



Journal of Turkish Operations Management

Güvenilirlik ve kullanılabilirliğe dayalı sürdürülebilir sistem tasarımı: yeni bir yaklaşım

Merve Uzuner Şahin^{1*}, Orhan Dengiz², Berna Dengiz³

¹ Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

e-mail: muzuner@baskent.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-5660-739>

² Endüstri Mühendisliği Bölümü, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Ankara, Türkiye

e-mail: orhan.dengiz@gmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-0814-2463>

³ Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

e-mail: bdengiz@baskent.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-2806-3308>

*Sorumlu Yazar

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi:

Geliş: 04.04.2021
Revize: 26.04.2021
Kabul: 19.05.2021

Anahtar Kelimeler:

Sistem Güvenilirliği,
Yaşam İmzası,
Görelî Önem İndeksi,
Kullanılabilirlik

Özet

Günümüz rekabet koşullarında üretim sistemlerinde sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla sistem güvenilirliğinin ve kullanılabilirliğinin artırılması için farklı yöntem arayışları araştırmacıların üzerinde çalıştığı önemli bir konudur. Sistem performansının analizi ve iyileştirilmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birinin sistem güvenilirliği olduğu bilinmektedir. Güvenilirlik değeri yüksek olması istenen bir kriter olup sistemde üretilen ürün miktarını doğrudan etkiler. Sistem güvenilirliğinin hesaplanması amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan yapı fonksiyonuna dayalı güvenilirlik hesabı problemin karmaşıklığını artırmaktadır. Bu nedenle, sistem güvenilirlik hesabının daha kolay ve daha kısa sürede yapılabilmesini sağlamak amacıyla alternatif yöntemlerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu amaçla literatürde önerilen yeni bir yöntem ‘yaşam imzası’ yöntemidir. Bir sistemin güvenilirliğinin artırılması için sistem güvenilirliği üzerinde en yüksek etkiye sahip olan bileşenin belirlenmesi, güvenilirlik artışını sağlayan tasarımın elde edilmesinde önemli bilgi sağlamaktadır. ‘Görelî bileşen önem indeksi’ bu amaçla kullanılan bir belirleyicidir. Bu çalışmada, her iki yöntem birlikte kullanılarak sistem güvenilirliği ve dolayısıyla kullanılabilirliği artırılmıştır. Böylece, önceden belirlenen dönemler için sistemin üretim miktarı istenilen düzeyde tutabilmektedir. Önerilen bu yaklaşım bir akü üretim hattında uygulanarak sonuçları değerlendirilmiştir.

Sustainable system design based on reliability and availability: a new approach

Article Info

Article History:

Received: 04.04.2021
Revised: 26.04.2021
Accepted: 19.05.2021

Keywords:

System Reliability,
Survival Signature,
Relative Importance Index,
Availability

Abstract

Different methods for increasing system reliability and availability is an important issue researchers are working on, in order to ensure sustainability in production systems within today's competitive conditions. One of the most important criteria known and used in analysis and improvement of system performance is system reliability. The high reliability value of a system is a desired criterion that directly affects the amount of goods produced in the system. A widely used system reliability calculation; ‘reliability computation based on structure function’ contributes to the problem complexity, therefore it is necessary to develop alternative methods for system reliability computation. One of these methods is the survival signature method. Determining the component which affects system reliability most provides important information in obtaining the design that provides the increase of the reliability of a system. The relative component importance index is used for this purpose. In this study, both methods were used together in order to increase system reliability and thus productivity. The production amount of the system can be kept at the desired level for predetermined periods. Furthermore, this proposed approach is applied in a battery production line and the results are discussed.

1. Giriş

Günümüzde teknolojiye yaşanan hızlı gelişmeler, başta üretim sistemleri olmak üzere çoğu sektörde büyük değişimlerin yaşanmasına sebep olmuştur. Üretim sistemlerinin karmaşık yapısı ve üretim süreçlerini iyileştirerek kullanılabilirliği artırma gereği, üretim süreçlerinin daha etkin bir şekilde değerlendirilmesinin önemini artırmıştır. Karmaşık sistemlerde bileşen sayısı arttıkça, örneğin istasyonlarda paralel ve seri bağlı makinelerin sayısı, ilişkilerin kontrolü zorlaşmaktadır. Örneğin, akü üretim hatlarında, uzun süreli kimyasal işlemlerin yanı sıra mekanik ve elektronik işlemlerin bulunması ve bu işlemlerin bulunduğu istasyonlarda paralel ve seri bağlı yapılara gereksinim duyulması durumunda sistemin incelenmesi ve performans artışı sağlayabilecek yeni tasarımların elde edilmesi için farklı yöntemlere gereksinim duyulmaktadır. Literatürde birçok farklı performans ölçütü vardır. Yaygın olarak kullanılan performans ölçütlerinden biri sistem güvenilirliğidir. Güvenilirlik çalışmalarının başlangıcı, II. Dünya Savaşı'nda kullanılan ve hasar gören uçakların, görevden döndükten sonra hasarlı bölümlerinin incelenerek daha dayanıklı hale getirilmesi üzerinde yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Güvenilirlik teorisinde, 1950'lerin başında önemli ilerlemeler yaşanmış olsa da güvenilirlik teorisinin geliştirilmesindeki asıl ilerleme, Boeing'de istatistiksel bir araştırma ekibinin kurulmasıyla gerçekleşmiştir. 1960'ların başında büyüyen bu ekip, Boeing'de on yıl boyunca, modern Güvenilirlik Teorisinin temel kavramlarını, modellerini ve yöntemlerini geliştirmiştir (Samaniego, 2007). Güvenilirlik iletişim, ulaşım, elektrik güç sistemlerinin tasarımı gibi çoğu gerçek hayat probleminde yaygın olarak kullanılmakta olup bir ürün veya bir sistemin amacına uygun olarak çalışmasını ifade eder.

Literatürde üretim alanında makine ve hat bazında güvenilirlik ve kullanılabilirlik analizlerinin yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Elsayed (Elsayed, 1996), bir paketli gıda üretim hattının sistem güvenilirliği ve kullanılabilirliğini incelemiş ve makinelerin arıza oranları kullanılarak performans iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Gupta ve diğ. (2007), bir plastik boru üretim tesisinin güvenilirlik ve kullanılabilirlik analizini; Gupta ve diğ. (2008), bir kauçuk tüp üretim sisteminin kullanılabilirlik analizini gerçekleştirmiştir. Görkemli ve Kapan Ulusoy (2009, 2010), bir üretim sisteminin güvenilirlik ve kullanılabilirliğinin analiz edilmesi amacıyla bulanık bayesgil bir yaklaşım önermiştir. Bu yaklaşım kapsamında makinelerin arıza ve bakım süreçlerindeki belirsizlikler dikkate alınmıştır. Garg ve diğ. (2010), otomobil endüstrisinde bir yağ karteri üretim sisteminin kullanılabilirliğini uygun bakım planlaması kullanılarak artırmıştır. Tsarouhas (2011), dört pizza üretim hattının arıza verilerini kullanarak hatların karşılaştırmalı performans analizini gerçekleştirmiştir. Tsarouhas (2012), bir yiyecek üretim hattında güvenilirlik, kullanılabilirlik ve bakım analizi üzerine çalışmıştır. Loganathan ve diğ. (2016), arızalanma ve tamir oranı ile üretim sistemi kullanılabilirliğini değerlendirmek için bir yöntem önermiş ve bir otomotiv üretim tesisinde uygulamıştır. Koçak ve İşçioğlu, (2018), bir meyve suyu dolmuş hattında güvenilirlik analizi yapmış ve üretim hatlarında arızalanan makineler için bakım faaliyetlerine ait alt yapının kurulmasını amaçlamışlardır. Literatürdeki bu çalışmalarda güvenilirlik genellikle tamir bakım politikaları için kullanılmıştır. Uzuner Şahin, Dengiz ve Atalay (2020), makine arıza ve tamir sürelerinin bulanık olduğu durum için sistemin performansını (güvenilirlik değerini) klasik yöntem olan yapı fonksiyonu ve bulanık kullanılabilirlik yaklaşımı ile analiz etmiş ve daha yüksek performansa sahip yeni bir sistem tasarımı önermişlerdir.

