



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Robotik kaynak hatlarının bulanık hata ağacı analizi

## *Fuzzy fault tree analysis of robotic welding lines*

Yazar(lar) (Author(s)): Özgür Turay Kaymakçı<sup>1</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-7553-6887

**To cite to this article:** Kaymakçı Ö. T., “Robotik Kaynak Hatlarının Bulanık Hata Ağacı Analizi”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1243-1256, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Kaymakçı Ö. T., “Robotik Kaynak Hatlarının Bulanık Hata Ağacı Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1243-1256, (2024).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1241578

# Robotik Kaynak Hatlarının Bulanık Hata Ağacı Analizi

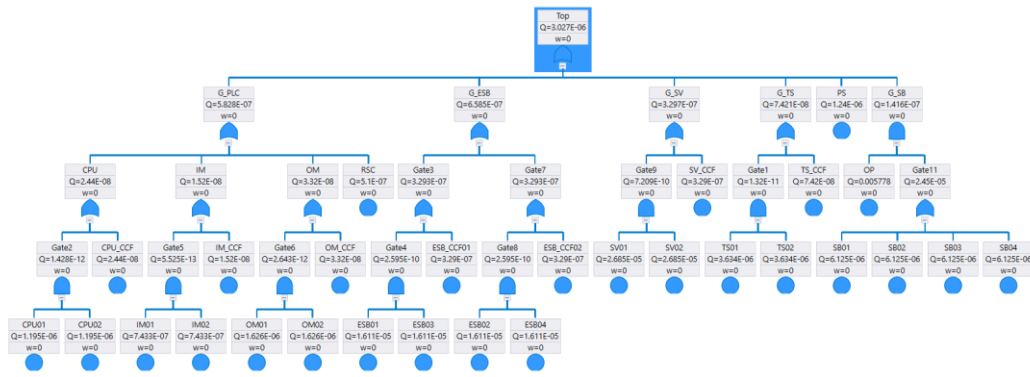
## Fuzzy Fault Tree Analysis of Robotic Welding Lines

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ ISO 13849 ilişkili risk analiz / Risk analysis related to ISO 13849
- ❖ Bulanık hata ağacı analizi / Fuzzy fault tree analysis
- ❖ Robotik kaynak hattı / Robotic welding line
- ❖ Belirsiz ve kesin olmayan olaylara ait risk / Risk of ambiguous and uncertain events
- ❖ Endüstri 4.0 / Industry 4.0

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Robotik güvenlik standartları çerçevesinde otomotiv endüstrisinde kullanılan bir robot hattı için risk analiz ve azaltma çalışmaları sektör uzmanlarının desteği ile hayata geçirilmiştir. / Within the framework of robotic safety standards, risk analysis and reduction studies for a robot line used in the automotive industry were carried out with the support of industry experts.



Şekil. Hata Ağacı /Figure. Fault Tree

### Amaç (Aim)

Çalışmanın amacı, endüstride sıklıkla kullanılan bir işbirlikçi robot uygulaması için gerçekçi bir risk analiz çalışması yapmaktır. / The aim of the study is to conduct a realistic risk analysis study for a collaborative robot application that is frequently used in the industry.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bulanık hata ağacı kullanılarak tasarım ve analiz yapılmıştır. / Design and analysis were made using fuzzy fault tree analysis

### Özgünlük (Originality)

Çalışma kapsamında sadece ekipman hata oranları değerlendirilmemiş bunun yanı sıra operatör hatası gibi belirsiz olaylar bulanık kümeler üzerinden analize dahil edilmiştir. / Within the scope of the study, not only equipment failure rates were evaluated, but also uncertain events such as operator error were included in the analysis through fuzzy sets.

### Bulgular (Findings)

Robotik kaynak hatlarında operatör hatasının da dâhil edildiği gerçekçi bir risk analiz çalışması yapılmıştır. / A realistic risk analysis study was carried out in robotic welding lines, including operator failure.

### Sonuç (Conclusion)

Sektör standartlarına göre istenilen performans seviyesini karşılayan ekonomik bir çözüm önerilmiştir. / Sektör standartlarına göre istenilen performans seviyesini karşılayan ekonomik bir çözüm önerilmiştir.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission

# Robotik Kaynak Hatlarının Bulanık Hata Ağacı Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Özgür Turay KAYMAKÇI\***

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

(Geliş/Received : 24.01.2023 ; Kabul/Accepted : 02.05.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 01.06.2023)

## ÖZ

Endüstri 4.0 ve dijitalleşmenin bir sonucu olarak robotlu üretim sistemleri yaygınlaşmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde kaynak, paletleme, montaj ve taşıma gibi ağır işlerde kullanılan robotların sahip oldukları yüksek potansiyel iş anlamında ciddi avantajlar vadederken beraberinde birçok iş güvenli riskini de açığa çıkartmaktadır. Ayrıca günümüzde işbirlikçi robotların kullanımının artması ile birlikte güvenlik konusu en önemli konulardan biri haline gelmektedir. İş güvenliği çerçevesinde robot hatları için birçok standart oluşturulmuş olup günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen bu standartlar ile üreticilerin tutarlı kalite ve performansa sahip ürünleri üretmesine olanak tanırken risklerin kabul edilebilir seviyede kalmasını garanti altına alınmaya çalışılmaktadır. Ne yazık ki bu çalışmalar yapılır iken genellikle insan faktörü göz ardı edilmiş ve risk hesaplamalarında kapsam dışında bırakılmıştır. Bu çalışmada bu eksikliği gidermek için otomotiv endüstrisinde kaynak işlemleri için kullanılan bir robot hattı üzerinde risk analiz ve risk azaltma çalışmaları hayata geçirilmiştir. Robotik güvenlik standartları da kapsam dâhilinde tutularak ilgili fonksiyonel güvenlik hesaplamaları yapılmıştır. Bu aşamada insan faktörü de analize dâhil edilmiştir. Bu kapsamda ilgili belirsizlikleri modelleyebilmek için bulanık setleri kullanan bir hata ağacı analiz yöntemi geliştirilmiştir. Böylelikle sadece ilgili ekipmanların kategorileri ve güvenilirlik parametreleri değerlendirilmemiş aynı zamanda insan-robot etkileşiminin sistem güvenilirliğine olan etkisi incelenmiştir. Son olarak elde edilen sonuçların sektör bazlı standartlar kapsamında yeterliliği irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İşbirlikçi robot, risk analizi, fonksiyonel güvenlik, insan faktörü.

## Fuzzy Fault Tree Analysis of Robotic Welding Lines

### ABSTRACT

As a result of Industry 4.0 and digitalization, robotic production systems are becoming increasingly prevalent. Particularly in the automotive industry, robots that are utilized for heavy tasks such as welding, palletizing, assembly, and transportation offer significant advantages in terms of high-potential work, but also expose numerous occupational safety risks. Additionally, with the increasing utilization of collaborative robots, safety has become one of the most crucial concerns. Several standards have been established for robotic lines within the framework of occupational safety and are currently widely used. These standards allow manufacturers to produce consistent quality and performance products while trying to ensure that the residual risks remain at an acceptable level. Unfortunately, during the implementation of these studies, the human factor is often overlooked and excluded from the scope of risk calculations. In this study, to address this gap, risk analysis and risk reduction studies were implemented on a robot line used for welding processes in the automotive industry. Functional safety calculations were evaluated based on system design parameters while taking into account robotic safety standards. At this stage, the human factor was also included in the analysis. In this context, a fuzzy set-based fault tree analysis method has been developed to model the relevant uncertainties. This approach allows not only the evaluation of the categories and reliability parameters of the relevant equipment, but also the investigation of the impact of human-robot interaction on system reliability. Finally, the adequacy of the results obtained has been examined within the framework of sector-specific standards

**Keywords:** Collaborative robot, risk analysis, functional safety, human factor.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teknolojinin hızlı değişimi ve rekabetin artması ile farklı türdeki ürünlere olan talep giderek artmakta, dolayısıyla da imalat sistemlerinde olağanüstü gelişmeler meydana gelmektedir. Geçtiğimiz yüzyılın yarısında ortaya atılan otomasyona dayalı imalat sistemleri genişleyerek verimliliği artırarak yatırım masraflarını azaltan, daha fazla üretim yapmanın yanı sıra kaliteyi de yükselten 'robotlar' devri başlamıştır. Bu noktada sanayi robotunun en kapsamlı tanımı ve robot tiplerinin sınıflandırması ISO/TC184/SC2 çalışma grubu tarafından ISO/FDIS 837 standardında "Endüstriyel

uygulamalarda kullanılan, sabit veya hareketli olabilen, üç veya daha fazla programlanabilir eksene sahip, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir çok amaçlı manipulatördür." olarak yapılmıştır.

Günümüzde robotların en büyük kullanım alanı endüstriyel üretimdir. Özellikle otomotiv endüstrisindeki çalışma şartları düşünüldüğünde fazla sayıda robot kullanıldığı görülmektedir. Diğer taraftan robot teknolojilerinin üretime bu denli dâhil olması iş güvenliği açısından bazı riskleri beraberinde getirmiştir. Bu risklerin bir kısmı mevcut durumda kullanılan makineler için de geçerli olsa da robotların aşağıda belirtilen karakteristik özellikleri diğer makinelerden ayrılır.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : okaymakci@comu.edu.tr

- Büyük operasyon alanlarında yüksek enerji ile hareket edebilecek kapasiteye sahip olması.
- Hareket başlangıcının ve robot kolu rotasının önceden kestirilememesi ve değişkenlik gösterebilmesi.
- Robot çalışma alanının diğer robot, makina veya ekipman çalışma alanları ile kesişebilmesi.
- Operatörün enerji altındaki robota yakın alanlarda çalışması gereken durumların olması.

Bu koşullar nedeni ile endüstriyel robot hatlarında çalışmak belli güvenlik standartları kapsamında hayata geçirilmek zorundadır. İşçilerin iş kazalarına maruz kalmaması için iş güvenliği çerçevesinde robot hatları için birçok standart oluşturulmuştur. Bu standartlardan endüstride sıklıkla takip edilenler şu şekildedir.

*ISO 13849-1:2015 Makine güvenliği. Kontrol sistemlerinin güvenlikle ilgili parçaları tasarım için genel prensipler.* Bu standart yazılım tasarımı da dâhil olmak üzere kontrol sistemlerinin güvenlikle ilgili bölümlerinin tasarımı ve entegrasyonu için güvenlik gereksinimleri ve ilkeler hakkında rehberlik sağlamaktadır. Kontrol sisteminin ilgili parçaları için, güvenlik işlevlerini yerine getirmek için gereken performans seviyesini içeren özellikleri belirtilmiştir [1].

