliyetlerinin etkinliğini artırmayı hedeflemişlerdir. Uzun ve Özdoğan (2011), yaptıkları güvenilirlik analizi çalışması ile bir işletmedeki bakım politikasını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmayla makine alt bileşenlerinin önleyici bakım periyotlarını belirlemişlerdir. Tsarouhas (2012), gıda endüstrisindeki üretim hatlarının Güvenilirlik, Kullanılabilirlik ve Sürdürülebilirlik (RAM: Reliability, Availability and Maintainability) analizi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmayla üretim sistemlerinin performans ve bakım etkinliği ile iyileştirilmesi gereken kritik noktaları tanımlamayı amaçlamışlardır. Zhang, Zhang, Yu ve Chen (2014), bir piston üretim hattının güvenilirlik analizi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada güvenilirlik ve sürdürülebilirlik konularıyla birlikte arıza kayıplarına dayalı önem ölçümü konusunu ele almışlardır. Uzuner (2015), bir akü üretim tesisinde güvenilirlik analizine bağlı olarak sistem tasarımı üzerine çalışmıştır. Bu çalışmayla birlikte üretim planlamasına yön vermeyi amaçlamıştır. Ahmaivala (2016), bir simülasyon üzerinden kenar bantlama makinesi üreten bir işletmedeki mevcut güvenilirlik düzeyinin bulunması ve geliştirilmesi için çalışma yapmıştır. Çalışmasında Monte Carlo benzetimi kullanmıştır. Omondi (2017), güvenilirlik analizlerinde kullanılan Weibull ve Log-normal dağılımlarına odaklanmıştır. Yapılan çalışmada buzdolabı fan motorunun ömür süresinin uzatılması hedeflemiştir. Koçak ve İşçioğlu (2018), meyve suyu dolm hatlarının güvenilirlik analizi üzerine çalışma yapmışlardır. Üretim hattının ve makinelerin güvenilirlik analizi sonuçları, iyileştirme noktalarını belirlemede ve bakım faaliyetlerinin planlamasında kullanılmıştır. Enzi ve

Khan (2022) yaptığı çalışmada, krank mili üretim hattının güvenilirliğini tahmin etmek için güvenilirlik, tehlike oranı, sağ kalım miktarı ve arıza yoğunluğunu hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde en sık arızanın halka vidada olduğu ve Pareto diyagramından en fazla arıza oranının son dört ay içinde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada; arızayı azaltmak ve güvenilirliği artırmak için bakım sisteminin desteklenmesi gerektiği, üretim hattında duruşlara neden olan arızaların analiz edilmesi, çalışanlara sürekli eğitim verilmesi ve üretim hattında modern teknolojilerin kullanılması önerilmektedir. Soltanali, Rohani, Tabasizadeh, Abbaspour ve Parida (2020), otomotiv üretiminde kritik olan ekipmanlar için güvenilirliğe dayalı bir bakım planlaması önermiştir. Çalışmada, üretim hattında sıvı dolm sisteminden arızalar arası süre verileri toplanmıştır. Güvenilirlik, veri dağılımının istatistiksel yapısı belirlenerek ve Monta Carlo benzetimi ile değerlendirilmiştir. İstatistiksel model, güvenilirliği yükseltmek için darboğaz oluşturan doldurma kafa setine öncelik verilmesi gerektiğini göstermiştir. Monte Carlo benzetimi uygulanarak en düşük hata ile en yüksek doğrulukta güvenilirlik elde edilmiştir. Bu çalışmada, optimal bakım aralıkları için güvenilirlik fonksiyonunu içeren maliyet tabanlı model uygulanmıştır.

Durumsal farkındalık, çevredeki unsurların bir zaman ve mekân hacmi içinde algılanması, anlamlarının kavranması ve yakın gelecekteki durumlarının tahmin edilmesidir (Endsley, 2000). Durumsal farkındalık, çevresinin ilgili unsurları ile etkileşim gerektiren bir durumda insan seviyesinde veya herhangi bir sistem seviyesinde ele alınabilir. Üretim operatörleri, bakım personelleri veya üretim makineleri üretimde durumsal farkındalığın ele alınabileceği konulara örnek olabilir.

Durumsal farkındalık üç seviyeden oluşmaktadır: mevcut durumdaki unsurların algılanması, mevcut durumun anlaşılması ve gelecekteki durumun tahmini. Durumsal farkındalığın ilk seviyesi, çevredeki ilgili öğelerin durumunu, niteliklerini ve dinamiklerini algılamakla ilişkilidir (Panteli, 2013). İlk seviye, ilgili bilginin algılanmasını kapsar. Öncelikle sistemin veya kişinin ilgili bilgilere erişimi olması gerekir. Sonrasında bu bilgiler sistem veya kişiler tarafından tanınabilmelidir. Durumsal farkındalığın ikinci seviyesi, ilgili amaç ve hedeflerle ilişkili olarak algılanan verilerin ne anlama geldiğinin anlaşılmasını işaret eder. Elde edilen bilginin doğru anlaşılması gerekmektedir. Durumsal farkındalığın üçüncü seviyesi ise, bir sistemin elemanlarının, mevcut durumlarına ve algılanan bilgilere dayalı olarak gelecekteki davranışlarının tahmin edilmesini ifade eder. Özellikle bu seviyede dinamik süreçlerin yanlış varsayımlarla geleceğe yansıtılması durumu kritiktir. Örneğin; karmaşık sistemler yüksek seviyede bağlılıklarla karakterize edilir. Bu da bir değişkenin tüm sistemi nasıl etkileyeceğinin tahmin edilmesini zorlaştırır.

Durumsal farkındalık üzerine farklı alanlarda birçok çalışma yapılmıştır. Durumsal farkındalıkta algılanan durum “zihinsel” veya “bilişsel” bir model olabilir. Bu da durumsal farkındalığın insan seviyesinde veya bilişsel bir sistem seviyesinde ele alınabileceğini göstermektedir. Literatürde endüstriyel ortamlarda operatörlerdeki durumsal farkındalık üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Endsley ve Kiris (1995), üretim operatörlerindeki döngü dışı performans sorununu ele almışlardır. Otomasyon sistemlerinin üretim süreçlerinde daha fazla yer almasıyla birlikte operatörlerdeki manuel işlere karşı durumsal farkındalığın azaldığını vurgulamışlardır. Lall ve diğ. (2017), çalışmalarında üretim süreçlerindeki teknik destek sistemlerle operatörlerdeki durumsal farkındalığın artırılmasının gerekliliği konusunu ele almışlardır. Endüstri 4.0 ve gelişen üretim teknolojileri ile birlikte, operatörlerdeki artan hız ve görev karmaşıklığını verimli bir şekilde yönetebilmek için, operatörlerdeki durumsal farkındalığın artırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmalarla birlikte endüstride bilişsel sistemler seviyesinde durumsal farkındalık üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur. Panteli (2013), bilgi ve iletişim teknolojileri güvenilirliğinin ve durum farkındalığının güç sistemi kesintileri üzerindeki etkisini konu olarak ele almıştır. Bu çalışmanın amacı, elektriksel olmayan olayların güç sistemi kesintileri riskine katkısını değerlendirmektir ve çalışmada, güvenilirlik ve durum farkındalığı konusu birlikte ele alınmıştır. Ghimire ve diğ. (2016), verimli proje yönetimi sağlamak için IoT (Internet of Things) teknolojileriyle karar verme süresini azaltmayı amaçlamıştır. Hedef, mevcut üretim süreçlerinin üstünde dinamik bir durumsal farkındalık yapısı oluşturup, üretim alanında veya proje uygulamalarında devam eden süreçleri tespit etme ve bunlara ilişkin içgörü kazanma yeteneklerine sahip bir proje yönetimi yaklaşımı sağlamaktır. Park, Laskey, Salim ve Lee (2017), çalışmalarında Öngörülü Üretim Durum Farkındalığı (Predictive Manufacturing Situation Awareness) konusunu ele almışlar ve bunu akıllı üretim sistemlerini desteklemenin ilk adımı olarak görmüşlerdir. Daha kısa sürede daha düşük maliyetle daha yüksek kalite elde etmek gibi konularda, imalat endüstrisinde endüstriyel rekabet gücünü artırmak amacıyla bir öngörülü üretim durum farkındalığı sistemi geliştirmeyi hedeflemişlerdir.

