İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF RAYLI SİSTEMLERİN ELEKTRİK GÜÇ BESLEMESİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tayfun AYDIN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF RAYLI SİSTEMLERİN ELEKTRİK GÜÇ BESLEMESİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tayfun AYDIN
(504081030)

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR

OCAK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **504081030** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tayfun AYDIN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"HAFİF RAYLI SİSTEMLERİN ELEKTRİK GÜÇ BESLEMESİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Yrd. Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Salman KURTULAN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **27 Ocak 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

İnsanoğlunun çağlar boyunca süregelen gelişimi birçok ihtiyacı da beraberinde getirmiştir. Bu ihtiyaçlardan en önemlilerinden biri de ulaşım veya ulaştırma ihtiyacıdır. İnsanoğlu yüz yıllardır bir yerden bir yere gitme veya ürettiklerini bir yerlere nakletme gayretindedir. Bu nedenle ulaşım, yüzyıllardır insanoğlunun ihtiyacı olan ve geliştirmekte olduğu bir kavramdır.

Raylı ulaşım, ulaşım sistemleri arasında insanlar tarafından en çok kullanılan ve en etkin ulaşım biçimidir. Tarihi M.Ö. 6.yy'a kadar dayanan raylı ulaşım günümüzde de geliştirilerek şehirlerin ve ülkelerin vazgeçilmez ulaşım yolu haline gelmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte raylı ulaşım sistemleri bulunduğu şehirlerin ya da ülkelerin gelişmişlik simgesi olmuştur. Raylı sistemler, yüksek yolcu kapasitesi, hızlı ve ekonomik ulaşım imkanı, tamamen elektrik güç besleme sistemleri ile çalıştığı için yakıt gereksiniminin olmaması, gürültü, hava kirliliği gibi olumsuz etkileri bulunmaması dolayısı ile hem toplumsal refahı ve sosyal imkanları geliştirmekte hem de ülke ekonomisi için olumlu etkiler bırakmaktadır.

Ülkemizde ilk demiryolu hattı 1866 yılında İzmir - Aydın arasında kurulmuştur. Cumhuriyetin ilk yıllarında raylı ulaşım ve demiryoluna önem verilmiş fakat 1950'li yıllardan 2000'li yıllara kadar ağırlıklı olarak karayollarına yatırıp yapılmış raylı ulaşım sistemleri ikinci planda bırakılmıştır. 2000'li yıllardan itibaren 10 yıllık süreçte raylı ulaşım sistemleri için yatırımlar artmış ve bu yatırımlar günümüzde de katlanarak devam etmektedir.

Gelişen teknoloji, artan nüfus ve ulaşım ihtiyacı raylı sistemlerin geliştirilmesi ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Bu nedenle ülkemizde bu sistemlerin geliştirilmesi için akademik çalışmalar yapılmalı, araştırma-geliştirme projelerine önem verilmeli ve sektörde çalışabilecek insanlar yetiştirmek için stratejiler geliştirilmelidir. Bu tez çalışmasının, raylı sistemler ile ilgili olan, bu konuda araştırma yapmak isteyen herkese yardımcı olmasını ve Türkiye'de raylı sistemlerin gelişimine katkıda bulunmasını temenni ederim.

Tezin hazırlanması aşamasında bana yol gösterip tüm bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR'a, hayatım boyunca bana güvenen ve desteklerini esirgemeyen ailem ile ailemden ayırmadığım Sn. İrem Turna'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Aralık 2011

Tayfun AYDIN
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 1
2. RAYLI SİSTEMLER TANIMI VE ÇEŞİTLERİ **3**
2.1 Demiryolu ve Raylı Sistemler Tanımı 3
2.1.1 Cadde tramvayı 3
2.1.2 Hafif raylı sistem 4
2.1.3 Hafif metro 4
2.1.4 Metro 5
2.1.5 Banliyö 5
2.1.6 Hızlı Tren 6
2.1.7 Bölgesel demiryolu 6
2.1.8 Monoray 7
2.2 Hafif Raylı Sistemler 7
2.2.1 Maliyet değerlendirmesi 9
2.2.2 Kapasite değerlendirmesi 9
2.2.3 Hız değerlendirmesi 9
2.2.4 Emniyet 9
2.2.5 Çevreye katkısı ve Şehre etkisi 9
2.3 Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesi 10
2.3.1 Orta gerilim üniteleri 12
2.3.1.1 Ölçü hücresi 12
2.3.1.2 Cer trafosu besleme hücresi 13
2.3.1.3 Yardımcı servis trafosu besleme hücresi 13
2.3.1.4 Ring hücreleri 13
2.3.2 Transformatörleri ve doğrultucu üniteleri 14
2.3.2.1 12-Darbeli doğrultucu-trafo yapısı 16
2.3.3 Yardımcı servis transformatörleri ve yardımcı servisler 17
2.3.4 İletim sistemleri 18
2.3.4.1 Konvansiyonel katener sistemi 18
2.3.4.2 Rijit katener sistemi 18
2.3.4.3 Üçüncü ray sistemi 19
3. GÜVENİLİRLİĞİN TANIMI VE KAVRAMLAR **21**
3.1 Güvenilirliğin Tanımı 21

3.1.1 Onarımsız birimler (belirli bir göreve koşullanmış sistemler) 22
3.1.2 Onarılabilir birimler (Sürekli işletmede olan sistemler) 22
3.2 Temel Güvenilirlik İndisleri 23
3.3 Güvenilirlik sistem çeşitleri 25
3.3.1 Seri bağlı sistemler (fazlalıksız sistemler, non-redundant systems) 26
3.3.2 Paralel bağlı sistemler (fazlalıklı sistemler, redundant systems) 27
3.3.3 Karma bağlı birimler 28
3.3.4 Yedek fazlalıklı sistemler (standby redundant systems) 28
3.3.5 Kısmi fazlalıklı sistemler 30
3.4 Sistem modellemesi 30
3.4.1 Markov modeli 31
4. HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİNİN ÖNEMİ 35
4.1 Hafif Raylı Sistemlerde Güvenilirlik Analizinin Anlamı 35
4.2 Güvenilirlik ve Maliyet 36
4.3 Raylı Sistemin güvenilirlik verilerinin önemi 37
5. HAFİF RAYLI SİSTEMLERİN GÜÇ BESLEMESİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ 39
5.1 Temel Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesi Sistemi 39
5.1.1 Besleme noktası 39
5.1.2 Orta gerilim sistemi 39
5.1.3 Cer trafoları 39
5.1.4 Doğrultucu grupları 40
5.1.5 Yardımcı servis trafoları 40
5.2 Güvenilirlik Analizi Yapılacak Hafif Raylı Sistem Verileri 42
5.3 Tren Besleme Sistemleri Güvenilirlik Hesabı 49
5.3.1 Örnek bir trafo merkezi güvenilirlik analizi 49
5.3.1.1 Alt sistemlerin güvenilirlik analizi 51
5.3.1.2 Besleme noktası analizi 51
5.3.1.3 O.G. hücreler analizi 52
5.3.1.4 Trafo ve doğrultucu grubu analizi 53
5.3.1.5 DC hücreler analizi 54
5.3.1.6 Katener hattı analizi 57
5.3.1.7 Tüm sistemin toplam güvenilirlik analizi 58
5.3.1.8 Sistemin toplam güvenilirlik hesabı 58
5.3.1.9 Örnek bir trafo merkezi için güvenirlik fonksiyonları ve sonuçları 60
5.3.1.10 Çeşitli t zamanları için sistemin güvenilirliği 61
5.4 Sistemin Arıza Hızının Belirlenmesi 62
5.4.1 Sabit arıza hızı varsayımı 62
5.4.2 Fonksiyona bağlı değişen arıza hızı varsayımı 64
5.5 Seksiyonlara Göre Güvenilirlik Analizi 65
5.5.1 Seksiyon 1 için toplam güvenilirlik analizi 65
5.5.1.1 Seksiyon 1 için markov modeli 66
5.5.1.2 Seksiyon 1 için sistem başarı durumları 67
5.6 Tüm Sistemin Güvenilirlik Analizi 70
5.6.1 Tüm sistemin çalışma durumuna göre güvenilirlik analizi 70
5.6.1.1 Tm1, tm2, tm3 için güvenilirlik hesabı 71
5.6.1.2 Tüm sistemin çalışma durumuna göre toplam güvenilirlik analizi 73
5.6.2 En az 2/3 çalışma durumuna göre güvenilirlik analizi 75
5.6.2.1 Tm1, tm2, tm3 için güvenilirlik hesabı 76
5.6.2.2 En az 2/3 çalışma durumuna göre toplam güvenilirlik analizi 78

5.6.3 En fazla 1/3 çalışma durumuna göre güvenilmezlik analizi 80
5.6.3.1 Tm1, tm2, tm3 için güvenilmezlik hesabı 81
5.6.3.2 En fazla 1/3 çalışma durumuna göre toplam güvenilmezlik analizi .. 83
5.7 Sistemin Güvenilirlik İndisleri (LOLP- LOLE) 85
5.7.1 Tüm hattın işletme bilgileri 85
5.7.2 Seksiyon 1 için güvenilirlik indisleri hesabı 87
5.7.3 Seksiyon 2 için güvenilirlik indisleri hesabı 88
5.7.4 Seksiyon 3 için güvenilirlik indisleri hesabı 90
5.7.5 Tüm hattın seksiyonlar bazında yük eğrisi 91
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 93
6.1 Raylı Sistemlerle İlgili Araştırmaların Ülkemiz İçin Önemi 93
6.1.1 Ulaşım Sorunu 93
6.1.2 Yüksek Maliyetler 94
6.1.3 Eğitim ve yetişmiş personel 95
6.2 Çalışmanın Uygulama Alanı 95
6.3 Analiz Sonuçlarının değerlendirilmesi 96
6.3.1 Güvenilirliği arttırmanın yöntemleri 98
KAYNAKLAR 99
ÖZGEÇMİŞ 101

