

BİR TRAMVAY HATTININ GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Ayhan KOYUN, Özgür Turay KAYMAKÇI

İstanbul Ulaşım A.Ş. , Esenler, İstanbul

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul

akoyun@istanbul-ulasim.com.tr, kaymakci@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 23.11.2014; Kabul/Accepted: 08.09.2015)

ÖZET

Cer gücü sistemi ve bu gücün iletim şeklinin kritik bir öneme sahip olduğu raylı ulaşım sistemlerinde öncelikli hedef, sistemin ihtiyaç duyduğu cer gücünü güvenilir bir şekilde temin ederek işletme sürekliliğini sağlamaktır. Bu da ancak cer gücü sistem bileşenlerinin minimum hata ile çalıştırılması ile sağlanabilir. Bu kapsamda yüksek kullanılabilirlik ve emniyet için raylı sistemler bünyesinde kullanılan cer gücü besleme sistem bileşenlerinin hata durumları belirlenmeli, bu hata durumlarının sebep olacağı riskler açığa çıkartılmalı, kabul edilemeyecek olanları engelleyen emniyet fonksiyonları hayata geçirilmeli ve sonuçta sistem gerekli emniyet seviyesine çekilmelidir. Bu çalışmada cer gücü besleme sistemine ait olan alt bileşenler İstanbul Ulaşım A.Ş. işletmesinde bulunan Kabataş - Bağcılar T1 tramvay hattı cer gücü besleme sistemi özelinde incelenmiş, sistemin bünyesinde bulunan hata durumları analiz edilmiş, alt sistemlere ait Markov modeller oluşturulmuş ve ilgili alt sistemler için güvenilirlik değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca bu modeller ışığında elde edilen sonuçlar referans alınarak tüm sisteme ilişkin emniyet analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cer sistemleri, güvenilirlik, işletme sürekliliği, raylı sistem, Markov model, hata ağacı analizi

RELIABILITY ANALYSIS OF A TRAM LINE

ABSTRACT

In railway systems which traction power system and transmission type of the power have a critical importance, priority target is that supplying continuity of operation by obtaining a reliable traction power which the system need. This can only be achieved by the operation of the traction power system components with minimal faults. In this scope, failure modes of the traction power supply system components which are used within the railway systems must be determined, risks which these failure modes will cause should be exposed, safety functions that prevent unacceptable risks should be implemented and as a result the system must be reached to the required level of the safety for high availability and safety. In this study, sub-systems that located in the traction power supply system were examined in the scope of the traction power supply system of the Kabataş - Bağcılar T1 tram line that is operated by Istanbul Transportation Co., failure modes were analyzed, Markov models have been created for sub-systems and reliability values were calculated for corresponding sub-systems. In addition, safety analysis of the whole system is made by getting the results that are obtained in the light of the models as a reference.

Keywords: Traction systems, reliability, continuity of operation, railway system, Markov models, fault tree analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde şehirleşme her geçen gün artmakta ve buna bağlı olarak kent içi ulaşım, özellikle İstanbul gibi büyük metropollerde önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Hızlı şehirleşme ve nüfus artışının bir yansıması olan artan motorlu taşıt sayısı, hava kirliliği de dâhil olmak üzere birçok sorunu da

beraberinde getirmekte ve toplu taşımacılığın artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu noktada yüksek konfor, performans, taşıma kapasitesi ve emniyet seviyesine sahip olan raylı sistemler öne çıkmaktadır. Günümüzde raylı ulaşım işletmeciliği, kullanılabilirlik ve emniyet olmak üzere iki önemli kriter üzerine kurulmuştur. Bu nedenle enerji kayıplarına neden olabilecek hataları tanımlamak, sınıflandırmak ve

sistemin durmasının kabul edilebilir risk aralığında olduğunu garanti etmek çok büyük önem arz etmektedir. Günümüzde raylı sistemler gibi kritik sistemlere ait güç sisteminin sadece elektriksel yönden analiz edilmesi yeterli değildir. Bunun yanı sıra var olan sistemin sahip olduğu güvenilirlik değeri belirlenmelidir. Ayrıca sistemin bünyesinde bulunan koruma sistemlerinin de istenilen emniyet seviyesinde olduğu garanti edilmelidir. Cer gücü sistemleri, birçok alt sistemden oluşan, birden fazla kaynaktan beslenen ve geniş alana yayılı büyük enerji iletim tesisleridir. Sistem bileşenlerinde farklı sebeplerle oluşabilecek birçok hata, raylı sistem işletmesine zarar vermekte ve sonuçta kullanılabilirliği düşmektedir. Bu kapsamda EN 50126-3'de enerji kesilmelerine neden olabilecek her türlü hata en yüksek riske sahip hata grubu olan "önemli arıza" olarak tanımlanmıştır [1]. Elektrik güç sistemlerinde ana koruma elemanı olarak kullanılan kesiciler, günümüzde mikroişlemci tabanlı koruma - kontrol röleleri ve çeşitli ölçüm cihazlarının entegrasyonu ile yük akışını kontrol etmekte, gerekli durum ve senaryolarda sistemi emniyetli moda taşımakta ve sonuçta sistemin elektriksel işlevselliğini güvenli bir şekilde yerine getirebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda kesiciler, yüksek performans ve güvenilirlik değerlerine sahip olması gereken elemanlardır ve bu nedenle bu çalışmada kesiciler emniyetle ilişkili sistemin bir alt bileşeni olarak ele alınmış ve analizler bu açıdan yapılmıştır. Raylı sistemlerde emniyet yönetim süreçlerinin uygulanması için gelişmiş yöntemlerin ve sistem yaklaşımının daha iyi anlaşılmasını amaçlayan EN 50126-1 standardında bir sistem, hedeflenen işlevselliği elde etmek için sistemli bir şekilde birbirine bağlanmış alt sistemler ve bileşenler bütünü olarak tanımlanmıştır. Aşikârdır ki alt sistemlerin ve bileşenlerin işlevselliği değişirse sistem durumu ve davranışı da değişebilir. Bu kapsamda EN 50126 - 1, bir sistemin uzun vadeli çalışma karakteristiğini RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) genel başlıkları altında ele almış ve bu başlıklara bağlı parametrelerin belli sınırlar aralığında kalmasını sistemin yaşam döngüsü boyunca belirlenmiş mühendislik kavramları, yöntemler, araçlar ve tekniklerin uygulanması ile garanti altına almıştır. Bu kapsamda sisteme ait RAMS analizinin düzgün bir şekilde yapılabilmesi için sistem yapısı, sistem bileşenleri, bu bileşenlerin hata tip ve değerleri, kritik elemanlar gibi kriterlerin doğru bir şekilde belirlenmeli, gerekli hesaplamalar düzenli olarak yapılarak indikatörlerin istenilen aralıkta kaldığı teyit edilmelidir. Böylelikle raylı sistem istenilen emniyet seviyesi ve kullanılabilirlik değerlerinde öngörülen maliyet sınırları içerisinde işletilebilir. Günümüzde tüm raylı sistem işletmeleri bu amacı garanti etmek durumundadır. Bir güç sisteminin en güçlü noktalarından biri trafo merkezleri olduğu halde, içerisinde zayıf noktalar olarak tanımlanabilecek ve yük veya işletme kaybına neden olabilecek hata noktaları içermektedir [2]. Bon-Hui ve Jun-Min, cer sisteminin uygun işletilebilmesi için elektrik güç sisteminin emniyetini sağlamanın ne