Sistem güvenilirliği, uzun yıllardır bileşenlerin durumları ve sistem içerisindeki konumlarının dikkate alınmasına dayalı olan *Yapı Fonksiyonu* kullanılarak hesaplanmaktadır. Yapı fonksiyonuna dayalı güvenilirliğin temel teorisi ve araçlarının gelişmesine Birnbaum, Esary ve Saunders tarafından 1961'de yayınlanan çalışma öncülük etmiştir (Birnbaum, Esary ve Saunders, 1961). Bu çalışmada, bir sistemin performansı ile sistemi oluşturan bileşenlerin performansı arasındaki temel bağlantıyı incelemek için bir yapı fonksiyonu oluşturulmuştur. n bileşenden oluşan bir sistemin tüm olası durum vektör uzayı $\{0,1\}^n$ ve sistemin durumu, yapı fonksiyonu $\phi: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$ ile gösterilir. Yani, n bileşenden oluşan bir sistem için toplamda 2^n farklı bileşen durumu (kombinasyonu) mevcuttur. Bu yöntem karmaşık sistem tasarımları için hesaplaması neredeyse imkansız bir karmaşıklık oluşturmaktadır (Samaniego, 2007). Bu nedenle, daha kolay uygulanabilir ve makul sürede hesaplanabilir yeni güvenilirlik hesaplama yöntemleri araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Samaniego (Samaniego, 1985), sistem güvenilirlik hesaplamasının sistem tasarımından bağımsız olarak yapılabileceğini araştırmış ve *Sistem İmzası* kavramını geliştirmiştir. Sistem güvenilirliğinin, bileşenlerinin sistem içerisinde buldukları konumdan bağımsız olarak hesaplanması, sistem tasarımında yapılan değişikliklerin etkilerinin daha hızlı ve kolay şekilde görülebilmesini sağlamaktadır. Bulut ve Yaman (2013, 2014), aynı ve farklı boyutlu tutarlı sistemlerin *sistem imzası* ile nasıl karşılaştırdıklarını incelemiştir. Sistem imzası, bileşenlerin özdeş özellikte olduğu sistemlerde kullanılmakta olup sisteme özgü bir vektördür. Dolayısıyla, sistem imzası kavramında, bileşenlerin özdeş olduğu (homojen bileşenler) durum, diğer bir deyişle sistemde tek bir bileşen türü olduğu varsayımı kullanılmaktadır. Diğer yandan, her bir alt sistemde aynı tür bileşenin bulunduğu durumda da sistem imzası her bir alt sistem için ayrı ayrı kullanılabilir. Ancak, gerçek hayat problemlerinin çoğunda sistem veya alt sistemler içerisinde özdeş

bileşenler yerine farklı özelliklere sahip bileşenler (heterojen bileşenler) kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu tür bileşenlerin kullanıldığı sistemlerin güvenilirliklerinin hesaplanması için sistem imzası kavramı temeline dayanan ve *Yaşam İmzası (Yİ)* adı verilen yeni bir hesaplama yöntemi 2012 yılında Coolen ve Coolen-Maturi tarafından önerilmiştir (Coolen ve Coolen-Maturi, 2012). *Yİ*, sistem tasarımındaki değişikliklerin etkisinin hızlı ve kolay şekilde görülebilmesini sağlar ve birden çok bileşen türünün olduğu sistemler için kullanılabilir (Feng, Patelli, Beer ve Coolen, 2016).

Sistemler genellikle sistem performansı üzerinde farklı derecede önemi olan bileşenlerden oluşmaktadır (Kuo ve Zhu, 2012). Sistem güvenilirlik analizinde, *Bileşen Önemi (Component Importance)* ölçütü, sistemin tasarım, iyileştirme ve kontrol aşamaları için oldukça kullanışlıdır. Bileşen önemi yüksek olan bir bileşenin güvenilirliğinin yüksek veya düşük olması sistem güvenilirliği üzerinde yüksek etkiye sahiptir. Amaca bağlı olarak, literatürde birçok farklı önem ölçütü tanımlanmıştır. Bileşen önemi ölçütü, sistem bileşenlerinin önem düzeylerinin ölçülmesine ve sistemdeki en "*kritik*" bileşenin belirlenmesine olanak sağlar. Sistemdeki her bir bileşenin arızalanma durumlarının sistem üzerindeki etkileri incelenir ve sistem içerisindeki zayıf noktalar tespit edilir. Bileşen önemi ölçütü kavramı ilk olarak Birnbaum tarafından 1968 yılında tanımlanmış ve yapısal, güvenilirlik ve yaşam süresi önem ölçütleri olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır (Birnbaum, 1968). Literatürde önerilen bileşen önemi ölçütlerinden bazıları, yapı önemi ölçütü (Borgonovo, 2007), Fussell-Vesely önemi ölçütü (Fussell, 1975; Vesely, 1970), kısmi önem ölçütü (Borgonovo ve Apostolakis, 2001) ve arıza kritiklik indeksidir (Wang, Loman ve Vassiliou, 2004). Kuo ve Zhu (2012) güvenilirlik önem ölçümlerini incelemiştir. Dutuit ve Rauzy tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, literatürde yer alan önem ölçülerinin matematiksel ve algoritmik temellerine değinilmiş ve hangi önem ölçütünün hangi özellikteki sistemler için uygun olduğu belirtilmiştir (Dutuit ve Rauzy, 2014). Feng ve diğ. (2016), bileşenlerin arızalanma sürelerinde belirsizlik olduğu durum için *Yİ* kullanarak sistem güvenilirliğini hesaplamış ve yeni bir bileşen önem ölçütü önermiştir. Li, Coolen, Zhu ve Tan (2020), bileşen güvenilirlik ölçütünün sistem güvenilirliğinin en iyilenmesi ve optimum bakım politikaları geliştirme amacıyla kullanımının önemine değinmiştir. Feng ve diğ. (2016), bileşen arızalanma sürelerindeki belirsizliği dikkate alarak sistem güvenilirliğinin hangi aralık içerisinde değer aldığını ve sistemin kritik bileşenini belirlemiştir. Ancak, mühendislik alanında yapılan çalışmalarda kritik bileşenin belirlenmesinin yanısıra sistemin güvenilirliğini arttırmak amacıyla yeni bir tasarım önerisi gerekli olmaktadır.

Yukarıda yer alan çalışmalarda olduğu gibi literatürde güvenilirlik, genel olarak klasik yaklaşımla, *Yapı Fonksiyonuna* dayalı olarak hesaplanmaktadır. Literatürde yer alan bu çalışmalarda güvenilirlik, sistemlerin bakım onarım çalışmalarına temel oluşturmak veya sistem performansının incelenmesi amacıyla hesaplanmaktadır. Bizim çalışmamızda önerilen yaklaşımın amacı; sistemin zaman içinde yıpranmaya bağlı olarak değişen güvenilirlik ve dolayısıyla kullanılabilirlik değerlerinin önceden hesaplanarak sistemin üretebileceği ürün sayısının zamana bağlı izlenmesini sağlamak ve böylece gerekli zamanlarda sistemde iyileştirme yapmaktır.

Sistemlerin iyileştirilmesi amacıyla yeni tasarımlar benzetim modeli kullanılarak darboğaz analizleri ile de elde edilebilmektedir. Bilindiği üzere benzetim modelinin kurulması ve çalıştırılması zahmetli, zaman isteyen ve dolayısıyla maliyetli bir yöntemdir. Sistem içindeki tüm stokastik (olasılıklı) proseslerle ilgili veri toplanması ve bu verilere uygun dağılım modellerinin belirlenmesi benzetim modelinin temel girdilerini elde etmek için gerekli ve önemli bir adımdır. Çoğu zaman veri toplanmasında problemler yaşanmakta yada uzun zamanlar almaktadır. İmalat sektöründe sağlıklı veriye erişim zorluğu en çok karşılaşılan problemlerden biridir. Öte yandan güvenilirliğin ve kullanılabilirliğin uzun dönemler için benzetim modeli ile izlenmesi benzetim modelinin karmaşıklığını ve dolayısıyla çalışma zamanını çok artırmaktadır. Dolayısıyla veri gereksinimini azaltacak, daha basit ve hızlı bir yöntem arayışı bu çalışmanın motivasyonunu oluşturmuştur. Önerilen yaklaşımda sadece arızalanma dağılımları ve tamir oranlarının bilinmesi yeterli olmaktadır. Bu yönüyle bu çalışmada ilk defa önerilen bu yaklaşım üretim sistemlerinin tasarımında etkin bir şekilde kullanılabilir olacaktır.

Bu çalışmada, istenen güvenilirlik değerini sağlayan bir sistem tasarımı elde etmek amacıyla bileşen önem ölçütü olarak *Görelî Önem İndeksi (GÖİ)* ile sistemdeki en kritik bileşen belirlenmiş mevcut sistem güvenilirliği *Yİ* yöntemiyle hesaplanmıştır. Buradan hareketle sistemin güvenilirliğini arttırmak amacıyla yeni bir sistem tasarımı önerilmiştir. Daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni bir sistem tasarımı elde ederek üretim artışını sağlamak için *Yİ* yöntemi ve bileşen önem ölçütü bildiğimiz kadarıyla ilk kez bu çalışmada birlikte kullanılmıştır. Daha önceki çalışmalarda bu amaçla ne birlikte ne de ayrı ayrı kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde önerilen yöntem ile ilgili açıklamalar verilmiştir. Üçüncü bölümde, bir gerçek hayat problemi ele alınarak daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistem tasarımı önerilen yöntemle elde edilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır.

2. Sistem güvenilirliğinin artırılması için bir yaklaşım

Güvenilirliği yüksek yeni bir sistem tasarımı elde etmek için bu çalışmada yeni bir yaklaşım önerilmektedir. YI ve $GÖİ$ 'nin birlikte kullanıldığı bu yöntemde öncelikle sistemde arızaların ortaya çıktığı bileşenler belirlenir. Sistem güvenilirliği Bölüm 2.1'de açıklandığı şekilde YI ile hesaplanır. Ardından her bir bileşenin $GÖİ$ 'si hesaplanarak güvenilirlik üzerinde etkisi en yüksek olan bileşen belirlenir ve paralel bağlı yapı içerisinde, varsa sistemin kısıtları dikkate alınarak, ilgili bileşen sayısı artırılır. Böylece daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistem tasarımı elde edilir. $GÖİ$ 'si en yüksek olan birden fazla bileşen varsa bu durumda arızalanma oranlarına bakılarak arızalanma oranı en yüksek olandan başlanarak sistemin güvenilirliği istenilen düzeye ulaşana dek işlemlere devam edilir. Önerilen yaklaşım için kullanılacak yöntemler sırasıyla açıklanmıştır.