3. Yöntem

Bu bölümde; güvenilirlik hesabı, olasılık yoğunluk modelinin belirlenmesi, MDK üretim hattında güvenilirlik hesabı ve güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeli hakkında bilgi verilmektedir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1 Güvenilirlik Hesabı

Güvenilirlik, bir makine veya sistemin, belirli koşullar altında, t süresi boyunca işlevini yerine getirebilme olasılığıdır (Tsarouhas, 2012). T , arızalar arası süreyi (TBF: Time Between Failure) gösteren sürekli rassal değişken olsun. $T \geq 0$ için güvenilirlik,

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (1)$$

şekilde ifade edilir. $F(t)$, bir sistemin güvensizliği ise

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2)$$

$F(t)$, t süresinden önce sistemin arızalanma olasılığı gösterir.

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T < t) \quad (3)$$

$F(t)$, arıza dağılımının birikimli dağılım fonksiyonudur. Güvenilirlik teorisinde arıza oranı (risk oranı) fonksiyonu

$$\lambda(t) = f(t) / R(t) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $f(t)$, arıza dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonudur ve

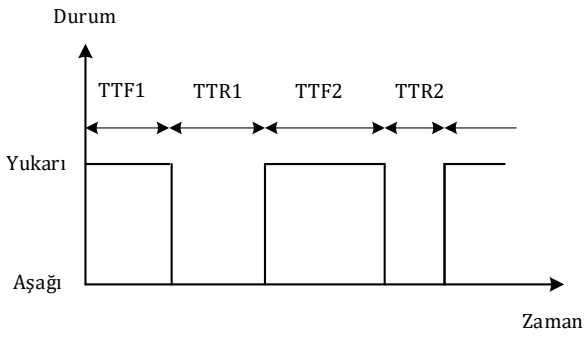
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

şekilde tanımlanır. $f(t)$ 'nin ortalaması, Arızalar Arası Ortalama Süreyi (MTTF: Mean Time to Failure) verir.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (6)$$

Bu çalışmada yaşam olasılığı üzerinden arızalar arası süreleri (TTF: Time To Failure) ve tamir süreleri (TTR: Time To Repair) kullanılarak güvenilirlik analizi yapılmıştır. Tamir durumları dizisi; TTF ve TTR değerlerinin sıralı olarak örneklendirilmesiyle oluşturulur (Panteli, 2013). Şekil 1'de bir bileşen için rastgele çalışma döngüsü gösterilmektedir. Burada “Yukarı” bileşenin çalıştığı durumu, “Aşağı” ise bileşenin tamir sürecinde olduğu durumu gösterir.

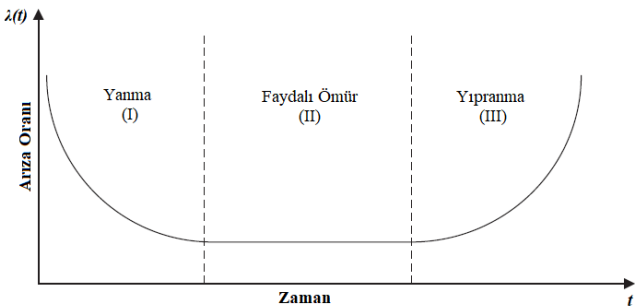
Güvenilirlik, bir sistemin fonksiyonlarını sorunsuz bir şekilde yerine getirebilme olasılığıdır. Güvenilirlik değerinin yüksek olabilmesi için TTF değerlerinin büyük, TTR değerlerinin ise küçük olması gerekmektedir. TTF değerlerinin büyük olması sistemin uzun süreli arızalanmadan çalıştığının göstergesidir. TTR değerlerinin büyük olması ise tamir için ayrılan sürelerin yüksek olması anlamına gelmektedir ve üretim maliyetini artıran bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1. Bir bileşenin rastgele çalışma döngüsü (Panteli, 2013)

Arıza oranı fonksiyonu $\lambda(t)$, bir bileşenin veya sistemin arıza oranını temsil eden zamana bağlı bir fonksiyondur. Bir sistem için kuvvet eğrisi üç bölgeden oluşur: yanma (burn-in), faydalı ömür (useful life) ve yıpranma (wear-out). Bu fonksiyon şeklinden dolayı kuvvet eğrisi (bathtub curve) olarak adlandırılır (Şekil 2).

Kuvvet eğrisindeki üç bölgede arızalar temelde farklı nedenlere bağlıdır. Bu sebeple güvenilirliği artırmada her bölgenin tedbirleri farklıdır. Birinci bölgede arızalar, üretim kusurlarından, zayıf işçilikten ve zayıf kalite kontrolden kaynaklanmaktadır. Birinci bölgede kusurlar düzeltilir, zayıf bileşenler değiştirilir ve kullanıcı ürünün kurulmasına, çalışmasına ve bakımına zaman geçtikçe alışır. İkinci bölgede; rastgele yükler, insan hatası, doğal arızalar ve kötüye kullanım nedeniyle arıza oranı sabittir. Bu bölgedeki hasarlar rastlantısal olarak meydana geldiği için hasarların tahmini zordur. Üçüncü bölgede; yorgunluk, eskime, korozyon ve sürtünmeden kaynaklı arızalar görülür. Arıza oranı fonksiyonu ile bir bileşen/sistemin yorulma hasarları, erken bozulmaları ve rastlantısal hasarları açıklanabilmektedir.



Şekil 2. Kuvvet eğrisi

3.2 Seri Üretim hatlarında güvenilirlik hesabı

Bir üretim hattının güvenilirliğini hesaplayabilmek için öncelikle o hatta güvenilirliği hesaplanabilecek en küçük sistemlere karar verilmelidir. Bu sistemler hattaki makineler, makinelerdeki istasyonlar vs. olabilir. Alt sistemlerin bağlantı şekillerine (seri, paralel, seri-

paralel) ve sıralamasına bağlı olarak hattın güvenilirliği hesaplanır.

Seri yapıya sahip bir sistem n adet alt sistemden oluşsun ve bu alt sistemler $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ile temsil edilsin. Seri sistemin güvenilirliği R_s ;

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n \quad (7)$$

$$= \prod_{i=1}^n R_i$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu eşitlikte alt sistemlerin güvenilirlik değerleri $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ile gösterilmektedir. Güvenilirlik değeri $[0, 1]$ aralığındadır. Alt sistem sayısı arttıkça seri sistemin güvenilirliği azalır.

Alt sistemlerinin güvensizlik değerleri $F_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ile gösterilsin. Bu durumda seri sistemin güvensizlik değeri F_s ;

$$F_s = 1 - [(1 - F_1) \times (1 - F_2) \times \dots \times (1 - F_n)] \quad (8)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i)$$

eşitliğinden hesaplanır.