kadar önemli olduğundan bahsetmiş, raylı sistem trafo merkezi için güvenilirlik endekslerinin hesaplanması için hata ağacı, olay ağacı ve bunlara bağlı minimal kesim setleri yöntemlerini önermiştir. Ayrıca güvenilirlik endekslerini tüm sistemin güvenilirliğini değiştirilebilecek elemanların belirlenmesinde kullanmış ve sistemin güvenilirlik değerinde bir artış elde edilebileceği göstermiştir [3]. Bir başka çalışmada ise sistemlerin işletmesinde güç kalitesinde bir bozukluk olması durumunda, cer sisteminin performansı olumsuz olarak etkilenebileceği ve işletme verimliliği ve efektif bir enerji tüketimi için cer sisteminin belli bir güvenilirlik değerine sahip olması gerektiğinden bahsedilmiştir [4]. Raylı sistem güç sistemlerinde yüksek güvenilirliğin maliyet verimliliği ve kaliteyi sağlamak için önemli kriterlerden birisi olduğu ve sistemlerin güvenilirlik seviyesinin hesaplanması bakım faaliyetlerinin planlanmasının yanı sıra, güvenilirlik açısından kritik bileşenlerin belirlenmesi için de önemli olduğu ifade edilmiştir. S.K. Chen, T.K. Ho ve B.H. Mao yaptıkları bu çalışmada bileşenlerin güvenilirliğini tüm sistemin güvenilirliği içinde bütünleştirmiş, minimal kesim setleri tarafından kritik bileşenleri tespit etmiş, hata ağacı analizi yöntemi ile raylı sistem güç sisteminin güvenilirliği hesaplamış ve bakım faaliyetlerinin tüm sistemin güvenilirliğine olan etkisi incelemiştir [5]. Billington ise güç sistemlerinde bir trafo merkezinin güvenilirlik değerlendirmesini beş temel parametre üzerinden dikkate almıştır. Bunlar sırasıyla fiziksel sistem tanımı, performans kriteri, güvenilirlik indisleri, hata modu ve etkilerinin değerlendirilmesi, hata etkilerinin birikimidir [6]. Günümüzde elektrik güç sistemlerinde gelişen teknoloji ile birlikte yüksek performans ve güvenilirliğe sahip mikroişlemci tabanlı aktif koruma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. İstenmeyen durumlarda koruma sistemi bünyesinde bulunan emniyet fonksiyonları kesiciyi kumanda ederek sistemi şebekeden ayırmakta ve koruma sağlamaktadır. Raylı sistemlerde elektriksel koruma EN 50122-1'de ele alınmış olmasına rağmen günümüzde elektrik koruma sistemlerinin aktif sistemler olduğu düşünüldüğünde ilgili koruma fonksiyonları ve kullanılan koruma sistemleri aşında yaptığı iş itibarıyla bir emniyetle ilgili sistem olarak değerlendirilmeli ve IEC 61508'e göre incelenmelidir. Bu çalışmada cer gücü besleme sistemlerinin güvenilirliği alanında yapılan çalışmalardan farklı olarak elektriksel koruma sistemleri aktif bir emniyet sistemi olarak ele alınmış, düşük talep modunda çalışan emniyetle ilişkili sistem olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca alt birimlerinin dinamikleri diğer güvenilirlik ile ilgili çalışmalardan farklı olarak Markov modelleme tekniği kullanılarak ifade edilmiş, alt sistem davranışlarını ve hata dinamiklerini gerektiği kadar detaylı gösteren Markov modeller geliştirilmiş ve elde edilen bu modeller İstanbul Ulaşım A.Ş. tarafından işletilen T1 tramvay hattının cer gücü besleme sistemine uygulanmış ve hatta ait güvenilirlik analizi yapılmıştır. Yapılan güvenilirlik analizi için T1 tramvay hattında, katanere enerjiiyi sağlayan trafo merkezlerinden birisi olan Beyazıt trafo

merkezi referans alınmıştır. Sistemde bulunan diğer trafo merkezleri Beyazıt trafo merkezi ile eş kabul edilmiştir. Çalışma genel olarak emniyetle ilgili sistemler ve fonksiyonel emniyetin anlatıldığı, analiz yapılan sistemin elektriksel güç besleme sisteminin tanıtıldığı, sistem bileşenleri için oluşturulan Markov modelin anlatıldığı ve son olarak tüm sistemin analizi için oluşturulan hata ağacının anlatıldığı bölüm olmak üzere 4 kısımdan oluşmaktadır.

2. EMNİYETLE İLGİLİ SİSTEMLER VE FONKSİYONEL EMNİYET (SAFETY RELATED SYSTEMS AND FUNCTIONAL SAFETY)

Emniyetle ilgili sistem (Safety Related System – SRS) genel olarak "kontrol altında bir donanım için bir güvenli durumu elde etmek ya da korumak amacıyla gerekli emniyet fonksiyonlarının uygulanması için kullanılan atanmış bir sistem" olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma göre bir emniyetle ilgili sistem, kendi veya başka emniyetle ilgili sistemler ve diğer risk azaltma önlemleri ile ilgili gerekli güvenlik fonksiyonları için gerekli güvenlik bütünlüğünü elde etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bütün emniyetle ilgili sistemlerin genel bir amacı vardır. Bu amaç, riskin kabul edilebilir seviyeye düşürülmesidir. Emniyetle ilgili sistemin gerekli işlevselliği ve güvenilirliği, sistemin güvenlik yaşam döngüsünün analiz aşamasından elde edilir. Emniyetle ilgili sistem, güvenlik yaşam döngüsünün uygunsuz şekilde gerçekleşmesine karşı gerekli korumayı sağlamada başarısız olabilir. Bu nedenle Emniyetle ilgili sistemin tasarım, uygulama ve işletme fazlarında sektörü yönlendirmek amacıyla çeşitli standartlar tanımlanmıştır. Bu konuyu kapsayan en yaygın standart IEC 61508, güvenlik yaşam döngüsünün bütün aşamaları için kilit gereklilikleri tanımlar [7]. Bu şemsiye standart, IEC 62021, IEC 61511 ve IEC 50128 gibi farklı sektörler için detaylandırılmıştır. IEC 62061 makine sektörü için emniyetle ilgili E/E/PE (Elektrik / Elektronik/ Programlanabilir Elektronik) kontrol sistemlerinin tasarımı, entegrasyonu ve doğrulaması için öneriler yapar [8]. IEC 61511, süreç endüstrisinde emniyetle ilgili sistemler için detaylı bilgiler verir [9]. Son olarak EN 50128, raylı sistem koruma ve kontrol uygulamalarında kullanılan programlanabilir elektronik sistemlerin yazılımının gelişmesi için süreç ve teknik gereklilikleri belirler [10]. Şu ifade edilmelidir ki bütün bu standartlar IEC 61508 içinde tanımlanmış güvenlik yaşam döngüsünden elde edilmiştir. Güvenlik yaşam döngüsü emniyetle ilgili sistemlerin ömrü boyunca öngörülen hata yapma aralığında bünyesinde bulunan tüm emniyetli ilgili fonksiyonları hayata geçirebilmesi için yapılması gereken bütün adımları kapsayan bir mühendislik sürecidir öyle ki kavramsal süreç tasarımının başlangıcından, bütün tasarım işletim ve bakım faaliyetleri boyunca süre gelir. Genel olarak bir emniyet çevrimi risklerin analizi, risk azalması için ihtiyacın değerlendirilmesi, sistem performansı gereksinimlerinin belirlenmesi ve sistemin her zaman

doğru işletilmesinin ve bakımının sağlanması adımlarını kapsar.