2.1 Yaşam imzası

Son yıllarda giderek ilgi gösterilen bir yöntem olan yaşam imzası, farklı türdeki bileşenlerin bile sistem güvenilirlik hesabını kolaylaştırmaktadır. Bu yeni hesaplama yöntemi, birden fazla türde bileşenden oluşan karmaşık sistemleri analiz etmek için ilk kez 2012 yılında Coolen ve Coolen-Maturi tarafından önerilmiştir (Coolen ve Coolen-Maturi, 2012). Ardından, yaşam imzasının farklı özellikteki sistemler için uygulamaları yapılmıştır (Aslett, Coolen ve Wilson, 2015; Coolen, Coolen-Maturi ve Al-Nefaiee, 2014; Coolen ve Coolen-Maturi, 2015).

n adet bileşenden oluşan tutarlı bir sistemde i 'inci bileşenin durumu x_i ile gösterilir ve bileşen çalışır durumda ise $x_i = 1$; değilse $x_i = 0$ olarak tanımlanır. Bu durumda, sistemde yer alan bileşenlerinin durum vektörü, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \{0, 1\}^n$ olarak gösterilir. Sistem durumu, bileşen durum vektörüne dayalı olarak $\phi = \phi(x): \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}$ şeklinde tanımlanır. Burada, $\phi(x)$ sistemin yapı fonksiyonu olmak üzere sistemin durumu, sistem çalışır durumda ise $\phi = 1$; değilse $\phi = 0$ değerini alır. Toplam n adet bileşenden oluşan ve $K \geq 2$ tür bileşen bulunan bir sistemde n_k her bir bileşen türüne ait toplam bileşen sayısını gösterir ve $n = \sum_{k=1}^K n_k$ 'dir. Sistemde yer alan aynı türdeki bileşenlerin arızalanma zamanlarının bağımsız ve özdeş olarak dağıldığı veya değişebilir olduğu varsayılmaktadır. Durum vektöründe bileşen sıralamasının rastgele yapılması sayesinde aynı tür bileşenler birlikte gruplanabilir. Böylelikle, i 'inci tür bileşenlerin durumları $\underline{x}^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_{n_k}^k)$ olarak gruplandığında, durum vektörü $\underline{x} = (\underline{x}^1, \underline{x}^2, \dots, \underline{x}^K)$ şeklinde yazılır. Coolen ve Coolen-Maturi (2012) tarafından tanımlanan YI , $l_k = 0, 1, \dots, n_k$ ve $k = 1, 2, \dots, K$ olduğu durum için $\Phi(l_1, l_2, \dots, l_K)$ şeklinde gösterilir ve her bir k tür bileşen için n_k adet içerisinde l_k tanesi çalışır durumdayken sistemin çalışma olasılığını ifade eder ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$). l_k bileşen içerisinde $x_i^k = 1$ olduğu toplam $\binom{n_k}{l_k}$ adet \underline{x}^k vardır, böylece $\sum_{i=1}^{n_k} x_i^k = l_k$ ($k = 1, 2, \dots, K$) olur ve S_{l_1, l_2, \dots, l_K} , sistemin tamamı için mümkün tüm durum vektörlerinin kümesini gösterir.

Farklı türlerdeki bileşenlerin rassal arıza sürelerinin tamamen bağımsız olduğunu ve ayrıca aynı tür bileşenlerin birbirleri arasında değiştirilebilir olduğu varsayımı altında, YI aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$\Phi(l_1, l_2, \dots, l_K) = \left[\prod_{k=1}^K \binom{n_k}{l_k} \right]^{-1} \times \sum_{\underline{x} \in S_{l_1, l_2, \dots, l_K}} \phi(\underline{x}) \quad (1)$$

$C_k(t) \in \{1, 2, \dots, n_k\}$, t anında çalışır durumda olan k 'inci tür bileşen sayısını gösterir. Aynı türdeki bileşenlerin birikimli olasılık yoğunluk fonksiyonu bilindiği ve k 'inci tür bileşenler için $F_k(t)$ olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, farklı türdeki bileşenlerin arızalanma zamanlarının birbirinden bağımsız olduğu varsayımı ile,

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcap_{k=1}^K \{C_k(t) = l_k\}\right) &= \prod_{k=1}^K P(C_k(t) = l_k) \\
&= \prod_{k=1}^K \binom{n_k}{l_k} \{F_k(t)\}^{n_k-l_k} \{1-F_k(t)\}^{l_k}
\end{aligned} \tag{2}$$

olur ve K tür bileşenin bulunduğu sistemin güvenilirlik fonksiyonu Eş. 3'de verilmektedir.

$$P(T_S > t) = \sum_{l_1=0}^{n_1} \dots \sum_{l_K=0}^{n_K} \left[\Phi(l_1, \dots, l_K) \prod_{k=1}^K \binom{n_k}{l_k} \{F_k(t)\}^{n_k-l_k} \{1-F_k(t)\}^{l_k} \right] \tag{3}$$

Eş. 3'te görüldüğü üzere, YI , sistemin yapısından bağımsız olarak yalnızca bir kez hesaplanır (Coolen ve Coolen-Maturi, 2012). Bu nedenle bu eşitlik NP-zor olan problemler için çözüm zamanı açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

2.2 Göreli önem indeksi

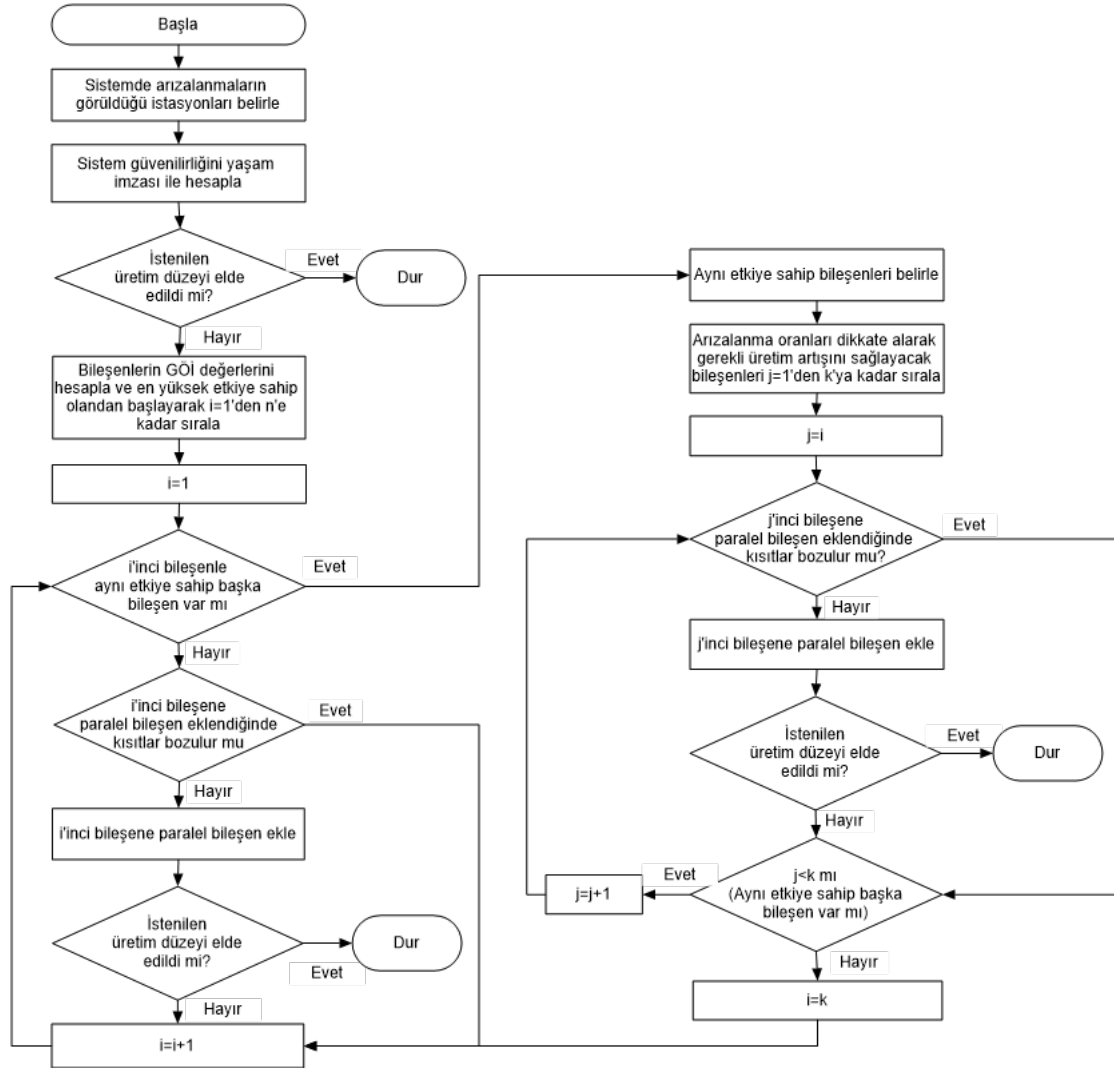
Sistem güvenilirliği üzerinde en yüksek etkiye sahip olan bileşenin (en önemli/kritik bileşen(ler)) belirlenmesi işlemi sistem güvenilirliğinin artırılmasında önemli bir yer tutar. Bu bileşen/lere paralel bir bileşen eklenerek güvenilirlik artışı sağlanabilir. Bu nedenle, sistem güvenilirliğinde kritik öneme sahip bileşen(ler)in belirlenmesi için literatürde çok sayıda önem ölçütü önerilmiştir (Borgonovo, 2007; Borgonovo ve Apostolakis, 2001; Fussell, 1975; Vesely, 1970). Önem ölçütleri, sistemde hangi bileşenlerin sistemin arızası üzerinde daha etkili olduğunu veya sistem güvenilirliğinin artırılması için daha önemli olduğunu gösteren sayısal bir sıralama sağlar. Bu çalışmada, Feng ve diğ. (2016) tarafından önerilen $GÖİ$ kullanılmıştır. $GÖİ$, herhangi bir i 'inci bileşen çalışır durumda iken sistemin çalışma olasılığı ile aynı i 'inci bileşen arızalı durumda iken sistemin çalışma olasılığı arasındaki fark olarak hesaplanır (Eş. 4):