*ISO 13849-2:2012 Makine güvenliği - Kontrol sistemlerinin güvenlikle ilgili parçaları - Validasyon.* Bu standart ile tasarım aşamasında belirtilen güvenlik fonksiyonlarının, elde edilen kategorinin ve bir kontrol sisteminin güvenlikle ilgili bölümleri için belirlenen performans seviyesinin analiz ve test edilerek doğrulanması için izlenecek prosedürleri ve koşulları belirtilmiştir.

*ISO 10218-1, Robotlar ve robotik cihazlar - Endüstriyel robotlar için güvenlik gereksinimleri - Bölüm 1: Endüstriyel Robotlar.* Bu standart, endüstriyel robotlar ve endüstriyel robot sistemleri tarafından sunulan belirli tehlikelerin tanımlanmasını içermektedir. Ayrıca bu standart C tipi bir standarttır yani herhangi bir standart ISO 10218-1 ile çeliştiğinde ISO 10218-1 geçerlidir [2].

*ISO 10218-2:2011, Robotlar ve robotik cihazlar. Endüstriyel robotlar için güvenlik gereksinimleri - Robot sistemleri ve entegrasyonu.* Bu standart endüstriyel robotların ve endüstriyel robot sistemlerinin entegrasyonu için güvenlik gereksinimlerini belirtir lakin özel olarak endüstriyel robot sisteminin içinde bulunduğu prosesle ilgili tehlikelerle ilgilenmez [3].

*ISO 15066:2016 Robotlar ve robotik cihazlar - İşbirlikçi robotlar.* Bu standart işbirliğine dayalı endüstriyel robot sistemleri ve çalışma ortamı için güvenlik gerekliliklerini belirtmektedir. Ayrıca ISO 10218-1 ve ISO 10218-2'de belirtilen işbirlikçi endüstriyel robot çalışmasına ilişkin gereksinimleri ve kılavuzu tanımlamaktadır [4].

Tüm bu standartlarda ortak olarak belirtilen şartlar göz önüne alındığında robot kullanılan sistemlerde emniyetli çalışmanın sağlanması ve risklerin kabul edilebilir seviyeye indirgenmesi için bir güvenlik yönetim sistemi geliştirilmesi zaruri olduğu gözlemlenmektedir. Bu kapsamda işletme altındaki risklerin açığa çıkartılması,

kabul edilebilir seviyeye getirecek şekilde uygun güvenlik fonksiyonlarının tanımlanması ve standartlarda belirtilen koşullarda işletilmesi kritik öneme sahiptir [5].

Bu kapsamda Huck ve arkadaşları işbirlikçi robot uygulamalarında beklenmedik çalışan davranışlarından kaynaklanan tehlikeleri belirlemek için simülasyona dayalı yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir [6]. Gualtieri ve arkadaşları ise laboratuvar vaka çalışmaları ve dijital ikiz kullanarak tüm sistemi karakterize eden özelliklere odaklanarak, güvenli işbirlikçi robot montaj ve tasarımı için yönergeler geliştirilmişlerdir [7]. Diğer taraftan Chemweno ve arkadaşları ise işbirlikçi robotları ISO 15066 standardı merkezli olarak incelemişler ve güvenlik güvencesi gerekliliklerini ve bu önlemlerin literatürde nasıl gerçekleştirildiğini ortaya koymuşlardır [8]. Zacharaki ve arkadaşları ise belirli süreçleri gerçekleştirirken işbirlikçi robotların temel işlevlerine odaklanarak, insan-robot etkileşimi sırasında hayata geçirilmesi gereken gerekli güvenlik seviyelerini tanımlamışlardır. Diğer çalışmalardan farklı olarak insan-robot işbirliği sırasında psikolojik güvenlik için gerekli mevcut yöntemleri ve bunun robot davranışı üzerindeki etkisini incelemişler ve robotların endüstriyel ve sosyal ortamlara dâhil edilmesinin psikolojik sonuçlarını derinlemesine tartışmışlardır. [9]. Berx ve arkadaşları ise işbirlikçi robotların yüksek düzeyde karmaşıklığa sahip olmalarından kaynaklanan yeni güvenlik endişelerine odaklanmış ve insan-robot işbirliği sırasında açığa çıkabilecek risk faktörlerini belirleyerek beş farklı kategoride gruplandırmışlardır öyle ki belirlenen kategoriler, teknolojik düşüncelerin ötesinde psikososyal ve etik risk faktörlerini de kapsamaktadır. Çalışmanın sonunda, işbirlikçi robotlarla ilgili çalışmaya başlamadan önce belirlenmesi, değerlendirilmesi ve azaltılması gereken risk faktörlerine dikkat çekmektedirler [10].

Tüm bu çalışmalarda performans seviyesinin sağlanması için tasarım aşamasından itibaren risk değerlendirmesi yapılmasının gerekliliği net bir şekilde ifade edilmektedir. İlgili risk değerlendirme tekniklerinin neler olduğu, seçimlerde uyulması gereken kıstas ve yönlendirmeler IEC 31010:2019'da belirtilmiştir. Standartta belirtilen teknikler, farklı koşullarda karar vermeye yardımcı olmak ve ilgili riskler hakkında sistematik bilgi toplamak için gerekli süreçleri içerir [11]. Buna göre risk değerlendirme sürecinde sıklıkla kullanılan teknikler şu şekildedir:

- Ön Tehlike Analizi (Preliminary Hazard Analysis – PHA)
- Hata Türü ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effect Analysis - FMEA)
- Tehlike ve İşlerlik Çalışması (Hazard and Operability Study - HAZOP)
- Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis - FTA)
- Ne – Eğer Yöntemi (What-If method)

Bu çalışmada IEC 31010:2019'da belirtilen yöntem ve teknikler kullanılarak, EN ISO 13849 merkezli bir risk

değerlendirmesi ve performans seviyesi belirlenmesi süreci işletilmiştir. Literatürde fonksiyonel güvenlik kapsamında yapılan çalışmalarda genellikle sistemi oluşturan bileşenler üzerinden bir risk analizi yapılmaktadır. Bu çalışmada ise yapılan bu çalışmalardan farklı olarak insan faktörü de risk analiz aktivitetlerine dâhil edilmiştir. İnsan faktörü kaynaklı belirsizlikleri modele dâhil edebilmek için bulanık mantık temelli hibrit bir hata ağacı analiz yöntemi üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar yorumlanmış, insan faktörünün özellikle işbirlikçi robotlar ile yapılan çalışmalarda risk perspektifinden sistem üzerine olan etkileri üzerinde durulmuştur.

## 2. RİSK YÖNETİM SÜREÇLERİ (RISK MANAGEMENT PROCESSES)

Risk, bir olayın istenmeyen biçimde sonuçlanması olasılığıdır. Bir riskin ortaya çıkabilmesi için bir tehlikenin açığa çıkması ve bu kapsamda insanın direkt ya da dolaylı olarak ilgili tehlikeye maruz kalması gerekir. Bu noktada IEC, güvenliği mülkiyete veya çevreye verilen zararın bir sonucu olarak doğrudan veya dolaylı olarak insanların fiziksel yaralanma veya sağlığına zarar verme gibi kabul edilemez risklerden kurtulması olarak tanımlar. O zaman risk analizinde asıl amaç, sistemde oluşabilecek tehlikeli durumları sistematik bir şekilde tespit etmek ve bu riskleri kabul edilebilir seviyeye çekmektir [12]. Bu kapsamda risk yönetim süreçleri ile ilgili olarak ortaya koyulan aktiviteler 5 adımda toplanmıştır. Bu aktiviteler sırası ile

- I. Risklerin tanımlanması
- II. Risklerin analiz edilmesi
- III. Risklerin sınıflandırılması
- IV. Riskleri engelleyici aktivitelerin belirlenmesi
- V. Riski takip edilmesi, izlenmesi

İşbirlikçi robot uygulamalarında ve endüstriyel robot sistemlerinde bu perspektif altında öncelikli olarak sistemdeki tehlikeler belirlenir. Robotik uygulamalarında riskler genel olarak kısmen bilindik olmakla beraber robotik sistemin yapısı, beraber çalıştığı prosesin dinamiklerine bağlı olarak kök nedenler ve risklerin etkileşimi değişmektedir. Bu noktada risklerin doğru şekilde belirlenmesi ve kaynaklarının analiz edilmesi çok kritik bir süreçtir.

Belirlenen riskler etki ve frekanslarına bağlı olarak sınıflandırılır. Literatüre bakıldığında risk sınıflandırma için birçok yaklaşım bulunmakla beraber endüstri genellikle standardın tercih ettiği ve sıklıkla kullanılan risk matrisi yöntemini kullanmaktadır. Böylelikle farklı uygulamalardaki risklerin karşılaştırılması mümkün olabilmektedir.

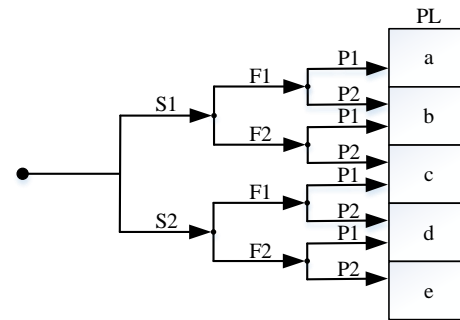
Bu sınıflandırma sonucunda kabul edilemeyen riskler için tasarım aşamasından başlayarak uygun güvenlik fonksiyonları önerilir ve hayata geçirilir. Bu fonksiyonların bazıları pasif iken bazıları da aktif fonksiyonlar olabilir. Burada amaç riski kabul edilebilir sınırlar dâhiline çekmektir. Genellikle çoğu uygulamada

riskin şiddetini azaltmak mümkün değildir. Diğer taraftan açığa çıkma frekansını azaltacak tedbirleri hayata geçirmek sureti ile riskin seviyesi düşürülür.

### 2.1. Risk Değerlendirmesi (Risk Assessment)

ISO 13849-1 standardı, performans seviyesinin belirlenmesinde ilgili fonksiyonda aktif olarak değerlendirilen tüm ekipmanlara ait hata ihtimallerini, hata modellerini ve etkin ömürlerini de hesaba katar. Değerlendirme PL a'dan PL e'ye çeşitli seviyelerde belirlenmiş olan performans seviyesi kullanılarak yapılır [1]. Belli bir uygulama için gerekli olan performans seviyesi Şekil 1'de verilen risk grafiği kullanılarak belirlenir.