2.1 Fonksiyonel Güvenlik Parametreleri (Functional Safety Parameters)

IEC 61508 güvenlikle ilgili sistemler için bazı güvenlik parametreleri ortaya atmıştır. Sistemlerin donanım tarafları bu güvenlik parametreleri üzerinden sınıflandırmıştır. Bu parametrelerden ilgili olanlar aşağıda değinilmiştir. Hata Oranı: Hata oranı güvenlik sistemleri için en önemli parametredir. t anında birimin çalışır olduğu kabulü altında, birime ait hata oranı $(t, t + \delta t)$ aralığındaki hata olasılığına eşittir ve λ olarak ifade edilir. Ayrıca hata, güvenli hata (S) ve tehlikeli hata (D) olmak üzere hata ikiye ayrılır. Ayrıca denklem (1) ve denklem (2) de verildiği gibi tehlikeli hata, teşhis edilebilir tehlikeli hata (DD) ve teşhis edilemeyen tehlikeli hata (DU) olarak ikiye ayrılır [11]. Ayrıca emniyet ile ilgili çalışmalarda hata oranının sistemin kullanım süresi içinde sabit olduğu kabul edilir.

$$\lambda = \lambda_D + \lambda_S \quad (1)$$

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (2)$$

Güvenilirlik (Reliability): Güvenilirlik fonksiyonu R(t) ile ifade edilir ve belirli bir zaman aralığında sistemin başarılı bir şekilde çalışma ölçüsüdür. Ayrıca güvenilirlik bir sistemin belirli bir zaman aralığında kendisi için istenen işlevi belirtilen sınırlar içerisinde yapabileceği olasılığıdır.

$$R(t) = \Pr\{T > t\} = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (3)$$

Teşhis Kapsamı (DC - Diagnostic Coverage): Teşhis Kapsamı, emniyetle ilişkili sistemlerde tehlikeli hataların ne oranda bulunabileceği ile ilgili bir ölçüdür. IEC 61508'de göre teşhis kapsamı (4) numaralı denklemdeki gibi tanımlanmıştır [12].

$$DC = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}} \quad (4)$$

Talep Anında Hataya Düşme Olasılığı (PFD - Probability of Failure on Demand): Emniyetle ilgili sistemin çalışması gerektiği anda hata yapma olasılığını ifade eder. Bu değer ne kadar küçük ise sistem o kadar emniyetlidir. PFD değerini hesaplamak için sadece tehlikeli hatalar göz önüne alınır. Genellikle emniyetle ilgili sistemlerin PFD değerinden bahsederken ortalamasından bahseder. Ortalama talep esnasında hata yapma olasılığı denklem (5)'de verildiği gibi tanımlanmıştır öyle ki burada $P(t)$ hata olasılığıdır.

$$PFD_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (5)$$

Ortalama Hataya Düşme Süresi (MTTF - Mean Time To Failure): Bir sistemin ya da bir birimin ilk kez hataya düşmesine kadar geçen istatistiksel ortalama çalışma süresidir. Hatada emniyetli sistemlerde ürünler genellikle MTTF değerlerine göre karşılaştırılırlar. **Ortalama Onarım Süresi (MTTR - Mean Time To Repair):** Bir sistem ya da birimin hatasının meydana gelmesi ile bu hatanın düzeltilmesi arasında geçen ortalama süredir. IEC 61508 standardına göre MTTR değeri 8 saat olarak belirlenmiştir.

Ortak Nedenli Hatalar (Common Cause Failures): İki ya da daha fazla alt sistemin eş zamanlı olarak ya da az bir zaman farkıyla ortak bir nedenden dolayı oluşan birbirine bağımlı sistematik hatalardır. Özellikle gerçekçi değerlere ulaşılabilmesi için hesaplamalara eklenmelidir. Ortak nedenli hataların modellenmesinde ve gerekli güvenilirlik parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden bir tanesi ortak nedenli hataların β faktör yöntemi ile modellenmeye dâhil edilmesidir. β faktör bütün ilişkili ortak nedenli hataları gösteren bir sabittir [12, 13]. IEC 61508-6 EK D'de bir E/E/PE sistemler için β faktörün nasıl belirleneceği IEC 61508 Tablo D.1'de ifade edilmiştir [7].

Güvenli Hata Kesri (SFF - Safe Failure Fraction): Dikkate alınan diğer bir parametre de güvenli hata kesridir. SFF, sistemin tehlikeli bir hata ile sonuçlanmayan hatanın toplam hataya oranıdır. SFF, güvenlik fonksiyonunu tehlikeye atmayacak güvenli hataların etkisinin hesaplanmasında kullanılır. IEC 61508-6'nin EK C, SFF'nin hesaplanması için (6) denklemini önerir [7].

$$SFF = \frac{\sum \lambda_S + \sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_S + \sum \lambda_D} \quad (6)$$

Donanım Hata Toleransı (HFT - Hardware Fault Tolerance): HFT, sistemin tolere edebileceği en yüksek hata sayısını ifade eder. HFT'nin sıfır olması tek bir hatanın emniyetle ilgili fonksiyonun kaybına neden olabileceği anlamına gelir. Sistemin HFT's, denklem (7)'ye göre hesaplanır.

$$HFT_{sys} = \min_{i=1}^n HFT_i \quad (7)$$

Güvenlik Bütünlük Seviyesi (Safety Integrity Level - SIL): IEC 61508 Bölüm 5 EK B'de verilen risk grafiğine göre güvenlik bütünlük seviyesi 4 seviye olarak belirlenmiştir [IEC 2010]. Buna göre SIL4 en yüksek seviyeyi temsil ederken, SIL1 en düşük seviyeyi ifade

etmektedir. Bu seviyelere karşılık gelen PFD_{avg} ve PFH değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca SFF ve HFT değerlerine bağlı olarak bir SRF için maksimum güvenlik bütünlük seviyesi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. PFD_{avg} ve PFH değerlerine göre SIL seviyeleri (SIL levels according to PFD_{avg} and PFH values)

SIL	PFD_{avg}	PFH
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$

Tablo 2. Bir emniyetle ilgili fonksiyon için en yüksek izin verilebilir SIL seviyesi (Maximum allowable SIL level for a safety related function)

SFF	HFT		
	0	1	2
$\leq 60\%$	İzin verilmez	SIL 1	SIL 2
$60\% - < 90\%$	SIL 1	SIL 2	SIL 3
$90\% - < 99\%$	SIL 2	SIL 3	SIL 4
$\geq 99\%$	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Markov Model: Sisteme ait mevcut durum verildiğinde, gelecek durumların geçmiş durumlardan bağımsız olduğu stokastik süreçleri modellemek için Andrei Markov tarafından ilk olarak ortaya atılmış bir yöntemdir. Mevcut durum, sürecin gelecekteki evrimini etkileyebilecek tüm bilgiyi kapsar. Gelecek durumlara belirli bir şekilde değil, olasılıksal bir süreçle ulaşır. Model, durumlar ve durumlar arası olasılıksal geçiş değerlerini içerir. Öyle ki sistemin modeli (8) no.lu denklemdeki gibi ifade edilir.

$$\dot{x}(t) = x(t) \cdot P \quad (8)$$

Burada P durum geçiş matrisi ve $x(t)$ sistemin durumlarının t anındaki değerlerini ifade eden olasılık vektördür öyle ki n modeldeki durum sayısı olmak

üzere $x_i(t) \in [0, 1]$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ve $\sum_{i=1}^n x_i(t) = 1$ 'dir.

Sistemin başlangıçtaki durumu x_0 ile ifade edilecek olunursa (8) no.lu denklemin çözümü (9) no.lu denklemdeki gibidir.

$$x(t) = x_0 \cdot e^{P \cdot t} \quad (9)$$

Modeldeki durumları sistemin çalışır olduğu durumlar $x_{OK,i}$, çalışamaz olduğu durumlar $x_{F,j}$ ve $i + j = n$ olduğunu düşündüğümüzde $x(t)$ durum olasılık vektörü $x(t) = (x_{OK,1} x_{OK,2} \dots x_{OK,i} x_{F,1} x_{F,2} \dots x_{F,j})$ gibi ifade edilebilir. Herhangi bir t anındaki talep anında hataya düşme olasılığını hesaplayabilmek için $x_{OK,i} = 1$ ve $x_{F,j} = 0$ alınması halinde $x(t) = (1 \ 1 \dots 1 \ 0 \ 0 \dots 0)$ olur ve (10) no.lu denklemdeki gibi hesaplanır.

$$PFD(t) = 1 - x_0 \cdot e^{Pt} \cdot x^T \quad (10)$$

Ayrıca daha fazla bilgi için literatürdeki ilgili çalışmalar ve ilgili standart incelenebilir [14, 15].

Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis - FTA): Literatürde analiz ve gerçekleştirme adımlarında yapılması gereken risk analizleri için farklı yöntemler bulunmaktadır. Hata ağacı analizi bu yöntemlerden en çok tercih edilen yöntemlerden bir tanesidir öyle ki sistem hataları ve sistem bileşenleri hataları, bağımsız olaylar arasındaki bağlantılar ile ifade edilmektedir. Günümüzde FTA güç, ulaştırma, petro-kimya gibi birçok kritik sistemin analizinde kullanılmakta, başarılı sonuçlar elde edilmektedir [16, 17]. Ayrıca IEC 61508-3 Tablo B.4 ve IEC 61508-2 7.4.5.2'de hem yazılımsal hem de donanımsal hataların analizinde FTA'nın kullanılabilirliğini ifade edilmektedir. Ayrıca FTA'nın endüstriyel problemlerde kullanılabilirliğini standardize etmek için ilgili standartlar yürürlüğe girmiştir [18].

