



Metro Hattı Cer Gücü Elektrifikasyonunun Güvenilirlik ve Hata Ağacı Analizi

Turan ÖLMEZ^{*1}, Büşra ÖLMEZ²

¹ Siemens Mobility Ulaşım Sistemleri A.Ş., Mühendislik Birimi, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*turan.olmez@siemens.com

(Alınış/Received: 12.11.2024, Kabul/Accepted: 25.12.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Demiryolu sisteminin en önemli bileşenlerinden biri, tren hareketi için gerekli enerjiyi sağlamaktan sorumlu olan cer gücü sistemidir. DC cer güç kaynağı sisteminin güvenli ve güvenilir bir şekilde çalışması, tüm kentsel demiryolu ulaşım sisteminin temelini oluşturur. DC cer güç kaynağı sistemi arıza analizi, koruması ve güç sistemi güvenilirlik değerlendirmesi hakkında araştırma yapmak çok önemlidir. Raylı sistemlerin sürekliliği, güç tedarikinin performansından önemli ölçüde etkilenmektedir. Demiryolu cer gücü elektrifikasyon sisteminin gelişmesiyle ve raylı sistemler yolcu sayısının artmasıyla birlikte RAMS kavramı, Güvenilirlik (R), Kullanılabilirlik (A), Bakım yapılabilirlik (M) ve Emniyet (S) önemi artmıştır. Bundan dolayı, cer gücü elektrifikasyon sisteminin yüksek güvenilirliğini analiz etmek ve iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu makalede, Metro İstanbul A.Ş. cer gücü sistemi güvenilirliği ile ilgili endeks sunulmaktadır ve Hata Ağacı Analizi (FTA) yaklaşımını kullanarak güvenilirliği değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu makale sistem güvenilirliğini artırmanın ve cer gücü elektrifikasyonunun güvenilirlik endeksini artırmak için öneriler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: RAMS, Hata Ağacı Analizi, Cer Gücü Sistemi, Raylı Sistemler, Güvenilirlik Analizi

Reliability and Fault Tree Analysis of Metro Line Traction Power Electrification

Abstract: One of the most important components of the railway system is the traction power system, which is responsible for providing the necessary energy for train movement. Safe and reliable operation of the DC traction power supply system is the basis of the entire urban railway transportation system. It is very important to conduct research on DC traction power supply system fault analysis, protection and power system reliability assessment. The continuity of railway systems is significantly affected by the performance of power supply. With the development of railway traction power electrification system and the increase in the number of passengers in railway systems, the importance of RAMS concept, Reliability (R), Availability (A), Maintainability (M) and Safety (S) has increased. Therefore, it is necessary to analyze the high reliability of the traction power electrification system and carry out improvement studies. In this article, the index related to the traction power system reliability of Metro İstanbul Inc. is presented and the reliability is evaluated using the Fault Tree Analysis (FTA) approach. In addition, this article provides suggestions for improving the system reliability and increasing the reliability index of traction power electrification.

Keywords: RAMS, Fault Tree Analysis, Traction Power System, Rail Systems, Reliability Analysis

1. Giriş

Son yıllardaki, ekonomik gelişme ve şehir nüfusunun artmasıyla birlikte, birçok metropolde şehir içi raylı sistem ulaşımın toplam uzunluğu da arz ve talep dengesini sağlayacak şekilde artış gösterdi. Cer gücü sistemi (TPS), elektrikli demiryollarının en önemli sistemlerinden birisidir ve emniyet sorunları giderek daha belirgin hale gelmektedir. Tren işletmesi esnasında yaşanacak bir elektrik kesintisi yalnızca ulaşımı felce uğratmakla kalmayacak, aynı zamanda ciddi ekonomik kayıplara da neden olacaktır. DC cer gücü sisteminin güvenli ve güvenilir çalışması, tüm şehir içi demiryolu ulaşım sisteminin temelini oluşturmaktadır. DC cer gücü sistemlerinin

Atıf için/Cite as: T. Ölmez, B. Ölmez, "Metro hattı cer gücü elektrifikasyonunun güvenilirlik ve hata ağacı analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 72-82, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1583509