3.2.3 Uyum iyiliği testi ve olasılık dağılım modelleri

Bir makinenin veya üretim hattının güvenilirliğini hesaplayabilmek için arızalar arası ve tamir süreleri verilerinden yararlanılır. Güvenilirlik, belirli bir süre sonra makine veya hattın arızaya geçmeme olasılığı olduğu için, güvenilirlik hesabı geçmiş arıza verilerinin dağılımına bağlı olarak yapılır. Makine ömür sürelerini gösteren veriler genellikle sürekli rastgele değişken özelliğe sahiptir ve bu nedenle bu verilerin ömür dağılımları da sürekli dağılımlardır. Güvenilirlik analizlerinde Weibull, Üstel, Log-normal ve Normal dağılım modelleri yaygın olarak kullanılan dağılım modellerindedir (Uzun ve Özdoğan, 2011).

Verilerin dağılımına uyan olasılık dağılım modeli seçilirken uyum iyiliği testi (goodness-of-fit test) kullanılabilir (Woodruff ve Moore, 1988). Uyum iyiliği için kullanılan testlere örnek olarak Kolmogorov-Smirnov testi, Anderson-Darling testi, Ki-Kare testi, Shapiro-Wilk testi ve Cramér-von Mises testi verilebilir.

3.3 MDK üretim hattında güvenilirlik analizi

Bir üretim hattında güvenilirlik analizi için duruş verileri kullanılır. Duruş verileri elle veya otomatik olarak toplanabilir. Bu çalışmada kullanılan duruş verileri bir MES (Manufacturing Execution System) ile veri tabanına otomatik olarak kaydedilmiştir.

Bu çalışmadaki güvenilirlik analizi için yapılan işlemlere ait akış şeması Şekil 3'de gösterilmektedir. Güvenilirlik analizi duruş verilerine ait TTF ve TTR değerleri kullanılır. İlk olarak MES ile toplanan duruş verileri ön işlemeden geçirilir.

Uyum iyiliği testi ile verilerin parametrik olasılık dağılımına uyumlu olup olmadığı belirlenir. Veriler parametrik dağılıma uygun ise en yüksek uyum değerine sahip dağılım modeline ait parametreler hesaplanır. Daha sonra olasılık dağılım modeline ait formüller ve parametreler kullanılarak güvenilirlik değerleri hesaplanır. Parametrik olmayan dağılımlar için ise parametrik olmayan veri analizi uygulanarak güvenilirlik değerleri hesaplanır.

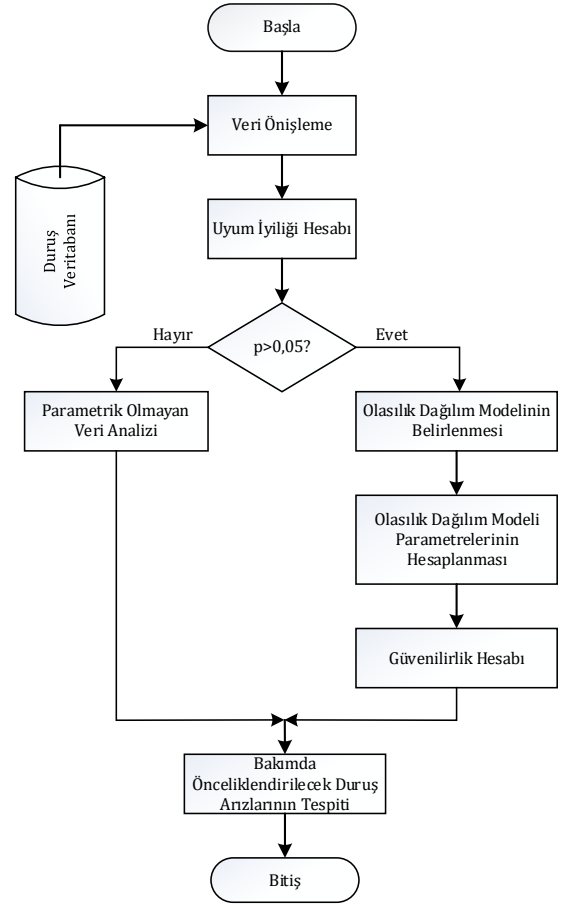
Bu çalışmada, olasılık dağılım modellerinin uyum iyiliği için Anderson-Darling testi kullanılmıştır. Weibull, Log-normal, Üstel, Log-lojistik, 3-parametrelili Weibull, 2-parametrelili Üstel, En Küçük Uç Değer, Normal ve Lojistik olasılık dağılım modelleri Anderson-Darling testi ile değerlendirilmiştir. Güvenilirlik analizinde kullanılacak olasılık dağılım modeli kararlaştırıldıktan sonra dağılım modelinin o veri seti için parametrelerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada parametrik dağılım modellerinin parametrelerinin tahmin edilmesinde En Çok Olabilirlik Tahminleme (MLE: Maximum Likelihood Estimation) yöntemi kullanılmıştır.

Duruş verileri parametrik olasılık dağılımlardan en az birine uyan makineler için seçilen dağılım modelinin olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonları kullanılarak güvenilirlik hesabı yapılır. Güvenilirlik değerleri belirli süreler için belirlenir.

Her veri seti bir parametrik dağılıma uymayabilir. Bu çalışmada herhangi bir parametrik dağılıma uymayan veriler için Kaplan-Meier analizi uygulanmıştır.

Bu çalışmada, her makinenin arızalanmadan çalışabileceği süreler için olasılıkları gösteren sağ kalım grafikleri çıkarılmıştır. Makinelerin belli sürelerdeki yaşam olasılıkları makinelerin güvenilirliği hakkında bilgi vermektedir. Süre arttıkça yaşam olasılığı düşeceği için sağ kalım grafikleri aşağı doğru eğimlidir. Arıza ve tamir süreleri için seçilen birikimli dağılım modeli ise ele alınan makinenin belirli bir süreye kadar arızalanma olasılığını göstermektedir.

Bir işletmede güvenilirlik analizi yapmak bakım faaliyetlerine yön vermek için önemlidir. Bu nedenle, güvenilirlik hesaplamaları yapıldıktan sonra sonuçların bakım faaliyetlerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

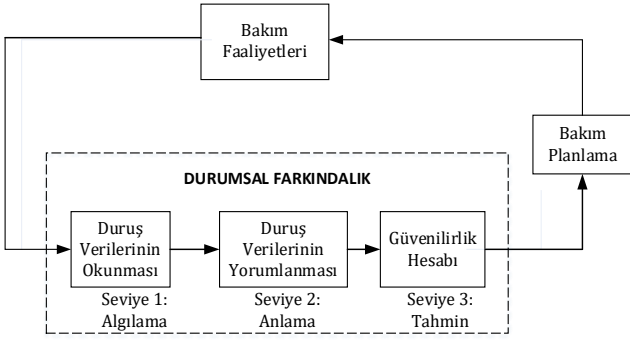


Şekil 3. Güvenilirlik analizi akış şeması

3.4. Durumsal farkındalık modeli

Üretim süreçlerinde güvenilirlik, üretim makinelerinin ve hatlarının çalışma performansını gösteren önemli bir ölçüttür. Çünkü güvenilirlik değeri, bir süre için ele alınan bileşenin veya sistemin arızasız olarak çalışma olasılığını gösterir.