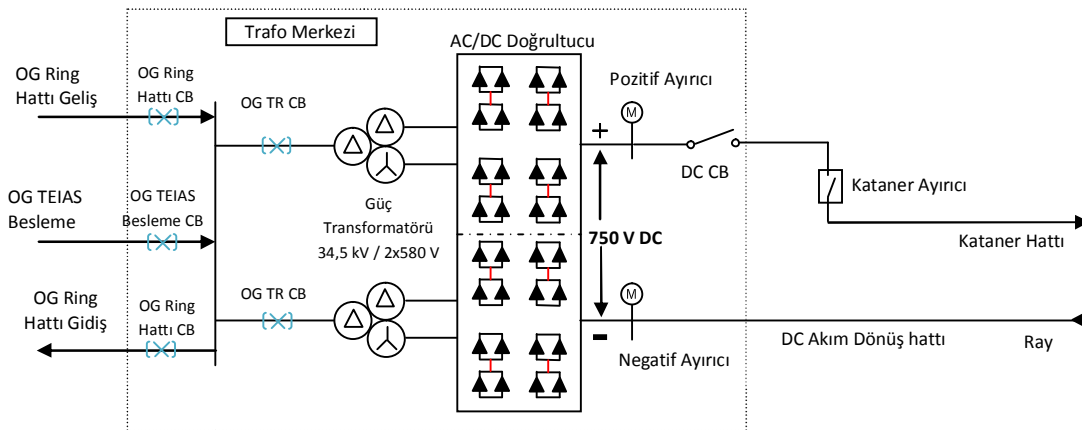
3. ELEKTRİKSEL GÜÇ BESLEME SİSTEMİNİN TANITIMI (INTRODUCTION OF THE ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEM)

Günümüzde raylı ulaşım sistemleri işletmeciliğinde belki de en önemli kriter sistemin hatasız bir şekilde işletilebilmesi ve yolculara olabildiğince kesintisiz, güvenli ve konforlu bir hizmet verilmesidir. Bu kapsamda elektrik güç besleme sisteminin planlanması, tasarımı ve işletilmesinin belli bir kalitede ve standartta olması çok büyük bir önem arz etmektedir. Diğer taraftan 20 milyon kişiye yaklaşan nüfusu ile İstanbul dünyanın önde gelen metropollerinden birisidir. Bu çalışma kapsamında incelenen T1 tramvay hattı ise dünyada bir günde en fazla yolcu taşıyan tramvay hattıdır. Bu noktada bu hattın elektrik güç besleme sisteminde oluşabilecek bir hata sistemin işletilmesine çok büyük sekteler vurabilmekte, ciddi yolcu mağduriyetleri oluşturabilmekte ve hattın işletmesinden sorumlu İstanbul Ulaşım A.Ş. için ciddi bir itibar ve para kaybına sebebiyet verebilmektedir. T1 tramvay

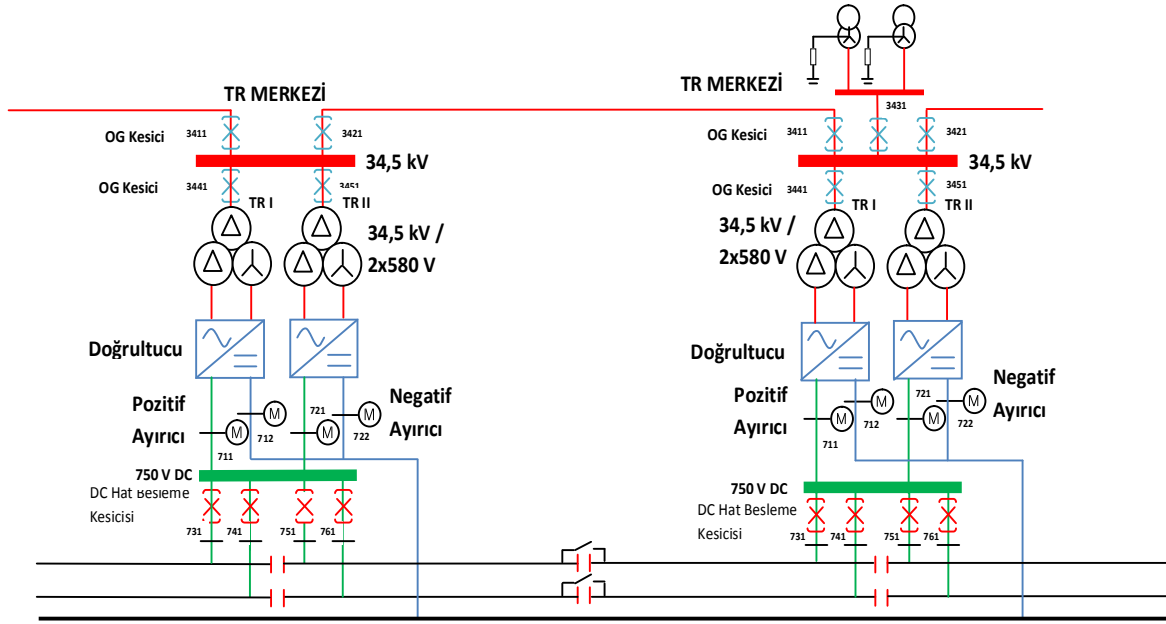
hattının elektrifikasyon sistemi genel olarak cer trafo merkezini elektriksel olarak birbirine bağlayan ring hattı, hatta gerekli cer gücünü sağlayan cer trafo merkezini, orta gerilim (OG) şalt sistemi, DC şalt sistemi ve katener sistemi olmak üzere 5 ana kısımdan oluşur. Bu 5 ana kısımdan biri olan katener sistemi, yapılan güvenilirlik analizi çalışmasına dâhil edilmemiştir. İstanbul Ulaşım A.Ş. sorumluluğunda bulunan ve güvenilirlik analizi için ele alınan T1 tramvay hattının genel olarak elektriksel özellikleri şu şekildedir: Sistem ulusal şebekeden 3 ana besleme noktası üzerinden beslenmekte ve katener hattında işletmede bulunan araçların ihtiyaç duyduğu cer gücü 10 adet trafo merkezi (TM) ile sağlanmaktadır. Trafo merkezleri esnek işletme ve yüksek güvenilirlik avantajları nedeniyle ring hattı ile birbirine elektriksel olarak bağlanmıştır. Bu çalışmada, sistemin modellenmesi T1 tramvay hattının standart besleme planına bağlı olarak yapılmıştır. Bu besleme planı şu şekildedir:

- Gülhane ana beslemeden; Dolmabahçe TM, Karaköy TM, Gülhane TM ve Beyazıt TM
- Pazartekke ana beslemeden; Haseki TM, Pazartekke TM, Hal(Merkezefendi) TM ve Demirciler TM
- Bağcılar ana beslemeden; Mehmet Akif TM ve Güneştepe TM

Standart bir trafo merkezine ait elektriksel bağlantı şeması Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre sistem genel olarak OG AC devre kesicileri, OG/AG cer trafo merkezini, AC/DC doğrultucuları ve DC kesicilerden oluşmaktadır. Elektriksel şemada görüldüğü gibi her bir trafo merkezinde güvenilirliği geliştirmek için bir yedekli besleme sistemi mevcuttur. Bu şekilde işletme sürekliliği açısından önemli bir katkı elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 2'de de görüldüğü gibi her trafo merkezinde iki katener yolunun da sağını ve solunu beslemek üzere 4 hat besleyici DC kesicisi bulunmaktadır. Bir trafo merkezi ile komşu trafo merkezi arasında bulunan katener hattı her iki trafo merkezi tarafından da beslenebilir. Bu durum güvenilirliği geliştirmenin yanı sıra cer trafo merkezini bakımı için esneklik sağlar.