arıza analizi, koruma mekanizmaları ve güvenilirlik değerlendirmeleri üzerine araştırmalar yapılması ve bu sistemlerin geliştirilmesi gerekliliği giderek daha önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, metro hattındaki cer gücü trafo merkezlerinin güvenilirlik analizi yapılmıştır. Cer gücü sistemindeki arızaların temel sebeplerini belirlemek ve bu sebeplerin sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla hata ağacı analizi yöntemi kullanılmıştır. Demiryolu ulaşımında, verimlilik ve hizmet kalitesini sağlamak için, cer gücü sistemlerinde yüksek emre amade oranı elde edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bakım planlanmaları ve güvenilirlik açısından sistemlerin güvenilirlik seviyesinin hesaplanmasının kritik bir bileşen olduğu ele alınmıştır. S.K. Chen, T.K. Ho ve B.H. Mao çalışmasında, sistemdeki bileşenlerin güvenilirliğini bütünsel bir şekilde değerlendirmiş, önemli bileşenleri belirlemiş, raylı sistemdeki cer gücü sisteminin güvenilirliğini hata ağacı analizi ile hesaplamış ve bakımın sistemin güvenilirliği üzerindeki etkilerini analiz etmiştir [1]. Ku & Cha, makalelerinde demiryolu trafo merkezinin güvenilirliğini değerlendirmek için minimal kesim kümeleri algoritmasını kullanmıştır [2]. Feng güvenilirlik teorisini kullanarak demir yolu katener sistemlerini değerlendirmek için analitik bir simülasyon yöntemi geliştirdiler [3]. Hayashiya, Japonya'daki on yıllık metro işletme verilerine dayanarak bir DC güç kaynağı sistemindeki her bir bileşenin güvenilirliğini değerlendirdiler ve yedekli bir sistem konfigürasyonu üzerinde niceliksel analiz gerçekleştirdiler [4]. J. Liu, yüksek hızlı trenler için cer gücü sisteminin yapı parametresi ve çalışma prensibine dayalı cer gücü sisteminin güvenilirlik blok diyagramı (RBD) modellerini oluşturmuştur [5]. Doğu Japonya Demiryolu Şirketi'ndeki DC cer gücü sistemi için, cer trafo merkezinin güvenilirliği ile yedekli DC besleme sistemi arasındaki ilişki verilmiştir [6].

2. Cer Gücü Elektrifikasyonu Sistem Tanıtımı

Güvenilirlik ve hata ağacı analizi yapılacak olan raylı sistem hattı Üsküdar - Samandıra M5 Metro hattıdır. İstanbul Anadolu yakasının ikinci, Türkiye'nin ise ilk sürücüsüz metro hattıdır. Üsküdar'dan Samandıra'ya kadar toplam 20 istasyondan oluşmaktadır. M5 metro hattı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi çalışmaları kapsamında Sultanbeyli bölgesine kadar uzatılacaktır. M5 Üsküdar – Samandıra metro hattının istasyon bilgileri aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



Şekil 1. M5 Üsküdar – Samandıra metro hattı istasyonları

Üsküdar – Samandıra hattında toplam uzunluk yaklaşık 26,5 km olduğundan DC tipi gerilim tercih edilmiştir. DC gerilim kullanımı, DC motorun tork hızını kontrol etme ve DC gerilimini kısa mesafe için daha ince iletkenler üzerinden iletme ve daha düşük güç kaybı gibi avantajlarıyla karşımıza çıkmaktadır. Raylı sistemlerde AC ve DC olmak üzere iki tip akım kullanılmaktadır. AC gerilim, enerji dağıtım sürecinin yüksek gerilim tarafında kullanılır. DC gerilim, sadece cer gücü temininde kullanılır [7].

Tablo 1. M5 metro hattı teknik verileri

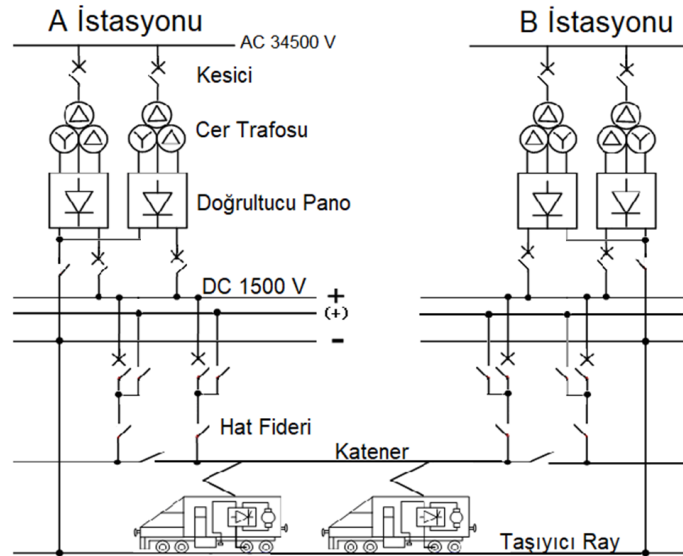
İşletme bilgileri	Değer
Hat uzunluğu:	26,5 km
Hat açıklığı:	Standart (1,435 mm)
Sefer süresi:	43 dk / Tek yön
Sefer sıklığı:	4 dakika (Pik saatlerde)
İstasyon sayısı:	20
Araç seti ve vagon sayısı:	126 adet
Günlük sefer sayısı:	520 sefer
Günlük yolcu sayısı:	311.349 (kişi/gün)

Depo sahası/Kumanda merkezi:	Dudullu
İşletme saatleri:	06:00 - 00:00

Türkiye'nin DC elektrikli demiryolu sisteminde, Ulusal Dağıtım İşletmesi önce TEİAŞ merkezine AC 154kV sağlar, ardından 34,5kV'luk gerilim seviyesine düşürülür ve bu gerilim seviyesine orta gerilim denir. TEİAŞ merkezlerinden metro girişine kadar gelen 34,5kV AC gerilim düşürülür ve trene güç sağlamak için cer trafo merkezi aracılığıyla 1500V DC'ye doğrultulur. Tren, katener üzerinden güç alır ve son olarak akım, taşıyıcı ray üzerinden, dönüş hattıyla cer trafo merkezinde devresini tamamlar [8]. M5 metro istasyonlarının tamamı, TEİAŞ'a ait 3 ana besleme noktasından beslenmekte ve trenlerin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi katener hattı aracılığıyla, cer gücü trafo merkezi (TM) ile sağlanmaktadır. Ulusal şebekeden 3 ana merkezden sağlanan besleme konfigürasyonu aşağıdaki tablo 2'de gösterilmiştir:

Bağlarbaşı TEİAŞ Merkezi	Ümraniye TEİAŞ Merkezi	Dudullu TEİAŞ Merkezi
Üsküdar TM	Çarşı TM	Dudullu TM
Fıstıkağacı TM	Çakmak TM	Çekmeköy TM
Altunizade TM	Altınşehir TM	Sarıgazi TM
Bulgurlu TM		Samandıra TM

Hat boyunca 11 adet cer trafo merkezi bulunmaktadır. Her trafo merkezinde iki adet cer trafosu ve iki adet yardımcı servis trafosu, iki adet AC/DC konvertör, DC şalt sistemi ve katener sistemi bulunmaktadır. Aşağıdaki standart bir cer gücü trafo merkezinin elektriksel tek hat şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Cer trafo merkezi tek hat şeması

Bir demiryolu güç kaynağı sistemi genellikle transformatörler, doğrultucu üniteler, kesiciler, ayırıcı ve katener /3.ray gibi çok sayıda ana bileşen içerir [9]. Metro hatları için gerekli olan güç, doğru akım (DC) formunda sağlanmakta olup, trafo merkezlerinde uygun bir gerilim seviyesine düşürülerek trenlerin hareketi için gereken enerji katener üzerinden iletilmektedir. Bu makalede, analiz edilecek gerçek demiryolu sistemi DC güç kaynağı tarafından beslendiğinden ve tek hat diyagramı Şekil 2'de gösterildiğinden yalnızca DC trafo merkezi yapılandırması ele alınmıştır. Demiryolu sisteminin güç gereksinimine bağlı olarak, güç 154/34,5 kV dönüş oranına sahip bir veya birkaç step-down trafo tarafından sağlanır. Bu nokta, demiryolu güç

sistemine ana besleme noktaları olarak kabul edilir. Orta gerilim (O.G.) seviyesindeki bara, hat güvenilirliğini sağlamak ve ayrıca bir ring bağlantısı sağlamak için bir sonraki trafoya bağlanmak üzere şalt cihazları, devre kesici, röle vb. ile donatılmış olup, bu baradan cer trafosuna ve yardımcı servis trafosuna güç verilir [10]. Demiryolu elektrifikasyonu beş farklı fonksiyonel kısımda görülebilir, bunlar; Orta gerilim seviyesinde bir ana besleme trafosu, orta gerilim kesicileri, 34,5/1,2 kV AC dönüş oranına sahip cer trafosu, 1,2 kV AC/1,5 kV DC oranına sahip AC/DC konvertör ve katener sistemidir.

3. Güvenilirlik Analizi Yöntemi ve Metro Cer Gücü Sistemi

Güvenilirlik değerlendirme yöntemi genellikle ürünün güvenilirliğini matematiksel istatistik veya olasılık teorisiyle analiz etme yöntemini ifade eder [11]. Genellikle nitel analiz ve nicel analiz içerir. Sistem güvenilirlik analizi için analitik yöntemler ve simülasyon yöntemleri olarak ayrılabilen birçok yöntem vardır. Bu makalede, cer gücü elektrifikasyon sisteminin güvenilirliğini incelemek için güvenilirlikle ilgili Hata Ağacı Analizi yöntemi tanıtılmış ve demiryolu sistemine uygulanmıştır. 1962'de H. A. Watson, bir kontrol sistemini değerlendirmek için ilk olarak Hata Ağacı Analizi (FTA) kavramını geliştirmiştir [12]. FTA o zamandan beri çok çeşitli konu ve uygulamalara sahip kapsamlı bir değerlendirme yöntemi haline gelmiştir. Sistemin arıza nedenlerinin çeşitli kombinasyonlarını ve bunların oluşma olasılığını belirlemek için bir hata ağacı diyagramı çizilmektedir. FTA kullanım amacı, güvenilirlikle ilgili teoriler ve endeksler aracılığıyla sistemdeki çeşitli ekipmanların kullanımını tam olarak iyileştirmektir, böylece demiryolu cer güç kaynağı sistemi daha kararlı bir şekilde çalışabilir. Bu makalede, arıza teşhisi ve bakımı için cer trafo merkezleri güç kaynağı sisteminin güvenilirliğini etkileyen faktörleri belirlemek için hata ağacı analizi kullanılmıştır [13]. Mevcut literatüre dayanarak, FTA'yı hata ilişkisini resmeden bir yöntem olarak kullanan bu makale, Metro İstanbul'un M5 Üsküdar – Samandıra metro hattının elektrikli demiryolu cer gücü sisteminin güvenilirliğini, sistem arızalarının nedenlerini analiz etmekte ve sistem güvenilirliğini iyileştirmek için yenilikçi önlemler önermektedir.