Güvenilirlik analizi, üretim tesisinde bakım planlamasındaki durumsal farkındalığı artırır. Ayrıca, güvenilirlik analizi işletmede üretimde kullanılan makinelerin ve üretim hatlarının çalışma performansları hakkında bilgi verir. Güvenilirlik analizi, tanımı ve seviyeleri düşünüldüğünde durumsal farkındalık ile paralellik göstermektedir. Durumsal farkındalığın algılama, anlama ve tahmin şeklindeki adımları güvenilirlik analizinde de uygulanmaktadır. Bu çalışmada önerilen güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeli Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Önerilen durumsal farkındalık modeli

Güvenilirlik analizinde öncelikle ele alınacak bileşen veya sistemle ilgili arıza verileri elde edilir. Daha sonra elde edilen veriler ön işlemeden geçirilir, güvenilirlik analizinde kullanılacak hale getirilir ve verilerle ilgili genel çıkarımlar yapılır. Güvenilirlik analizinin son adımında güvenilirlikle ilgili hesaplamalar gerçekleştirilir ve gelecek ile ilgili olasılık tahminleri yapılır. Güvenilirlik analizi sonucunda elde edilen bilgiler bakım faaliyetlerinin planlamasında kullanılır. Güvenilirlik analizi, belirli periyotlarla tekrarlanması gereken bir analizdir. Bu da durumsal farkındalığın genel döngüsünde olması gereken bir durumdur. Güvenilirlik analizi yapılan sistem ya da bileşen yıpranma sürecinde ise güvenilirlik hesaplarının sık aralıklarla periyodik olarak yapılması önemlidir. Çünkü güvenilirlik değeri düşük olan bir sistem ya da bileşenin yıpranma sürecinde olması muhtemeldir. Bu durumun tespiti ve önlem ve düzeltme olarak gerekli aksiyonların alınması, o sistem veya bileşen için güvenilirlik değerini artıracaktır. Güvenirliğin artması ile birlikte verimlilik artacak, üretim kapasitesi yükselecek ve maliyetler düşecektir.

4. Bulgular

Bu bölümde; MDK üretim hattı hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca, MDK üretim hattının güvenilirlik analizinden elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Bu çalışmada, Pareto grafiklerinin analizi, uyum iyiliği testleri, olasılık dağılım modellerinin analizi ve parametrik olmayan analizler Minitab 19 istatistiksel analiz yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Anonim, 2021).

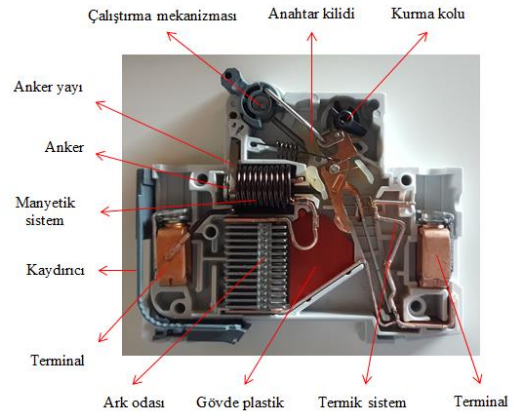
4.1 Minyatür devre kesici üretim hattı

Minyatür devre kesiciler, elektrik tesisatını ve sistemi aşırı akım ve kısa devrelere karşı koruyan koruma ve anahtarlama devre elemanlarıdır. Şekil 5'de bir Siemens minyatür devre kesicisinin iç yapısı gösterilmektedir.

Siemens Gebze Elektrik Ürünleri Fabrikası'nda Minyatür Devre Kesici üretim hattı seri bağlı on bir (11) makineden oluşmaktadır. Bu makineler, hattın başından sonuna doğru sırasıyla; hat yükleme makinesi, manyetik sistem ve anker makinesi, kurma kolu ve kaydırıcı makinesi, anker yayı ve ark odası makinesi, kamera ve

kapak makinesi, perçin makinesi, tampon makinesi, test makinesi, lazer baskı makinesi, koruma parçası makinesi ve paketleme makinesidir.

Hat yükleme makinesi, yarı mamul olarak gelen minyatür devre kesicilerin hatta otomatik olarak beslenmesini sağlayan makinedir. Minyatür devre kesiciler yarı mamul olarak şarjörler içinde dizili bir şekilde gelmektedir ve şarjörler bir robot aracılığı ile besleme istasyonlarına yerleştirilmektedir. Manyetik sistem ve anker makinesi, minyatür devre kesicinin manyetik sistem ve anker parçalarının montajını yapan makinedir. Kurma kolu ve kaydırıcı makinesi, minyatür devre kesicinin kurma kolu ve kaydırıcı parçalarının montajını yapan makinedir. Anker yayı ve ark odası makinesi, minyatür devre kesicinin anker yayı ve ark odası parçalarının montajını yapan makinedir. Kamera ve kapak makinesi, minyatür devre kesicinin içindeki parçaların varlığını ve konumlarını bir kamera ile kontrol eder. Ardından minyatür devre kesicinin kapağının montajını yapar. Perçin makinesi, minyatür devre kesicinin kapak ve gövdesini perçinleyen makinedir. Tampon makinesi, perçin makinesi ile lineer test makinesi arasında geçiş makinesidir.

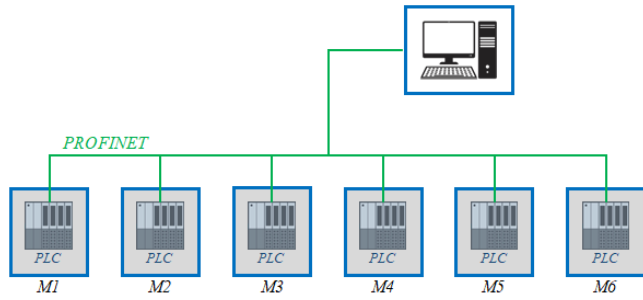


Şekil 5. Siemens minyatür devre kesicinin iç yapısı

Test makinesi, minyatür devre kesicilerin termik açma ve manyetik açma zamanlamasını ve limitlerini ve mekanik yapısının düzgün çalışıp çalışmadığını test eder. Lazer baskı makinesi, minyatür devre kesicilerin üst ve yan yüzeylerine, ürün tipine bağlı olarak karakteristik bilgilerini ve firmanın bilgilerini içeren baskıları yapan makinedir. Koruma parçası makinesi, minyatür devre kesicinin koruma parçasının montajını yapan makinedir. Bununla birlikte minyatür devre kesicinin yüksek gerilim testini de yapar. Paketleme makinesi, minyatür devre kesicilerin otomatik olarak paketlenmesini sağlar. Tampon makinesi hattın ortasında depo görevi görmektedir. Operasyonel süreçler tampon makinesinin öncesi ve sonrası olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada, minyatür devre kesici üretim hattının sadece tampon makinesine kadar olan altı (6) makine ele alınmıştır. Üretim hattında ilk

altı makine sırasıyla hat yükleme makinesi, manyetik sistem ve anker makinesi, kurma kolu ve kaydırıcı makinesi, anker yayı ve ark odası makinesi, kamera ve kapak makinesi ve perçin makinesidir. Bu makineler sırasıyla M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 ile temsil edilecektir.

MDK üretim hattını oluşturan makineler PLC (Programmable Logic Controller) ile kontrol edilmektedir. Üretim hattı seri olarak çalışan makinelerden oluştuğu için bir arıza durumunda makineler bekleme durumuna geçecektir. MDK üretim hattı verileri bir MES üzerinden toplanmaktadır. Her makine PROFINET ağı üzerinden MES'e veri göndermektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Veri toplama sistemi

MES üzerindeki veri tabanına; vardiyalık olarak makinelere giren ürün adedi, çıkan ürün adedi, bozuk olarak ayrılan ürün adedi, Genel Ekipman Etkinliği (Overall Equipment Effectiveness) değerleri ve duruş verileri kaydedilmektedir. Duruş verisi; makine ismi, TTF, TTR, duruş mesajı ve mesaj numarasını içermektedir. Bir makine arızaya geçtiğinde, arızaya ait duruş mesajı MES tarafından veri tabanına anlık olarak kaydedilmektedir. Bu çalışmada 2020 yılı Mart ayına ait veriler kullanılmıştır (Siemens veri kullanım onayı, 26/11/2020).