Şekil 1. Cer trafo merkezinin elektriksel şeması (Electrical diagram of the substation)

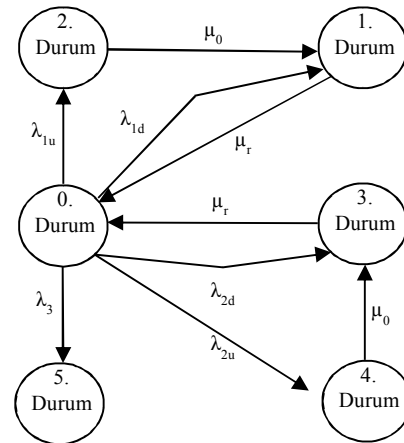


Şekil 2. T1 Tramvay hattının örnek hat şeması (Single-line diagram of the T1 tramline)

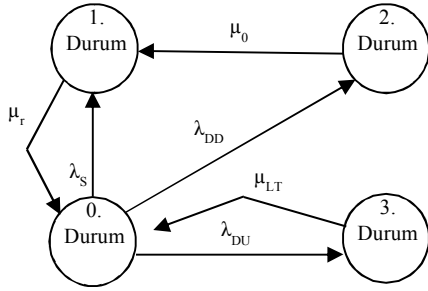
Sistemin analizinde ele alınacak alt sistemler:

- OG şalt hücresi, OG ring hattı kesicileri ve cer trafosunu besleyen OG kesicileri için ayrı ayrı olmak üzere Tablo 1'de verilen ekipmanları içinde bulunduran OG şalt sistemleridir.
- Cer gücü trafosu, 34,5 kV. gerilim seviyesindeki enerjiyi 580 V seviyesine dönüştüren ve hatta araçlar için gerekli olan cer gücünü sağlayan trafolardır. Her trafo merkezinde 2 adet bulunmaktadır.
- Doğrultucu paneli, cer trafosu vasıtasıyla 580 V. indirilen AC gerilimin diyotlar vasıtasıyla doğrultularak 750 V DC çevrilmesini sağlayan alt sistemdir.
- Pozitif besleme, doğrultucu ünitesinin pozitif uçlarından DC barayı besleyen 750 V DC ayırıcıların bulunduğu birimlerdir.
- Negatif dönüş beslemesi, doğrultucu ünitesinin negatif uçlarından negatif DC dönüş barasını besleyen 750 V DC ayırıcıların bulunduğu birimlerdir. Mevcut sistemin devresini tamamlanması amacıyla negatif kısımdan (ray sistemi) doğrultucu çıkışına geri dönüş vardır.
- DC hat besleme şalt hücresi, içinde hat besleme 750 V DC kesicileri bulunduran ve her bir DC kesici için ayrı ayrı olan DC şalt sistemleridir. Her bir trafoda her iki katener yolunun sağını ve solunu beslemek üzere 4 adet bulunmaktadır.
- Hücre kaçak koruması, şalt hücresinde hücre kaçığı hatasına karşı bir koruma rölesi vasıtasıyla sağlanan koruma ve denetlemedir. Hücre kaçığı, tüm

bir trafo merkezini enerjisiz bırakabilecek bir durumdur. Denetlenecek iki tip hücre kaçığı hatası vardır. Bunlar sırasıyla DC şalt hücresinden toprak yapısına akım teşhisi ve DC şalt hücresi ile negatif potansiyel arasında gerilim teşhisidir. OG şalt hücresi ve cer gücü trafosu alt sistemleri sistemin AC kısmını oluşturan doğrultucu paneli, pozitif besleme, negatif besleme hücresi, DC hat besleme hücresi ve hücre kaçık koruması alt sistemleri sistemin DC kısmını oluşturmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi analiz aşamasında ele alınan alt sistemlerden OG şalt hücresi ve DC hat besleme hücresi bünyesinde düşük talep modunda çalışan devre kesici bulunduran ve belirli fonksiyonlara göre koruma sağlayan aktif sistemler olarak düşünülmüştür. Sistemin DC kısmını oluşturan alt sistemler için Şekil 3'de gösterilmiş Markov model geliştirilmiş ve benzer şekilde sistemin AC kısmını oluşturan alt sistemler için Şekil 4'te verilen Markov model geliştirilmiştir.



Şekil 3. DC sistem için Markov model (Markov model for DC system)



Şekil 4. AC sistem için Markov model (Markov model for AC system)

Şekil 3'de belirtilen ve DC kısmı oluşturan alt sistemler için kullanılan Markov modelde 0. durum, sistemin hatasız olarak çalıştığı durumu ifade ederken, 1. durum sistemin işleyişini etkilemeyecek ve sistem için herhangi bir tehlike oluşturmayacak teşhis edilebilir güvenli hatalar sebebiyle sistemin gittiği durumu ifade etmektedir. Diğer taraftan 2. durum, sistemin işleyişini etkilemeyecek ve sistem için herhangi bir tehlike oluşturmayacak teşhis edilemeyen güvenli hatalar sebebiyle gidilen durumu ifade etmektedir. 3. durum ise sistemin işleyişini trafo merkezlerinde bulunan yedekli yapı sayesinde etkilemeyecek teşhis edilebilir hatalar nedeniyle gidilen durumu göstermektedir.

Son olarak 4. durum sistemin işleyişini trafo merkezlerinde bulunan yedekli yapı sayesinde etkilemeyecek teşhis edilemeyen hatalardan kaynaklı gidilen durumu göstermektedir. 5. durum ise trafo merkezini tümüyle devre dışı bırakabilecek hatalar kaynaklı durumu ifade etmektedir.

Sistemin AC kısmını oluşturan alt sistemler için Şekil 4'deki Markov model geliştirilmiştir. Modelde sistemin sorunsuz olarak çalıştığı hâl 0. durum ile ifade ederken, sistemin çalışmasını engellemeyecek ve onarılabilir düzeltilebilecek güvenli hatalar sebebiyle gidilen yer 1. durum ile ifade edilmiştir. 2. durum ise sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyecek teşhis edilebilir tehlikeli hataları ifade etmektedir. Teşhis edilemeyen tehlikeli hatalar kaynaklı gidilen durum ise 4. durum ile modele eklenmiştir. Sistem için tanımlanan bu durumlar arasında geçiş olasılıkları ise sırasıyla λ_S , λ_{DD} , λ_{DU} , $\mu_R = \frac{1}{\tau_R}$, $\mu_0 = \frac{1}{\tau_0}$ ve $\mu_{LT} = \frac{1}{\tau_{LT}}$ olarak ifade edilmiştir.

Bu çalışmada gerekli güvenilirlik analizini yapmak ve sisteme ait emniyet seviyesini belirleyebilmek için yöntem olarak Markov model ve FTA tercih edilmiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak kesici gibi bakım çalışmaları haricinde düşük talep modunda çalışan ve çeşitli koruma fonksiyonları ile kontrol edilen elemanların bulunduğu aktif koruma sistemleri emniyetle ilgili sistemler olarak ele

alınmıştır. Bu alt sistemleri oluşturan her bir elemana ait PFD_{avg} değerleri bu elemanlar için oluşturulan Markov modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Emniyet ilişkili sistemler olarak ele alınan alt sistemleri oluşturan her bir eleman için elde edilen PFD_{avg} yararlanılarak ilgili sistemin PFD_{avg} değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca IEC 61508 Part 5 Annex B'de ifade edilen risk graf matrisine göre emniyetle ilgili sistemin sağlaması gereken emniyet bütünlük seviyesinin SIL 2 olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [7].

Hesaplamalar esnasında yapılan kabuller ise aşağıdaki gibidir.

K1. Teşhis süresi 24 saat olduğu kabul edilmiştir.

K2. AC kısım için S değerinin %50 olduğu kabul edilmiştir.

K3. Pozitif beslemenin ve negatif dönüş beslemenin hata oranı değerlerinin aynı olduğu varsayılmıştır.

K4. Pozitif besleme, negatif dönüş besleme DC hat besleme hücresi alt sistemlerinin MTTR değerinin 8 saat olduğu varsayılmıştır.

K5. Periyodik bakım süresi 6 ay olarak alınmıştır.