3.1. Güvenilirlik endeksi

Güvenilirlik endeksi, güvenilirlik teorisinin önemli bir parçasıdır. Güvenilirlik hesaplamalarında faydalanılması gereken matematik altyapısı bulunmaktadır. Güç sisteminin güvenilirliğini nicel olarak değerlendirmek için bu bölümde güvenilirlik endeksleri tanıtılmıştır. Güvenilirlik sistemin belirtilen koşullar altında ve belirtilen zaman t içinde belirtilen işlevi yerine getirme olasılığına sistemin güvenilirliği denir. Güvenilirlik fonksiyonu R(t) ile ifade edilir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Paralel bağlı sistemlerde güvenilirlik hesabı, sistemin herhangi bir bileşenin çalışmaması durumunda diğer bileşenlerin devreyi tamamlayabilme yeteneğine dayanır. Bu durumda sistemin güvenilirliği, bileşenlerin güvenilirlik değerlerine bağlıdır. Bir paralel sistemde, n sayıda bileşen varsa ve her bir bileşenin güvenilirlik katsayısı R_i ($i = 1, 2, \dots, n$) ise, sistemin toplam güvenilirliği R_s şu formülle hesaplanır:

$$R_s = 1 - \prod_{k=1}^x (1 - R_k) \quad (2)$$

Bu formülde “x” bileşen sayısını, R_k k. bileşenin güvenilirlik değerini ve R_s sistemin güvenilirlik endeksini göstermektedir.

3.2. Arıza oranı

Birim zamanda arızalanan bileşen sayısının toplam bileşen sayısına oranına arıza oranı denir ve zamanın bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon, güvenilirlikle ilgili kritik fonksiyonlar olan güvenilirlik fonksiyonu, arıza oranı (λ : arıza/saat) ve ortalama yaşam süresi gibi kavramlar için bir temel oluşturmaktadır [14].

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (3)$$

3.3. MTTF

MTTF (mean time to fail), bir sistem veya bileşenin ilk arızasına kadar geçen ortalama süreyi ifade eder. Genellikle, onarılamayan (non-repairable) sistemler için kullanılır. MTTF, bir ürünün veya sistemin güvenilirliğini değerlendirmek için önemli bir ölçüttür; daha yüksek bir MTTF, ürünün daha güvenilir olduğunu gösterir.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (4)$$

Sabit arıza oranına sahip bir seri sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$MTTF = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (5)$$

3.4. MTBF

MTBF (mean time between failure) bir sistemin veya cihazın arızalar arasındaki ortalama çalışma süresini gösteren bir güvenilirlik ölçüsüdür. Genellikle onarılabilen mekanik, elektronik ve yazılım sistemlerinde kullanılmaktadır ve bir ürünün ne kadar süre boyunca sorunsuz çalışabileceğini tahmin etmek amacıyla hesaplanır. MTBF, güvenilirlik analizinde önemli bir rol oynar. Ancak, bu kavram arızaların onarılabildiği sistemlerde kullanılır [15].

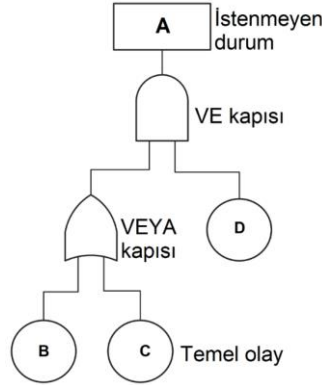
$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (6)$$

$$MTBF = \frac{\text{Toplam Çalışma Süresi}}{\text{Toplam Arıza Sayısı}} \quad (7)$$

3.5. FTA hata ağacı analizi

Hata ağacı analizi, istenmeyen bir olay olan en üstteki olayı yada durumu açıkça tanımlamakla başlar. Daha sonra en üstteki istenmeyen olayın oluşumuna yol açabilecek çeşitli olay kombinasyonları belirlenir. Hata ağacındaki çeşitli seviyeler, daha düşük seviyedeki olayların yayılmasının en üstteki olayın oluşumuna nasıl yol açtığını gösterir. En üstteki olaylar genellikle istenmeyen sistem arızalarını veya sistemi tehlikeye atan olayları ifade eder. En alttaki olaylar genellikle bir bileşen arızasını veya bir insanın hatalı çalışmasını ifade eder. Şekil 3'te, hata ağacında kullanılan temel olay sembollerini ve mantık kapısı sembollerini ve bir hata ağacı

örneğini gösterir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, A en üstteki olaydır ve B, C, D en alttaki temel olaylardır. Kapılar olarak bilinen mantık operatörleri olayların nasıl oluşturulacağını belirler. Temel olay, AND (ve) kapıları ve OR (veya) kapıları gibi mantıksal semboller aracılığıyla bir veya daha fazla üst olaya bağlanır. AND ve OR lojik kapıları, dijital elektronik devrelerinde temel bileşenlerdir ve binari lojiği kullanarak çeşitli hesaplamalar yaparlar. Her iki kapı da belirli girişlere dayanarak bir çıkış üretir, ancak çıkışların hesaplanma mantığı farklıdır. AND kapısı, yalnızca tüm girişler 1 (doğru) olduğunda çıkışı 1 yapar. Eğer girişlerden biri bile 0 (yanlış) olursa, çıkış 0 olur. OR kapısı, girişlerden en az birisi 1 (doğru) olduğunda çıkışı 1 yapar. Yalnızca tüm girişler 0 olduğunda çıkış 0 olur [16].