4.2. MDK üretim hattında makinelerin duruş hatalarının analizi

MDK üretim hattındaki makineler ağırlıklı olarak pnömatik sistemlerden oluşmaktadır. Bu nedenle, pnömatik pistonların hareketlerini yapamamalarından kaynaklanan duruşlar, arızaların büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Duruşlar birkaç saniyeden birkaç saate kadar sürebilmektedir. Operatörler, duruşların büyük bir bölümüne anlık olarak müdahale edebilmekte ve makineyi tekrar hızlı şekilde çalışır hale getirebilmektedir. Bu nedenle duruşların birçoğu kısa süreli duruştur.

MDK üretim hattındaki makinede çeşitli nedenlerle oluşan duruşların oluşma sıklıkları süreleri kullanılarak Pareto grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler, her makine için en sık oluşan arızaları göstermektedir. Makinelerde ortaya çıkan duruşlar "DXXX" şeklinde kodlanmıştır.

Şekil 7'de M1 makinesinde ortaya çıkan duruşlar sıklığına ve duruş sürelerine göre Pareto grafiğinde gösterilmektedir.

Veri setinde M1 için 580 adet arıza kaydı bulunmaktadır. Pareto grafiğinden görüleceği gibi M1 için en sık oluşan ilk altı duruş, en yüksekte en küçüğe doğru sıralandığında, D026, D013, D042, D030, D029 ve D028 kodlu duruşlardır. Bu kodlar sırasıyla; kapak açma mekanizması Z eksen silindirinini aşağı inmemesi, kartezyen robot tutucusunun kapanmaması, kartezyen robotun Z eksenine ait servo motorun hataya geçmesi, 3 numaralı şarjör itme silindirinini ileri gitmemesi, 4 numaralı şarjör itme silindirinini ileri gitmemesi ve 5 numaralı şarjör itme silindirinini ileri gitmemesi duruşlarını temsil etmektedir.

Tablo 1 ve Tablo 2'de oluşma sıklığına ve sürelerine göre etkisi yüksek duruşların birikimli oranları gösterilmektedir. Bu tablolar, makinelerine ait arızaların duruş sıklığına göre oluşturulan Pareto grafiklerinden elde edilmiştir.

Tablo 1. Makinelerde oluşma sıklığına göre en sık görülen duruşlar ve birikimli oranları

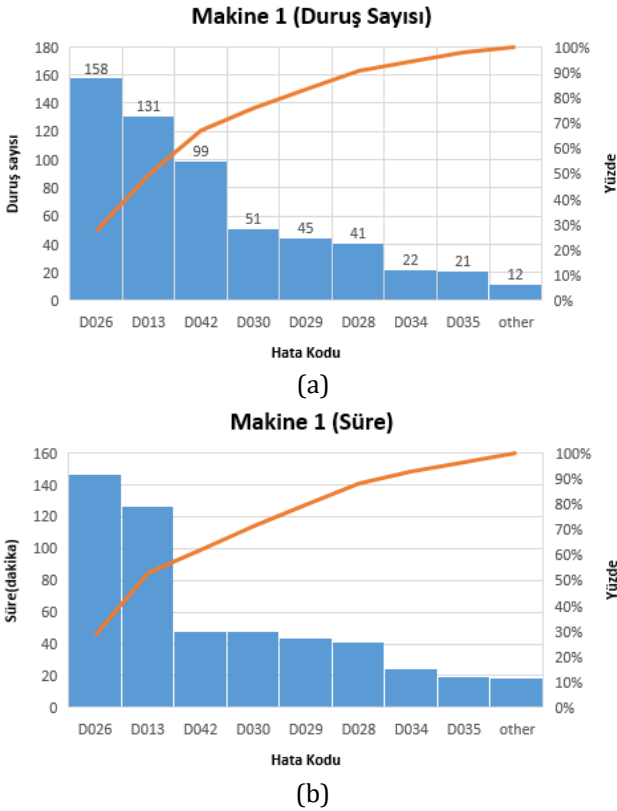
Makine	Duruş Kodları	Birikimli Oran (%)
M1	D026, D013, D042, D030, D029, D028	90,5
M2	D064, D029, D084, D056, D058, D069	75
M3	D040, D018, D022, D027, D042	77
M4	D083, D043, D061, D044, D041, D014	82
M5	D086, D095, D035, D065, D066	83,4
M6	D085, D064, D068, D077	94,4

Tablo 2. Makinelerin duruş süresine göre en çok görülen duruşlar ve birikimli oranları

Makine	Duruş Kodları	Birikimli Oran (%)
M1	D026, D013, D028, D030, D042, D029	87,8
M2	D064, D084, D059, D056, D058, D029	84,2
M3	D040, D018, D022, D042, D027	74
M4	D083, D022, D043, D044, D061, D014	81
M5	D020, D04, D066, D086, D095	94,4
M6	D064, D085, D077	95

Makinelerin ve hattın performansını ve kullanım süresini artırmak için, arızaların gerçekleşme sebeplerini ortadan kaldırmaya yönelik yapılacak faaliyetlerde bu arızalara öncelik verilmelidir. Bazı arızaların etkisi oluşma sıklığı açısından yüksekken,

bazılarının etkisi ise duruş süresi açısından yüksektir. Özellikle hem oluşma sıklığı hem de duruş süresi açısından etkisi yüksek arızaların gerçekleşme sebeplerinin ortadan kaldırılması, makinelerin performansını artıracak ve kullanım sürelerini uzatacaktır.



Şekil 7. M1 makinesinde sık görülen duruşların a) sayısına ve b) sürelerine göre Pareto grafikleri

4.4. Makinelerin güvenilirlik hesabı

MES kullanılarak üretim hattındaki M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 makinelerinden toplanılan 2020 yılı Mart ayına ait TTF ve TTR değerleri için güvenilirlik hesaplamaları yapılmıştır.

4.4.1. Olasılık dağılım modelinin belirlenmesi

Olasılık dağılım modelinin uygunluğuna Anderson-Darling test istatistiği değerine göre karar verilmiştir.

Anderson-Darling testi; Weibull, Üstel, Log-normal, Log-lojistik, 3-parametrelili Weibull, 2-parametrelili Üstel, En Küçük Uç Değer, Normal ve Lojistik dağılımlarına uygulanmıştır. Her makine için Anderson-Darling test istatistiği değeri $p > 0,05$ olan dağılımlar anlamlı kabul edilmiştir ve güvenilirlik analizi için o dağılım modeli kullanılmıştır. Eğer herhangi bir makinenin arızalar arası süresi verileri için, Anderson-Darling test istatistiği değeri 0,05'ten büyük olan bir dağılım yoksa o veri kümesi parametrik olmayan dağılım olarak kabul edilmiştir.

İstatistiksel analiz programı (Anonim, 2021) kullanılarak dokuz adet dağılım için Anderson Darling testi istatistiği değeri hesaplanmıştır (Öz, 2021). Tablo 3 ve Tablo 4'de M1-M6 makinelerinin arızalar arası süre ve tamir süresi verilerinden belirlenen olasılık dağılım modelleri için Anderson testi ile elde edilen p değerleri verilmektedir.

Tablo 3'de verilen değerlere göre M1, M2, M3 ve M6 makinelerinde arızalar arası süre için en uygun olasılık dağılımı modelinin 3-parametrelili Weibull olduğu görülmektedir. 3-parametrelili Weibull dağılımı için M1, M2, M3 ve M6 makinelerinden Anderson Darling testinden elde edilen sırasıyla $p=0,395$; $p>0,5$; $p>0,5$; ve $p=0,07$ değerleri elde edilmiştir. M4 ve M5 için istatistik değerleri $p > 0,05$ olan olasılık dağılımı bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu makinelerde Kaplan-Meier analizi uygulanmıştır.