$$GÖİ_i = P(T_S > t | T_i > t) - P(T_S > t | T_i \leq t) \tag{4}$$

$GÖİ_i$, her bir bileşenin sistem güvenilirliği üzerindeki etkisini ölçen bir değerdir. Örneğin, $GÖİ_i$ değeri büyük olan bileşen, belirli bir t anında sistem güvenilirliği üzerinde büyük etkiye sahiptir. t zamanında, en büyük $GÖİ_i$ değerine sahip bileşen en "kritik" bileşendir. Kritik bileşenin belirlenmesi, tamir-bakım süreçlerinin ve yeni bileşen alımlarının planlanmasında, sistemin yaşam ömrünün hesaplanmasında önemlidir.

2.3 Önerilen yaklaşımın akış diyagramı

Bu çalışmada önerilen ve YI ve $GÖİ$ 'nin birlikte kullanıldığı yöntem ile ilgili akış diyagramı Şekil 1'de verilmektedir. Bu kapsamda öncelikle sistemde arızaların ortaya çıktığı bileşenler belirlenir. Ardından, sistem güvenilirliği YI ile hesaplanır. Daha sonra her bir bileşenin $GÖİ$ 'si hesaplanarak güvenilirlik üzerinde etkisi en yüksek olan bileşen belirlenir ve paralel bağlı yapı içerisinde ilgili bileşen sayısı artırılarak daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistem tasarımı elde edilir. $GÖİ$ 'si en yüksek olan birden fazla bileşenin olduğu arızalanma oranlarına bakılarak üretim miktarı istenilen düzeye ulaşana dek Şekil 1'de de görüldüğü gibi işlemlere devam edilir.



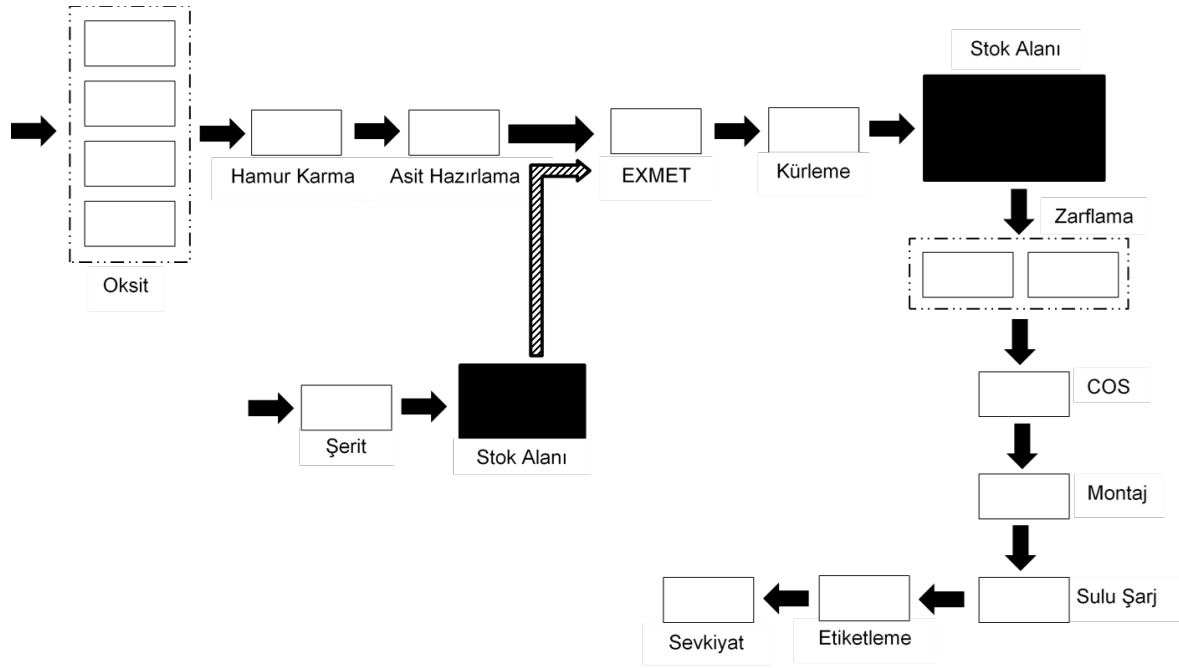
Şekil 1. Sürdürülebilir üretime sahip sistem tasarımı elde etmek için önerilen yaklaşımın akış diyagramı

3. Uygulama

Bu bölümde, bir akü üretim sistemi dikkate alınmıştır. Bu makalede önerilen yaklaşım kullanılarak, karmaşık bir yapıya sahip bir sistem olan bu akü üretim hattında güvenilirlik analizi ve daha yüksek güvenilirliğe sahip yeni sistem tasarımı elde edilebilmiştir. Böylece, sistemin yıpranma ve bozulmalarından kaynaklanan aylık üretim miktarındaki azalma dönemleri önceden izlenerek, belli bir plan dahilinde gerekli önlemler alınabilecektir.

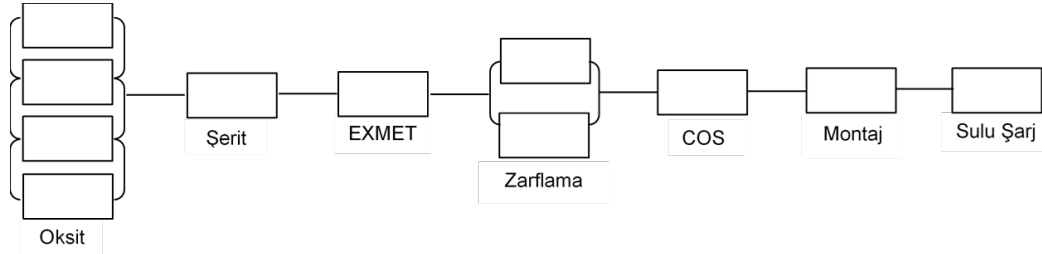
3.1 Problem tanımı: akü üretim hattı

Akü üretimi yapan bu firmada aylık ürün çıktısının en az 7000 adet olması istenmektedir (Uzuner, 2015). On iki iş istasyonundan oluşan bu akü üretim hattının şematik gösterimi Şekil 2'de verilmektedir. Oksit biriminde saf kurşun külçeleri eritilmekte ve oksidi giderilmektedir. Hamur karma biriminde, gelen kurşun oksit hamur formuna getirilmektedir. Asit hazırlama istasyonuna gelen hamurlar asit çözeltisiyle kaplanmaktadır. Şerit istasyonunda alışımlı kurşun külçelere çeşitli alışımlar eklenmektedir. Asit hazırlama ve şerit istasyonundan gelen asit kaplanmış hamurlar EXMET biriminde birleştirilerek fırınlanmaktadır. Fırınlanan plakalar kürlenmek için kür odalarına alınır. Kür odalarında belirli süre bırakılan plakalar sırasıyla zarflama, COS (Cost-On-Strap) ve montaj birimlerine uğrayarak hizalama ve görsel kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Sulu şarj istasyonunda, aküler sulu şarj edilerek asit seviyeleri kontrol edilmektedir. Kontrolten geçen aküler etiket biriminde etiketlenerek depoya gönderilmektedir. Firma, mevcut üretim hattı ile aylık akü üretimi hedefine ulaşamamaktadır. Bu nedenle, ilgili dönemlerde sistem güvenilirliği artırılarak elde edilen yeni tasarım ile istenen üretim miktarına ulaşılması amaçlanmaktadır.



Şekil 2. Akü üretim hattının şematik gösterimi (Kaynak: (Uzuner, 2015))

Ele alınan bu üretim hattı bundan böyle sistem olarak geçecektir. Bu sistemde iş istasyonlarındaki makineler bileşen olarak adlandırılmıştır. Sistemde arızalanmaların görüldüğü istasyonlar Şekil 3'te verilmektedir. Sistem bileşenlerinin arızalanma dağılımları üstel dağılıma uygundur. Bu veriler gerçek sistem kayıtlarından elde edilen veriler olup, Uzuner (2015)' den alınmıştır. Her bir bileşen için dağılım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Sistemde arızalanmaların ortaya çıktığı istasyonlar (Kaynak: (Uzuner, 2015))

Tablo 1. Arızalanma dağılım (üstel dağılım) parametreleri

Bileşen Adı	Sayısı (m_k)	Dağılım Parametresi (λ)
Oksit	4	0,000022
Şerit	1	0,000091
EXMET	1	0,000265
Zarflama	2	0,000342
COS	1	0,000548
Montaj	1	0,000851
Sulu Şarj	1	0,000182

Tablo 1'de yer alan bileşenler sırasıyla $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ ve l_7 ile gösterilerek imza vektörü oluşturulmuştur. R paket programında *ReliabilityTheory* paketi kullanılarak sistemin YI 'si kolaylıkla hesaplanabilmektedir (Aslett, 2012;

Huang, Aslett ve Coolen, 2019). Sistemin arızalı olduğu durumlar $(\Phi(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7) = 0)$ hariç sistemin YI 'si Tablo 2'de verilmektedir.