KISALTMALAR

km : Kilometre
sa : Saat
mm : Milimetre
V : Volt
DC : Doğru Akım
kV : Kilovolt
UIC : International Union of Railways
m^2 : Metrekare
UITP : International Association of Public Transport
AC : Altenatif Akım
Hz : Hertz
kW : Kilowatt
kVA : Kilovolt Amper
MVA : Megavolt Amper
p : Darbe sayısı
V_m : Şebeke geriliminin tepe değeri
tm : Görev süresi
tf : Arızaya kadar olan süre
MTTF : Mean time to failure
MTTR : Mean time to repair
λ : Arıza Hızı
μ : Onarım hızı
MTBF : Mean time between failures
R : Güvenilirlik (reliability
Q : Güvenilmezlik
TM-x : X nolu hat besleme bölgesi
OG : Orta gerilim
t : Zaman
HRS : Hafif Raylı Sistem
P_S : Anahtarlama olasılığı
TCDD : Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
LOLP : Yük kaybı olasılığı (loss of load probability)
LOLE : Beklenen yük kaybı (loss of load expectation)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Türkiyedeki Hafif Raylı Sistem Projeleri 8
Çizelge 2.2 : Farklı darbe sayılarında ortalama gerillim değerinin gerilimin tepe değerine oranı 15
Çizelge 5.1 : Habipler - Topkapı hattı işletme bilgileri 43
Çizelge 5.2 : İstasyon bilgileri 44
Çizelge 5.3 : Trafo merkezi bilgileri 44
Çizelge 5.4 : Bölge ayırıcılarını hat üzerindeki yerleri 45
Çizelge 5.5 : Trafo merkezileri arası çekilen o.g. kablolar 45
Çizelge 5.6 : Trafo merkezileri arası çekilen d.c kablolar 46
Çizelge 5.7 : Tüm Sistemin arıza verileri 48
Çizelge 5.8 : TM-1 bölgesine ait arıza hızı verileri 50
Çizelge 5.9 : Trafo merkezi güvenilirlik fonksiyonları 60
Çizelge 5.10 : Örnek Trafo merkezi için hesaplanan MTTF,r, λ ve μ değerleri 60
Çizelge 5.11 : Çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 61
Çizelge 5.12 : Trafo merkezkeri MTTF ve λ değerleri 63
Çizelge 5.13 : Sabit arıza hızı varsayımına göre mutlak hata oranları 63
Çizelge 5.14 : Fonksiyona bağlı değişen arıza hızına göre mutlak hata oranlar 64
Çizelge 5.15 : 1. Seksiyonun arıza ve onarım hızları 66
Çizelge 5.16 : Durum geçiş olasılığı matrisi 67
Çizelge 5.17 : 1. Seksiyon durum olasılıkları 67
Çizelge 5.18 : 1. Seksiyon 1.senaryoya göre analiz sonuçları 68
Çizelge 5.19 : 1. Seksiyon 2.senaryoya göre analiz sonuçları 69
Çizelge 5.20 : TM1,TM2 ve TM3 hat-1 için güvenilirlik fonksiyonu 71
Çizelge 5.21 : $R_{3H1\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 71
Çizelge 5.22 : TM1,TM2 ve TM3 hat-2 için güvenilirlik fonksiyonları 72
Çizelge 5.23 : $R_{3H2\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 72
Çizelge 5.24 : $R_{3H1\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 73
Çizelge 5.25 : $R_{3H2\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 74
Çizelge 5.26 : $R_{2H1\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 76
Çizelge 5.27 : $R_{2H2\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 77
Çizelge 5.28 : $R_{2H1\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 78
Çizelge 5.29 : $R_{2H2\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri 79
Çizelge 5.30 : $Q_{1H1\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için R ve Q değerleri 81
Çizelge 5.31 : $Q_{1H2\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için R ve Q değerleri 82
Çizelge 5.32 : $Q_{1H1\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilmezlik değerleri 83
Çizelge 5.33 : $Q_{1H2\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilmezlik değerleri 84
Çizelge 5.34 : Raylı sistem hattının günlük tren işletme bilgileri 85
Çizelge 5.35 : Seksiyonlar bazında hattaki tren sayıları 86
Çizelge 5.36 : 1. Seksiyon günlük yükleri ve yük olasılıkları 87
Çizelge 5.37 : 1. Seksiyon çalışma durumu olasılıkları 87

Çizelge 5.38 : 1. Seksiyon için Yükün birikmeli olasılığı 87
Çizelge 5.39 : 1. Seksiyon LOLP ve LOLE değerleri 88
Çizelge 5.40 : 2. Seksiyon günlük yükleri ve yük olasılıklar 88
Çizelge 5.41 : 2. seksiyon çalışma durumu olasılıkları 89
Çizelge 5.42 : 2. Seksiyon için Yükün birikmeli olasılığı 89
Çizelge 5.43 : 2. Seksiyon LOLP ve LOLE değerleri 89
Çizelge 5.44 : 3. Seksiyon günlük yükleri ve yük olasılıkları 90
Çizelge 5.45 : 3. Seksiyon çalışma durumu olasılıkları 90
Çizelge 5.46 : 3. Seksiyon için Yükün birikmeli olasılığı 90
Çizelge 5.47 : 3. Seksiyon LOLP ve LOLE değerleri 91
Çizelge 6.1 : Seksiyon bölgelerin arızaya kadar olan süreleri 97
Çizelge 6.2 : Tüm seksiyonlar için LOLP ve LOLE indisleri 97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bağcılar - Kabataş Cadde Tramvayı (İstanbul)..... 3
Şekil 2.2 : Gaziantep Hafif Raylı Sistemi..... 4
Şekil 2.3 : Aksaray - Atatürk Havalimanı Hafif Metro Hattı (İstanbul)..... 4
Şekil 2.4 : Taksim - 4.Levent Metrosu (İstanbul)..... 5
Şekil 2.5 : Haydarpaşa - Gebze Banliyösü (İstanbul)..... 5
Şekil 2.6 : Ankara - Eskişehir Hızlı Treni..... 6
Şekil 2.7 : Monoray Sistemi Moskova..... 7
Şekil 2.8 : Raylı Sistem Güç Beslemesi Örneği..... 10
Şekil 2.9 : Hafif Raylı Sistem örnek Tek Hat Şeması..... 11
Şekil 2.10 : Bir Orta Gerilim Kesici Hücresi Görseli..... 13
Şekil 2.11 : Trafo Merkezi Doğrultucu Devresi Örneği..... 14
Şekil 2.12 : 12 Darbeli Doğrultucu Bağlantı Şeması..... 16
Şekil 2.13 : Çift Sekonderli Cer Trafosunun Doğrultuculara Bağlantı Şeması..... 16
Şekil 2.14 : Yardımcı Servisler Güç Beslemesi..... 17
Şekil 2.15 : Konvansiyonel Katener Sisteminin Genel Görünüşü..... 18
Şekil 2.16 : Rijit Katener Sistemi Bileşenleri..... 19
Şekil 2.17 : 3. Ray Sistemi..... 19
Şekil 3.1 : Onarımsız Birimler..... 22
Şekil 3.2 : Onarılabilir Sistemler..... 23
Şekil 3.3 : Küvet Karakteristiği..... 24
Şekil 3.4 : Çalışma Döngüsü..... 25
Şekil 3.5 : Seri Bağlı Sistem..... 26
Şekil 3.6 : Paralel Bağlı Sistem..... 27
Şekil 3.7 : Karma Bağlı Sistem..... 28
Şekil 3.8 : Yedek Fazlalıklı Sistem..... 29
Şekil 3.9 : Kısmi Fazlılıklı Sistem..... 30
Şekil 3.10 : Onarılabilir bir birimin markov modeli..... 31
Şekil 3.11 : Onarılabilir üç birimli sistemin markov modeli..... 32
Şekil 4.1 : Toplam maliyet ve güvenilirlik..... 36
Şekil 5.1 : Örnek hafif raylı sistem elektrik güç beslemesi tek hat şeması..... 40
Şekil 5.2 : Örnek bir trafo merkezi tek hat şeması..... 41
Şekil 5.3 : Raylı sistemler ağ haritası (istanbul) [19]..... 43
Şekil 5.4 : Habitler - Topkapı Hafif Raylı Sistem Hattı Tek Hat Diyagramı..... 47
Şekil 5.5 : Örnek bir trafo merkezi için güvenilirlik analizi blok diyagramı..... 49
Şekil 5.6 : Besleme noktası blok diyagramı..... 51
Şekil 5.7 : O.G. hücreler blok diyagramı..... 52
Şekil 5.8 : Trafo ve doğrultucu grubu blok diyagramı..... 53
Şekil 5.9 : DC hücreler blok diyagramı..... 54
Şekil 5.10 : Katener hattı blok diyagramı..... 57
Şekil 5.11 : Toplam güvenilirlik hesabı için indirgenmiş blok diyagramı..... 58
Şekil 5.12 : Trafo merkezi güvenilirlik - zaman grafiği..... 61

Şekil 5.13 : 1. Seksiyon tekhat şeması 65
Şekil 5.14 : Markov modeli durum diyagramı 66
Şekil 5.15 : Tüm sistemin çalışma duruma göre sistemin blok diyagramı 70
Şekil 5.16 : $R_{3H1\text{-}123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 71
Şekil 5.17 : $R_{3H2\text{-}123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 72
Şekil 5.18 : Tüm sistemlerin duruma göre toplam blok diyagramı 73
Şekil 5.19 : $R_{3H1\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 74
Şekil 5.20 : $R_{3H2\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 74
Şekil 5.21 : En az 2/3 çalışma duruma göre sistemin blok diyagramı 75
Şekil 5.22 : $R_{2H1\text{-}123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 76
Şekil 5.23 : $R_{2H2\text{-}123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 77
Şekil 5.24 : En az 2/3 çalışma duruma göre toplam blok diyagramı 78
Şekil 5.25 : $R_{2H1\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 79
Şekil 5.26 : $R_{2H2\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği 79
Şekil 5.27 : En fazla 1/3 çalışma duruma göre sistemin blok diyagramı 80
Şekil 5.28 : $Q_{1H1\text{-}123}$ için R(t) ve Q(t) grafiği 81
Şekil 5.29 : $Q_{1H2\text{-}123}$ için R(t) ve Q(t) grafiği 82
Şekil 5.30 : En fazla 1/3 çalışma duruma göre toplam blok diyagramı 83
Şekil 5.31 : $Q_{1H1\text{-}HRS}$ için güvenilmezlik - zaman grafiği 84
Şekil 5.32 : $Q_{1H2\text{-}HRS}$ için güvenilmezlik - zaman grafiği 84
Şekil 5.33 : Tüm hattın günlük yük eğrisi 86
Şekil 5.34 : Seksiyonların her bir hat için günlük yük eğrileri 91

HAFİF RAYLI SİSTEMLERİN ELEKTRİK GÜÇ BESLEMESİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

ÖZET

Son yıllarda özellikle ülkemizde ulaşım sorununu çözebilmek için raylı sistemlere verilen önem artmıştır. Özellikle şehir belediyeleri şehirlerin gelişmişlik göstergesi kabul edilen raylı sistemlere son yıllarda yoğun ilgi göstermişlerdir. Bu da raylı sistem yatırımlarının artması, yeni raylı sistem hatlarının devreye girmesi ve yeni hatların ihtiyacının oluşmasını beraberinde getirmiştir. Her yeni yapılan raylı sistem hattı yeni projelerin önünü açmış ve şehir gelişimine büyük katkılar sağlamıştır. Bunlara bağlı olarak raylı sistemler ile ilgili araştırmalar gittikçe artmış ve güncel hale gelmiştir. Yapılan araştırmaların artması raylı sistemlerin ülkemizdeki gelişimine önemli katkılar sağlayacaktır. Bu tezde raylı sistemlere kısaca değinilecek, raylı sistemlerin özel bir parçası olan hafif raylı sistemlere tanıtılacak, hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesi anlatılacak ve hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi yapılacaktır.