Tablo 4'den M2 ve M3 makinelerinin tamir süresi verilerine uygun olasılık dağılım modelinin 3-parametrelili Weibull dağılımı olduğu görülmektedir. Bu makineler için Anderson Darling testi ile elde edilen p -değerleri sırasıyla 0,162 ve 0,231'dir. Diğer makineler için Kaplan-Meier analizi kullanılmıştır.

4.4.2. Olasılık dağılım modeli parametrelerinin hesaplanması

Arızalar arası ve tamir süresi verileri için belirlenen 3-parametrelili Weibull ve Log-normal olasılık dağılım modellerinin parametreleri MLE (Maksimum Likelihood Estimation) yöntemiyle hesaplanmıştır. 3-parametrelili Weibull olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonları Eşitlik (10) ve Eşitlik (11)'de verilmektedir.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (10)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (11)$$

Bu eşitliklerde; β şekil, η ölçek ve γ konum parametresini göstermektedir. Log-normal olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonları aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (\log x - \mu)^2 \right\} \quad (12)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (\log y - \mu)^2 \right\} dx \quad (13)$$

Bu eşitliklerde; μ ortalama ve σ varyansı göstermektedir.

Tablo 3. Arızalar arası süre verileri için olasılık dağılım modellerinden elde edilen Anderson-Darling testinin p değerleri

Dağılım	Anderson-Darling Test İstatistiği Değeri					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Weibull	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Log-normal	<0,005	0,112	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Üstel	0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Log-lojistik	<0,005	0,032	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
3-parametrelili Weibull	0,395	>0,5	>0,5	0,009	<0,005	0,07
2-parametrelili Üstel	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
En Küçük Uç değeri	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Normal	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Lojistik	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

Tablo 4. Tamir süresi verileri için olasılık dağılım modellerinden elde edilen Anderson-Darling testinin p değerleri

Dağılım	Anderson-Darling Test İstatistiği Değeri					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Weibull	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Log-normal	<0,005	0,017	0,231	<0,005	<0,005	<0,005
Üstel	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Log-lojistik	<0,005	0,008	0,022	<0,005	<0,005	<0,005
3-parametrelili Weibull	<0,005	0,162	0,057	<0,005	<0,005	<0,005
2-parametrelili Üstel	<0,01	0,022	0,204	<0,01	<0,01	<0,01
En Küçük Uç Değeri	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Normal	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Lojistik	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

M1-M6 makineleri içinden arızalar arası süresi ve tamir süresi verileri parametrik dağılıma uygun olanlar için belirlenen olasılık dağılım modellerinin MLE ile hesaplanan parametreleri Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 5. Arızalar arası süre verilerine göre M1, M2, M3 ve M6 makinelerinin dağılım modeli parametreleri

Makine	3-parametrelili Weibull Dağılım Modeli Parametreleri		
	Şekil (β)	Ölçek (η)	Konum (γ)
M1	0,888068	40,2849	0,966984
M2	0,638147	51,4760	1,12842
M3	0,653196	54,1258	0,979365
M6	0,727432	50,2849	1,05174

Tablo 6. Tamir süresi verilerine göre M2 ve M3 makinelerinin dağılım modeli parametreleri

Makine	Olasılık Dağılım Modeli	Dağılım Parametreleri	Modeli
M2	3-parametrelili Weibull	Şekil (β): 0,833674 Ölçek (η): 0,428146 Konum (γ): 0,0972094	
M3	Log-normal	Ölçek (σ): 0,688111 Konum (μ): -1,01129	

4.4.3. Makinelerin yaşam olasılık tahmini

Arızalar arası ve tamir süreleri için makinelerin yaşam olasılığı tahminleri Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir. Arızalar arası ve tamir süresi verileri parametrik bir dağılıma uyan makinelerin yaşam olasılıkları, olasılık dağılım modeline ait olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Tablolarda verilen süreler üzerinden hesaplanan yaşam olasılıkları değerleri makinenin güvenilirliği hakkında bilgi vermektedir.

Sağ kalım grafiğinden, makinenin belirli bir süreden sonra düzgün çalışma olasılığı belirlenir. Bu değer aynı zamanda makinenin güvenilirlik değeridir. Birikimli arıza grafiği, ele alınan makinenin belirli bir süreye kadar arızalanma olasılığını gösterir. Arıza oranı (failure rate) grafiği, belirli bir zamandaki anlık arıza oranını göstermektedir. Arıza oranının artması, zamanla arızalanma olasılığının daha yüksek olduğunu ve sistemin yıpranma sürecinde olduğunu gösterir. Arıza oranının azalması, sistemin arızalanma olasılığının erken kullanım dönemlerinde daha yüksek olduğunu gösterir. Sistemin faydalı ömür döneminde arıza oranı sabittir. Şekil 8 ve Şekil 9'da M1'in arızalar arası ve tamir süreleri için sağ kalım, birikimli arıza ve arıza oranı grafikleri gösterilmektedir. M1'in tamir süresi verileri için uygun dağılım modeli belirlenemediğinden Şekil 9'da grafikler istatistiksel yazılım programı kullanılarak Kaplan-Meier metodu ile elde edilmiştir.

Tablo 7. Arızalanma sürelerine göre yaşam olasılığı tahminleri

Zaman (dakika)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
2	0,96	0,93	0,93	0,88	<0,954 ve >0,947	0,95
5	0,88	0,83	0,83	<0,72 ve >0,71	<0,868 ve >0,861	0,85
10	0,77	0,72	0,73	<0,60 ve >0,59	<0,834 ve >0,828	0,75
20	0,60	0,59	0,60	<0,471 ve >0,469	<0,769 ve >0,762	0,61
30	0,47	0,50	0,51	<0,350 ve >0,348	<0,722 ve >0,715	0,51
40	0,38	0,43	0,45	<0,294 ve >0,292	<0,630 ve >0,623	0,44
50	0,30	0,38	0,39	<0,239 ve >0,238	<0,557 ve >0,550	0,38

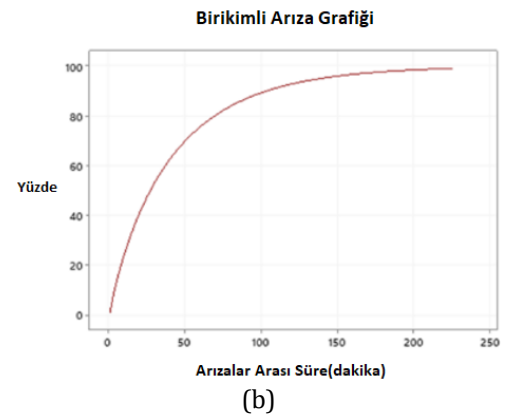
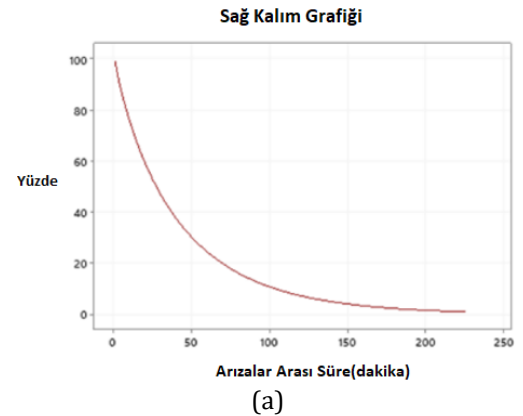
Tablo 8. Tamir sürelerine göre yaşam olasılığı tahminleri