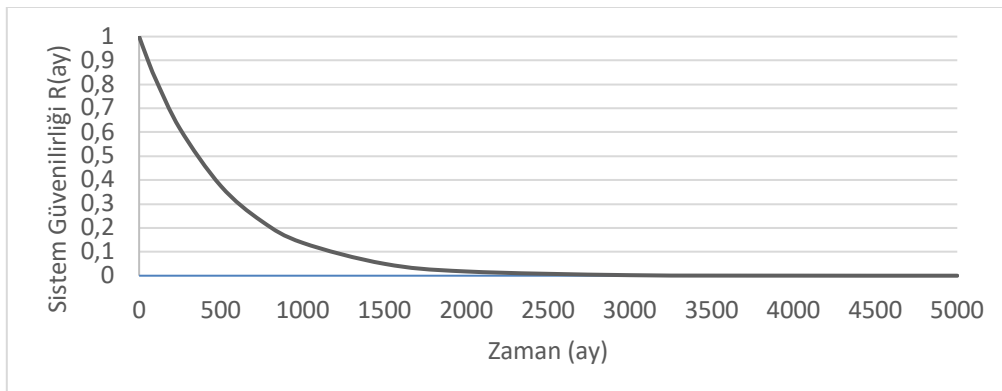
Tablo 2. Sistemin yaşam imzası

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	$\Phi(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7)$
1	1	1	1	1	1	1	1,00
1	1	1	2	1	1	1	1,00
2	1	1	1	1	1	1	1,00
2	1	1	2	1	1	1	1,00
3	1	1	1	1	1	1	1,00
3	1	1	2	1	1	1	1,00
4	1	1	1	1	1	1	1,00
4	1	1	2	1	1	1	1,00

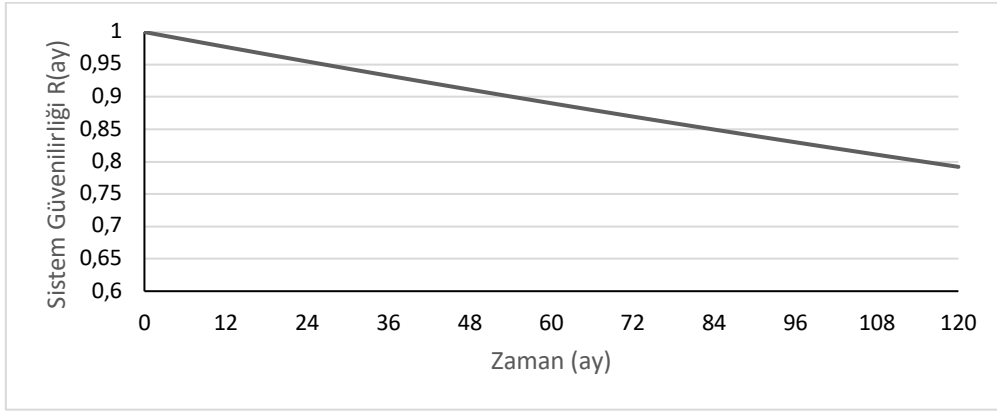
Sistemde mevcut bileşen sayıları $m_1 = 4, m_2 = 1, m_3 = 1, m_4 = 2, m_5 = 1, m_6 = 1$ ve $m_7 = 1$ 'dir. Sistemin YI 'si $l_1 \in \{0, 1, 2, 3, 4\}, l_2, l_3, l_5, l_6, l_7 \in \{0, 1\}$ ve $l_4 \in \{0, 1, 2\}$ için tüm olası kombinasyonlar dikkate alınarak hesaplanır ve durum vektörü $\underline{x} = (x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, x_1^2, x_1^3, x_1^4, x_2^4, x_1^5, x_1^6, x_1^7)$. Örneğin, $\Phi(2, 1, 1, 2, 1, 1, 1)$ değeri hesaplanırken $x_1^1 + x_2^1 + x_3^1 + x_4^1 = 2, x_1^2 = 1, x_1^3 = 1, x_1^4 + x_2^4 = 2, x_1^5 = 1, x_1^6 = 1, x_1^7 = 1$ olan tüm olası \underline{x} vektörleri dikkate alınır. Bu özellikleri sağlayan toplam 6 olası durum vektörü tanımlanır ve bunların tamamında sistem çalışır durumdadır. Aynı türdeki bileşenlerin arızalanma dağılımlarının bağımsız ve özdeş olduğu ve farklı türde bileşenlerin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı nedeniyle bu 6 vektörün görülme olasılığı eşittir. Dolayısıyla, $\Phi(2, 1, 1, 2, 1, 1, 1) = 6/6 = 1$. Eş. 3'e göre elde edilen sistem güvenilirliği fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$P(T_S > t) = \sum_{l_1=0}^4 \sum_{l_2=0}^1 \sum_{l_3=0}^1 \sum_{l_4=0}^2 \sum_{l_5=0}^1 \sum_{l_6=0}^1 \sum_{l_7=0}^1 \left[\Phi(l_1, \dots, l_7) \prod_{k=1}^7 \binom{m_k}{l_k} \{F_k(t)\}^{m_k-l_k} \{1-F_k(t)\}^{l_k} \right] \quad (5)$$

Burada $F_k(t)$, bileşenin kümülatif yaşam zamanı dağılımı yani başka bir deyişle arızalanma olasılığı olarak ifade edilir. Sistem güvenilirliği fonksiyonunun genel formu Şekil 4'te; 120 aylık kısmı ise Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 4. Güvenilirlik fonksiyonunun genel formu



Şekil 5. Güvenilirlik fonksiyonunun 120 aylık bölümü

Üretim miktarı, sistemin üretim kapasitesi ve kullanılabilirliği dikkate alınarak elde edilebilmektedir (Elsayed, 1996). Kullanılabilirlik, bir sistemin veya sistemde yer alan bileşenin, belirli bir zamanda veya belirli bir zaman dilimi içinde, işlevine uygun şekilde çalışma olasılığıdır (Verma, Srividya ve Prabhu Gaonkar, 2007) ve sistemin başarısızlık oranı ($h(t)$) ve tamir oranı (μ) kullanılarak Eş 8'e göre hesaplanır (Elsayed, 1996). Sistemin arıza olasılık fonksiyonu, sistem güvenilirlik fonksiyonun türevi ile Eş 6'ya göre elde edilir. Sistemin başarısızlık oranı ise arıza olasılık fonksiyonu ve güvenilirlik fonksiyonu kullanılarak Eş 7'ye göre hesaplanır.

$$f(t) = \frac{-dR(t)}{dt} \quad (6)$$

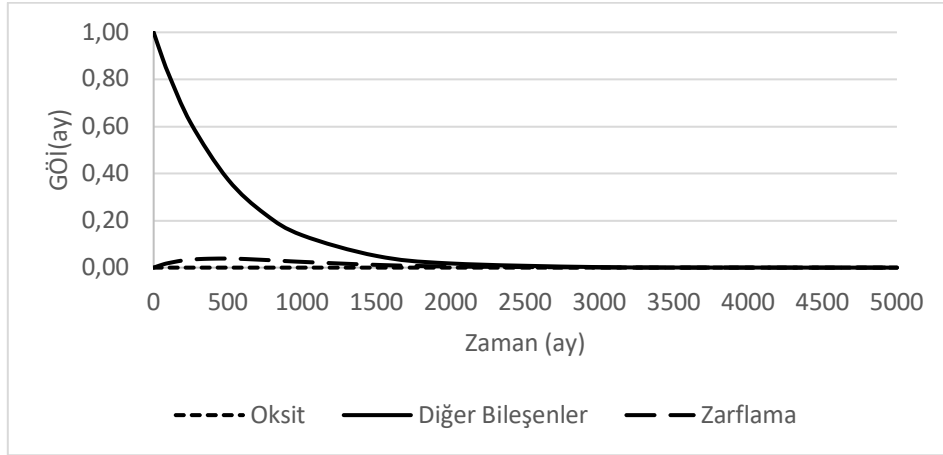
$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (7)$$