Bölüm 1'de hafif raylı sistemlerde elektrik güç beslemesinin önemi, güvenilirlik analizinin neden yapılması gerektiği vurgulanmış ve belirtilmiş konu ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir.

Bölüm 2'de raylı sistem ve hafif raylı sistemlerle ilgili temel kavramlar verilmiş, raylı sistem çeşitlerinden bahsedilmiş ve hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesi anlatılmıştır. Raylı sistemler anlatılırken ülkemizde bulunan raylı sistemlerden örnekler verilmiştir.

Bölüm 3'te güvenilirliğin tanımı yapılmış, sistemle ilgili genel kavramlar ve indisler verilmiş, güvenilirlik modelleri, temel güvenilirlik kavramları ve güvenilirlik sistem çeşitleri anlatılmıştır.

Bölüm4'te Hafif raylı sistemlerin elektrik güç besleme sistemlerinde güvenilirlik analizinin anlamına değinilmiş, güvenilirlik maliyet ilişkisi anlatılmış ve bölümün sonunda analizinde kullanılacak verilerin önemi belirtilmiştir.

Bölüm 5'de örnek olarak alınan İstanbul'da bulunan bir hafif raylı sistem hattı olan Habipler - Topkapı hafif raylı sistem hattının elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi yapılmıştır. Bu bölümde örnek sistemin modellenmesi yapılıp analizde kullanılacak veriler belirlenmiştir. Daha sonra sistemi oluşturan her birim için tek tek güvenilirlik analizi yapılmış bölümün sonunda çeşitli senaryolara göre sistemin toplam davranışı belirlenmiş analizden çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak hafif raylı sistemlerin güvenilirlik açısından değerlendirilmesi yapılmış, güvenilirliği arttırmanın yolları araştırılmıştır. Bu tezde elde edilen veriler sistemin gelecek davranışı hakkında bilgi verme niteliğindedir. Bu tür çalışmaların artması sistemin daha güvenli tasarlanmasını sağlayacak, bununla birlikte güvenilirlik ile maliyet ilişkisini belirlemede yapılacak analizlerin önünü açacaktır.

RELIABILITY ANALYSIS IN THE TRACTION POWER SYSTEM OF LIGHT RAIL TRANSIT SYSTEMS

SUMMARY

In our country, the increase in the investments on rail transit systems comes with a variety of studies regarding these systems. The increase in the number of studies will provide a great contribution to the development of rail transit systems in our country. This thesis briefly defines rail transit systems; introduces light rail transit systems that is a special part of rail transit systems; explains the traction power system of light rail transit system and performs reliability analysis in traction power systems of light rail transit systems. Reliability analysis was individually conducted for every sub-system and reliability values were calculated. Reliability values for a sample substation were obtained through these values calculated and then, system failure rate was determined. Markov model for the system was established on the basis of sections according to the system failure rate and operating state probabilities of the system were identified according to various operational scenarios of the system. Afterwards, reliability values regarding the whole system were calculated according to the various operational status of the system. At the end of this chapter, load state probabilities of the system were calculated and various reliability indices were obtained. As a result, the evaluation of light rail transit systems were carried out in terms of reliability and research regarding alternative ways were conducted so as to increase the reliability. Data acquired through this thesis provide a variety of information on the future status of the system. An increase in the number of such studies will contribute to a more reliable design for the system and pave the way for future analysis regarding the reliability-cost correlation.

In Chapter 1, the importance of traction power system in light rail transit systems and the reasons for reliability analysis are highlighted and the objective of this thesis is explained. The main objective of this thesis is to establish a source for future systems by conducting a reliability analysis for traction power system of light rail transit system. At the end of chapter1, information on the rail transit systems and studies on reliability analysis in our country as well as other studies that are used as reference source are given.

In Chapter 2, the basic concepts regarding rail transit and light rail transit systems are briefly identified, the types of rail transit systems are defined and the traction power system of light rail transit systems is explained. At the outset of this chapter, definitions of railway and rail transit systems are given as well as the definitions and features of current rail transit systems such as street-railroads, light rail transit systems, light metro, metro, suburban train, high-speed train, regional railways and monorail systems. Following these definitions, a detailed explanation on the light rail transit systems is provided and the factors regarding system, cost, capacity, speed, safety and security and the impact on the environment are evaluated. At the end of this chapter, features of light rail transit systems that are currently on-operation in Turkey are stated.

Traction power system of a light rail transit system is explained in a detailed manner. Medium voltage switchgears, traction transformers, rectifiers forming the traction power systems of light rail transit systems are defined, system connection diagram is presented and operational logic is explained. At the end of this chapter, overhead line system transmitting the traction power systems to the train is defined. Different overhead line systems such as conventional overhead line system, rigid catenary system and 3rd rail system are defined and related diagrams are given.

In Chapter 3, reliability is briefly defined and basic concepts and indices related to the system are given, detailed information on reliability models, basic reliability concepts and reliability system types are provided. At the outset of this chapter, concept of "reliability" is identified and the definitions of recoverable and irrecoverable units that are used in reliability analysis are stated. Afterwards, reliability indices "λ and μ" are defined concepts such as "mean time to failure" and "mean time to repair" are explained and then, definitions for non-redundant systems, redundant systems, series-parallel systems, standby redundant systems and partial redundant systems are provided and equations in the literature regarding those systems are stated. At the end of this chapter, information on how to model this system is provided and Availability and Unavailability probabilities that are the parameters of Markov model to be used while modeling the system, are explained. All necessary steps to be taken for Markov model are identified and relevant equations are given.

In Chapter 4, it is briefly referred to the importance of reliability analysis in traction power systems of light rail transit systems, reliability-cost correlation is explained and at the end of the chapter, the importance of the data to be used in the analysis is highlighted. The importance of reliability analysis for rail transit system is explained at the outset of this chapter. The most important point regarding the rail transit systems is uninterrupted power supply. Taking this point as a source of reference, the importance and future contributions of traction power system is clarified. Afterwards, necessary precautions to be taken so as to increase the reliability are explained. At the end of the chapter, the importance of data to be used in reliability analysis as well as the required features of the data to be in order to increase the accuracy of this analysis are stated.

In Chapter 5, Habipler- Topkapı light rail transit system line that is located in Istanbul was selected as a sample system and a reliability analysis was conducted to the traction power system of this line. In this chapter, modelling of the sample system was established and datas to be used during the analysis were determined. Afterwards, reliability analysis were individually conducted for every unit forming the system and at the end of this chapter, overall behaviour of the system is determined according to various scenarios and results and outcomes obtained through the analysis are evaluated. At the outset of this chapter, sub-systems forming the traction power system of light rail transit system are defined. Single line diagrams identifying the system are presented and then, data on rail transit system to be analysed are provided. This data includes operational information on light rail transit system, root plan, information about station and substation, location of section insulators on the line, Medium voltage and direct current cables installed between substations. Along with all these information, single line diagram of the system is also provided. Failure points that are possible to affect the system operation are clarified and total number of failures occured on these points during a 5-year operational period are given.

The number of failures will be used during the reliability analysis. There are 9 substations in the system. These substations feed two lines. All substations have the same features. Therefore, reliability analysis was conducted for only one substation. It is assumed that reliability values of all substations are equal. Reliability analysis block diagram was established through the modelling of the system for a sample substation. Reliability analysis of the system was conducted according to the block diagram consisting of 5 sub-systems. The analysed 5 sub-systems are feeding points, medium voltage switchgears, transformators and rectifiers, direct current switchgears and overhead line systems. Reliability analysis for every sub-system were individually conducted and reliability functions for Line 1 and Line 2 were obtained. According to these reliability functions obtained, λ and MTTF values of the system were calculated and as a result of these processes, reliability values of the system were determined according to the various t-times. At the end, reliability-time diagram was set according to these values obtained.

Afterwards, it is mentioned about different methods used in order to determine the failure rate of the system and it is accepted that the system has a constant failure rate.

It was assumed that every 3 substations forms 1 section and reliability analysis of these sections were conducted accordingly. During the analysis, Markov model was used. Markov state space diagram of the system was established for 3 substations and state transition matrix of the system was obtained according to this diagram. Limiting probabilities of the matrix obtained were calculated and operation state probabilities of a section were calculated. Through these probabilities, availability and unavailability probabilities of the system were calculated according to two different scenarios. MTTF values of the system were also calculated by means of these probabilities.

Afterwards, reliability analysis of the system was conducted according to the various operating statuses of the whole system. These operating statuses were examined in three parts. These parts are stated as state of operating of all substations in every section, state of operating of at least 2/3 substations in every section and state of operation of 1/3 substations at the most in every section, respectively. Reliability analysis of the system were conducted for these three statuses and reliability values of every system were obtained according to different t-times. Through the data obtained, reliability-time diagrams were established for every system.

In Part 7 of Chapter 5, LOLE and LOLP that are the reliability indices of the system were calculated. For this reason, information on daily train operation of the whole system is provided. Table showing the number of trains at various times of the day and daily load curve are available. Load probabilities of the system were calculated according to the determined load statuses and LOLP and LOLE values were calculated through these probabilities. This analysis was conducted for every three section. At the end of the chapter, daily load curve of the system is given on the basis of all sections.