Şekil 3. Hata ağacı analizi örneği

FTA hata ağacı analizini oluştururken izlenmesi gereken adımlar aşağıdaki şekil 4'te gösterilmiştir.

- ▼ İstenmeyen durum ve alt olayların belirlenmesi.
- ▼ Alt olayların belirlenmesi.
- ▼ Lojik fonksiyonları kullanarak istenmeyen durum ile alt olayların bağlantısının yapılması.
- ▼ Hata olayının sıklığını ve olay ağacındaki dalların olasılıklarının belirlenmesi.
- ▼ Belirlenen sonuçlar için olasılıkları hesaplanması.

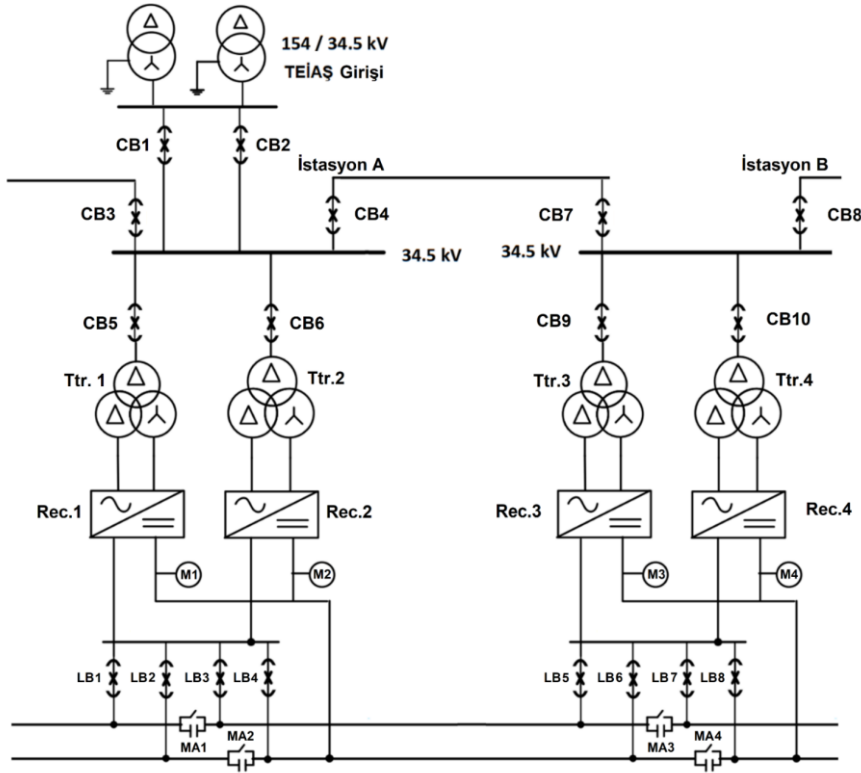
Şekil 4. Hata ağacı analizi adımları

3.6. Minimum kesim kümesi analizi (MCS)

Minimum kesim kümesi (MCS), bir arada meydana geldiklerinde en üst olayın meydana gelmesine neden olan en küçük olay grubudur. Kesim kümesi analizi, kapı mantığına dayalı olarak gerçekleştirilen nitel bir analizdir. Arıza ağacındaki olaylar için ayrıntılı sayısal bilgi mevcutsa, en üst olayın meydana gelme olasılığını sayısal olarak sağlamak için nicel bir analiz yapılabilir. Minimum kesim kümesindeki olasılıkların hepsi meydana gelirse en üst olayın meydana gelmesine neden olacak en küçük bileşen ve insan hatası kombinasyonu gerçekleşmiş olur. Arızaların hepsi temel veya gelişmemiş olaylara karşılık gelir. Bir üst olay birçok minimal kesme kümesine sahip olabilir ve her minimal kesme kümesi farklı sayıda temel veya gelişmemiş olaylara sahip olabilir. Minimal kesme kümesindeki her olay, üst olayın gerçekleşmesi için gereklidir ve minimal kesme kümesindeki tüm olaylar üst olayın gerçekleşmesi için yeterlidir.

4. Cer Gücü Sisteminin Güvenilirlik Analizi ve FTA Modeli

M5 metro hattının FTA modeli hattın besleme senaryosu dikkate alınarak yapılmıştır. FTA modeli oluşturulurken 20 istasyondaki trafo merkezi alt bileşenlere ayrılarak ve bu bileşenlerin arızalanması durumu ayrı ayrı ele alınmıştır. Cer gücü sistemi onarılabilir bir sistem olmasına rağmen, tek bileşen ölçeğinde onarılamaz bileşenleri de içermektedir. Öte yandan, güvenilirlik olasılık dağılımları kullanılarak hesaplanabilen zamana bağlı bir niceliktir. Şekil 5, birbirine komşu 1500V DC cer trafo merkezi besleme düzenlemelerini ve temel bileşenlerini göstermektedir. Sistemde 6 ana bileşen vardır: kesiciler (CB), cer transformatörleri (Ttr), doğrultucular (Rec) negatif geri dönüş motorlu ayırıcısı (M), istasyonları katener bağlantısını kuple etmek için kullanılan motorlu ayırıcılar (MA) ve yük ayırıcılar (LB). Her bileşen, FTA'daki alt olay olarak tanımlanır ve etiketlenir ve buna karşılık gelen olay kodu aşağıdaki şekil 5'te gösterilmiştir [17].