$$A(t) = 1 - \frac{h(t)}{h(t) + \mu} \quad (8)$$

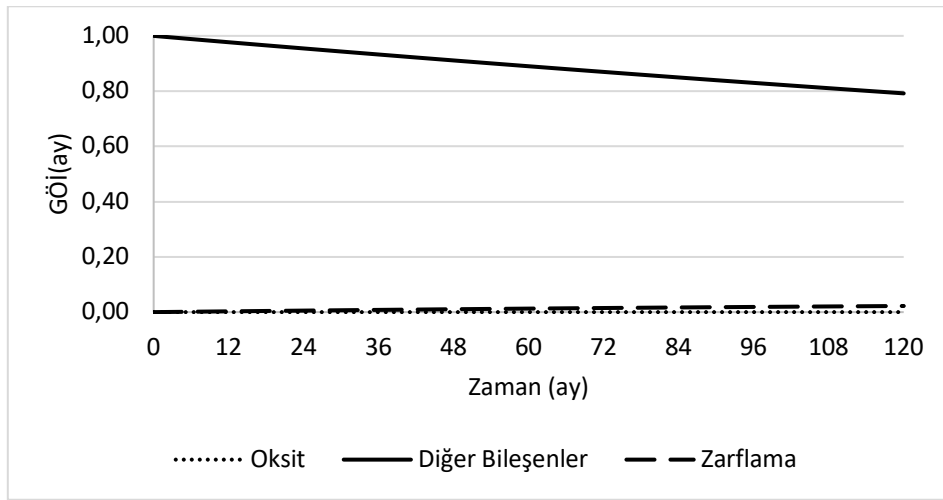
Mevcut sistem tasarımı ile sistem güvenilirliğine bağlı olarak sistem kullanılabilirliği ve üretilen ürün miktarının firmanın beklentisini karşılayıp karşılamadığı incelenir. Firmadan alınan bilgiye göre bu üretim hattının aylık akü üretim kapasitesi 7500 akü/ay'dır. Üretim miktarı, kullanılabilirlik ve sistemin üretim kapasitesinin çarpımıyla elde edilir (Elsayed, 1996). Mevcut sistem tasarımının $t=1$ zamanı için güvenilirliği 0,9980 ve sistem kullanılabilirliği 0,8920 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda $t=1$ zamanı için üretim miktarı, $0,8920 \times 7500 = 6690$ akü olup firma beklentisinin altında bir değerdir. Firmanın üretim beklentisini karşılayabilmesi için bir sistem iyileştirme çalışmasına ihtiyaç duyduğu açıkça görülmektedir.

Birinci iyileştirme çalışması:

Çalışmanın bu kısmında sistem güvenilirliği üzerinde en yüksek etkiye sahip olan bileşen bulunarak sistemde güvenilirlik artışı sağlayacak yeni tasarım Şekil 1'de verilen akış şemasına göre elde edilecektir. Bu amaçla her bir bileşenin $G\ddot{O}I$ değeri fonksiyonu genel olarak 5000 ay için Şekil 6'da, 120 ay için ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

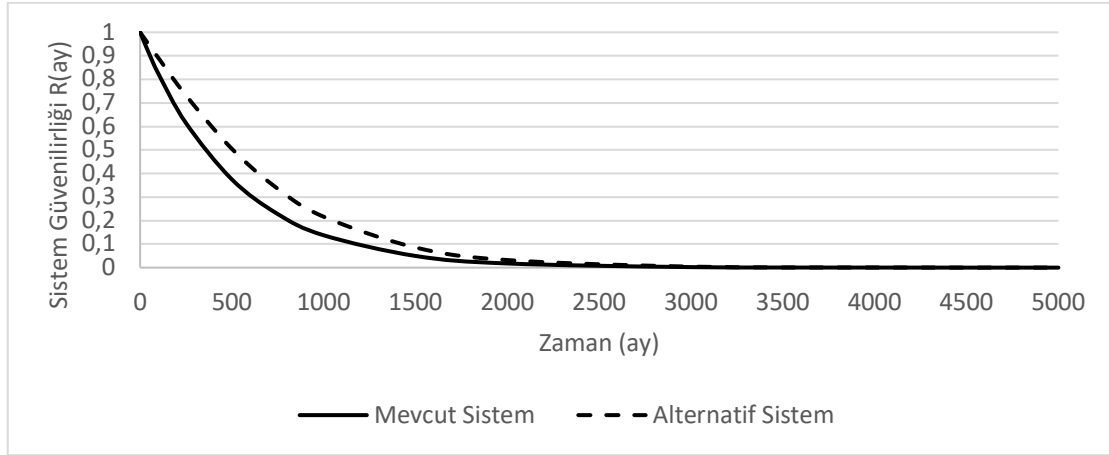


Şekil 6. GÖİ fonksiyonları

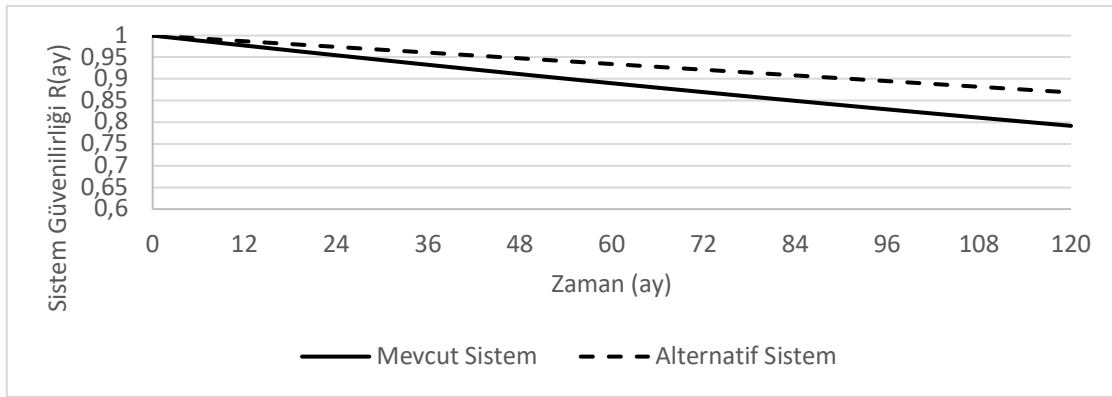


Şekil 7. 120 aylık GÖİ fonksiyonları

Şekil 7 incelendiğinde, Oksit bileşeninin GÖİ değeri 0 değerinden başlayıp 0,000000014 değerine doğru giderken, Zarflama bileşeninin GÖİ değeri ise 0 değerinden başlayıp 0,022210839 değerine doğru gitmektedir. Sistemde seri bağlı olarak yer alan Şerit, EXMET, COS, Montaj ve Sulu Şarj bileşenlerinin GÖİ değeri eşit değerde ve diğerlerine göre çok yüksek olup aynı azalma eğilimine sahiptir (Şekil 6 ve Şekil 7'de diğer bileşenler adıyla gösterilmiştir). Bu bileşenlerin herhangi birinin arızalanması sistem güvenilirliğini en yüksek şekilde etkiler. Bu durumda, en yüksek GÖİ değerine sahip diğer bileşenler olarak adlandırılan bileşenler arasından sistem için farklı zayıflık noktası oluşturan -örneğin arızalanma oranları- bilgileri kullanılarak sistem tasarımında iyileştirme sağlanabilir. Bu nedenle, diğer bileşenler arasında en yüksek arızalanma oranına sahip olan Montaj bileşeninin öncelikle ele alınması gereken bileşen olduğuna karar verilmiştir. Bu durumda, montaj bileşenine paralel bir bileşenin eklenip eklenemeyeceği kararı sistem kısıtlarına uygunluğu dikkate alınarak verilir. Uygun olması durumunda paralel bileşen eklenmesiyle sistemde sağlanacak güvenilirlik artışı hesaplanarak yeterli iyileşmenin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Mevcut duruma göre sistem güvenilirliğinde elde edilen iyileşme (alternatif durum) genel olarak 5000 ay için Şekil 8'de, özel durumda 120 ay için Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 8. Mevcut ve alternatif sistem için sistem güvenilirlik fonksiyonları



Şekil 9. 120 aylık mevcut ve alternatif sistem güvenilirlik fonksiyonları

Şekil 8 ve Şekil 9'da görüldüğü üzere, önerilen alternatif sistemin güvenilirliği mevcut sisteme göre daha düşük bir azalış eğilimine sahiptir. Dolayısıyla sistem güvenilirliğinde elde edilen bu iyileşme ilgili üretim hattında üretilen akü sayısında artış sağlayacaktır. Daha önce açıklanan Eş 6-8 kullanılarak önerilen alternatif sistem için hesaplanan kullanılabilirlik değeri sistemin üretim kapasitesi ile çarpılarak üretim miktarı hesaplanmıştır. Böylece, önerilen alternatif sistem tasarımının $t=1$ zamanı için güvenilirliği 0,9989 ve sistem kullanılabilirliği 0,9363 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda $t=1$ zamanı için üretim miktarı, $0,9363 \times 7500 = 7022$ akü olup firma beklentisinin üstünde bir değerdir. Bu değer firmanın üretim beklentisini karşılayabilecek bir değer olup bu alternatif sisteme göre tasarım yapıldığında; zaman içinde bozulmalara bağlı olarak değişen sistem güvenilirliği ve ona bağlı hesaplanan kullanılabilirlik ile (Bkz. Şekil 12) elde edilen akü üretim sayıları Tablo 3'te verilmiştir. Örneğin, $t=1$ için üretim miktarı, $0,9363 \times 7500 = 7022$ iken $t=6$ için $0,9359 \times 7500 = 7019$ akü olarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Alternatif sistem tasarımı ile üretililebilecek akü sayıları