In Chapter 6, outcomes and suggestions are stated. In this chapter, it is especially mentioned about the importance of rail transit systems for Turkey. Turkey is belated to use rail transit systems. For this reason, this delay results in a great deal of problems. These problems can be listed as transportation, high-costs and insufficient number of qualified workers. Those problems are touched upon in this chapter and suggestions are presented.

Afterwards, application areas of this study are clarified. This study can be regarded as a resource for traction power systems of the rail transit systems. It can be used as a reference for future systems.

Following these discussions, outcomes obtained through reliability analysis of light rail transit system are evaluated. According to the outcomes, this system is highly reliable. Failure of 1 substation in every section of the system is not regarded as the failure of the whole system. System failure is only realized in the event of failure of two substations in every section. According to this assumption, mean time to failure for Line-1 was calculated as 201 years, for Line-2 as 211 years, which shows that the failure probability of the system is quite low. In addition to this, LOLP and LOLE indices of the system were calculated and values are shown on the Table. According to these indices, system cannot supply the required load for Line-1 in the course of 1,91 hours per year. For Line-2, it was observed that the system cannot supply required load in the course of 1,86 hours. As is understood from the data, probability of disruption in the rail system is quite low.

In addition to this, in the event that load cannot be supplied in the railway enterprise, train service is maintained by decreasing the number of trains operation on the line.

In the light of information, various performance indices can be established in the future studies. A variety of new analysis can be made, when necessary, such as how long the system works under different load conditions, how long it takes to repair the failure, how long it takes to operate the system again with full loading and how much it costs in the event of system failure.

Consequently, light rail transit systems were evaluated in terms of reliability and research on new ways to increase the reliability was carried out. Data achieved through the thesis provides information on future behaviour of the system. An increase in the number of such studies will lead to a more reliable designs and pave the way for further analysis for the determination of reliability-cost correlation.

1. GİRİŞ

Raylı sistemler ulaşım sorununun çözülmesinde önemli bir yere sahiptir. Artan nüfus özellikle büyük kentlerde ulaşımı sorun haline getirmektedir. Raylı sistemler sadece insan taşımacılığı değil aynı zamanda yük taşımacılığı için de hem hız hem de ekonomik açıdan en verimli sistemlerdir. Bu tezde raylı sistemlerden hafif raylı sistemler ele alınarak elektrik güç besleme sistemlerinde güvenilirlik analizi yapılacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Elektrik güç besleme sistemi raylı sistemlerin işletme sürekliliği açısından büyük öneme sahiptir. Elektrik güç sistemi işletmeyi aksatmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Sistemde oluşacak herhangi bir arıza durumu hemen düzeltilebilir olmalı ve sistem herhangi bir arıza durumundan etkilenmemelidir. Bu nedenle elektrik güç besleme sisteminin güvenilirliği işletme sürekliliği açısından çok önemlidir. Bu tezde hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi yapılmış ve sistemi etkileyen faktörler araştırılmıştır. Tezin amacı hafif raylı sistemlerin elektrik beslemesinde güvenilirlik analizi yaparak bundan sonra tasarlanacak sistemler için bir kaynak oluşturmak, raylı sistemlerle ilgili yapılacak diğer çalışmalar için referans olmaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Raylı sistemlerle ilgili dünya çapında birçok çalışma bulunmaktadır. Ülkemizde ise uygulanan raylı sistemler çok yeni olduğu için öncü çalışmalar bulunmaktadır ve daha birçok yeni çalışmanın yapılacağı açıktır. Güvenilirlik analizi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu tezde hem raylı sistem açıklamaları hem de güvenilirlik analizi uygulaması için bir çok kaynaktan yararlanılmıştır. Güvenilirlik analizi uygulamaları için Nurşen DÜNDAR'ın (2002) "Elektrik dağıtım sistemlerinde güvenilirlik analizi" yüksek lisans tezinden faydalanılmıştır.

Bununla birlikte konu ile ilgili Ramazan ÇAĞLAR'ın (1999) "Elektrik enerji sistemlerinde güvenilirlik değerlendirmesi için kısıtlılık seçimi" doktora tezinden faydalanılmıştır. Ülkemizde raylı sistemlerle ile ilgili yapılmış çalışmalardan bahsetmek gerekirse, Oya Demirer (1994) "Elektrikli ulaşım sistemleri besleme düzeninin incelenmesi, değerlendirilmesi ve optimizasyonu" doktora tezi, Süleyman AÇIKBAŞ (2008) "Çok hatlı çok araçlı rayli sistemlerde enerji tasarrufuna yönelik sürüş kontrolü" doktora tezi, M.T Söylemez ve S.Açıkbaş (2005,9)'ın "DC Beslemeli Raylı Ulaşım Sistemlerinin Simülasyonu" ve Salman Kurtulan'ın (1992) " Bir elektrikli ulaşım sisteminin modellenmesi ve simülasyonu" doktora tezi çalışmaları bulunmaktadır.

2. RAYLI SİSTEMLER TANIMI VE ÇEŞİTLERİ

2.1 Demiryolu ve Raylı Sistemler Tanımı

Bir yerden bir yere madeni bir yol üzerinde, mekanik bir güçle hareket ettirilen araçlar içinde, insan ve eşya taşımasını temin eden tesislerin hepsine birden demiryolu denir. Buradan demiryolunun bir bütün olduğu, sadece, ray, travers ve balasttan ibaret bulunmadığı, istasyon binalarının, köprü ve tünellerin, lokomotif depolarının, telgraf, telefon direkleri ve benzerlerinin de demiryolunun bir parçası olduğu ve tarifte sözü geçen taşıma işine yardımcı her tesisin aynı şekilde demiryolunun bir kolunu teşkil ettiği anlaşılır [1].

Demiryolunu sistemleri genel anlamda, raylar, enerji besleme sistemi, sinyalizasyon ve haberleşme sistemleri ile araçlardan oluşur. Raylı toplu taşıma sistemlerini güncelliğini koruyan ve kullanılmakta olan sistemler inceleyelim.

2.1.1 Cadde tramvayı

Karayolu vasıtaları ile aynı alanı kullanan, yol ve trafik durumuna göre bir sürücü tarafından kumanda edilen, elektrik enerjisini katanerden alan, yolcu taşıma kapasitesi düşük olan raylı toplu ulaşım sistemidir. Ortalama 25/35 km/sa hızla işletilebilen tramvaylar yaklaşık her 300–500 metre civarında duraklar mevcuttur [2]. Şekil 2.1'de İstanbul'da işletmede olan Bağcılar-Kabataş Cadde tramvayından bir kesit görülmektedir. İlk bölümü olan Sirkeci-Aksaray arası 1992 yılında açılan hat, önce Topkapı ve Zeytinburnu'na daha sonra Eminönü'ne bağlanmış, son olarak 2006 yılında Kabataş bağlantısı yapılmıştır [3].



Şekil 2.1 : Bağcılar - Kabataş Cadde Tramvayı (İstanbul)

2.1.2 Hafif raylı sistem

Ray açıklığı genellikle 1435 mm olan 750V DC veya 1500 V DC ile 3. raydan veya katanerden enerji alan, bir sürücü tarafından sinyalizasyon sistemine uygun olarak kumanda edilen, her 600–1000 metre mesafede özel istasyonlarda yolcu indirip bindiren, ortalama 60–80 km/sa süratle kendine ait hatlarda işletilen raylı toplu taşıma sistemidir [2]. Şekil 2.2'de 2010 yılında hizmete giren Gaziantep Hafif Raylı Sistemden bir kesit bulunmaktadır.



Şekil 2.2 : Gaziantep Hafif Raylı Sistemi

2.1.3 Hafif metro

Genellikle 1435 mm ray açıklındaki hatlarda, 600-750V DC veya 1500V DC ile 3. raydan veya kataner hattından beslenen, tek yönlü olarak çalışan 4-6 araçtan diziler halinde sinyalizasyon sistemine tabi olarak işletilen çoğunlukla yer altında açılan tünellerde döşenen hatlarda ortalama 70-90 km/sa hızla gidebilen raylı toplu taşım sistemidir [2]. Şekil 2.3'de görülen 1989 yılından bu güne yolcu taşımaya devam eden Aksaray - Atatürk Havalimanı Hafif Metro hattı, hizmet verdiği bölge ve güzergah üzerinde günlük 220.000 yolcu ile taşıyıcı aks konumuna gelmiştir [3].



Şekil 2.3 : Aksaray - Atatürk Havalimanı Hafif Metro Hattı (İstanbul)

2.1.4 Metro

Hafif metrodan daha fazla yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Dünyada en yaygın olarak büyük şehirlerde kullanılan toplu taşım aracıdır. Hafif metronun tek yönde saatte 60000-70000 yolcu taşıma kapasiteli halidir. Yolcu yükü nedeniyle dizideki araç sayısı daha fazla, istasyon peronları daha uzundur. Dünyanın büyük şehirlerinde (Paris, Roma, Moskova gibi) çok büyük bir toplu taşımı gerçekleştirmektedir. En büyük dezavantajı alt yapı yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre çok yüksek olmasıdır [2]. Şekil 2.4'de görülen ve yapımına 1992 yılında başlanan ve Taksim - 4.Levent arasında hizmet veren metro, 16 Eylül 2000 tarihinde hizmete girmiştir. 31 Ocak 2009 da hattın kuzeyinde Atatürk Oto Sanayi ve güneyinde Şişhane uzantıları hizmet vermeye başlamıştır [3].



Şekil 2.4 : Taksim - 4.Levent Metrosu (İstanbul)

2.1.5 Banliyö

Büyük şehirlerde çoğunlukla şehir dışındaki yerleşim yerlerine yolcu taşımada kullanılan banliyölerde hat genişliği 1435 mm olup 15 - 25 kV besleme enerjisini katenerden almaktadır. İşletme giderleri ve enerji tüketimi oldukça düşüktür [2]. Şekil 2.5'te görülen Haydarpaşa-Gebze banliyösü uzun zamandır hizmet vermektedir. Bu güzergah marmaray kapsamında yenilenecektir.