Şekil 5. Birbirine komşu cer gücü trafo merkezlerinin tek hat şeması

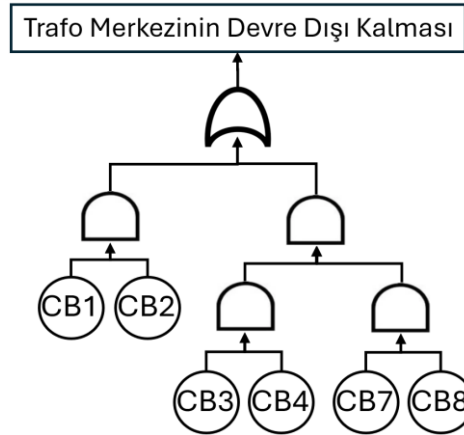
Her trafo merkezi için güvenilirlik endeksleri hesaplanmıştır, mevcut metro elektrifikasyon sisteminde cer gücü trafo merkezleri aynı donanımlara sahip olduğundan dolayı TEİAŞ girişinin de olduğu bir trafo merkezinin sonuçları paylaşılmıştır. Tablo 3'te trafo merkezinin, MTBF, arıza oranı (λ) ve yıllık bazda güvenilirlik değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3. TEİAŞ merkezlerinden besleme konfigürasyonu

Arızalanan Ünite	Arıza Tipi	MTBF (Yıl)	Arıza Oranı	Güvenilirlik
TEİAŞ Giriş Hücreleri	Hücre Arızası	24,7	$4,621 \times 10^{-6}$	0,960405
	OG Kablo Arızası	8,32	$1,372 \times 10^{-5}$	0,886751
OG Hücreler	Kesici Arızası	15,26	$1,38 \times 10^{-5}$	0,936570
	Sıcaklık Rölesi Arızası	23,41	$4,876 \times 10^{-6}$	0,958182
	OG Kablo Arızası	4,74	$3,972 \times 10^{-6}$	0,809799
CER Trafoları	Cer Trafosu Arızası	47,21	$2,418 \times 10^{-6}$	0,979040
	Diyot Arızası	19,52	$5,847 \times 10^{-6}$	0,950060
	OG Kablo Arızası	4,74	$3,972 \times 10^{-6}$	0,809799

Negatif Hücresi	Motorlu Ayırıcı Arızası	57,36	$1,991 \times 10^{-6}$	0,982718
	DC Kablo Arızası	15,14	$2,071 \times 10^{-6}$	0,936084
Doğrultucu Hücreler	Diyot Arızası	9,63	$3,852 \times 10^{-6}$	0,901367
	Ters Akım Arızası	52,19	$2,187 \times 10^{-6}$	0,981021
DC Giriş Hücresi	DC Giriş Hücresi Arızası	28,06	$4,068 \times 10^{-6}$	0,964989
Kuplaj Ayırıcısı	Ayırıcı Arızası	17,82	$6,406 \times 10^{-6}$	0,945424
DC Yük Ayırıcı	DC Kablo Arızası	11,4	$1,859 \times 10^{-6}$	0,916019
	Ayırıcı Arızası	42,18	$2,706 \times 10^{-6}$	0,976570
Katener Hattı	Kontak Telinin Erimesi	17,82	$6,406 \times 10^{-6}$	0,945424
	Kontak Telinin Bükülmesi	21,93	$5,205 \times 10^{-6}$	0,955425

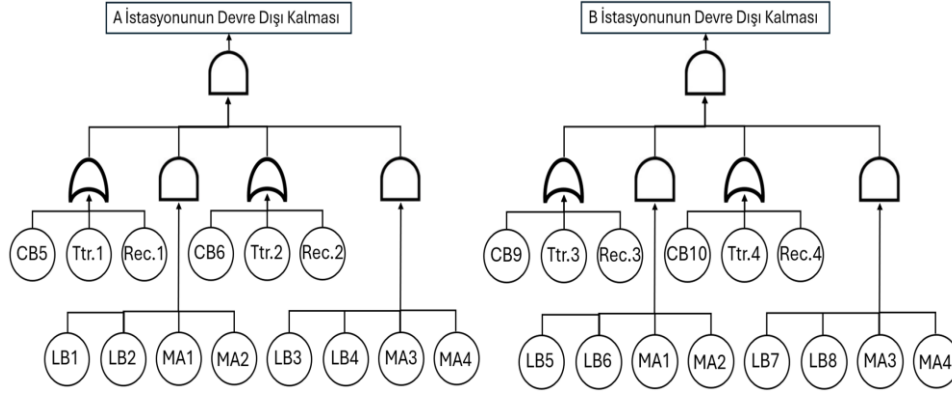
M5 hattının FTA modeli metro hattında kullanılan tüm bileşenleri içererek tasarlanmıştır. FTA modelinde komşu trafo merkezleri birbirini şekil 5’te gösterildiği gibi motorlu ayırıcılar aracılığıyla kuple edebildiğinden dolayı istasyonların enerjisiz kalması durumu ayrı ayrı analiz edilmiştir. Metro hatlarının dizayn aşamasında yapılan, DC röle koruma – koordinasyon çalışmasında komşu iki trafo merkezinin kaybedilmesi durumunda tren işletmesi yapılamamaktadır. FTA analizinde trafo merkezinin devre dışı kalması için komşu iki trafo merkezinin yada TEİAŞ girişinin kaybedilmesi gerekmektedir. Bu senaryonun FTA diyagramı aşağıdaki şekil 6’da paylaşılmıştır.