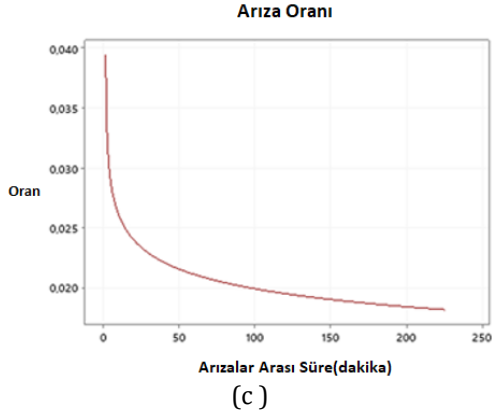
Zaman (dakika)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
0,1	0,9776	0,9851	0,9697	0,9458	0,9404	0,9812
0,2	0,8741	0,7376	0,8076	0,6561	0,5629	0,8662
0,3	0,7966	0,5849	0,6103	0,4449	0,3642	0,6268
0,4	0,7017	0,4728	0,4451	0,3159	0,2781	0,4272
0,5	0,6362	0,3866	0,3219	0,2131	0,1987	0,3498
1	0,2776	0,1553	0,0708	0,0729	<0,0795 ve >0,0728	0,1244
2	<0,069 ve >0,672	0,0312	0,0066	<0,0243 ve >0,0224	<0,0464 ve >0,0397	<0,0376 ve >0,0352
3	<0,0362 ve >0,345	0,0072	0,0011	<0,0168 ve >0,015	<0,0265 ve >0,0199	<0,0188 ve >0,0164
4	<0,0086 ve >0,0069	0,0018	0,0002	<0,015 ve >0,0131	<0,0265 ve >0,0199	<0,0164 ve >0,0141
5	<0,0086 ve >0,0069	0,0005	~0	<0,0075 ve >0,0037	<0,0199 ve >0,0132	<0,0117 ve >0,0094
10	<0,0017 ve >0	~0	~0	<0,0037 ve >0,0019	<0,0199 ve >0,0132	<0,0117 ve >0,0094
15	0	~0	~0	<0,0019 ve >0	<0,0199 ve >0,0132	<0,0117 ve >0,0094
20	0	~0	~0	<0,0019 ve >0	<0,0132 ve >0,0066	<0,0117 ve >0,0094
30	0	~0	~0	<0,0019 ve >0	<0,0132 ve >0,0066	<0,0094 ve >0,007

Makinelerin arızalar arası süreleri incelendiğinde, ortalama arızalar arası süresi en düşük makine 36,07 dakika ile M4 iken, en yüksek makine 107,3 dakika ile M5'tir. Makinelerin tamir süreleri incelendiğinde, ortalama tamir süresi en düşük makine 0,467 dakika ile M3 iken, en yüksek makine de 2,82 dakika ile M6'dır. Tamir süresi yüksek olan makinelerin tamir sürelerinin düşürülmesi için gerekli çalışmalar yapılmalıdır.

Makinelerin arızalar arası sürelerine göre güvenilirlik değerleri incelendiğinde 60. dakika değeri için M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 için güvenilirlik değerleri sırasıyla 0,2456; 0,3364; 0,3471; 0,204; 0,533 ve 0,3254'tür. Bu değerlere göre güvenilirlik değeri en düşük makine M4 iken, en yüksek makine M5'tir. Arızalar arası süreleri için güvenilirlik değerini özellikle sık sık oluşan arızalar olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle, M4 için bakım planlamasında oluşma sıklığına göre birikimli toplamı %82 olan D083, D043, D061, D044, D041 ve D014 kodlu duruşlara bakım planlamasında öncelik verilmelidir.

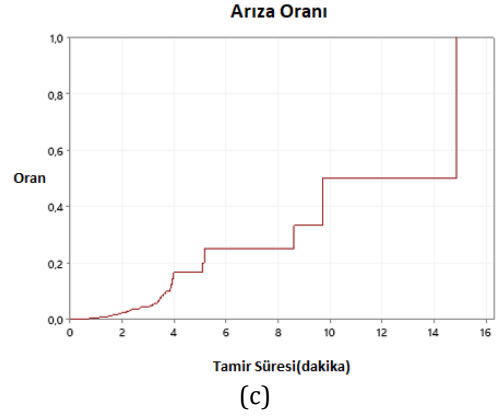
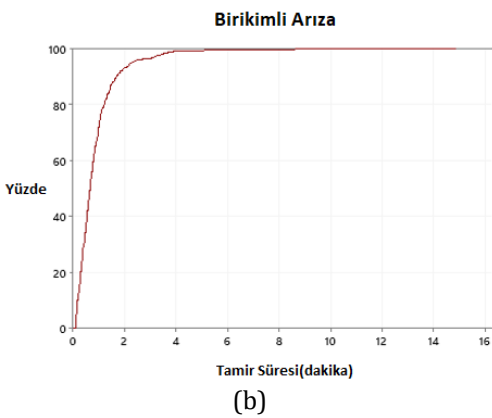
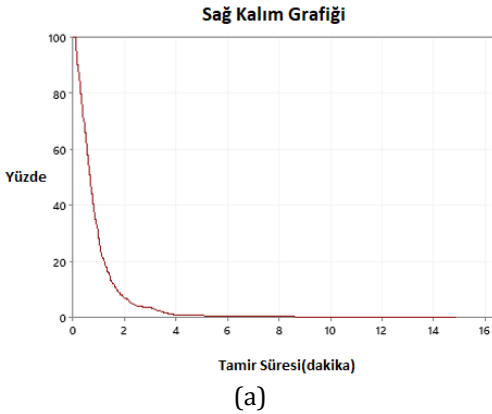
Tablo 8'de verilen zaman değerleri için makinelerin tamir edilebilme olasılıkları elde edilir. Örneğin; M2 arızalandığında 1 dakikada tamir edilme olasılığı 0,8447 (=1-0,1553)'dir. M3 arızalandığında ise, 1 dakikada tamir edilme olasılığı 0,9292'dir. Tablo 8'de görüldüğü gibi süre arttıkça makinelerin tamir süresine ait yaşam olasılığı azalmakta ve bundan dolayı tamir edilebilme olasılığı artmaktadır.





Şekil 8. M1 makinesinin arızalar arası süreleri için a) sağ kalım, b) birikimli arıza ve c) arıza oranı grafikleri

Bir dakikalık tamir süreleri M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 için güvenilirlik değerleri sırasıyla 0,2776; 0,1553; 0,0708; 0,0729; 0,076 ve 0,1244'tür. Bu makinelerin 1 dakika içinde tamir edilebilme olasılıkları ise sırasıyla 0,7224; 0,8447; 0,9292; 0,9271; 0,924 ve 0,8756'dır. Bu sonuçlara göre bir dakikada tamir edilebilme olasılığı en düşük makine M1 iken, en yüksek makine M3'tür.



Şekil 9. M1 makinesinin tamir süreleri için a) sağ kalım, b) birikimli arıza ve c) arıza oranı grafikleri

Tamir edilebilme olasılığının düşük olması tamir süresinin uzun olması anlamına gelmektedir. Bu nedenle, M1 için bakım planlamasında duruş süresine göre birikimli toplamı %87,8 olan D026, D013, D028, D030, D042 ve D029 kodlu duruşlara bakım planlamasında öncelik verilmelidir.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Günümüz koşullarında üretim yapan firmalar diğer firmalarla rekâbet edebilmek için bakım politikalarına önem vermek zorundadır. Bakım çalışmalarının sistematik bir şekilde yürütülebilmesi için doğru analizlerle personellerdeki farkındalığın artırılması ve makinelerin ve hatların mevcut performans parametrelerinin detaylı bir şekilde çıkartılması ve bu parametrelerin izlenmesi gerekir.