Şekil 2.5 : Haydarpaşa - Gebze Banliyösü (İstanbul)

2.1.6 Hızlı Tren

UIC (International Union of Railways, Uluslararası Demir Yolları Derneği) 'hızlı tren'i yeni hatlarda saatte en az 250 km hız yapabilen, var olan hatlarda da saatte en az 200 km hız yapabilen trenler olarak belirlemiştir. Çoğu hızlı tren sisteminin ortak bir dizi özelliği vardır. Çoğu trenin üstünde yer alan hatlardan aldığı elektrik ile çalışmaktadır. Ne var ki bu her hızlı tren için geçerli değildir, zira bazı hızlı trenler dizel ile çalışmaktadır. Daha kesin olan bir tanımı rayların özelliğiyle ilgilidir. Hızlı tren hatları titreşimi azaltmak ve ray segmentleri arasındaki açılmaları engellemek için hat boyunca kaynak yapılmış raylardan oluşur. Bu sayede üzerinden trenler saatte 200 km hız ile sorunsuz geçebilmektedir. Trenlerin hızında en önemli engel eğim yarıçaplarıdır. Hatların tasarımlarına göre değişebilmekle birlikte, hızlı tren yollarında eğimler çoğunlukla 5 kilometrelik bir yarıçapta gerçekleşir. Bazı istisnalar bulunsa da hızlı tren yollarında herhangi bir geçişin bulunmaması tüm dünyada kabul gören bir standarttır [4]. Şekil 2.6'da ülkemizdeki ilk hızlı trem projesi olan 2009 tarihinde de ilk yolcu seferini yapmış olan Ankara - Eskişehir Hızlı treninden bir kesit gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Ankara - Eskişehir Hızlı Treni

2.1.7 Bölgesel demiryolu

Demir yolu üzerinde çalışan en fazla 80 m^2 lik araçların oluşturduğu sistemlerdir. Hızlı raylı sistemin daha büyük ölçeklisi olup, uzun mesafeli güzergahlarda hızlı raylı toplu taşımacılıkta daha verimli çalışır [2].

2.1.8 Monoray

Monoray sistemleri, yer sorunun yaşandığı yerlerde Hafif Metro sistemlerin yerine uygulanmaktadır. Monoray sisteminde taşımacılık tek bir yükseltilmiş klavuz/taşıyıcı kirişler üzerinde yapılmaktadır. Sadece Japonya' da şu anda işletilmekte olan 71 km çift hat monoray sistemi mevcuttur. 2003 de 13 km daha işletmeye açılmıştır. ABD, İngiltere, Almanya, ve Malezya da işletilmekte olan monoray sistemleri mevcuttur.

Monoray sistemlerinin taşıma kapasiteleri tek yönde saatte 30.000 kişiyi bulmakta ve ortalama 25-30 km/sa ticari hıza ulaşabilmektedirler. Şekil 2.7'de Moskova'da çalışmakta olan monoray sisteminden bir kesit görülmektedir. Ülkemizde henüz monoray sistemi uygulanmamış olup. Sistemle ilgili çeşitli fizibilite çalışmaları yapılmaktadır.



Şekil 2.7 : Monoray Sistemi Moskova [5]

2.2 Hafif Raylı Sistemler

1983'te UITP'nin Uluslararası Hafif Raylı Sistemler Komisyonu şu tanımı öne sürmüştür: "Hafif raylı sistemler; kendi geçiş hakkında, yer altında, yer seviyesinde veya yükseltilmiş şekilde işletilebilen, modern tramvaydan hızlı transit sistemine kadar aşamalı bir şekilde geliştirilebilen ray temelli bir taşımacılık biçimidir." Almanya, İsviçre, Belçika gibi 1950'lerde ve 1960'larda tramvayların topluca kapanmasından kurtulan ülkelerde; pek çok mevcut sistem modernize edilerek yenilenmiştir ve şimdi bu sistemlere "hafif raylı sistemler" adı verilmektedir. Tramvayların caddelerden kalktığı pek çok diğer ülkede, 1970'lerin ortalarından bu yana tamamen yeni sistemler geliştirilmiştir. Kuzey Amerika, Asya Pasifik bölgesi ile İngiltere ve Fransa gibi birkaç Avrupa ülkesinde durum bu şekilde olmuştur [6].

Ülkemizde ise İstanbul başta olmak üzere birçok şehirde Hafif Raylı Sistem projeleri bulunmaktadır. Ülkemizde bulunan Hafif Raylı Sistemler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Türkiye'deki Hafif Raylı Sistem Projeleri

Hat İsmi	**Hattın Uzunluğu (km)**	**İstasyon Miktarı**	**Ortalama Yolcu Sayısı (Kişi/Gün)**	**Sefer Sıklığı (Sn)**	**Besleme Sistemi**
İstanbul Habipler - Topkapı HRS	15,3	22	170.000	300	750V DC
Ankaray HRS	8,7	11	175.000	120	750V DC
Bursa (Burulaş)	17,1	17	200.000	180	1500V DC
Konya HRS	18,9	31	110.000	120	750V DC
Eskişehir (Estram)	16	26	120.000	120	750V DC
Samsun HRS	15,7	21	90.000	240	750V DC
Gaziantep HRS	9,3	13	80.000	300	750V DC
Kayseri HRS	17,5	28	90.000	240	750V DC

Raylı sistemler bir şehrin gelişmişlik göstergesi olduğu için birçok belediye tarafından hayata geçirilmek istemektedir. Hafif raylı sistem metroya göre yatırım maliyetleri daha düşük olduğu için tercih edilmektedir. Şu anda İstanbul'da Otogar - Bağcılar hafif raylı sistem projesi ve Gaziantep'te de Karataş hafif raylı sistem uzatma hattının yapımı devam etmektedir. Buna ek olarak Samsun, Bursa, Kayseri ve Eskişehir'de uzatma hatları planlanmakta ve bu projelerin birçoğu ihale aşamasına gelmiştir.

2.2.1 Maliyet değerlendirmesi

Raylı sistemlerin yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Fakat yolcu sayısının yüksek olduğu şehirlerde raylı sistemler özellikle de hafif raylı sistemler diğer ulaşım çözümlerine göre (otobüs gibi) uzun vadede çok avantajlı hale gelirler.

2.2.2 Kapasite değerlendirmesi

Hafif raylı sistemler tek yönde 3000 - 11000 yolcu/saat kapasitesi ile yolcu taşıyabilmektedir. Bu sayı otobüs gibi alternatif yolcu taşıma sistemlerine göre çok daha fazladır.

2.2.3 Hız değerlendirmesi

Hafif Raylı Sistemler araçları 30 - 80 km/sa ortalama hıza ulaşabilirler. Ayrıca raylı sistemler kavşak ve ışıklar gibi araç trafiği ile birleşen noktalarda geçiş üstünlüğüne sahiptir. Bu nedenle yolcu taşımacılığında raylı sistemler en hızlı sistemlerdir. Özellikle trafiğin yoğun olduğu pik saatlerde çok sayıda yolcu taşıyarak yolcu akışını hızlı ve verimli şekilde sağlar. Bunun yanında ağır hava koşullarında da işletme aksamadan devam edebilir.

2.2.4 Emniyet

Hafif raylı sistemler kara ulaşımındaki araçlara göre çok daha güvenlidirler. Hafif raylı sistemlerin şehir içi trafiğinden ayrılmış yolları, ışıklardaki geçiş üstünlüğü olması nedeni ile karayolu ulaşımındaki kaza riskinden çok daha az kaza riski vardır.

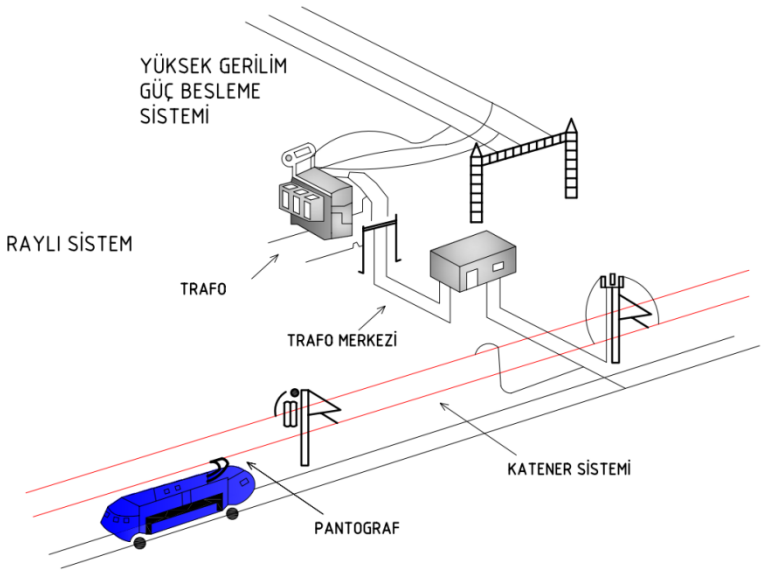
2.2.5 Çevreye katkısı ve Şehre etkisi

Hafif Raylı Sistemler elektrik ile çalışan sistemler olduğu için çevre kirliliği ve gürültüye neden olmamaktadır. Bununla beraber modern görüntüsü ve güçlü imajı sayesinde şehire olumlu bir hava vermektedir. Bunun yanında raylı sistem güzergahları yeni yaşam ve ticaret alanlarının oluşmasına ya da eski alanların modernleşmesine katkı sağlamaktadır. Raylı sistem şehrin genel görüntüsünü değiştirip güzelleştirdiği gibi trafik sorununun çözümünde de oldukça etkilidir.

2.3 Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesi

Raylı sistemlerde motorların tahriki ve diğer yardımcı servislerin beslemesi için gerekli olan güce "cer gücü" denir. Raylı sistemlerin enerji beslemesinin türü ihtiyaca ve motor karakteristiğine göre belirlenir. Şehir içi ulaşımda trenin hızlı yol alıp hızlı yavaşlaması istenmek ile beraber şehirlerarası ulaşım için bu karakteristik olmazsa olmaz şart değildir. Bu nedenler sistem beslemesi kullanım alanı ve ihtiyaca göre farklılık göstermektedir.