K1, K2 ve K4 no.lu kabuller standartlardan alınmıştır. K3 ve K5 no.lu kabuller ise İstanbul Ulaşım A.Ş.'nin bakım prosedürlerinden çıkartılmıştır. Tablo 3 ve Tablo 4'de verilen hata modları ve hata oranları değerleri OG ve DC şalt sistemlerinin üretici firmalarından alınmış, DC şalt sistemine ait hata modları ve hata oranları oluşturulan Markov modelde tanımlanan durumlar ve geçiş olasılıklarına göre sınıflandırılmıştır.

Sınıflandırmaları gerçekçi bir şekilde yapabilmek için İstanbul Ulaşım A.Ş. bünyesinde oluşturulan ilgili arıza kayıtları detaylı olarak incelenmiş, olası arızaların etkileri sektör uzmanları ile analiz edilmiş ve bu analizler üretici firmadan tedarik edilen özet halindeki hata modu ve etki analizi (FMEA – Fault Mode and Effect Analysis) raporları ile karşılaştırılmıştır.

Hem OG şalt hücresi hem de DC hat besleme hücresine ait alt sistemler hata ağacı analizinde birbirlerine paralel olarak bağlı sistemler olarak düşünülmüş, buna göre PFD_{avg} değerleri hesap edilmiş ilgili değerler Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca Tablo 1 ve Tablo 2 referans alınarak hem OG şalt hücresi hem de DC hat besleme hücresi için emniyet seviyeleri belirlenmiş ve Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 3: OG şalt hücresi elemanlarının hata oranları
(Failure rates of the MV switchboard elements)

Parçalar ve Bileşenler	Fonksiyon	Hata Modu	Hata Oran	MTTR
Donanımlar SF6 gazlı kesici	OG beslemesini bağlama veya kesme	Sahte açma	0,115E-6	1
Donanımlar SF6 gazlı kesici	OG beslemesini bağlama veya kesme	Kapamada hata	0,285E-6	
Donanımlar SF6 gazlı kesici	OG beslemesini bağlama veya kesme	Açmada hata	0,285E-6	
Donanımlar SF6 gazlı kesici	OG beslemesini bağlama veya kesme	Gaz kaçağı	0,148E-6	
Toroidal akım trafosu	Ölçme - izleme	Yanma / yalıtkan kaybı	0,286E-6	8
Gerilim trafosu	Ölçme - izleme	Yanma / yalıtkan kaybı	0,240E-6	8
Röleler (zaman, yardımcı vb.)	Anahtarlama vb.	Fonksiyon kaybı	0,060E-6	1
Kontrol birimi	Kontrol arayüzü	Fonksiyon kaybı	3,226E-6	3
Şalt panosunun hücresi	Koruma / ayırma	İzolasyon kaybolması & iç ark hatası	0,530E-6	20

Tablo 4: DC hat besleme hücresi elemanlarının hata oranları
(Failure rates of the DC line feeder switchboard elements)

Bileşen	λ_{1u}	λ_{1d}	λ_{2u}	λ_{2d}	λ_3
DC kontaktör	5,0000E-09	-	1,50E-07	-	-
Koruma rölesi	1,5000E-06	-	3,55E-06	-	-
Yüksek hızlı CB	9,52E-08	9,52E-08	1,522E-07	9,52E-08	1,9690E-01
Yalıtım yükseltici	1,0096E-06	-	1,186E-06	6,089E-07	7,9520E-01
MCB	-	8,16E-08	-	2,176E-07	-
Mikro şalter	5,44E-07	5,44E-07	-	1,088E-06	-
Röle	-	1,928E-07	4,82E-08	2,41E-07	-
Seçici şalter	-	4,82E-08	-	3,12E-07	-
Şönt direnç	-	-	-	3,94E-08	-
Parafudr	-	2E-09	-	-	4,30E-09
Test sigortası	-	-	-	2E-08	-
Test direnci	-	-	1,70E-09	-	-

Tablo 5: OG hücresi elemanlarının PFD_{avg} değerleri
(PFD_{avg} values of the MV switchboard elements)

Alt Sistem	Bileşen	PFD _{avg}
OG hücresi	Kesici	1,6654E-06
OG hücresi	Akım trafosu	4,4677E-06
OG hücresi	Gerilim trafosu	3,8294E-06
OG hücresi	Yardımcı röleler	1,1995E-07
OG hücresi	Kontrol birimi	1,9299E-05
OG hücresi	Şalt hücresi	2,1054E-05

Tablo 6: DC hat besleme hücresinin bileşenlerinin PFD_{avg} değerleri
(PFD_{avg} values of the DC line feeder switchboard elements)

Alt Sistem	Bileşen	PFD _{avg}
DC hat besleme hücresi	DC kontaktör	4,77142E-07
DC hat besleme hücresi	Koruma rölesi	1,12908E-04
DC hat besleme hücresi	Yüksek hızlı CB	4,36682E-04
DC hat besleme hücresi	İzolasyon yükseltici	1,78185E-03
DC hat besleme hücresi	MCB	1,73762E-06
DC hat besleme hücresi	Mikro şalter	8,68784E-06
DC hat besleme hücresi	Yardımcı röle	3,45770E-06
DC hat besleme hücresi	Seçici anahtar	2,49154E-06
DC hat besleme hücresi	Şönt direnç	3,14624E-07
DC hat besleme hücresi	Parafudr	9,41694E-06
DC hat besleme hücresi	Test sigortası	1,59708E-07
DC hat besleme hücresi	Test direnci	5,40771E-08

4. GÜÇ BESLEME SİSTEMİNİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ (RELIABILITY ANALYSIS OF THE POWER SUPPLY SYSTEM)

T1 tramvay hattına ilişkin FTA modeli hatta ait besleme senaryosu göz önüne alınarak yapılmıştır. FTA modeli oluşturulurken katener hattı 2 komşu trafo merkezi arasında kalan alt birimlere ayrılmış ve bu alt birimlerin enerjisiz kalması durumu ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu alt birimler sırasıyla;

- Dolmabahçe - Karaköy arası katener hattı arızası
- Karaköy - Gülhane arası katener hattı arızası
- Gülhane - Beyazıt arası katener hattı arızası
- Beyazıt - Haseki arası katener hattı arızası
- Haseki - Pazartekke arası katener hattı arızası
- Pazartekke - Hal arası katener hattı arızası
- Hal - Demirciler arası katener hattı arızası

- Demirciler - Mehmet Akif arası katener hattı arızası
- Mehmet Akif - Güneştepe arası katener hattı arızası

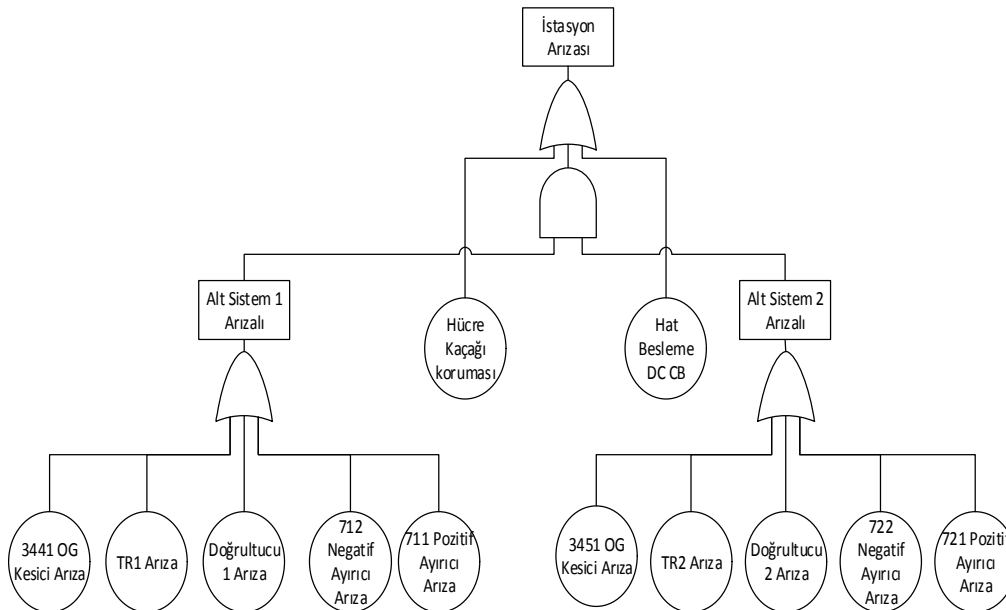
olarak oluşturulmuştur. Bunların dışında, alt birim olarak bir trafo merkezinin tamamen devre dışı kalması durumu “İstasyon Arızası” olarak tanımlanmış ve mevcut sistemde elektriksel donanım olarak şalt tesisleri aynı olduğundan her trafo merkezi için bu tanım kullanılmıştır. Sistem analizinde ele alınacak alt sistemlere ait güvenilirlik parametreleri Tablo 8’de verilmiştir. Son olarak, oluşturulan alt birimler belli bir sistematik içinde düşünülerek ve Tablo 8’deki veriler kullanılarak komple sistem için oluşturulan FTA modelde tepe olay *Sistem Arızası* olarak ifade edilmiştir. Sistemde bulunan bileşenlerin ortak nedenli hatanın sisteme olan etkisi IEC 61508 - 6 referans alınarak incelenmiş ve $\beta_D = 0.1$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 7. Alt sistemlerin PFD_{avg} değerleri (PFD_{avg} values of the subsystems)