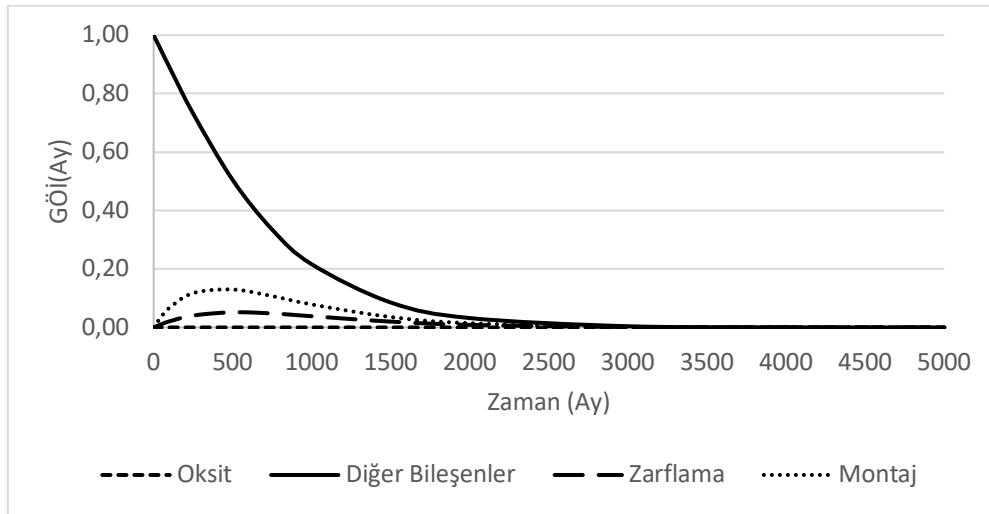
t (Ay)	Güvenilirlik	Kullanılabilirlik	Üretim Miktarı	t (Ay)	Güvenilirlik	Kullanılabilirlik	Üretim Miktarı
1	0,9989138	0,936353392	7022	20	0,9782123	0,934764516	7010
2	0,9978272	0,936267817	7022	21	0,9771199	0,934683006	7010
3	0,9967403	0,936182463	7022	22	0,9760273	0,934601702	7009
4	0,995653	0,93609733	7021	23	0,9749344	0,934520602	7008
5	0,9945653	0,936012416	7020	24	0,9738413	0,934439707	7008
6	0,9934773	0,935927722	7020	25	0,972748	0,934359016	7007
7	0,9923889	0,935843245	7019	26	0,9716545	0,934278528	7007
8	0,9913002	0,935758986	7018	27	0,9705608	0,934198241	7006
9	0,9902112	0,935674943	7018	28	0,9694669	0,934118156	7005

10	0,9891219	0,935591115	7017	29	0,9683728	0,934038271	7005
11	0,9880322	0,935507503	7016	30	0,9672785	0,933958586	7004
12	0,9869422	0,935424104	7016	31	0,9661841	0,9338791	7004
13	0,985852	0,935340918	7015	32	0,9650895	0,933799813	7003
14	0,9847614	0,935257945	7015	33	0,9639947	0,933720722	7002
15	0,9836706	0,935175183	7014	34	0,9628998	0,933641829	7002
16	0,9825794	0,935092631	7013	35	0,9618047	0,933563132	7001
17	0,981488	0,93501029	7013	36	0,9607095	0,933484629	7001
18	0,9803964	0,934928157	7012	37	0,9596141	0,933406322	7000
19	0,9793045	0,934846233	7011	38	0,9585187	0,933328208	6999

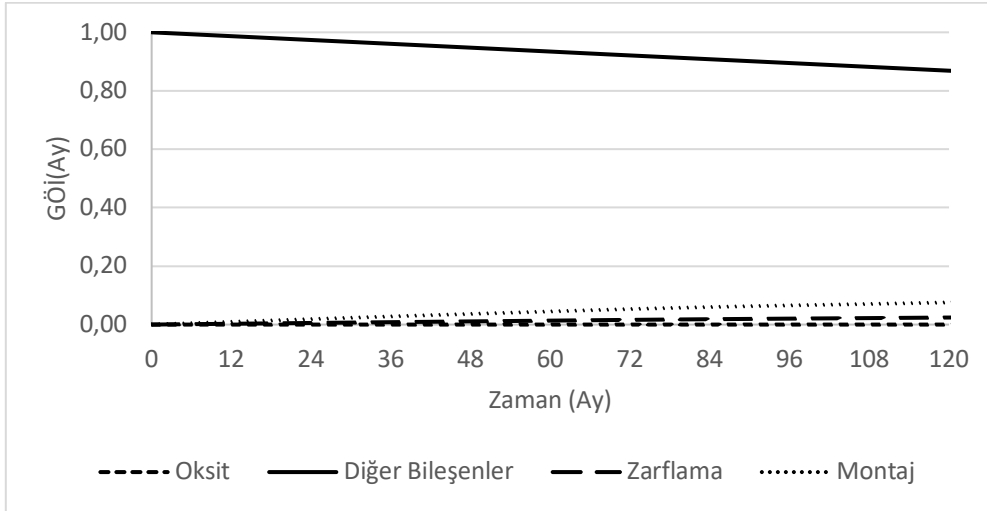
Önerilen alternatif sistemin güvenilirlik fonksiyonuna göre (Şekil 9) firmanın, gelecek 3 yıl boyunca hedeflediği 7000 akü miktarının altına düşmeyeceği görülmüştür (Bknz. Tablo 3). Ancak bu tabloda görüldüğü gibi firmada 3. yıldan itibaren ayda 7000 akü üretilemeyecektir. Üretimin aynı düzeyde sürdürülebilir olması için yeni bir iyileştirme çalışmasına daha ihtiyaç duyulacağı bu tabloda açıkça görülmektedir.

İkinci iyileştirme çalışması:

Yeni bir iyileştirme ihtiyacının ortaya çıktığı bu durumda, Şekil 1’de verilen akış diyagramını uyarınca sistem güvenilirliği üzerinde en yüksek etkiye sahip olan bileşen bulunarak sistemde güvenilirlik artışı sağlayacak yeni sistem tasarımı elde edilecektir. Bu amaçla her bir bileşenin *GÖİ* değeri fonksiyonu genel olarak 5000 ay için Şekil 10’da, 120 ay için ise Şekil 11’de gösterilmiştir.



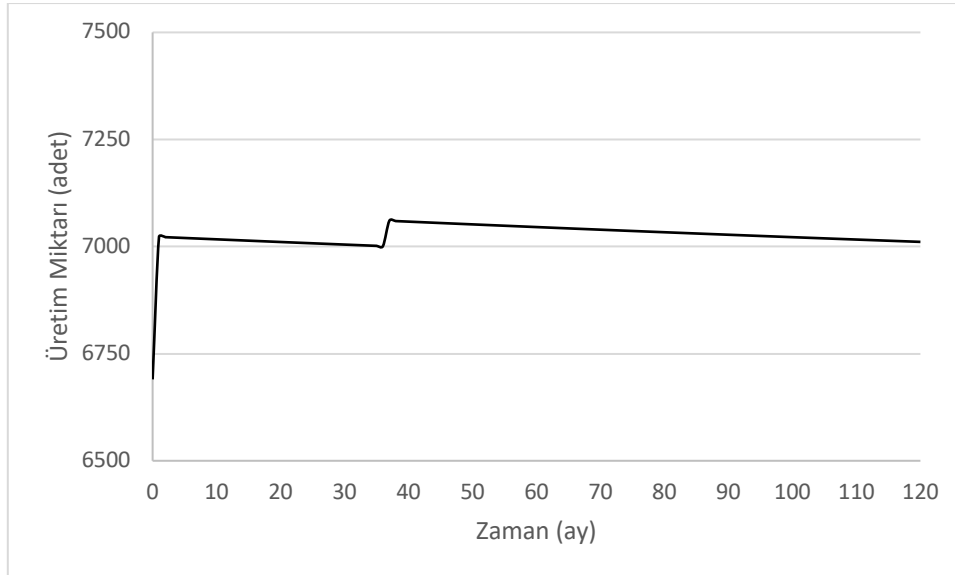
Şekil 10. *GÖİ* fonksiyonları



Şekil 11. 120 aylık $GÖİ$ fonksiyonları

Şekil 10 ve Şekil 11'de yer alan $GÖİ$ değerleri dikkate alınarak, diğer bileşenler olarak adlandırılan ve sistemde seri bağlı olarak yer alan Şerit, EXMET, COS ve Sulu Şarj bileşenlerinin arasından sistem kısıtlarına uygunluğu nedeniyle Şerit bileşenine paralel bileşen eklenmesine karar verilmiştir. Bu aşamada sistemde sağlanacak güvenilirlik artışı yeniden hesaplanarak yeterli üretim miktarına ulaşıp ulaşılmadığına bakılır. Yapılan hesaplamalara göre yeni sistem tasarımı ile firmanın 7 sene daha aylık en az 7000 akü üretebileceği gözlemlenmiştir (Bknz. Şekil 12). Önerilen alternatif sistemler sayesinde toplamda 10 yıllık süre boyunca hedeflenen üretim miktarının altına düşülmediği Şekil 12'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşım ile bozulmaların dikkate alındığı durumlarda $Yİ$ ve $GÖİ$ birlikte kullanılarak sistem güvenilirliği ve kullanılabilirlik ile istenilen düzeyde üretimin elde edilebileceği alternatif tasarımların hangi dönemlerde devreye alınacağı ve sağlayacağı üretim artışı hesaplanabilmektedir. Böylece, gerekli iyileştirmeler yönetim tarafından planlanarak zamanında yapılabilecek, aylık üretim miktarı sürdürülebilir şekilde dengede tutulabilecektir.