Şekil 1'deki grafiğe göre S kaza şiddetini, F ilgili riske maruz kalma sıklığını ve P risk sonucunda açığa çıkabilecek olan kazanın önleneme olasılığını ifade eder. Buna göre S1 düşük şiddetli iken S2 yüksek şiddetli olmasına karşılık gelir. Benzer şekilde F1 düşük maruz kalma sıklığı ve F2 yüksek sıklıkta ilgili riske maruz kalmayı ifade eder. Son olarak P1 ile ilgili risk sonucunda açığa çıkabilecek olan kazanın önlenme ihtimalinin olduğuna karşılık gelir iken P2 ile kazanın önlenme ihtimalinin olmadığı bilgisi paylaşılır.



Şekil 1. Performans tablosu (Performance table)

Şekil-1'de bulunan grafik uygulaması başlangıç noktasından ele alınarak, sırasıyla yaralanma ciddiyeti (S), tehlikeli duruma maruz kalma süresi (F), ve tehlikeyi önleme ihtimali (P) tanımlanarak yapılır.

Diğer taraftan güvenlik fonksiyonunun sağladığı performans seviyesini hesaplayabilmeyi ISO 13849-1 standardı beş parametre üzerinden tanımlar [1]. Bunlar sırası ile kontrol kategorisi, tehlikeli bir hataya kadar geçen ortalama süre, teşhis kapsamı, ortak neden faktörü ve hata oranıdır.

### 2.2. Güvenlikle İlgili Sistemler ve Performans Seviyesinin Belirlenmesi (Safety Related Systems And Determining The Performance Levels)

IEC 61508, güvenlikle ilgili bir sistemi " Kontrol altındaki ekipmanın güvenli bir duruma ulaşmak için gerekli güvenlikle ilgili işlevleri hayata geçirmesi tasarlanmış sistem" olarak ifade etmektedir [13]. Bu tanıma göre, belirtilen koşullar ihlal edildiğinde güvenlikle ilgili sistem prosesi güvenli duruma taşır. Güvenlikle ilgili sistemler, özel tasarım algılayıcılar, kontrolörler ve eyleyicilerden oluşur. Güvenlikle ilgili sistemin yapısı risk analizleri neticesinde öngörülen

güvenlik fonksiyonlarını hayata geçiren bu algılayıcı, kontrolör ve eyleyicilerin bir kombinasyonudur. Tüm bu ekipmanların ortak kullanım amacı riskleri ortadan kaldırmak veya kabul edilebilir seviyeye indirmektir. Ayrıca ifade etmek gerekir ki güvenlikle ilişkili sistem bileşenlerinden sistemi kontrol etmesi ve temel işlevselliğini hayata geçirmesi beklenmez. IEC 61508 şemsiye standart olması neticesinde ilgili analizlerde kullanılmak üzere ilgili parametreleri tanımlamıştır. Güvenlikle ilgili sistemler, tanımlanan bu parametreler üzerinden sınıflandırılmış ve karşılaştırılmıştır.

### 2.2.1. Hata oranı (Failure rate)

Sistemin hata yapma sıklığıdır ve  $\lambda$  ile gösterilir. Sistemin başarısız olma olasılığını gösteren hata yoğunluk fonksiyonunun ( $f(t)$ ) güvenilirlik fonksiyonuna ( $R(t)$ ) oranıdır. Denklem 1'de verildiği gibi ifade edilir. Genellikle milyon saat başına hata (FPMH) olarak ifade edilir. Hata oranı, Denklem 2-3'de ifade edildiği gibi sırasıyla güvenli hata ve tehlikeli hata olmak üzere iki farklı hatanın toplamı olarak ifade edilir. Güvenli hata oranı ise güvenlik oranı (S) ile hata oranının çarpımıdır [14].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_S + \lambda_D \quad (2)$$

$$\lambda_S = S \times \lambda \quad (3)$$

Denklem 4'te belirtildiği gibi, tehlikeli bir hata, tehlikeli tespit edilmiş hata (DD) ve tehlikeli tespit edilmemiş hata (DU) olmak üzere iki bölümden oluşur. Güvenlikle ilgili çalışmalarda, sistemin kullanım süresi içerisinde hata oranının sabit olduğu kabul edilmektedir [13].

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (4)$$

### 2.2.2. Güvenli hata oranı (Safe Failure Fraction)

Denklem 5'te de verildiği gibi IEC 61508'e göre güvenli hata ile tehlikeli tespit edilmiş hatanın toplam hataya oranıdır. IEC 61508-6 Ek C'de 2.1.5'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$SFF = \frac{\sum \lambda_S + \sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_S + \sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}} \quad (5)$$

### 2.2.3. Ortalama hata süresi (Mean time to failure)

Bu süre endüstri tarafından kullanılan yaygın parametrelerden biridir ve bir sistemin veya herhangi bir ürünün ilk hata meydana gelmesine kadar operasyonda kaldığı sürenin istatistiksel ortalamasıdır. Literatürde genellikle MTTF kısaltması ile sembolize edilir. Bir bileşenin MTTF değeri ne kadar yüksekse, o bileşenin birim zamanda hataya düşme olasılığı o kadar düşüktür.

$$MTTF = \int_0^T R(t) dt \quad (6)$$

Bunun yanında özellikle robotik uygulamalara ortalama hata süresi denildiğinde tüm hatalar değil tehlikeli bir hata meydana gelene kadar geçen ortalama süre  $MTTF_D$  dikkate alınır. ISO 13849-1'e göre Denklem 8-9'da verildiği gibi tanımlanır.

$$MTTF_D = \frac{B_{10d}}{0,1 n_{op}} \quad (7)$$

$$n_{op} = \frac{d_{op} h_{op} 3600}{t_{cycle}} \quad (8)$$

Burada  $h_{op}$ , 1 gün içerisindeki ortalama çalışma saatini ifade eder iken  $d_{op}$ , 1 yıl içerisindeki ortalama çalışma gün sayısı manasına gelmektedir.  $t_{cycle}$  ise 2 iş adımı arası geçen süredir.  $B_{10d}$  ekipmanın hata yapabileceği döngü değerinin %10'unu belirtir. Ayrıca tehlikeli hata oranı ile  $MTTF_D$  arasındaki ilişki 9'da verilmiştir.

$$MTTF_D = \frac{1}{\lambda_D} \quad (9)$$

Ayrıca EN ISO 13849 MTTFD değerlerine göre alt sistem/ekipman 3 kategoride sınıflandırmıştır. Tablo 1'de ilgili sınıflandırma verilmiştir.

**Tablo 1.** MTTF<sub>D</sub> aralığı (MTTF<sub>D</sub> interval)

Kategori	MTTF <sub>D</sub> aralığı
Düşük	3 yıl $\leq$ MTTF <sub>D</sub> < 10 yıl
Orta	10 yıl $\leq$ MTTF <sub>D</sub> < 30 yıl
Yüksek	30 yıl $\leq$ MTTF <sub>D</sub> $\leq$ 100 yıl

### 2.2.4. Teşhis kapsamı (Diagnostic coverage)

İlgili sistemlerde ne ölçüde tehlikeli hataların meydana gelebileceğinin bir ölçümüdür. DC ile sembolize edilir. IEC 61508-4 bölüm 3.8.6'ya göre Denklem 10'da verildiği gibi tanımlanır.

$$DC = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}} \quad (10)$$

Diğer taraftan  $MTTF_{D,1}, MTTF_{D,2}, \dots, MTTF_{D,N}$  N farklı bileşen için ortalama tehlikeli hata süresi olmak üzere teşhis kapsamı Denklem 11 ile hesaplanır.

$$DC_{avg} = \frac{\frac{DC_1}{MTTF_{D,1}} + \frac{DC_2}{MTTF_{D,2}} + \dots + \frac{DC_N}{MTTF_{D,N}}}{\frac{1}{MTTF_{D,1}} + \frac{1}{MTTF_{D,2}} + \dots + \frac{1}{MTTF_{D,N}}} \quad (11)$$

EN ISO 13849-1:2005 DC değerine göre ekipmanları 3 kategoride sınıflandırmıştır. Buna göre ilgili değer aralıkları ve ifadeleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Teşhis kapsamı (Diagnostic coverage)

DC Aralık İfadesi	Değer Aralığı
Tanımlı değil (-)	DC < 60 %
Düşük	60 % $\leq$ DC < 90 %
Orta	90 % $\leq$ DC < 99 %
Yüksek	99 % $\leq$ DC

### 2.2.5. Ortak nedenli hatalar (Common cause failures)

Bu tür hatalar, tek bir olay veya nedenin sonucu olarak birden çok alt sistemin arızalanmasına neden olan hata türüdür. Literatürde ortak nedenli hataları tanımlamak için birden fazla yöntem tanımlanmış olmasına rağmen Fleming tarafından önerilen  $\beta$  faktör yöntemi halen yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Bu yöntem  $\beta$  ve  $\beta_D$  değerlerini belirlemek için kantitatif bir yöntem önerir. Burada  $\beta$  ve  $\beta_D$ , sırasıyla tespit edilmemiş hatalar için genel ortak nedenli başarısızlık faktörünü ve tespit edilen hatalar için genel ortak nedenli hata faktörünü tanımlar. Diğer taraftan robotik uygulamalarda ortak nedenli hata



faktörü EN ISO 13849-1:2015 Annex F'ye göre bir kontrol listesi üzerinden belirlenir. Buna göre 65 ve üstü skor ortak nedenli hata ile ilgili kriterlerin sağlandığını ifade eder iken altının kabul edilemez olduğunu ifade eder. Ayrıca 65 ve üstünün IEC 61508-6:2000'e göre en fazla %2'lik bir  $\beta$ -faktöre karşılık gelmektedir [16].