Raylı sistemlerde güç beslemesinin asıl amacı tren hareketini sağlamaktır. Basit olarak şehirlerarası elektrik iletim hatlarından alınan yüksek gerilimli elektrik enerjisi bir indirici trafo merkezi tarafından gerilim seviyesi ihtiyaca göre ayarlanır. Elektrik enerjisi transformatörler tarafından istenilen güçte ve gerilim seviyesinde sağlanır. Daha sonra elektrik enerjisi trene iletim sistemi üzerinden aktarılır. Tren hareketi için gerekli olan elektrik enerjisinin sağlandığı merkezlere "Cer gücü trafo merkezi" adı da verilir. Şekil 2.8'de örnek bir raylı sistem güç beslemesi gösterilmiştir.



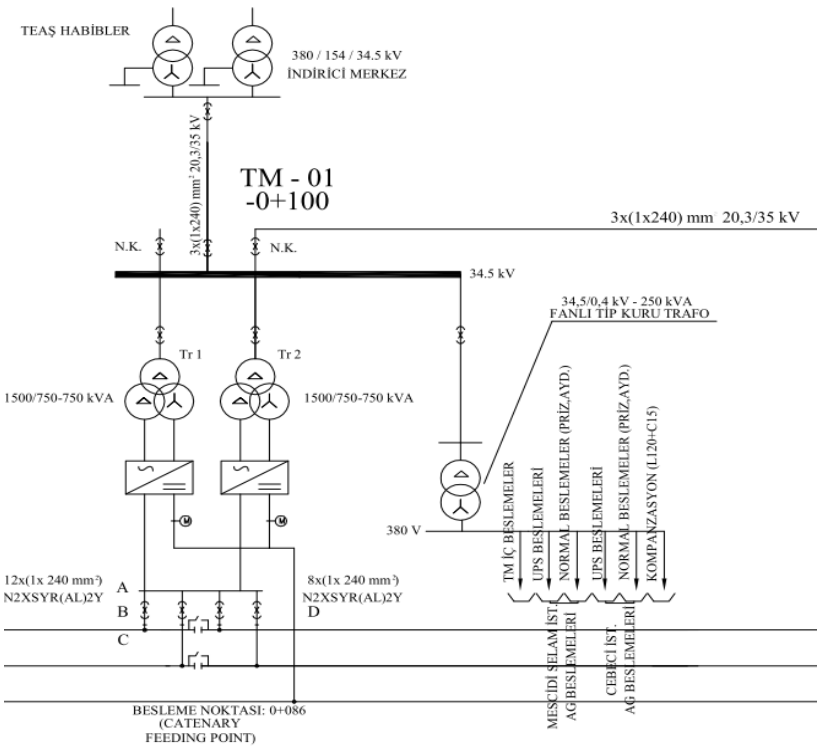
Şekil 2.8 : Raylı Sistem Güç Beslemesi Örneği

Raylı ulaşım sistemlerinde enerji beslemesi alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

AC sistemler bir fazlı ve 3 fazlı olarak iki gruba ayrılır. Fakat 3 fazlı sistemler günümüzde kullanılmamaktadır.

Bir Fazlı Akım (AC) Sistem; Bir faz, doğru akım sistemlerindeki gibi iki iletkenlidir. 50 Hz, 60 Hz gibi endüstride kullanılan frekanslarla aynı olanakları gösterir. Bu nedenle 15 ila 25 kV'lık yüksek gerilim altında 50 Hz'lik bir fazlı akım kullanılmaktadır[7]. Bu bir fazlı akım 3 fazlı eletrik iletim hatlarının tek fazının kullanılması ile elde edilir. Genellikle uzun mesafeli şehirlerarası raylı sistemlerde bu sistem kullanılır. Gerilim seviyesinin artması trafo merkezleri arasındaki uzaklığında artmasına ve böylece trafo merkezi sayısının azalmasına olanak tanır. Bu sistem Marmaray projesi kapsamında da kullanılacaktır.

Bir Fazlı Akım (DC) Sistem; Bu sistem seri motorların yol almada istenilen büyük yol alma momentini sağlamasından sonra (1914-1918) yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Doğru akımın bir avantajı da sadece iki iletkene ihtiyaç olmasıdır ve bu iletkenlerden biri de ray olabilir. Troleybüs ve tramvayların DC gerilim değeri 500-600 V, uzak mesafe doğru akım taşıtlarının ise 500-600-750-1200-1500 V'tur. Kullanılan doğru gerilim, motorların izolman olanakları ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle hattaki kayıp azalma ve hız kullanım alanını kolaylaştırmak için gerilim yükseltilir [7]. Örnek bir hafif raylı sistem güç beslemesi tek hattı şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9 : Hafif Raylı Sistem örnek Tek Hat Şeması

Bu sistemden de görüldüğü gibi enerji beslemesi hafif raylı sistemin güç beslemesi 154/34,5 kV indirici merkezden alınarak Cer trafo merkezine getirilmiştir. Burada bulunan orta gerilim kesici hücrelerinden Cer ve Yardımcı servis trafolarına çıkış verilmiştir. Cer trafoları tren hareketi için gerekli güç beslemesini sağlarken yardımcı servis trafosu istasyon içi güç ihtiyacını karşılamaktadır. Cer trafoları 34.5/2xO.6 kV gerilim seviyesi dönüşümü yapmaktadır. Yardımcı Servis trafoları ise 34,5/0,4 kV gerilim seviyesi dönüşümü yapmaktadır. Cer trafolarından çıkan 600 V AC gerilim doğrultucu grubuna girmektedir. Doğrultucu grubunda 750 V DC gerilim elde edilip buradan iletim sistemi yardımı ile tren beslemesi sağlanmaktadır. Son elde edilen bu gerilim seviyesi kullanılan sistemin ihtiyacına göre değişebilir. Hafif raylı sistemlerde yolcu taşıma kapasitesi, güç ihtiyacı arttıkça gerilim seviyesinin artması sistemi daha verimli hale getirebilir. Ülkemizde 750 V DC ile beslenen sistemler olduğu gibi yeni yapılan sistemlerde 1500V DC tercih edilmektedir. Hafif raylı sistemlerdeki elektrik güç beslemesini oluşturan sistemleri 4 grupta inceleyebiliriz.

1- Orta Gerilim üniteleri

2- Cer transformatörleri ve Doğrultucu sistemleri

3- Yardımcı Servis Transformatörleri ve yardımcı servisler

4- İletim sistemleri

2.3.1 Orta gerilim üniteleri

Hafif raylı sistemlerde indirici merkezden alınan enerji orta gerilim kabloları ile trafo merkezine taşınır. İndirici merkezden taşınan bu enerji orta gerilim kesici hücrelerine girer. Orta gerilim hücreleri sistemin ihtiyacına göre kesiciler ile donatılmıştır. Orta gerilim hücreleri hem ölçme hem de besleme amacı ile kullanılır. Hafif raylı sistemlerde orta gerilim sistemleri aşağıda belirtilen hücreleri içerir.

2.3.1.1 Ölçü hücresi

Genelde sistemin başında bulunur ve tüm hafif raylı sistemin harcadığı gücü ölçmek için kullanılır.

2.3.1.2 Cer trafosu besleme hücresi

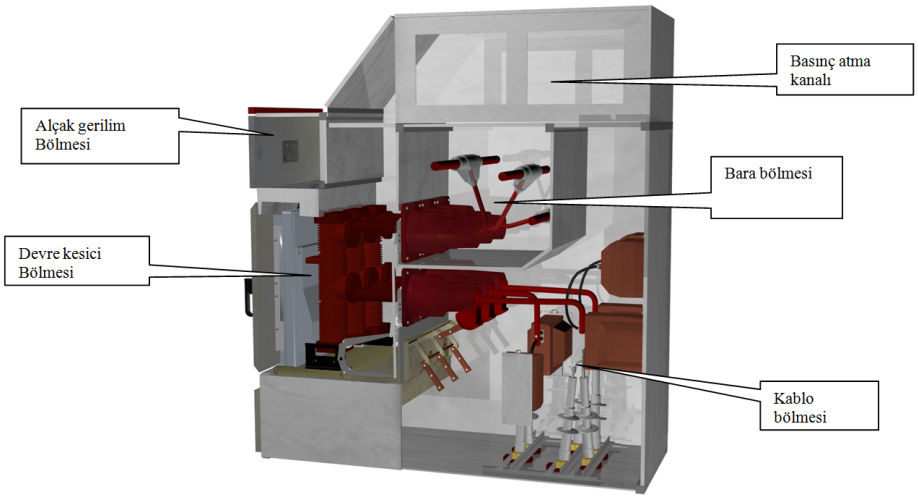
Tren hareketi için gerekli enerjinin sağlandığı için kullanılan cer trafolarının beslemesi için kullanılan hücredir. Cer trafolarının güç değerlerine göre kesicilerin kısa devre akım kesme kapasiteleri belirlenir.

2.3.1.3 Yardımcı servis trafosu besleme hücresi

İstasyon, tünel v.b. alanlarda kullanılan tren hareketi için gerekli enerji dışındaki tüm enerjinin temini için gerekli olan enerjiyi sağlayan yardımcı servis trafolarının beslemesi için kullanılan hücrelerdir. Yardımcı servis trafolarının güç değerlerine göre kesicilerin kısa devre kesme kapasiteleri belirlenir.