Şekil 12. Önerilen yaklaşım ile elde edilen iyileştirmelere bağlı üretilen akü miktarları

4. Sonuç

Bir sistemin güvenilirliğinin hesaplanmasına sistemlerin performans analizinde veya sistemlerin iyileştirilmesi çalışmalarında ihtiyaç duyulur. Genellikle artan piyasa taleplerini karşılamak ya da zamanla ortaya çıkan

yıpranmaya bağlı olarak düşen üretim miktarlarını artırmak için firmalar sistemlerinde iyileştirme yapma çabası içinde olurlar. Bu çalışmada, bu amaçla, sistem performans ölçütü olarak dikkate alınan sistem güvenilirliği için *Yİ* ve sistem güvenilirliği üzerinde en yüksek etkiye sahip olan bileşenin belirlenmesi için *GÖİ* ilk defa birlikte kullanılmıştır. Önerilen bu yaklaşımla sistem güvenilirliği, sistem yapısından etkilenmeyen *Yİ* yöntemiyle hesaplanmış, sistem güvenilirliği üzerinde en yüksek etkiye sahip bileşen ise *GÖİ* ile belirlenmiş ve bu bilgi güvenilirliğin artırılmasını sağlayacak alternatif sistem tasarımını elde etmek üzere kullanılmıştır. Örnek bir uygulama olarak Uzuner (2015) çalışmasındaki gerçek sistem ele alınmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Çalışma kapsamında önerilen bu yaklaşımla, sistemin uzun dönem boyunca aylık üretim miktarı izlenebilmekte ve üretimin istenen miktarın altına inmemesi için önlem alınması gereken kritik dönemlerin önceden tespit edilmesi de sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, önerilen bu yaklaşım ve uygulama adımları detaylı bir şekilde verilmiş, önerilen alternatif sistem üzerinde elde edilen iyileştirmeler grafik ve tablolarla sunulmuştur.

Ele alınan akü üretim hattında sistem güvenilirliği, önerilen alternatif sistem tasarımlarıyla ilgili dönemlerde yükseltilmiş ve güvenilirlikte dolayısıyla kullanılabilirlikte elde edilen artışlar ile aylık üretim miktarı önce 6690'dan 7022'ye, ikinci iyileştirme döneminde ise 7060'a çıkarılarak sırasıyla %5 ve %5,53 oranında iyileştirmeler sağlanmıştır. Sonuç olarak bozulmalardan kaynaklı aylık üretim miktarındaki azalmalar önceden izlenebilmiş, belirli bir plan dahilinde gerekli önlemler alınabilmiş ve sistemde istenilen üretim düzeyinin sürdürülebilirliğini sağlayacak öneriler yapılmıştır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Merve Uzuner Şahin, gerçek sistemle ilgili araştırmalar, literatür tarama, gerekli hesaplamalar ve makale yazımında; Orhan Dengiz, güvenilirlik ve kullanılabilirlik teorik temelinde ve hesaplamalarında ve makale yazımında; Berna Dengiz sistem tasarımı ve alternatif sistem tasarımlarının incelenmesi ve genel makale yazımında v.b. konularda katkı sağlamışlardır.

Teşekkür

Makalenin daha iyi bir hale gelmesine katkı sunan hakemlere teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Aslett, L. J. M. (2012). ReliabilityTheory: Tools for structural reliability analysis. R package, Erişim adresi: <https://www.louisaslett.com/>

Aslett, L. J. M., Coolen, F. P. A. ve Wilson, S. P. (2015). Bayesian inference for reliability of systems and networks using the survival signature. *Risk Analysis*, 35(9), 1640–1651. doi: 10.1111/risa.12228

Birnbaum, Z. W. (1968). On the importance of different components in a multicomponent system (Teknik rapor) Erişim adresi: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0670563>

Birnbaum, Z. W., Esary, J. D. ve Saunders, S. C. (1961). Multi-component systems and structures and their reliability. *Technometrics*, 3(1), 55–77. doi:10.1080/00401706.1961.10489927

Borgonovo, E. (2007). A new uncertainty importance measure. *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 771–784. doi: 10.1016/j.ress.2006.04.015

Borgonovo, E. ve Apostolakis, G. E. (2001). A new importance measure for risk-informed decision making. *Reliability Engineering and System Safety*, 72, 193–212. doi: 10.1016/S0951-8320(00)00108-3

Bulut, Y. ve Yaman, H. (2013). Farklı boyutlu tutarlı sistemlerin sistem imzası ile karşılaştırılması. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6, 85–102. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/311619>

- Bulut, Y. ve Yaman, H. (2014). Aynı boyutlu tutarlı sistemlerin sistem imzası ile karşılaştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(4), 300–307. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/236064>
- Coolen, F. P. A. ve Coolen-Maturi, T. (2012). Generalizing the signature to systems with multiple types of components. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 170 AISC, 115–130. doi:10.1007/978-3-642-30662-4-8
- Coolen, F. P. A. ve Coolen-Maturi, T. (2015). Predictive inference for system reliability after common-cause component failures. *Reliability Engineering and System Safety*, 135, 27–33. doi: 10.1016/j.ress.2014.11.005
- Coolen, F. P. A., Coolen-Maturi, T. ve Al-Nefaiee, A. H. (2014). Nonparametric predictive inference for system reliability using the survival signature. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228(5), 437–448. doi: 10.1177/1748006X14526390
- Dutuit, Y. ve Rauzy, A. (2014). Importance factors of coherent systems: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228(3), 313–323. doi: 10.1177/1748006X13512296
- Elsayed, E. A. (1996). *Reliability engineering*. Massachusetts, USA: Addison Wesley Longman, Inc.
- Feng, G., Patelli, E., Beer, M. ve Coolen, F. P. A. (2016). Imprecise system reliability and component importance based on survival signature. *Reliability Engineering and System Safety*, 150, 116–125. doi:10.1016/j.ress.2016.01.019
- Fussell, J. B. (1975). How to hand-calculate system reliability and safety characteristics. *IEEE Transactions on Reliability*, R-24(3), 169–174. doi:10.1109/TR.1975.5215142
- Garg, S., Singh, J. ve Singh, D. V. (2010). Availability analysis of crank-case manufacturing in a two-wheeler automobile industry. *Applied Mathematical Modelling*, 34(6), 1672–1683. doi:10.1016/j.apm.2009.09.016
- Görkemli, L. ve Kapan Ulusoy, S. (2009). *Üretim süreçlerinin güvenilirliğinin bulanık bayesgil yöntemi ile belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, YÖK tez veri tabanından erişildi. (Tez No. 246158)
- Görkemli, L. ve Kapan Ulusoy, S. (2010). Fuzzy bayesian reliability and availability analysis of production systems. *Computers and Industrial Engineering*, 59(4), 690–696. doi:10.1016/j.cie.2010.07.020
- Gupta P., Jayant, A. ve Goyal, A. (2008). Availability analysis of rubber preparation system a subsystem of a tube manufacturing plant availability analysis of rubber preparation system a subsystem of a tube manufacturing plant under preemptive resume priority repair under preemptive resume priority repair. *2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 506–511. doi:10.1109/IEEM.2008.4737920
- Gupta, P., Lal, A. K., Sharma, R. K. ve Singh, J. (2007). Analysis of reliability and availability of serial processes of plastic-pipe manufacturing plant: A case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24(4), 404–419. doi:10.1108/MBE-09-2016-0047
- Huang, X., Aslett, L. J. M. ve Coolen, F. P. A. (2019). Reliability analysis of general phased mission systems with a new survival signature. *Reliability Engineering and System Safety*, 189, 416–422. doi:10.1016/j.ress.2019.04.019
- Koçak, A. ve İşçioğlu, F. (2018). Meyve suyu dolun hatlarında güvenilirlik analizi. *Journal of Yasar University*, 13(50), 185–196. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/486721>
- Kuo, W. ve Zhu, X. (2012). *Importance measures in reliability, risk, and optimization*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Li, Y., Coolen, F. P. A., Zhu, C. ve Tan, J. (2020). Reliability assessment of the hydraulic system of wind turbines based on load-sharing using survival signature. *Renewable Energy*, 153, 766–776. doi:10.1016/j.renene.2020.02.017

- Loganathan, M. K., Kumar, G. ve Gandhi, O. P. (2016). Availability evaluation of manufacturing systems using Semi-Markov model. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(7), 720–735. doi:10.1080/0951192X.2015.1068454
- Samaniego, F. J. (1985). On closure of the IFR class under formation of coherent systems. *IEEE Transactions on Reliability*, R-34(1), 69–72. doi:10.1109/TR.1985.5221935
- Samaniego, F. J. (2007). *System signatures and their applications in engineering reliability*. Stanford, CA, USA: Springer Science & Business Media.
- 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. (2011). A comparative study of performance evaluation based on field failure data for food production lines. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 26–39. doi:10.1108/13552511111116231
- Uzuner, M. (2015). *Bir işletmede güvenilirlik analizine dayalı sistem tasarımı*. (Yüksek Lisans Tezi). Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, YÖK tez veri tabanından erişildi. (Tez No. 382325)
- Uzuner Sahin, M., Dengiz, B. ve Atalay, K. D. (2020). Performance enhancement of production systems using fuzzy-based availability analysis and simulation method. *European Journal of Industrial Engineering*, 14(5), 632–648. doi:10.1504/EJIE.2020.109914
- Verma, A. K., Srividya, A. ve Prabhu Gaonkar, R. S. (2007). *Fuzzy-reliability engineering : concepts and applications*. Mumbai, India: Narosa Publishing House Pvt. Ltd.
- Vesely, W. E. (1970). A time-dependent methodology for fault tree evaluation. *Nuclear Engineering and Design*, 13(2), 337–360. doi:10.1016/0029-5493(70)90167-6
- Wang, W., Loman, J. ve Vassiliou, P. (2004). Reliability importance of components in a complex system. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 6–11. doi:10.1109/rams.2004.1285415