### 2.3. Güvenlik Kategorileri (Safety Categories)

Güvenliğin istenen seviyede sağlanması alarm ve ekipmanların doğru zamanda doğru şekilde çalışması ile mümkün olur. Bu özellikler için de kullanılan ekipmanların hata oranlarının da doğru şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılacak olan güvenlik ekipmanlarının istenilen performans seviyesini sağlaması gerekir. Bu güvenlik kategorileri ilk olarak için ISO 954-1 standardında deklare edilmiştir. Sonrasında ilgili kategoriler EN ISO 13849-1:2015 standardında yer almıştır. EN ISO 13849-1:2015 standardı güvenlik kategorilerini bir kontrol sisteminin güvenlik ile ilgili olan parçalarının hata toleranslarının ve hata durumlarında gösterdikleri davranışların bir sınıflandırılması olarak tanımlar. Bu kategoriler, parçaların yapısına, hata tespitine ve güvenilirliğine göre belirlenir. ISO 954-6, güvenlikle ilgili sistemleri 5 kategori üzerinden tanımlamıştır. Ayrıca ifade etmek gerekir ki bu kategoriler risk seviyelerini de ifade etmemektedir.

#### 2.3.1. Kategori B (Category B)

Kontrol sisteminin güvenlikle ilgili parçaları, ilgili standartlara uygun işletme performansına ve işlenen malzeme kaynaklı etkenlere dayanıklı olmalıdır. Bu kapsamda aşağıda maddeler halinde verilmiş olan örnek işletim koşullarına uyumlu üretilmelidir.

- Çalışma ortamına dayanıklı malzeme seçimi
- Mekanik titreşim, harici manyetik alanlar, güç kesintileri ve parazit gibi dış etkenler
- Bileşenlerin ilgili standartlara uygunluğu

Bu nedenle, B kategorisi parçalar için özel bir güvenlik standartları geçerli değildir. Bir hata meydana geldiğinde güvenlikle ilgili fonksiyon devre dışı kalabilir.

#### 2.3.2. Kategori 1 (Category 1)

Bu kategoride, kategori B'de ifade edilen gerekliliklerin yanı sıra bilinen bileşenler ve uygun güvenlik ilkeleri referans alınarak tasarım yapılır. Bilinen bileşenler ve uygun güvenlik ilkelerine bazı örnekler şunlardır:

- Daha önce çok çeşitli uygulamalarda kullanılmış parçalar
- Güvenlikle ilgili uygulamalar için uygun olan ve güvenilirliği onaylanmış parçalar
- Bir hata meydana geldiğinde devrenin açılması ve güç kaynağının kapatılması gibi hata kiplerinin tanımlanması
- Hataların erken tespiti

Bu kategorinin bozulma olasılığı B kategorisine göre daha azdır. Sistem mimarisi 1ool güvenlik mimarisi ile tasarlanmıştır.

#### 2.3.3. Kategori 2 (Category 2)

Bilinen bileşenlerin yanı sıra uygun güvenlik ilkeleri ve fonksiyonları kullanarak, kategori 2 gereksinimleri de yerine getirilmelidir. Bu amaçla kontrol sistemlerinin güvenlikle ilgili parçaları ve fonksiyonları, kontrol sistemi tarafından düzenli aralıklarla denetlenecek şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca kontrol sistemi aşağıda belirtilen işlevleri prensip olarak içermelidir.

- Çalışma esnasında periyodik denetim.
- Herhangi bir hata açığa çıktığında sistemin güvenli bir şekilde durdurulması ya da engellenmesi
- Bir hata algılandığında uygun güvenlik fonksiyonu başlatılması ve ilgili hata sonlanana kadar güvenlik koşulunun aktive olması

#### 2.3.4. Kategori 3 (Category 3)

Bilinen bileşenlerin yanı sıra uygun güvenlik ilkeleri ve fonksiyonları da dahil olmak üzere B kategorisindeki tüm gerekliliklerin uygulanması gereklidir. Ayrıca, kategori 3 gerekliliklerinin bir parçası olan sistem yedekliliği, tasarımın önemli bir parçasıdır. Ortak nedenli hataların oluşma olasılığı yüksek durumlarda ise bu durumlar dikkate alınmalıdır.

#### 2.3.5. Kategori 4 (Category 4)

Bu kategoride bilinen bileşenlerin yanı sıra uygun güvenlik ilkeleri ve fonksiyonları kullanarak, B kategorisi gerekliliklerinin tamamı yerine getirilmelidir. Ek olarak, kategori 4 gereksinimleri doğrultusunda sistem yedekli mimariye sahip bir tasarım ile hayata geçirilmelidir. Ortak nedenli hata riskini azaltmak için, farklı teknoloji ve firmaların bileşenleri kullanarak çözüm üretilmelidir.

Şekil 2'de verilen tablo kategori değerlendirme tablosunda S yaralanmanın ciddiyetini, F tehlikenin olma sıklığı ya da tehlikeye maruz kalma süresini ve P ise tehlikeden kaçma olasılığını ifade etmektedir. Buna göre S1 hafif yaralanma iken S2 ciddi yaralanma ya da ölüm durumuna karşılık gelmektedir. F1 ilgili riskin olma olasılığının nadir olduğu duruma karşılık gelir iken F2 ise sıklıkla olduğu duruma karşılık gelir. Son olarak P1 ile belli koşullarda tehlikeden kaçınmak mümkün iken P2 ile böyle bir durumun olmadığı durumu ifade eder.

	Kategoriler				
	B	1	2	3	4
S1	●	●	○	○	○
F1	●	●	●	○	○
S2	●	●	●	○	○
F2	●	●	●	○	○
P1	●	●	●	○	○
P2	●	●	●	○	○

Şekil 2. Kategori değerlendirme tablosu (Category rubric)

Şekil 2’de verilen tablo kullanılarak robotik uygulamanın sahip olduğu risk seviyesi ile ilişkili olarak sistemin sağlanması gereken kategori belirlenebilir.

## 2.4. Performans Seviyesinin Belirlenmesi

(Determining Performance Levels)

Güvenlikle ilgili bir kontrol sisteminin performans seviyesi dört parametre üzerinden belirlenir. Bu

**Tablo 3.** Performans seviyesini belirlemek için basitleştirilmiş seçim tablosu (Simplified selection table to determine performance level)

Kategori	B	1	2	2	3	3	4
DC <sub>avg</sub>	-	-	Düşük	Orta	Düşük	Orta	Yüksek
Her bir kanal için MTTF <sub>D</sub>							
Düşük	a	-	a	b	b	c	-
Orta	b	-	b	c	c	d	-
Yüksek	-	c	c	d	d	d	e

## 2.5. Hibrit Hata Ağacı Analizi (Hybrid Fault Tree Analysis)

Hata ağacı analizi yöntemi, en yaygın kullanılan güvenilirlik analizi yöntemlerinden biridir. Boole cebri, olasılık hesaplamaları ve güvenilirlik teorisine dayanır, öyle ki istenmeyen durumların mantıksal kombinasyonu grafiksel olarak gösterilir. Hata ağacı analizi kavramı, 1962 yılında Bell Laboratuvarlarında geliştirilmiştir. Hata ağacı metodolojisi, sistem hataları ve sistem bileşenleri arasındaki bağıntıyı gösteren mantıksal diyagramlardan oluşmaktadır. Bu diyagram sonucunda tepe olayın oluşma olasılığı hata ağacı modeline göre elde edilir. Bu çalışmada temel olayların tepe olaya olan etkisini daha iyi anlayabilmek için Birnbaum Önem Faktörü, Fussell-Vesely Önem Faktörü ve Risk Azaltma Faktörü gibi literatürde sıklıkla tercih edilen önem faktörleri hata ağacı analiz edilecektir [17].

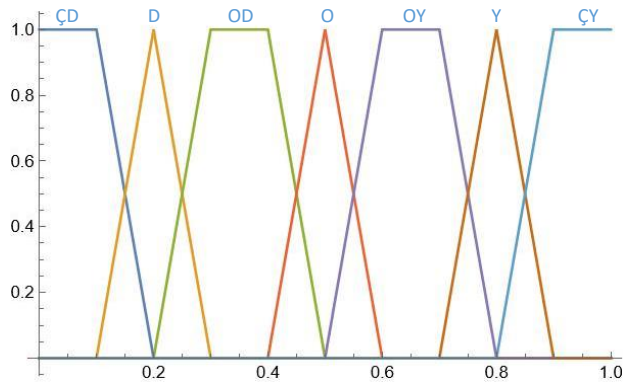
Diğer taraftan geleneksel hata ağacı analizinde insan hataları gibi belirsiz ve kesin olmayan olaylar etkili bir şekilde ele alınmama eğilimindedir. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için hata ağacı analizi için bulanık küme değerlendirmesi ve olasılıksal tahmin kullanan bulanık mantık tabanlı hibrit bir yaklaşım üzerinden gidilmesinin uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Bu yöntemde donanımsal bileşenlere ilişkin hata oranları ve hata modları tedarikçi firmaların dokümanlarından ve OREDA dokümanlarından elde edilir iken insan hatası gibi hatalar ise dilsel değişken üzerinden tanımlanmıştır.  $X_i$  herhangi bir temel olay ve  $P(X_i)$  ilgili olayın hata olasılığı olmak üzere bağlantı kapılarının VE ya da VEYA olmasına göre tepe olayın hata olasılığı Denklem 12 ile hesaplanır.

$$P(T) = \begin{cases} \prod_{i=1}^N P(X_i) & \text{VE için} \\ 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(X_i)) & \text{VEYA için} \end{cases} \quad (12)$$

Diğer taraftan her olayın hata olasılığı iyi tanımlanmamış olabilir. Bu noktada dilsel değişken kavramı, geleneksel nicel ifadelerde makul bir şekilde tanımlanamayacak kadar karmaşık veya çok kötü tanımlanmış durumlarla

parametreler sırası ile Kategori, MTTF<sub>D</sub>, DC<sub>avg</sub> ve CCF’dir. Bu dört parametreye göre performans seviyesinin değerinin belirlenmesi EN ISO 13849-1:2005 4.5.4’e göre Tablo 3 oluşturulmuştur. Tablo 3’e kullanılarak sistemin sağladığı performans seviyesi ortaya çıkartılır.

uğraşırken çok faydalıdır. Bir dil değişkeni, değerleri doğal veya yapay dilde sözcükler veya cümleler olan değişkendir. Örneğin, 'az' dilsel bir değişkendir. Diğer taraftan bir dilsel değişken bulanık sayı ile temsil edilebilir. Örneğin, Şekil 3’de {Çok Düşük (ÇD), Düşük (D), Oldukça Düşük (OD), Orta (O), Oldukça Yüksek (OY), Yüksek (Y), Çok Yüksek (ÇY)} dilsel ifadelerin bulanık sayı karşılıkları temsil edilmiştir [18].