Güvenilirlik analizi, üretim hatlarının ve makinelerin performanslarının mevcut ve gelecekteki durumu hakkında bilgi sahibi olmanın en etkili yöntemlerden biridir. Güvenilirlik analizi ile birlikte arıza dağılımları, arızaların istatistiksel özellikleri, sağ kalım olasılıkları, arıza oranları gibi bilgiler elde edilir.

İşletmeler, birçok açıdan faydalı bilgiler sunan güvenilirlik analizini bakım politikalarının merkezine yerleştirebilir.

Güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık, üretim hatlarında ve makinelerde kullanılması ile uygulaması gelecekte oluşabilecek sorunların önceden öngörülmesi ve gerekli tedbirlerin alınması ve planlamaların yapılabilmesi için önemlidir.

Bu çalışmada, üretim hattındaki makinelerindeki duruşları azaltmak ve verimliliği artırmak için döngüsel olarak bakım planlaması ve bakım faaliyetinin yapıldığı durumsal farkındalık modeli kullanılmıştır. Bu uygulama modeli, üretim hattındaki duruşlar yönünden operatör, bakımcı ve yönetici düzeyinde durumsal farkındalık artırılacaktır.

Bu çalışmanın devamında, güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeline göre belirlenen bakım faaliyetlerinin üretim hattının verimliliğini ne kadar iyileştirdiği araştırılabilir. Bunun yanında, belli bir zaman aralığında durumsal farkındalık modelinin MKD üretim hattındaki dar boğaz oluşturan sorunların azaltılmasına yönelik etkileri analiz edebilir. Bu çalışmanın devamı olarak, benzetim ile makinelerin arızalar arası süreleri ve tamir süreleri için elde edilen dağılımlardan hattın duruş sıklıkları, duruş süresi ve güvenilirlik gibi parametreler hesaplanabilir. Ayrıca, üretim hattının performansını analiz eden, güvenilirlik analizi ile darboğaz oluşturan duruşları tespit ederek bakım faaliyetlerinin planlaması için öneride bulunan bir sistem geliştirilmesi üzerinde çalışılabilir.

Teşekkür

Siemens Gebze Elektrik Ürünleri Fabrikasına, MKD üretim hattı verilerinin tez çalışmasında kullanılmasına izin verdiği için teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; D. ÖZ, bilimsel yayın araştırması, veri toplama, yöntem, bulgular ve sonuçlar, makalenin hazırlanması; R. EDİZKAN ve A. YAZICI bilimsel yayın araştırması, yöntem, bulgular ve sonuçlar, makalenin hazırlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Anonim, 2021, Minitab Industry Solutions, <https://www.minitab.com/en-us/industry/>, erişim tarihi: 15.05.2021.

Ahmadivala, M. (2016). A simulation based approach for reliability evaluation and optimization of time-dependent systems: a case study of production systems (Barin Plast Company) (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Şehir Üniversitesi, İstanbul.

Atamer, Ş. (2009). Makine elemanlarında güvenilirlik ve ömür analizleri, (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Barabady, Javad ve Kumar, Uday. (2008). Reliability Analysis of Mining Equipment: A Case Study of a Crushing Plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. Reliability Engineering and System Safety, 93, 647-653.

Endsley, M.R., Kiris, E.O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. Human Factors, 37(2), 381-394. DOI: <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>

Endsley, M. (2000). Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review. In: Endsley, M.R., & Garland, D.J. (Eds.). Situation Awareness Analysis and Measurement. (1st ed.). CRC Press.

Enzi, A., Khan, S.A. (2022). Automated production line reliability analysis of the crankshaft manufacturing process. Advances in Science and Technology Research Journal, 16(1), 15-27. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/143936>

Ghimire, S., Luis-Ferreira, F., Nodehi, T., Jardim-Goncalves, R. (2016). IoT based situational awareness framework for real-time project management, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 30(1), 74-83. doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130242>

İnceoğlu, F., (2013). Sağkalım analiz yöntemleri ve karaciğer nakli verileri ile bir uygulama (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Malatya.

Koçak, A., İşçioğlu, F. (2018). Meyve suyu dolum hatlarında güvenilirlik analizi, Journal of Yaşar University, 13(50),185-196. DOI: <https://doi.org/10.19168/jyasar.384192>

Kuldaşlı, E.D. (2009). Elektrik enerji sistemlerinde güvenilirlik temelli bakım (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kuo, W. ve Zuo, M. J. (2003). Optimal Reliability Modelling, Principles and Applications. John Wiley and Sons, Inc.

Lall, M., Torvatn, H., Seim, E.A. (2017). Towards Industry 4.0: Increased Need for Situational Awareness on the Shop Floor. In: Lödding, H., Riedel, R., Thoben, KD., von Cieminski, G., Kiritsis, D. (eds). Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing, APMS 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 513, 322-329. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_38

Liberopoulos, G., Tsarouhas, P. (2005). Reliability analysis of an automated pizza production line. Journal of Food Engineering, 69(1), 79-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.07.014>

Omondi, B.A. (2017). Weibull and log-normal distributions in reliability analysis applications, (Yüksek Lisans Tezi), Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Öz, Diler (2021), Akıllı fabrikalarda güvenilirlik analizi temelli durumsal farkındalığın artırılması (Yüksek

- Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Panteli, M. (2013). Impact of ICT reliability and situation awareness on power system blackouts (Doktora Tezi). University of Manchester, Manchester, İngiltere.
- Park, C.Y., Laskey, K.B., Salim, S., Lee, J.Y. (2017). Predictive situation awareness model for smart manufacturing. 2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion), 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/ICIF.2017.8009849>
- Seifoddini, H. ve Djassemi, M. (2001). The Effect of Reliability Consideration on Application of Quality Index. Computer and Industrial Engineering, 40, 65-77.
- Topçu, Ç. (2007). Greenwood ve Kaplan-Meier metodu yardımı ile varyans tahmini (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tsarouhas, P. (2012). Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: a review. International Journal of Food Science and Technology, 47(11), 2243-2251. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2012.03073.x
- Tsarouhas, P.H., Arvanitoyannis, I.S. (2010). Reliability and maintainability analysis of bread production line. Critical reviews in Food Science and Nutrition, 50(4), 327-343.
- Türkan, A.H. (2007). Güvenilirlik analizinde kullanılan istatistiksel dağılım modelleri (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Soltanali H., Rohani A., Tabasizadeh M., Abbaspour-Fard M.H. ve Parida A. (2020). Operational reliability evaluation-based maintenance planning for automotive production line, Quality Technology & Quantitative Management, 17:2, 186-202, DOI: [10.1080/16843703.2019.1567664](https://doi.org/10.1080/16843703.2019.1567664)
- Uzun, A., Özdoğan, A. (2011). Güvenirlik analizlerine dayalı önleyici bakım planlanması. Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 20(1), 303-320.
- Uzuner, M. (2015). Bir işletmede güvenilirlik analizlerine dayalı sistem tasarımı (Yüksek Lisans Tezi). Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ünal, G. (2009). Güvenilirlik merkezli bakım ve bir endüstriyel uygulama (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Woodruff, B.W., Moore, A.H. (1988). 7 Application of goodness-of-fit tests in reliability. Handbook of Statistics, Elsevier, 7, 113-120. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-7161\(88\)07009-9](https://doi.org/10.1016/S0169-7161(88)07009-9)
- Zhang, D., Zhang, Y., Yu, M., Chen, Y. (2014). Reliability defects identification of serial production systems: application to a piston production line. Arabian Journal for Science and Engineering, 39(12), 9113-9125, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1426-7>