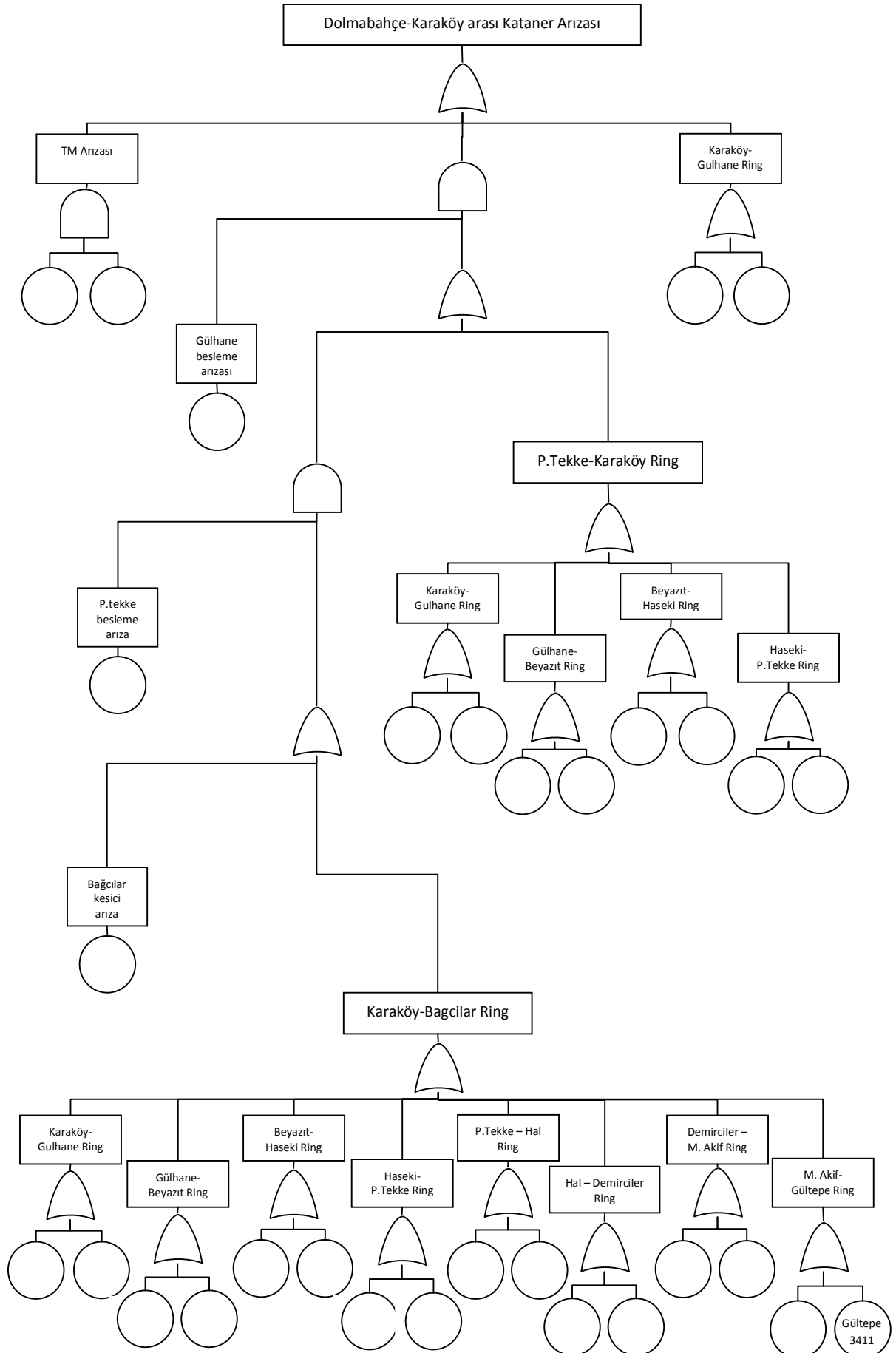
Alt Sistem	PFD_{avg}	SFF	HFT_{sys}	SIL
OG şalt hücresi	5,04363E-05	%91	0	2
DC hat besleme hücresi	2,36073E-03	%99	0	2

Tablo 8. Alt sistemlerin güvenilirlik parametreleri (Reliability parameters of the subsystems)

	MTBF(yıl)	Hata Oranı(E-6)	Güvenilirlik
OG şalt hücresi	22,1	5,175	0,9775
Trafo	69	1,6556	0,9927
Doğrultucu panel	174,4	0,6545	0,9971
Negatif dönüş hücresi	729,9	0,1564	0,9993
Pozitif besleme	729,9	0,1564	0,9993
DC hat besleme hücresi	14,9	7,6456	0,9670
Hücre kaçağı koruması	95,4	1,1965	0,9947



Şekil 5. İstasyon arızası için hata ağacı (Fault tree for the substation failure)



Şekil 6. Dolmabahçe-Karaköy arası kataner arızası için geliştirilmiş olan hata ağacı (Fault tree developed for failure of catenary system between Dolmabahçe-Karaköy)

İstasyon Arızası: Mevcut sistemde bulunan trafo merkezlerinde OG bara ile katener arasında kalan kısımda bir arızadan dolayı ele alınan trafo merkezinin hattı besleyememe olasılığıdır. Belirtilen kısımda bulunan cer trafosunu besleyen OG şalt hücresi, trafo, doğrultucu, pozitif besleme, negatif dönüş beslemesinden birisinin arıza olasılıkları üzerinden elde edilmiştir. İlgili arıza için geliştirilmiş olan hata ağacı Şekil 5’de ayrıca verilmiştir.

Dolmabahçe - Karaköy Arasında Katener Hattı Arızası: T1 hattı üzerinde her bir trafo merkezi iki komşu trafo merkezi ile yedekli çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Dolmabahçe - Karaköy trafo merkezleri arasında kalan katener hattının enerjisiz kalması şu koşullar altında ancak mümkündür:

Katener hattının bu kısmının Gülhane'den beslenmesi durumunda Dolmabahçe ve Karaköy TM'lerinin arızalanması,