**Şekil 3.** Dilsel değişkeni temsil eden bulanık sayı (Fuzzy number representing linguistic variable)

Uzman muhakeme modelleri nicel risk değerlendirmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda klasik uzman modeli ya da Bayesian uzman modeli gibi çeşitli modeller geliştirilmiştir [19]. Bu yaklaşımların önyargı ve bağımsızlık gibi bazı elverişsiz durumları söz konusudur. Diğer taraftan endüstri tarafından sıklıkla tercih edilen geçmiş deneyime dayalı uzman kararlarının ağırlıklandırılması stratejisi hem daha güvenilir hem daha rahat uygulanabilir bir metot olarak düşünülmüş ve tercih edilmiştir. Ağırlıklandırma için Tablo 4 geliştirilmiştir. Bu tablo sektör uzmanlarının katkıları ile oluşturulmuştur.



**Tablo 4.** Uzman görüşü ağırlıklandırma tablosu (Expert opinion weighting table)

Pozisyon	İş Tecrübesi (yıl)	Eğitim	Yaş	Ağırlık Skoru
Profesör/Yönetici	>30	Doktora (PhD)	>50	5
Doçent/Kd. Mühendis	21...30	Yüksek Lisans (MSc)	40...50	4
Mühendis	11...20	Lisans (B.Sc.)	36...40	3
Teknisyen	5...10	M. Yüksek Okulu (MYO)	30...35	2
İşçi	<5	Meslek Lisesi (ML)	<30	1

Toplam  $n$  adet uzmanın olduğu düşünülüğünde  $i$ . uzmanın ağırlıklandırma puanı  $WS_i$ , ilgili uzmanın iş tecrübesi, eğitim ve yaş niteliklerine bağlı olarak elde ettiği ağırlık skorlarının toplamıdır. Diğer taraftan ilgili uzman için ağırlıklandırma faktörü  $WF_i$  ile ilişkili ifade Denklem 13’de verilmiştir.

$$WF_i = \frac{WS_i}{\sum_{k=1}^n WS_k} \quad (13)$$

Bu çalışmada dilsel değişkenleri bulanık sayılara dönüştürebilmek için Chen ve Hwang tarafından geliştirilmiş olan nümerik yaklaşım kullanılmıştır [20]. Bu çalışmada dilsel ifade olarak Şekil 3’de verilen dilsel ifadeler ve üyelik fonksiyonları üzerinden tanımlanmıştır. Hesaplamalarda kolaylık olması açısından tüm üyelik fonksiyonları yamuk üyelik fonksiyonları üzerinden tanımlanmıştır öyle ki  $a < b < c < d$  olmak üzere  $(a, b, c, d)$  üyelik fonksiyon parametreleridir. Şekil 3’e göre “OY” ve “Y” dilsel değişkenlerine ilişkin parametreler  $(a, b, c, d) = (0.5, 0.6, 0.7, 0.8)$  ve  $(a, b, c, d) = (0.7, 0.8, 0.8, 0.9)$  şeklindedir.

Diğer taraftan her bir temel olay için farklı uzmanlar tarafından verilen dilsel ifadeler birleştirilmeli ve tek bir görüşe ulaşılmalıdır. Bu noktada doğrusal görüş havuzu yöntemi kullanılmıştır [21].  $N_e$  uzman sayısı,  $m$  temel olay sayısı ve  $i = 1 \dots m$  olmak üzere dilsel değişkene karşılık gelen nihai toplanmış bulanık sayı Denklem 14’te göre hesaplanır.

$$FN_i = \sum_{j=1}^{N_e} LE_{ij} WF_j \quad (14)$$

Burada  $LE_{ij}$   $i$ . temel olay için  $j$ . uzman tarafından verilen dilsel ifadeye (a veya b veya c veya d) karşılık gelmektedir.  $WF_j$  ise ilgili uzmana ilişkin ağırlık faktörüdür.

Ayrıca bu elde edilen bulanık sayıyı durulaştırmak için ise yine Chen and Hwan tarafından ortaya atılan “sol ve sağ bulanık sıralama yöntemi” tercih edilmiştir [20]. Buna göre bir bulanık sayının sol ve sağ fayda puanı sırası ile Denklem 15-16 ile elde edilir.

$$\mu_L = \frac{1-a}{1+b-a} \quad (15)$$

$$\mu_R = \frac{d}{1+d-c} \quad (16)$$

Bulanık olasılık skoru (BOS) ise Denklem 17 ile elde edilir.

$$BOS = \frac{\mu_R + (1 - \mu_L)}{2} \quad (17)$$

Son olarak  $E$ , belirsizlik içeren temel olay olmak üzere ilgili olaya ait bulanık olasılık skoru Onisawa’nın tanımlanmış olduğu Denklem 18 verilen bulanık hata olasılığı  $P(E)$  ifadesi ile elde edilir [22].

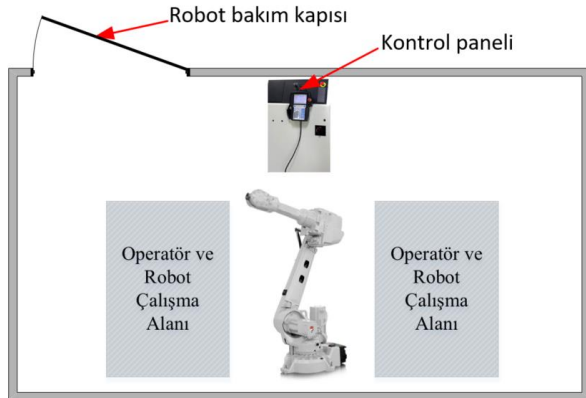
$$P(E) = \frac{1}{10^{2.301 \left( \frac{1-BOS}{BOS} \right)^{1/3}}} \quad (18)$$

Genel olarak bulanık hata ağacı ile ilgili işlem adımları Mahmood ve arkadaşları tarafından genel olarak tanımlanmıştır [23]. Buna göre robotik kaynak hatları ile ilgili olarak düzenlenen hata ağacı algoritmasına ait işlem adımları aşağıdaki gibi türetilmiştir.

1. Tepe olayı seçin ve hata ağacı diyagramını oluşturun.
2. Hata ağacı mantık diyagramında nesnel olasılığa sahip temel olayları ve ayrıca belirsizlik içeren dilsel değişkenler yardımıyla ifade edilecek temel olayları belirle.
3. Nesnel olasılığa sahip temel olaylar için tedarikçi firmalardan ya da OREDA veri tabanından ilgili güvenilirlik parametrelerini elde et.
4. Operatör hatası ve belirsiz temel olaylar için uzman görüşlerini topla ve derle.
5. Farklı uzman görüşlerini içeren dilsel ifadeleri bulanık sayılara dönüştür ve uzmanların görüşlerinden tek bir bulanık sayı elde et.
6. Uzman görüşlerinin nihai karşılığı olan bulanık sayıyı bulanık olasılık puanına ve akabinde bulanık başarısızlık oranına dönüştür.
7. Tepe olaya ait başarısızlık oranı değerini ve  $MTTF_D$  değerini hesapla.  $DC_{avg}$  değerini hesapla. Performans seviyesi değerini belirle.

### 3. ROBOTİK KAYNAK HATTI RİSK ANALİZİ (RISK ANALYSIS OF ROBOTIC WELDING LINE)

Robot hatları planlanan işe göre farklı tasarımlara sahiptir. Bu noktada her tasarım ve sistem için özgün risk analizi, güvenlik seviyesi ve fonksiyonel güvenliğin sağlanması üzerine çalışma yapılmalıdır. Robot hücrelerinin emniyet performans seviyesi ile ilgili ISO 10218-2:2011 5.2.2. ve ISO 1349-1 standardı belirleyicidir. Robotik kaynak hattı ile ilgili sektör temsilcileri ile yapılan görüşmelere neticesinde Şekil 1’de verilen performans seviyesi belirleme tablosuna göre  $S=S2$ ,  $F=F2$  ve  $P=P1$  için tasarımın  $PL=d$  seviyesinde performansla sahip olması gerekliliği açığa çıkmıştır. Ayrıca Şekil 2’de göre güvenlik ekipmanlarının kategori 3 seviyesinde olması gerekmektedir.



Şekil 4. Robot hattı prensip şeması (Principle diagram of the robot line)

Şekil 4’de verilen hat için yapılan HAZOP çalışması göre sistem seviyesinde riskler Tablo 5’de liste halinde ifade edilmiştir.

Tablo 5. Robot hattı ile ilgili riskler (Risks related to robot line)

Risk Kodu	Riskin Açıklaması
RSK01	Operatör çalışma alanındayken robotun da aynı alana gelmesi
RSK02	Alanda operatör varken robotun çalışması
RSK03	Herhangi bir acil durum senaryosunda robotun durmaması
RSK04	Soğutma suyunun kesilmesi ya da aşırı ısınma
RSK05	Pnömatik sistem hatası

Bu risklerden en tehlikelisi RSK01 kodu ile verilen risktir. Zira bu riskin sonucunda robot operatöre zarar vermektedir. Eğer operatör çalışma alanında ise bu riskten kaçınılması operatör için nerede ise imkânsızdır. Bu çalışmada RSK01 üzerinden ilgili hesaplamalar yapılacaktır ve yöntem tanıtılacaktır. Uygulamada süreç aynı adımlar takip edilerek diğer riskler için de işletilebilir.

Buna göre yukarıda liste halinde verilen riskleri kabul edilebilir değerlere çekebilmek için yapılan çalışma sonucunda alınacak güvenlik önlemleri maddeler halinde verilmiştir. Bu güvenlik tedbirleri aktif fonksiyonları içerdiği gibi beraberinde pasif güvenlik tedbirlerini barındırmaktadır.