2.3.1.4 Ring hücreleri

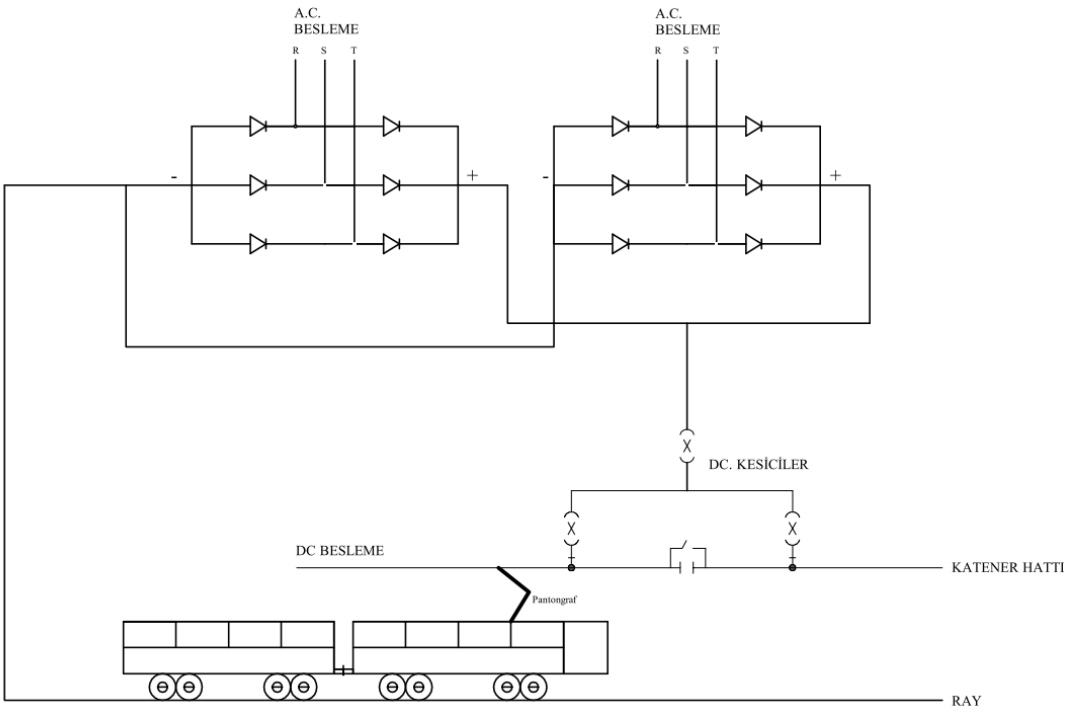
Raylı sistemlerde enerji kesintisini önlemek, herhangi bir trafo merkezindeki enerji kaybının tren hareketini veya diğer sistemlerin çalışmasını engellememesi amacı ile ring sistemi kullanılır. Bu sistem tüm trafo merkezilerini birbirine bağlar ve herhangi bir trafo merkezindeki enerji kesintisi durumunda enerjinin diğer trafo merkezlerinden temin edilebilmesini sağlar. Ring hücreleri genellikle orta gerilim hücre gruplarının ilk ve son hücresi olarak kullanılırlar ve bir önceki ve bir sonraki trafo merkezi ile olan bağlantıyı sağlarlar. Şekil 2.10'da bir orta gerilim kesici hücresi bölümleri gösterilmektedir.



Şekil 2.10 : Bir Orta Gerilim Kesici Hücresi Görseli (ABB)

2.3.2 Transformatörleri ve doğrultucu üniteleri

Cer trafo merkezleri şebekeden aldığı alternatif gerilimi doğrultucular ile doğru gerilime çevirerek, tren hareketi enerjisini sağlayarak iletim hatlarına gönderir. Cer trafo merkezinin ana bileşenleri, cer trafosu, doğrultucu ve kesicidir. DC demiryollarının çalışma gerilimi değerleri 600 V'dan 3000 V'a kadar uzanır. Her bir trafo başına performans, tramvay veya Hafif Raylı sistem için burada görülen banliyö trafiği alanında 1000 – 2000 kW ve metro sistemlerinde yaklaşık olarak 2500–5000 kW miktarındadır. Uygun trafo mesafeleri yaklaşık olarak 1,5 - 3 km içerisindedir. Trafoların beslemesi için enerji kaynağı olarak, kamu kuruluşlarından 3-faz AC temin edilir. Olağan gerilim değeri 10 ve 36 kV arasındadır [8]. Şekil 2.11'de Trafo merkezlerindeki doğrultucu devresinin örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.11 : Trafo Merkezi Doğrultucu Devresi Örneği

Redresör transformatörü güç şebekesi tarafından beslenen orta gerilimi, doğru nominal cer gerilimi için redresör tarafından talep edilen alçak gerilime dönüştürür. Redresör transformatörleri özellikle, redresörün çalışmasından kaynaklanan güçlü değişken gerilim verileri için tasarlanmıştır. Güç yelpazesi, troleybüs ve elektrikli tramvayları besleyen sistemler için yaklaşık 1000 kVA'ya, ağır yeraltı demiryolu sistemleri (metrolar) için yaklaşık 5 MVA'ya ulaşır.

Genelde iki tip transformatör kullanılır:

- Dökme reçine transformatör (Kuru Tip)
- Yağ transformatörleri

Cer trafoları özel trafolardır. Genelde çift sekonderli olarak tasarlanıp kullanılırlar. Bunu nedeni çift sekonderli trafoların harmonikleri azaltması ve birbirini yedekleyebilmesidir.[9]

Diyot redresörü, üç-faz alternatif akımların DC'ye dönüştürülmesi için gereklidir. Günümüzde, çoğunlukla, DC demiryollarının güç beslemesi tarafından kullanılan silikon diyotlu kontrolsüz diyot redresörleri mevcuttur.

Nadir rastlanan istisnai durumların dışında, 6-darbe veya 12-darbe devreleri kullanılır. 6-darbe düşük yükler için ve 12-darbe yalnızca orta veya yüksek için kullanılır. Bu ayrıca, üç-faz şebekesini enerji temin kurumunca talep edilen değerlerde beslemek için düşük yüklerde de kullanımdadır. 12-darbe devre, iki adet üç-faz köprüden paralel veya seri devre yoluyla devam ettirilir [8]. Doğrultucu gruplarının tasarımını istenilen güç değeri etkiler. Doğrultucu tasarımında belirleyici değer akım değeridir.

Doğrultulan gerilimin ortalama değer olarak ifadesi denklem **(2.1)**'deki gibidir.

$$V_{d0} = V_M \frac{p}{\pi} sin\frac{\pi}{p} \qquad \textbf{(2.1)}$$

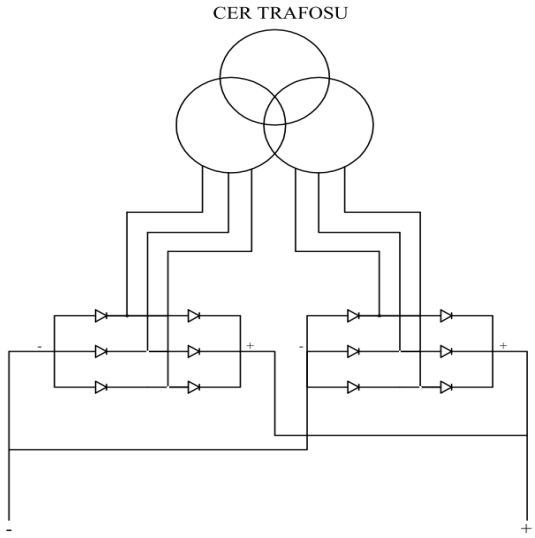
Burada p darbe sayısıdır. V_m ise şebeke geriliminin tepe değeridir. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi, denklemde darbe sayıları yerine konduğunda V_{d0}/V_m oranının 1'e yaklaştığı görülmektedir. Bu da doğrultulan gerilimin daha az salınımlı ve sürekli olduğunu gösterir.

Çizelge 2.1 : Farklı darbe sayılarında ortalama gerilim değerinin gerilimin tepe değerine oranı

Darbe Sayısı (P)	P=2	P=3	P=6	P=12
$\frac{V_{d0}}{V_m}$	0,637	0,827	0,955	0,989

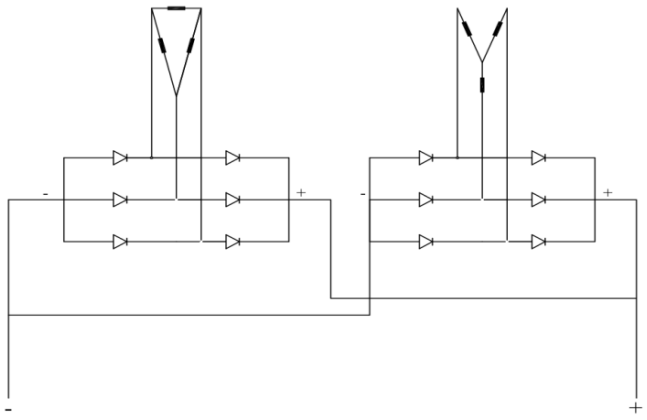
2.3.2.1 12-Darbeli doğrultucu-trafo yapısı

Raylı sistemlerin eski uygulamalarında 6 darbeli doğrultucu grupları kullanılmaktaydı. Artan güç ihtiyacını karşılamak için daha sonraları 12 darbeli doğrultucular kullanılmaya başlanmıştır. Yeni uygulamaların hemen hepsinde artık 12 darbeli doğrultucu grupları kullanılmaktadır. Şekil 2.12'de 12 darbeli doğrultucuların devreye bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 2.12 : 12 Darbeli Doğrultucu Bağlantı Şeması

Çift sekonderli trafolar bu uygulamalar için idealdir. Seri bağlı üçgen ve yıldız sargılarının uçlarının 6'şar adet diyotla seri bağlanması sonucu gerilim-akım doğrultma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.13'te sekonder sargıları üçgen ve yıldız olan cer trafosunun doğrultucu ünitesine bağlanması görülmektedir. 3 fazlı 12 darbeli doğrultucunun trafo bağlantı modeli şekildeki gibidir



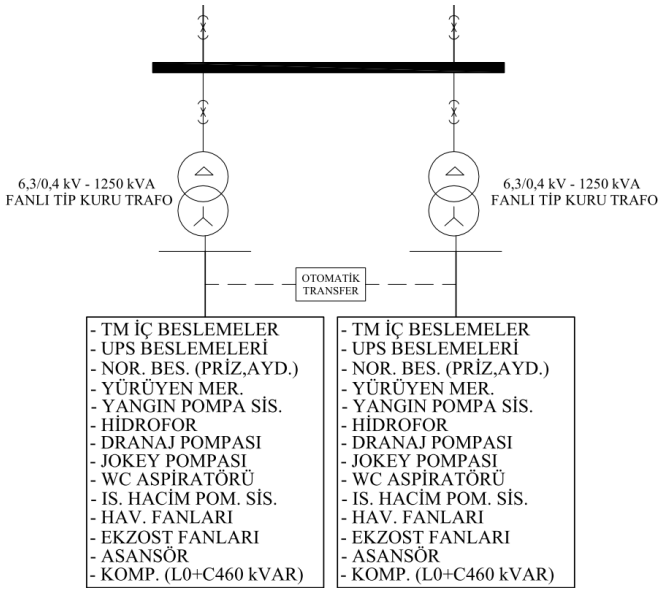
Şekil 2.13 : Çift Sekonderli Cer Trafosunun Doğrultuculara Bağlantı Şeması

2.3.3 Yardımcı servis transformatörleri ve yardımcı servisler

Raylı sistemlerde yardımcı servis trafoları özel trafolar değillerdir. Diğer tüm alçak gerilim enerji beslemesine ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılan genelde 34,5/0,4 kV dönüştürme oranına sahip trafolardır. İstasyonun büyüklüğüne, yeraltı ya da yerüstü istasyonu olmasına veya hatta tünel olup olmamasına göre güç değeri değişiklik gösterir. Raylı sistemlerdeki yardımcı servis trafoları 100 kVA'dan başlayıp güç ihtiyacına göre 2400 kVA'ya kadar çıkabilmektedir. Hafif raylı sistemlerde yardımcı servis trafoları tarafından beslenebilecek sistemler aşağıda belirtilmiştir.