Şekil 6. Trafo merkezinin devre dışı kalması için hata ağacı

Trafo merkezinin devre dışı kalması için minimum kesim kümesi olan CB1 ve CB2 orta gerilim kesicilerinin devre dışı kalması ihtimalinin gerçekleşmesi yeterlidir. Oluşturulan FTA modeli ve buna bağlı olarak yapılan güvenilirlik hesaplamaları sonucunda FTA birimleri ve ele alınan tüm sistem için elde edilen güvenilirlik değeri 0,977108 olarak hesaplanmıştır. CB3, CB4, CB7 ve CB8 hücrelerinin devre dışı kalması ile trafo merkezini devre dışı bırakacak diğer senaryodur. Tasarlanan FTA modeline göre trafo merkezinin güvenilirlik hesabı yapılmıştır. Orta gerilim kesicileri yedekli olduklarından dolayı güvenilirlik değeri denklem 2’de paylaşılan formüle göre 0,94361’dir.

FTA modelinde, istasyon bazlı güvenilirlik analizi yapıldığında, M5 metro hattı cer gücü sistemini oluşturan trafo merkezlerinde, orta gerilim kısmından, trenin enerjisini pantograf aracılığıyla aldığı katener arasında oluşabilecek bir arıza, ilgili istasyonun devre dışı kalmasına sebep olmaktadır. FTA modeli tasarlanırken DC yük ayırıcılar trafo merkezinin yedekliliğini sağladığından dolayı “ve” lojik kapısı kullanılmıştır. Bu arızaya yönelik olarak geliştirilmiş hata ağacı, şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. A ve B istasyonunun devre dışı kalması için hata ağacı

Şekil 7’de gösterildiği gibi cer trafosunu enerjilendiren orta gerilim hücresi, cer trafosu, doğrultucu ünite, hat fiderleri, negatif dönüş panosu ve dc yük ayırıcı gibi unsurların arıza olasılıkları dikkate alınarak bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Birbirine komşu olan A ve B istasyonlarının her ikisi de devre dışı kaldığında yani aynı anda iki trafo merkezinin kaybedildiği (N-2) senaryoda istasyonların katener etaplarını kuple ederek enerjilendirilmesini sağlayan motorlu ayırıcılar da devre dışı kalırsa işletme durmaktadır [18].

Tablo 4. Komşu istasyonların güvenilirlik analizi

Arızalanan Birim	Güvenilirlik
A İstasyonu	0,987163
B İstasyonu	0,987163
İşletmenin Durması	0.999836

5. Sonuç

Bu çalışmada, metro hattı cer gücü trafo merkezlerinin güvenilirlik değerlendirmesi sunulmaktadır. Cer gücü sistemindeki hataların kök nedenlerini tanımlamak ve bu nedenlerin sistem üzerindeki etkilerini incelemek için hata ağacı analizi kullanılmıştır. Tren çekiş gücünü sağlayan trafo merkezlerinin tamamı aynı elektrik sistemine sahip olduğundan dolayı aynı katener etabını besleyen komşu trafo merkezlerinin güvenilirlik değerleri paylaşılmıştır. Metro sistemi'nin pratik bir sistemi için temel bileşenlerin MTBF (Mean Time Between Failure) ve hata ağacı analizine göre minimal kesim kümesinin güvenilirlik indekslerinin hesaplanması sunulmuştur.

Güvenilirlik indeksleri istasyonlarda bulunan her alt bileşen için hesaplanmıştır ve sonuçları tablo 4’te verilmiştir. Tablo 3’te paylaşılan MTBF değerleri, gerçek arıza sayılarına göre hesaplanmıştır. Bu çalışma, komşu trafo merkezlerinin beslediği katener bölgesinin tamamen enerjisiz kalarak işletmeyi durdurma olasılığının son derece düşük olduğu hesaplanmıştır. Güvenilirlik hesaplamasının doğruluğu, geçmiş deneyimleri yansıtan mevcut verilere bağlıdır. Metro elektrifikasyonu yedekli tasarlandığından dolayı güvenilirlik değerleri oldukça yüksektir fakat tablo 3’de paylaşıldığı gibi sistemde güvenilirlik değeri en düşük olan ve en çok arıza yaşanan orta gerilim hücrelerine bağlanan XLPE orta gerilim kablolarında yaşanmaktadır. Orta gerilim kablolarının MTBF değerlerinin düşük olması ilgili orta gerilim hücrelerinin de güvenilirlik değerlerini azaltmaktadır. Orta gerilim hücreleri bir ring kaybedildiğinde diğer ring istasyon enerjisini sağlamada yeterli olduğundan ve arızalarının giderilmesi kısa sürede tamamlandığından dolayı yedekliliğe gerek duyulmamaktadır. Fakat OG kabloların güvenilirliğinin artırılması için her ek noktasının yıllık olarak hi-pot ve izolasyon testine tabi tutulması gerekmektedir.