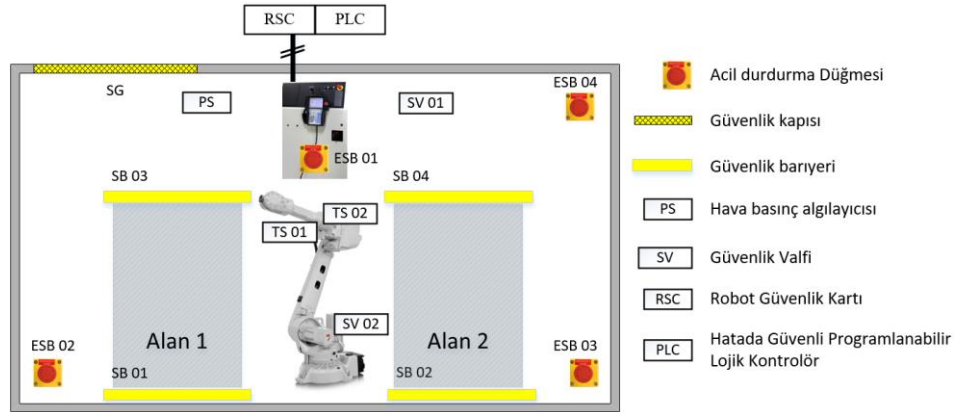
- I. İlk olarak robot çalışma alanının güvenlik kuralları çerçevesinde koruyucu bariyerler ile kapatılması ve bu bariyerlerin darbeye dayanıklı malzemenen, belirlenen dışında herhangi bir alanından içeriye geçişi engelleyen ve sağlam yapıda olması.
- II. Operatörün ve robotun çalışma alanında olduğunu anlayacak bir ekipmanın kullanılması gereklidir. Bunun için alan tarama özelliği olan ve alan içerisinde cisim olması durumunda bilgi veren güvenlik bariyeri (GB) kullanılması. Hat yapısından dolayı ISO 13857’e göre güvenlik bariyerleri 300mm-2000mm arası boylara sahip olmalıdır. Her

bir çalışma alanı için operatör çalışma alanının her yerini tarayacak şekilde L şeklinde monte edilecek uygun boyutlarda iki adet güvenlik bariyerinin kullanılması uygun olacaktır. Benzer şekilde robotun çalışma alanında olup olmadığını anlamak için de alanın arka tarafına da robot çalışma alanına girdiği andan itibaren algılanması için 800mm boyutunda bir adet güvenlik bariyerinin kullanılmasına karar verilmiştir. İlgili bariyerin “Parmak Korumalı” olması daha uygun olacaktır.

- III. Robot bakım işlemlerinde ve özel müdahalelerde içeriye girmeyi sağlamak amaçlı bir kapı kullanılmalıdır. Bu kapının da yine bir güvenlik ekipmanı ile kontrol edilmesi ve içeride herhangi birinin bulunması veya kapının açık bulunması durumları algılanmalıdır. Bu amaçla da Güvenlik Kapısı (GK) olarak adlandırılan bir ekipmanın da tasarıma eklenmesi uygun olacaktır.
- IV. Operatörün yada hatta çalışma yapan kişilerin anormal bir durumda sistemi durdurabileceği acil durdurma butonu (ADB) kullanılmalıdır. Şekil 4’de verilen hat için mesafeler dikkate alındığında operatör çalışma alanlarına, kontrol paneline ve güvenlik bariyeri iç bölgesine olmak üzere dört adet eklenmesi yeterli olacaktır. ADB’ler 1oo2 mimariye göre çalışacaklardır.
- V. Robotta oluşabilecek anormal durumların da algılanabilmesi için robot üzerine algılayıcı ekipmanlarının eklenmesi gerekmektedir. Aşırı ısınmayı algılamak amacıyla 1oo2 mimarisine göre çalışan iki adet sıcaklık algılayıcı (SA) ve ayrıca su basıncının algılanması için de bir adet basınç algılayıcı (BA) tasarıma eklenmiştir.
- VI. Ayrıca sistemde bulunan hareketli kısımların kontrolü için de robot ve çalışma alanları için birer adet güvenlik valfinin (GV) kullanılmasına karar verilmiştir. Bu valfler 1oo2 mimari ile çalışacak ve anormal bir durumda robota ve çalışma alanında bulunan ekipmanlara giden akış kesilerek şekilde sisteme entegre edilecektir.

Tüm bu ekipmanların kontrolü sağlamak amacıyla da sisteme bir adet hatada güvenli kontrol sistemi eklenmiştir. Tüm aktif emniyet fonksiyonlarını bu özel kontrolör üzerinden işletilecektir. Yapısı itibari ile yüksek güvenilirliğe sahip olan bu ekipmanlar yedekli mimaride çalışabilme özelliğine sahiptir. Bu çalışmada 1oo2 mimariye sahip uygun bir hatada güvenli programlanabilir kontrol sistemi tercih edilmiştir.

Bahsedilen koşulların sağlanması için gerekli en önemli şartlardan biri de robotun güvenlik fonksiyonlarının kontrol edilebilmesidir. Bu da robot acil durumlarının kontrol edildiği ve kontrol panosu içerisinde yer alan robot güvenlik kartının (RGK) hatada güvenli kontrol sistemi ile entegre olmasıdır. Aksi takdirde herhangi bir acil duruş koşulu sağlandığında robot bu bilgiyi alamayacak ve acil duruşa geçmeyecektir.



Şekil 5. Güvenlikle İlişkili Sistem Yerleşim Planı (System layout of the safety related system)

Şekil 5'te robot hattı ile ilgili tasarlanan güvenlikle ilgili sistem yerleşim planı verilmiştir. Ayrıca şu ifade edilmelidir ki güvenlikle ilişkili sistemler kapsamında dikkat edilmesi gereken en önemli husus hedeflenen performans seviyesiyle ilişkili olarak ekipman seçimidir. Bu noktada ilgili ekipmanın hata oranı, çalışma şartı koşulları, etkin ömrü büyük önem taşımaktadır. Endüstride yapılan en büyük hatalardan birisi sadece hatada güvenli programlanabilir kontrol sisteminin seçilmesinin yeterli olduğu yanılgısıdır. Unutulmamalıdır ki bir sistem ancak en zayıf halkası kadar güçlüdür. Bu noktada güvenilirlikle ilgili parametreler açısından dengeli bir ürün seçimi son derece önemlidir. Diğer taraftan kaynak robot hatları robot ve

operatör etkileşiminin yüksek olduğu hatlardandır. Bu noktada ilgili hatta robot sistem bileşenlerinin hatasının yanı sıra operatör hatasının (OP) da ilgili risk analize dâhil edilmesi sürecin daha iyi anlaşılabilmesi, daha gerçekçi sonuçlara ulaşılması için çok önemlidir. Operatör hatası yapısal olarak belirsiz ve kesin olmayan bir olay olması neticesinde sistem üzerine olan etkisini kantitatif olarak risk analiz sürecine dahil etmek için ilgili olay dilsel değişkenler üzerinden modellenmiştir. Bu nedenle operatör hatası ile ilişkili olarak Şekil 3'de verilen bulanık küme üzerinden ifade edilmiştir. Operatör hatası ile ilgili 20 sektör uzmanına sorulmuş ve kendilerinin ilgili hatayı bulanık kümede verilen dilsel değişkenlerden bir tanesi ile tanımlamaları istenmiştir.

Tablo 6. Uzman bilgileri (Expert information)

Uzman ID	Pozisyon	İş Tecrübesi	Eğitim	Yaş	Ağırlık Puanı	Ağırlık Faktörü $WF_i$
Uzman01	Doçent	12	PhD	36	15	0,0564
Uzman02	Teknisyen	12	MYO	41	11	0,0414
Uzman03	İşçi	19	ML	42	10	0,0376
Uzman04	Operatör	10	MYO	36	10	0,0376
Uzman05	K. Mühendis	12	B.Sc.	34	12	0,0451
Uzman06	Mühendis	1	MSc	25	9	0,0338
Uzman07	Yönetici	25	B.Sc.	54	18	0,0677
Uzman08	Yönetici	23	MSc	52	19	0,0714
Uzman09	Teknisyen	7	MYO	35	8	0,0301
Uzman10	İşçi	20	ML	40	10	0,0376
Uzman11	K. Mühendis	16	MSc	45	16	0,0602
Uzman12	Profesör	27	PhD	50	19	0,0714
Uzman13	K. Mühendis	22	MSc	46	17	0,0639
Uzman14	Mühendis	5	B.Sc.	29	9	0,0338
Uzman15	K. Mühendis	10	PhD	39	14	0,0526
Uzman16	Operatör	7	MYO	37	10	0,0376
Uzman17	Operatör	13	MYO	43	12	0,0451
Uzman18	Yönetici	20	MSc	45	17	0,0639
Uzman19	Yönetici	25	B.Sc.	53	18	0,0677
Uzman20	Operatör	15	MYO	42	12	0,0451

Uzmanlara ait bilgiler, toplam ağırlık puanları ve ağırlık faktörleri Tablo 6'da verilmiştir. Her bir uzman için ağırlık puanı Tablo 4'te verilen uzman görüşü ağırlıklandırma tablosu referans alınarak elde edilmiştir. Örnek olarak Uzman 2 Tablo 4'e göre 12 yıllık iş tecrübesi için 3 puan, eğitim seviyesinden 2 puan,

yaşından dolayı 4 puan ve çalıştığı pozisyonundan kaynaklı 2 puan elde etmektedir. Buna göre toplamda 11 ağırlık puanına sahiptir. Tüm uzmanların ağırlık puanı elde edikten sonra Denklem 13'e göre de Ağırlık Faktörü WFi hesaplanmıştır. Ayrıca Şekil 3'te verilen dilsel ifadelere göre operatör hatası ile ilgili uzman görüşleri ise Tablo 7'de verilmiştir.

**Tablo 7.** Uzman görüşleri (Expert opinions)

Uzman ID	Görüş	Uzman ID	Görüş	Uzman ID	Görüş	Uzman ID	Görüş
Uzman01	Y	Uzman06	OY	Uzman11	OD	Uzman16	OD
Uzman02	Y	Uzman07	O	Uzman12	ÇD	Uzman17	O
Uzman03	D	Uzman08	O	Uzman13	D	Uzman18	Y
Uzman04	O	Uzman09	Y	Uzman14	O	Uzman19	ÇY
Uzman05	Y	Uzman10	D	Uzman15	OD	Uzman20	Y

Uzman görüşleri farklı farklı dilsel ifadelerle karşılık gelmektedir. Diğer taraftan bu farklı dilsel ifadeleri birleştirmek için doğrusal görüş havuzu yöntemi kullanıldığında Denklem 14'e göre operatör hatasına ilişkin olarak elde edilen bulanık sayının üyelik fonksiyonu yamuk üyelik fonksiyonu olarak açığa çıkarılır öyle ki Uzman 2'nin görüşü Y olması neticesinde  $(a_Y, b_Y, c_Y, d_Y) = (0.7, 0.8, 0.8, 0.9)$  üyelik fonksiyon değerleri Uzman 2'ye ait WFi ile çarpılır ve Uzman 2'nin nihai üyelik fonksiyonuna olan katkısı  $(a_2, b_2, c_2, d_2) = (0.415, 0.508, 0.540, 0.633)$  açığa çıkar. Sonuçta operatör hatasına ait ilgili üyelik fonksiyonu parametreleri  $(a_f, b_f, c_f, d_f) = (0.415, 0.508, 0.540, 0.633)$  şeklindedir.