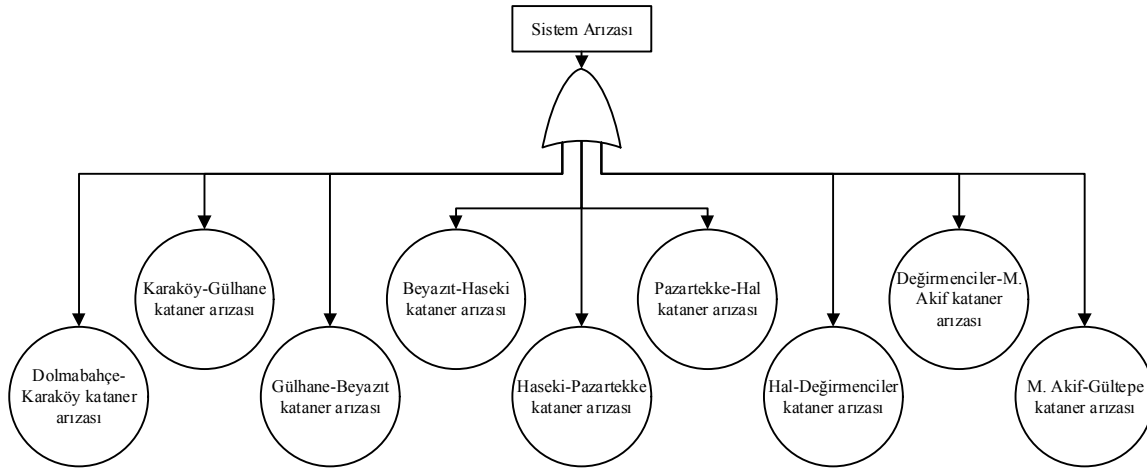
- Karaköy-Gülhane arasındaki ring hattında bulunan OG kesicilerden herhangi birisinin arızalanması,
- Gülhane ana besleme OG kesicisinin arızası ve Pazartekke-Karaköy arasında OG ring kesicilerinden herhangi birisinin arızası,

- Bütün ana besleme OG kesicilerinin arızalanması,
- Gülhane ve Pazar Tekke ana besleme OG kesicilerinin arızalanması ve Karaköy-Gülhane arasında ring OG kesicilerinden herhangi birisinin arızalanması.

İlgili hatta ait hata ağacı Şekil 6’de ayrıca verilmiştir.

Sistem Arızası: İstanbul Ulaşım A.Ş T1 tramvay hattı katener sistemi iki komşu trafo merkezi arasında kalan katener hatları olmak üzere bölümlere ayrılmıştır. Bu katener bölümleri için ayrı ayrı hata olasılıkları tanımlanmıştır. Katener sisteminin herhangi bir bölümünün enerjisiz kalması durumunda araçların sistem üzerinde kararlı olarak hareket edemeyeceği düşünülerek işletme sürekliliği sağlanamayacaktır. Bu da aslında sistemin hata vermesi manasına gelmektedir. İlgili hata ağacı Şekil 7’de verilmiştir.

Oluşturulan FTA modeli ve buna bağlı olarak yapılan güvenilirlik hesaplamaları sonucunda FTA birimleri ve ele alınan tüm sistem için elde edilen güvenilirlik değerleri Tablo 9’da verilmiştir. Sonuç olarak sistemin güvenilirlik değeri 0,916693 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Sistem arızası için geliştirilen hata ağacı (Fault tree developed for System Failure)

Tablo 9. FTA sonucunda elde edilen güvenilirlik değerleri (Reliability values acquired as a result of FTA)

Birimler	Güvenilirlik
İstasyon arızası	0,957477
Dolmabahçe - Karaköy arası kataner hattı arızası	0,950077
Karaköy - Gülhane arası kataner hattı arızası	0,995198
Gülhane - Beyazıt arası kataner hattı arızası	0,996120
Beyazıt - Haseki arası kataner hattı arızası	0,997229
Haseki - Pazartekke arası kataner hattı arızası	0,997744
Pazartekke - Hal arası kataner hattı arızası	0,997705
Hal - Demirciler arası kataner hattı arızası	0,992970
Demirciler – M. Akif arası kataner hattı arızası	0,992161
M. Akif - Güneştepe arası kataner hattı arızası	0,995198
Sistem hatası	0,916693

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, İstanbul Ulaşım A.Ş. tarafından işletilen T1 tramvay hattının besleme sistemi ele alınmış, alt sistemlere ait Markov modelleri elde edilmiş ve hata ağacı analiz yöntemi kullanılarak elektriksel besleme sistemine ait güvenilirlik analizi yapılmıştır. Bu noktada farklı noktalar arasında kataner hattının güvenilirlik değerleri hesap edilmiş ve bu değerler referans alınarak sistemin tamamının güvenilirlik değeri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra diğer çalışmalardan farklı olarak, OG şalt hücresinin ve DC hat besleme hücresinin birer emniyetle ilişkili sistem olarak değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Bu kapsamda kesiciler ile hayata geçirilen fonksiyonlar birer emniyetle ilişkili fonksiyon olarak değerlendirilmiş, ilgili sistemlerin Markov modelleri elde edilmiş, bu modeller vasıtasıyla sistemin sağladığı PFD_{avg} değeri hesaplanmış ve sistemin sağladığı emniyet bütünlük seviyesi standartlarda verilen tablolar referans alınarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, OG şalt hücresinin ve DC hat besleme hücresinin emniyet bütünlük seviyesinin SIL 2'e karşılık düştüğü görülmüş ve sistemin güvenilirlik değeri 0,916693 olarak hesaplanmıştır. IEC 61508 Part 5 Annex B'de tavsiye edilen risk graf matrisine referans alındığında analiz edilen emniyetle ilgili sistemlerin en az SIL 2 seviyesinde bir emniyet bütünlük seviyesine sahip olmaları gerektiği görülmektedir. Bu kapsamda OG şalt hücresinin ve DC hat besleme hücresinin gerekli emniyet seviyesini sağladığı söylenebilir. Ayrıca sistemin güvenilirlik değerleri gayet uygundur. Eğer daha yüksek güvenilirlik değerlerine ihtiyaç duyulması halinde periyodik bakım süresi kısaltılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. International Electrical Commission, **PD CLC/TR 50126-3: 2008 - Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). Guide to the application of EN 50126-1 for rolling stock RAM**, IEC Standards Online, 2008.
2. Karki R., Billinton R. ve Verma A. K., **Reliability Modeling and Analysis of Smart Power Systems**, Springer Science & Business Media, USA, 2014.
3. Ku B. H. ve Cha J. M., "Reliability Assessment of Electric Railway Substation by using Minimal Cut Sets Algorithm", **Journal of International Council on Electrical Engineering**, Cilt. 1, 135-139, 2011.
4. Ríos M. A. ve Ramos G., "Power System Modelling for Urban Massive Transportation Systems", **Infrastructure Design, Signaling and Security in Railway**, InTech Europe, 2012.
5. Chen S.K., Ho T.K. ve Mao B.H., " Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis" **IET Electric Power Applications**, Cilt 1, 161–172, 2007.
6. Billinton R., Ringlee R. ve Wood A. J., **Power-System Reliability Calculations**, MIT Press, USA, 2003.
7. International Electrotechnical Commission, **IEC 61508 - Functional Safety of Electrical/Electronic/ Programmable Electronic Safety Related systems**, IEC Standards Online, 2010
8. International Electrotechnical Commission, **IEC 62061, Safety of machinery - Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems**, IEC Standards Online, 2005.
9. International Electrotechnical Commission, **IEC 61511 safety instrumented systems for the process industry sector, parts 1–3**, IEC Standards Online, 2003.
10. International Electrotechnical Commission, **BS EN 50128:2011 "Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Software for railway control and protection Systems**, IEC Standards Online, 2011.
11. Goble W., "Safety Instrumented Systems Verification: Practical Probabilistic Calculations", ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation, 2005.
12. Böresök J., "Functional Safety - Basic Principles of Safety - Related Systems", Huthig GmbH & Co. KG Heidelberg, Germany, 2007.
13. Böresök J., "Electronic Safety Systems - Hardware Concepts, Models, and Calculations" Huthig GmbH & Co. KG Heidelberg, Germany, 2004.
14. International Electrotechnical Commission, **IEC 61165, Application of Markov techniques**, IEC Standards Online, 2006.
15. Bukowski, J.V., "A comparison of techniques for computing PFD average", **Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium**, 590 – 595, 24-27 Jan. 2005.
16. Ho, T. K. ve Mao, B. H., "Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis", **IET Electric Power Applications**, Cilt 1, No 2, 161 – 172, 2007.
17. Volkanovski, A., Cepin, M. ve Mavko, B., "Application of the FTA for assessment of power system reliability", **Reliability Eng. and Sys. Safety**, Cilt 94, 1116 – 1127, 2009.
18. International Electrotechnical Commission, **IEC 61025, Fault Tree analysis (FTA)**, IEC Standards Online, 2006.