Metro elektrifikasyon sisteminde güvenilirliği artırmak için en etkili yöntemler yedekliliği artırmak ve kestirimci bakımlar yapmaktır. Raylı sistemlerin cer gücü sistemler alt bileşenleri hassastır ve sürekli olarak pantograf kömürü tozuna maruz kalmaktadır. Bu nedenle sistemde oluşabilecek arızanın önceden tespiti ve proaktif bir yaklaşım için kestirimci bakımların her bakım döneminde yapılması gerekmektedir. Bu yöntemle işletmenin ve sistemin güvenilirliği artacaktır.

Teşekkür

Bu makalenin hazırlanmasına izin ve destek veren Metro İstanbul A.Ş. yetkililerine teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] S.K. Chen, T.K. Ho ve B.H. Mao, "Reliability evaluations of railway power supplies by fault tree analysis" *IET Electric Power Applications*, vol 1, pp. 161–172, April 2007.
- [2] B.H. Ku and J.M. Cha, "Reliability assessment of electric railway substation by using minimal cut sets algorithm," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 135-139, April 2011
- [3] D. Feng, S. Lin, Q. Yang, X. Lin, Z. He, and W. Li, "Reliability evaluation for traction power supply system of high-speed railway considering relay protection," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 5, no. 1, pp. 285–298, Mar. 2019
- [4] H. Hayashiya, M. Masuda, Y. Noda, K. Suzuki, and T. Suzuki, "Reliability analysis of DC traction power supply system for electric railway," in Proc. *19th Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE, ECCE Europe)*, Sep. 2017, pp. 1–6.
- [5] P. P.D. Meyer, *The Reliability of the Electric Transmission Infrastructure in the 21st Century*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006, p. 1.
- [6] E. Zio, "Reliability engineering: Old problems and new challenges," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, vol. 94, no. 2, pp. 125–141, Feb. 2009.
- [7] T. Ölmez, "Energy distribution modelling in railway systems" M.Sc. thesis, Marmara University, Dept. Elect. and Elec. Eng., İstanbul, 2020
- [8] Metro İstanbul A.Ş., "M5 Üsküdar-Samandıra Metro Hattı," 2018. [Online]. Available: <https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/HatDetay?hat=M5> [Accessed: Oct. 13, 2024].
- [9] Hu, J. et al., "The research of DC traction power supply system and the DDL protection algorithm based on MATLAB/Simulink," in *CICED 2010 Proceedings* vol. 12, Nanjing, China, 2010, pp. 1-6
- [10] *Railway Applications – Supply Voltages of Traction Systems*, EN 50163, European Committee for Standardization (CEN), 2004.
- [11] C. R. Avery, "Power electronics reliability in rail traction," in *IEE Colloquium on Power Electronics Reliability - Promise and Practice. Does it Deliver?*, vol. 202, no. 6, pp. 1-7, May 1998.
- [12] S. Sagareli, "Traction power systems reliability concepts," in *ASME/IEEE Joint Rail Conference, Proceedings of the 2004*, Baltimore, USA, 2004, pp. 35-39
- [13] *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)*, EN 50126, European Committee for Standardization (CEN), 2017.
- [14] Jun-Min Cha and Bun-Hui Ku, "Reliability Assessment of Railway Power System by using Tree Architecture," *KIEE*, vol. 59, no.9, p.9-15, Jan 2010.
- [15] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", *Plenum Press*, vol. 16, no. 7, pp. 322-354, Feb 1996.
- [16] Sang-Log Kwak, Jong-Bae Wang, Bong-Seob Lee and Chan-Woo Park, "Construction of Event Tree & Fault Tree for Train Fire Risk Assessment", *JKSR* Vol. 11, P.530-535, Dec 2008.
- [17] E. Ruijters and M. Stoelinga, "Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools," *Comput. Sci. Rev.*, vols. 15–16, pp. 29–62, Feb. 2015.
- [18] P. P. D. Meyer, "The Reliability of the Electric Transmission Infrastructure in the 21st Century," *IEEE*, vol. 28, pp. 1-10, Nov. 2006

Özgeçmiş**Turan ÖLMEZ**

1990 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini İstanbul Aydın Üniversitesinde, Yüksek lisans Eğitimini Marmara Üniversitesinde tamamlamıştır. Doktora eğitimine Yıldız Teknik Üniversitesinde devam etmektedir. Siemens Mobility A.Ş.'de Sistem mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları raylı sistemlerdir.
E-Posta: turan.olmez@siemens.com

**Büşra ÖLMEZ**

1993 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesinde tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimine Yıldız teknik üniversitesinde devam etmektedir. Metro İstanbul A.Ş.'de elektrik bakım mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları raylı sistemlerdir.
E-Posta: busra.olmez@metro.istanbul

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Turan ÖLMEZ: Kavramsallaştırma, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Büşra ÖLMEZ: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol ve Düzenleme.