Sağ ve sol sıralama yöntemine göre  $(a_f, b_f, c_f, d_f)$  üyelik fonksiyona parametrelerine sahip olan bulanık sayıyı durulaştırabilmek için Denklem 15 ve Denklem 16 kullanıldığında sol ve sağ fayda puanları sırası ile  $\mu_L = 0.5356$  ve  $\mu_R = 0.5791$  olarak elde edilir.

Buna göre bulanık olasılık skoru ise Denklem 17'ye göre hesaplanır.

$$BOS = \frac{\mu_R + (1 - \mu_L)}{2} = 0.521$$

**Tablo 8.** Güvenlikle ilişkili sistem bileşenlerinin hata oranı parametreleri (Failure rate parameters of safety-related system components)

Ekipman	$d_{op}$	$h_{op}$	$t_{cycle}$	$B_{10d}$	DC (%)	MTTF <sub>D</sub> (yıl)	$\lambda_D$
Acil Durdurma Butonu (ADB)	200	20	20	500000	60	6.94	1.64E-05
Güvenlik Valfi (GV)	200	20	5	1200000	50	4.17	2.74E-05

Bu ekipmanların katalog değerlerine göre elde MTTFD,  $\lambda_D$  ve  $\lambda_{DD}$  değerleri ayrıca Tablo 8'de verilmiştir. Güvenlik kategorisine sahip ekipmanlar için  $\lambda$ , DC ve S değerleri Tablo 9'de verilmiş, aynı tabloya hesaplanan MTTFD,  $\lambda_D$  ve  $\lambda_{DD}$  değerleri eklenmiştir.

Ayrıca IEC 61508-6:2000'e göre teşhis kapsamı için 65 ve üstü için  $\beta$ -faktör en fazla %2 olmaktadır. Bu nedenle hesaplamalarda  $\beta$ -faktör 0.02 olarak kabul edilmiştir.

Onisawa'nın tanımlamış olduğu bulanık hata olasılığı kavramı üzerinden operatör hatasını (OP) uzman görüşler ekseninde kantitatif olarak ifade etmek için Denklem 18 kullanıldığında

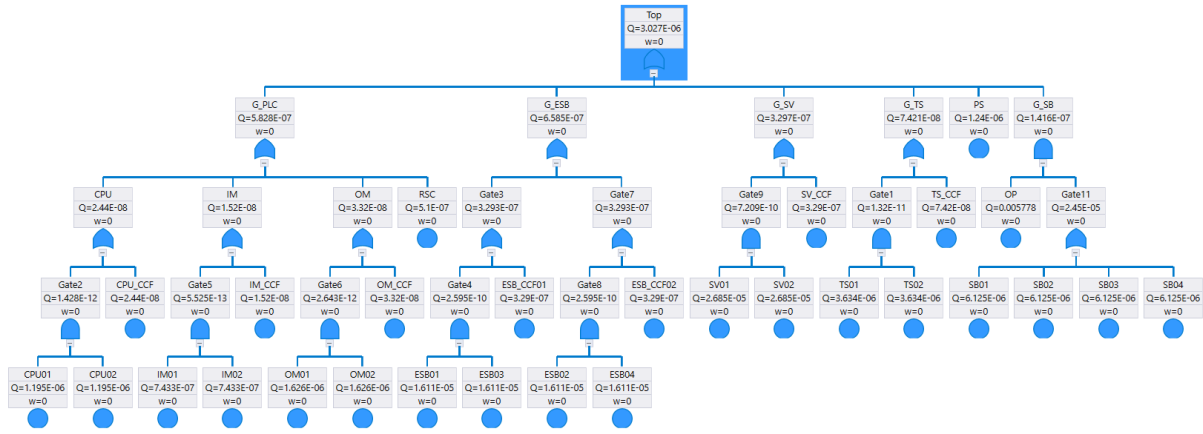
$$P(OP) = \frac{1}{10^{2.301 \left( \frac{1-BOS}{BOS} \right)^{1/3}}} = 0.005778$$

elde edilir. Ayrıca sistemin güvenlik ile ilgili hesaplamalarını yapmak için konservatif olmayan bazı varsayımlar yapılmıştır. Ekipmanların periyodik bakım aralığının bir yıl olduğu kabul edilmiştir ve ilgili testlerin uzman personel tarafından yapıldığı varsayılmıştır. Sistemin devreye almasında herhangi bir hata oluşmadığı ya da oluşan hataların tamamen düzeltildikten sonra sistemin devreye alındığı kabul edilmiştir. Aynı şekilde kullanım ömrünü tamamlayan tüm ekipmanların muadilleri ile değiştirileceği kabul edilmiştir. Bu nedenle aşındırma aşamasında oluşan hatalar dikkate alınmamıştır. Tüm yedekli bileşenlerin aynı firmadan tedarik edildiği ve hata oranlarının eşit olduğu kabul edilmiştir. Son olarak ortalama tamir süresinin sekiz saat olduğu ve tamirin uzman personel tarafından yapıldığı varsayılmıştır. Buna göre ilgili ekipmanların güvenilirlik parametreleri Tablo 8'de verilmiştir.

Yedekli mimarilere ilişkin ortak nedenli hatalar hata ağacında ilgili olay isminin ardına CCF koyulmak sureti ile sembolize edilmiştir. Örnek olarak SA CCF, iki adet sıcaklık algılayıcısı ile ilgili ortak nedenli hatadır. RSK01 kodlu "Operatör çalışma alanındayken robotun da aynı alana gelmesi" riski için hibrit hata ağacı Şekil 6'da verilmiştir.

**Tablo 9.** Güvenlik kategorisine sahip ekipmanlar için hata oranı değerleri (Failure rate values for equipment having safety category)

Ekipman	$\lambda$ (FPMH)	DC (%)	S (%)	MTTF <sub>D</sub>	$\lambda_D$
Hatada Güvenli Kontrolör(CPU)	2.439	99.63	50.00	46.80	1.22E-06
Hatada Güvenli Giriş Modülü(GM)	1.517	99.31	50.00	75.25	7.59E-07
Hatada Güvenli Çıkış Modülü(ÇM)	2.592	99.24	36.00	44.04	1.66E-06
Robot Güvenlik Kartı (RGK)	1.020	99.00	50.00	111.92	5.10E-07
Güvenlik Kapısı (GK)	1.900	60.00	50.00	60.08	9.50E-07
Güvenlik Bariyeri (GB)	12.500	90.00	50.00	9.13	6.25E-06
Sıcaklık Algılayıcısı (SA)	4.120	90.00	10.00	27.71	3.71E-06
Basınç Algılayıcısı (BA)	1.500	89.00	17.40	76.10	1.24E-06

**Şekil 6.** Robot hattı için geliştirilmiş olan hata ağacı analizi ( Fault tree analysis developed for the robot line)

Şekil 6’da verilen hata ağacı Tablo 8, Tablo 9’da verilen hata oranları ve hesaplanan  $P(OP)$  değerine göre kesme setleri belirlenir. Tepe olayın hata olasılığı Denklem 12’ye göre hesaplandığında ve hata ağacına ortak nedenli hatalar da hesaplama dâhil edildiğinde 21 adet minimal

kesme seti için oluşturulmuş gözlemlenmiştir. Buna göre hata olasılıkları ve tepe olaya olan katkıları sıralı olarak Tablo 10’da verilmiştir.

**Tablo 10.** Kesme setleri hata oranları (Failure rate of the cut sets)

Küme ID	Minimal Kesme Kümeleri	Hata Oranı	Katkı (%)	Küme ID	Minimal Kesme Kümeleri	Hata Oranı	Katkı (%)
$CS_1$	BA	1.20E-06	40.9	$CS_{11}$	ÇM_CCF	3.32E-08	1.09
$CS_2$	RGK	5.10E-07	16.8	$CS_{12}$	CPU_CCF	2.44E-08	0.806
$CS_3$	ADB_CCF01	3.29E-07	10.8	$CS_{13}$	GM_CCF	1.52E-08	0.50
$CS_4$	ADB_CCF02	3.29E-07	10.8	$CS_{14}$	GV01.GV02	7.21E-10	0.02
$CS_5$	GV_CCF	3.29E-07	10.8	$CS_{15}$	ADB01.ADB03	2.59E-10	8E-05
$CS_6$	SA_CCF	7.42E-08	2.45	$CS_{16}$	ADB02.ADB04	2.59E-10	8E-05
$CS_7$	OP.GB01	3.54E-08	1.16	$CS_{17}$	SA01.SA02	1.32E-11	4.3E-06
$CS_8$	OP.GB02	3.55E-08	1.16	$CS_{18}$	ÇM01.ÇM02	2.64E-12	8.73E-07
$CS_9$	OP.GB03	3.55E-08	1.16	$CS_{19}$	CPU01.CPU02	1.43E-12	4.71E-07
$CS_{10}$	OP.GB04	3.55E-08	1.16	$CS_{20}$	GM01.GM02	5.52E-13	1.82E-07

Bu elde edilen minimal kesme setlerine göre tepe olaya (T) ait hata olasılığı Denklem 12’ye göre hesaplandığında

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(CS_i)) = 3.02E - 06 \text{ 1/h}$$

olarak elde edilir. Buna göre sistemin tehlikeli bir hata meydana gelene kadar geçen ortalama süre MTTFD ise 37.8 yıl olarak hesaplanır. Ayrıca Denklem 11’e göre  $DC_{avg} = 90.36$  olarak elde edilir. Tablo 1’e göre MTTFD “Yüksek” olarak sınıflandırılır iken  $DC_{avg}$ , Tablo 2’e göre “Orta” olarak sınıflandırılmaktadır.



Sistemin tasarımında Seviye 3 ekipman kullanıldığı düşünüldüğünde EN ISO 13849-1:2005 4.5.4 ışığında elde edilen verilere göre Tablo 3’de verilen performans seviyesi belirleme çizelgesine göre sistem PL=d seviyesindedir. Bu noktada üçüncü bölümün başında ISO 10218-2:2011 ve ISO 1349-1 standartları referans alınarak belirlenen performans seviyesini karşıladığı gözlemlenmektedir.

Hata ağacı incelendiğinde hata oranına en yüksek katkıyı %40.9 ile basınç algılayıcının yaptığı gözlemlenmektedir. Basınç algılayıcının diğer bileşenlere göre hata oranının yüksek olmamasına rağmen katkısının bu kadar yüksek olması basınç algılayıcı için sistem mimarisi olarak 1001 sistem mimarisinin tercih edilmiş olmasıdır.

Operatör hatası modelde güvenlik bariyeri ile beraber değerlendirilmiştir. Ancak operatör hatası oluştuğunda ve güvenlik bariyeri hatası var ise RK01 riski açığa çıkmaktadır. Bu kapsamdaki her bir kesme setinin katkısı %1.16 seviyesindedir. Bu da basınç algılayıcının katkısının yanında çok düşük kalmaktadır.  $P(GB) \sim 5 P(BA)$  olduğu düşünüldüğünde operatör

hatasının analize dahil edilmemesi halinde güvenlik bariyeri olarak çok düşük güvenilirlik parametrelerine sahip bir ekipmanın tercih edilmesi gerektiği gibi bir izlenim açığa çıkacaktır.

Ayrıca aynı operatör hatası dâhil edilmeden analiz tekrarlandığında  $P(T) = 2.74E-05$  1/h olarak elde edilir. Buna göre MTTFD ise 4.17 yıl olarak hesaplanmakta ve “Düşük” olarak sınıflandırılmaktadır. Teşhis oranı ve kategorinin değişmediği düşünüldüğünde Tablo 3’e göre sistem PL=b seviyesinde çıkacaktır. Bu noktada tasarımın yetersiz olduğu ve daha yüksek bir maliyet ile daha komplike bir sistemin tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Diğer taraftan operatörü sistemin bir parçası olarak değerlendirilir ve operatör hatasını da analize eklediğimizde aslında tasarımın yeterli güvenlik seviyesine sahip olduğu açığa çıkmaktadır. Tablo 11’de ayrıca bazı olayların güvenilirlik analizine göre literatürde sıklıkla tercih edilen bazı önem faktörü değerleri verilmiştir.

**Tablo 11.** Hata ağacının nicel değerlendirmesi (Quantitative evaluation of the fault tree)

Olay	Birnbaum Önem Faktörü	Fussell-Vesely Önem Faktörü	Risk Azaltma Faktörü
BA	1.0	0.409671	1.69
RGK	1.0	0.168494	1,202
ADB CCF	1.0	0.108695	1.121
SV CCF	1.0	0.108695	1.121
SA CCF	1.0	0.0245	1.025
ÇM CCF	1.0	0.0109	1.011
CPU CCF	1.0	0.00806	1.008
GM CCF	1.0	0.00502	1.005
OP	2.45E-05	0.04676	1.04
GB	0.005778	0.01169	1,011
GV	2.68E-05	0.000238	1.00024
ADB	1.61E-05	4.36E-06	1.00009
SA	3.63E-06	4.36E-06	1

Birnbaum Önem Faktörü, herhangi bir temel olay oluştuğunda emre amade olmama ile temel olayın oluşmadığındaki emre amade olmamanın farkı olarak tanımlanır. Fussell-Vesely Önem Faktörü ise belirli bir olaya ilişkin önemi olayın meydana gelmesinin sistemde hata oluşmasına ne kadar katkıda bulunduğunu üzerinden tanımlar. Diğer taraftan risk azaltma faktörü ise temel olaya ait hata oluşma ihtimalinin sifıra indirilmesi halinde tepe olaydaki risk azalmasının oranını belirler. Dikkat edilecek olunursa hata ağacında tepe olayı direkt tetikleyen tüm olayların Birnbaum Önem Faktörü değerleri 1.0 olarak gözlemlenmektedir. Bu bariz beklenen bir sonuçtur. Örnek olarak robot güvenlik kartında ya da basınç algılayıcısında oluşan bir hata “Operatör çalışma alanındayken robotun da aynı alana gelmesi” riskini direkt açığa çıkartmaktadır. Yedekli mimaride çalışan herhangi bir temel olay ile ilgili ortak

nedenli hataların da Birnbaum Önem Faktörünün 1.0 çıkması çok barizdir. Zira ortak bir hata kaynağından dolayı yedekli mimarideki her iki bileşen de hataya gitmekte ve tepe olayın oluşmasını tetiklemektedir. Lakin ortak nedenli hataların Fussell-Vesely Önem Faktörünün düşük olması sistem hatasına olan katkılarının aslında düşük olduğunu ifade etmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

ISO 13849 standardı endüstriyel robot hatlarında iş güvenliğinin sağlanması amacıyla sistem yapısı ve işleyişine göre detaylı olarak risk analizinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Standart merkezli bu çalışmalar yapılır iken genellikle insan faktörü göz ardı edilmekte, risk hesaplamalarında kapsam dışında bırakılmaktadır. Bu çalışmada bu eksiği gidermek için robotik güvenliği standartları çerçevesinde otomotiv endüstrisinde kaynak

işlemi için kullanılan bir robot hattı üzerinde risk analiz ve risk azaltma çalışmaları sektör uzmanlarının desteği ile hayata geçirilmiştir. Özellikle ISO 13849 standardı referans alınarak fonksiyonel güvenlik hesaplamaları sistem tasarım parametreleri üzerinden yapılmış, insan faktörü analiz aşamasında sisteme dâhil edilmiştir. Bu noktada insan hatası kaynaklı belirsizliği modelleyebilmek ve risk analiz süreçlerine dâhil edebilmek için bulanık setler üzerinden hibrit bir hata ağacı analiz sistematığı önerilmiştir. İlgili algoritma sonucunda sadece ekipman kategorileri,  $MTTF_D$  ya da  $DC_{avg}$  gibi güvenilirlik parametreleri değerlendirilmemiş aynı zamanda insan faktörü analize dâhil edilmiştir. İnsan robot etkileşiminin sistemin tasarımının güvenilirliğine olan etkisi kantitatif bir şekilde incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda insan hatasının analize dâhil edilmesi güvenlik sistemini gereksiz yere tutucu bir çözümden uzaklaştırdığı gözlemlenmiş, hali hazırdaki çözümün istenilen performans seviyesini sağladığı gösterilmiştir. Diğer taraftan gelecekte insan davranışlarını modelleyen yapay zeka tekniklerinin kullanılması ve bu tekniklerin robot tasarım ve iş güvenliği planlamalarında kullanılması daha etkin çalışan güvenli işbirlikçi robotların açığa çıkmasına neden olacaktır. Sektör uzmanlarının değerlendirmelerine göre önümüzdeki yıllarda robotik kaynaklı Ar-Ge çalışmalarının daha çok güvenilirlik teknolojileri ile alakalı olacak olması bu çalışmanın önemini ayrıca destekler niteliktedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Özgür Turay KAYMAKÇI:** Verileri toplamış, sonuçları analiz etmiş ve makaleyi yazmıştır.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] IEC/ISO, "EN ISO 13849-1, Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design", **International Electrotechnical Commission**, (2017).
- [2] IEC/ISO, "ISO 10218-1 - Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots, Part 1: Robots", **International Electrotechnical Commission**, April, (2011).
- [3] IEC/ISO, "ISO 10218-2 - Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots, Part 2: Robot systems and integration", **International Electrotechnical Commission**, (2011).
- [4] IEC/ISO, "ISO/TS 15066 - Robots and robotic devices — Collaborative robots", **International Electrotechnical Commission**, (2016).
- [5] L. Gualtieri, E. Rauch, and R. Vidoni, "Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review", **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 67, (2021).
- [6] T. P. Huck, C. Ledermann, and T. Kroger, "Testing Robot System Safety by Creating Hazardous Human Worker Behavior in Simulation", **IEEE Robot Autom Lett**, 7(2), (2022).
- [7] L. Gualtieri, E. Rauch, and R. Vidoni, "Development and validation of guidelines for safety in human-robot collaborative assembly systems", **Comput Ind Eng**, 163, (2022).
- [8] P. Chemweno, L. Pintelon, and W. Decre, "Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment: A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems", **Safety Science**, 129, (2020).
- [9] A. Zacharaki, I. Kostavelis, A. Gasteratos, and I. Dokas, "Safety bounds in human robot interaction: A survey", **Safety Science**, 127, (2020).
- [10] N. Berx, W. Decré, I. Morag, P. Chemweno, and L. Pintelon, "Identification and classification of risk factors for human-robot collaboration from a system-wide perspective", **Comput Ind Eng**, 163, (2022).
- [11] IEC/ISO, "IEC 31010 - Risk management - Risk assessment techniques", **International Electrotechnical Commission**, (2019).
- [12] IEC/ISO, "ISO 12100 - Safety of machinery : general principles of design : risk assessment and risk reduction", **International Electrotechnical Commission**, (2010).
- [13] M. Rausand, **Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications**, (2014).
- [14] M. Rausand, **Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications**, 9781118112724. (2014)..
- [15] K. Fleming, "A reliability model for common mode failures in redundant safety systems", **Proceedings of the 6th Annual Pittsburgh Conference on Modelling and Simulation**, (1974).
- [16] IEC/ISO 13849-1, "Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design", **International Electrotechnical Commission**, (2015).
- [17] D. Sherwin, A. Hoyland, and M. Rausand, "System Reliability Theory-Models and Statistical Methods", **The Statistician**, 44(4), (1995).

- [18] Y. Yang, L. Garmendia, and G. Montero, Eds., "Theory and Applications of Ordered Fuzzy Numbers: A Tribute to Professor Witold Kosiński", Cham, Switzerland: Springer International Publishing, (2017).
- [19] T. Rosqvist, "On the use of expert judgement in the qualification of risk assessment", **VTT Publications**, no. 507., (2003).
- [20] S.-J. Chen, C.-L. Hwang, F. P. Hwang, F. Multiple, and A. Decision, "Fuzzy multiple attribute decision making (methods and applications)", **Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**, no. XI, (1992).
- [21] S. C. Hora and E. Kardeş, "Calibration, sharpness and the weighting of experts in a linear opinion pool", **Ann Oper Res**, 229(1), (2015).
- [22] T. Onisawa, "An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility", **Fuzzy Sets Syst**, 27(2), (1988).
- [23] Y. A. Mahmood, A. Ahmadi, A. K. Verma, A. Srividya, and U. Kumar, "Fuzzy fault tree analysis: A review of concept and application", **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, 4(1),(2013).