- Tünel havalandırma sistemleri
- İstasyon havalandırma ısıtma - soğutma sistemleri
- Yangın pompaları
- Drenaj pompaları
- Yürüyen merdiven ve asansör beslemeleri
- İstasyon - Tünel aydınlatma ve priz tesisatları
- Zayıf akım sistemleri (CCTV, Anons, Haberleşme, Scada, Sinyalizasyon, Yolcu bilgilendirme, Telsiz v.s)

Şekil 2.14'de örnek bir trafo merkezi yardımcı servisler güç beslemesi gösterilmektedir.



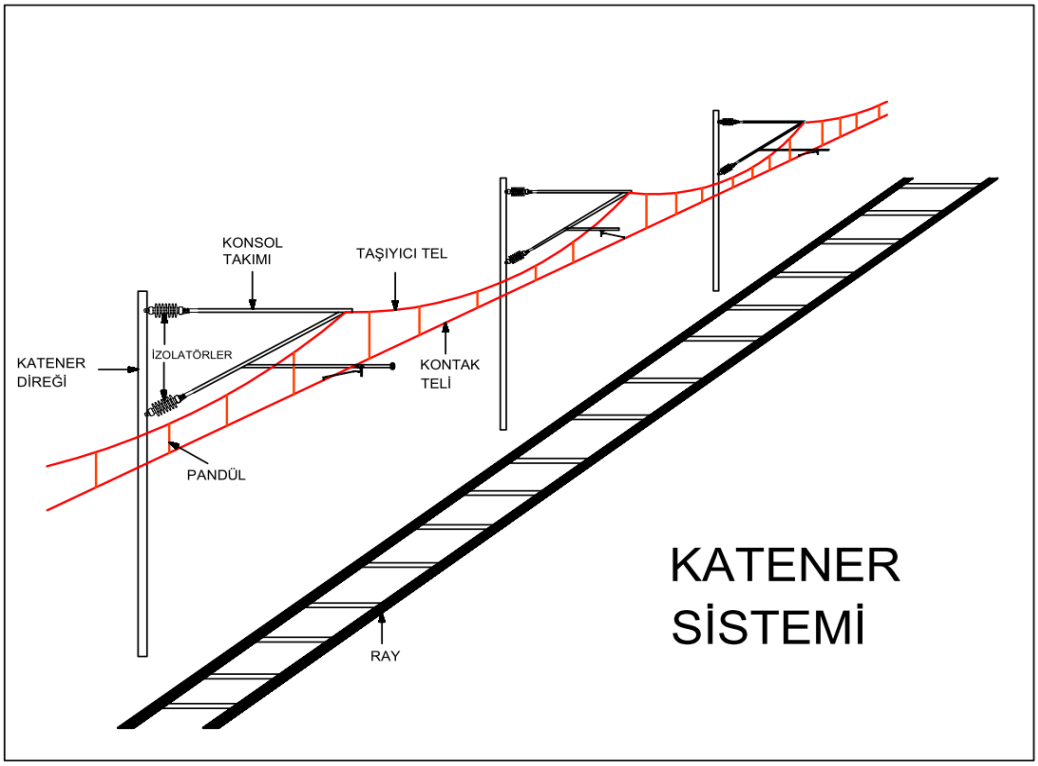
Şekil 2.14 : Yardımcı Servisler Güç Beslemesi

2.3.4 İletim sistemleri

Raylı sistemlerde trafo merkezinden sağlanan güç iletim sistemleri vasıtası ile trene aktarılır. Bu iletim sistemlerini 3 grupta inceleyebiliriz.

2.3.4.1 Konvansiyonel katener sistemi

Katener Sistemi trenlerin işletilebilmesi için gerekli olan enerjinin trafo merkezlerinden değişik taşıma düzenekleri ile taşındığı havai hat sistemidir. Tren enerjiyi katenerden pantograf aracılığı ile alır. Akım, devresini raylar ve geri dönüş kabloları üzerinden tamamlar. Konvansiyonel Katener Sisteminde taşıyıcı tel, kontak teli, izolatör, pandül, atlama kabloları iletken gergi düzenekleri(ağırlıklar), direk, konsol, hoban, bağlantı parçaları vb. kullanılır. Şekil 2.15'da konvansiyonel katener sisteminin genel görüntüsü verilmiştir.

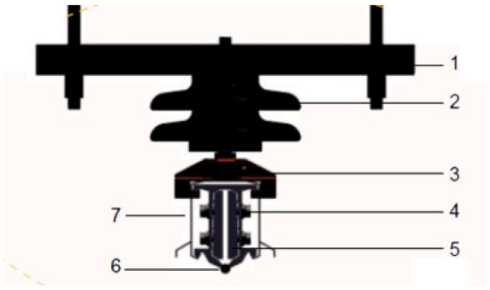


Şekil 2.15 : Konvansiyonel Katener Sisteminin Genel Görünüşü[10]

2.3.4.2 Rijit katener sistemi

Son yıllarda gelişen raylı sistem teknolojisi ile konvensiyonel katener sistemine alternatif olarak ortaya çıkan, hafif, bakımı ve yüksek iletkenliğe sahip rijit katener sistemi kullanılmaktadır.

Bu sistemin konvansiyonel katener sistemleri ile beraber aynı hat içerisinde kolaylıkla kullanılabilmeleri en büyük avantajlarından biridir. Genel olarak aşağıdaki şekilde verilmiş Alüminyum kompozit bir profil ve buna tutturulmuş kontak telinden oluşmaktadır. İzolasyonun daha kolaylaşması amacıyla daha küçük tünel yapımına imkan sağlayan rijit katener sistemi metrolarda kullanılmaktadır. Şekil 2.16'de Rijit katener sistemini oluşturan elemanlar gösterilmektedir.



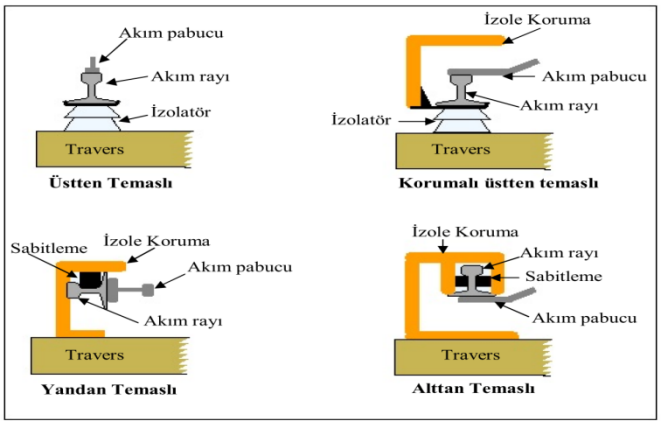
1- Saport
2- İzolatör
3 Steady Clamp
4-Aluminyum profil
5-Bağlantı contası
6- Kontak Teli
7- Koruma Kılıfı

Şekil 2.16 : Rijit Katener Sistemi Bileşenleri

2.3.4.3 Üçüncü ray sistemi

Üçüncü ray demir yolu araçlarına elektrik enerjisi sağlamak amacıyla kullanılan yöntemdir. Bu yöntem adını taşıyıcı rayların birinin dış tarafında hat boyunca devam eden üçüncü raydan almaktadır. Üçüncü ray nadir de olsa bazen iki rayın ortasında da olabilmektedir. Elektrik, araçların yan taraflarında bulanan akım pabuçları aracılığıyla raydan trene aktarılır.

Üçüncü rayların üzeri genellikle yalıtkan kapaklarla kapatılır böylece yağmur gibi hava şartlarının olumsuz etkilerinin üçüncü raya etkileri en aza indirilirken yolcu ve çalışanların yüksek gerilim hattıyla karşı karşıya gelmeleri önlenmiş olur. Şekil 2.17'de 3. Ray sistemi ve çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.17 : 3. Ray Sistemi [11]

3. GÜVENİLİRLİĞİN TANIMI VE KAVRAMLAR

3.1 Güvenilirliğin Tanımı

Güvenilirlik analizi bir sistemin gelecekteki davranışını öngörebilmeye yardımcı olduğu için çok güvenilir olması istenen sistemler için çok önem arz etmektedir. Özellikle enerji santral uygulamalarında güvenilirlik analizi oldukça önemli olmak ile beraber herhangi bir arızanın sistemin genel çalışmasını etkilememesinin istendiği endüstriyel tesisler için de güvenilirlik analizinin önemi büyüktür.

Güvenilirlik kısaca bir birimin görevini yerine getirme olasılığı olarak tanımlanabilir. Güvenilirlik bir sistemin istenilen süre zarfında, istenilen koşullar altında kendisinden bekleneni yerine getirme olasılığı olarak da tanımlanabilir. Güvenilirlik analizi tanımından da anlaşılacağı gibi bir olasılık hesabıdır. Tüm sistemler belirli bir olasılık ile görevlerini yerine getirirler ve bu olasılık sistemin tanımlandığı fonksiyona ve rastlantısal değişkenlere göre değişir.

Analiz yapılacak sistemlerin çalışması, tek bir bileşene bağlı olabileceği gibi birden fazla bileşene de bağlı olabilir. Bir sistemi oluşturan her bir alt sistemin de kendi görevini yerine getirebilme olasılığı vardır. Yani bir sistemin güvenilirlik analizi yapılmak isteniyorsa onu oluşturan tüm sistemlerin güvenilirliği ayrı ayrı dikkate alınmalıdır. Bir transformatör örneğini ele alırsak; Transformatör bir ana sistemdir, transformatörün sargıları bir alt sistemdir, sargıların sıcaklık kontrolü bir temel sistem, sıcaklık kontrolünü yapan röle bir alt sistemdir.

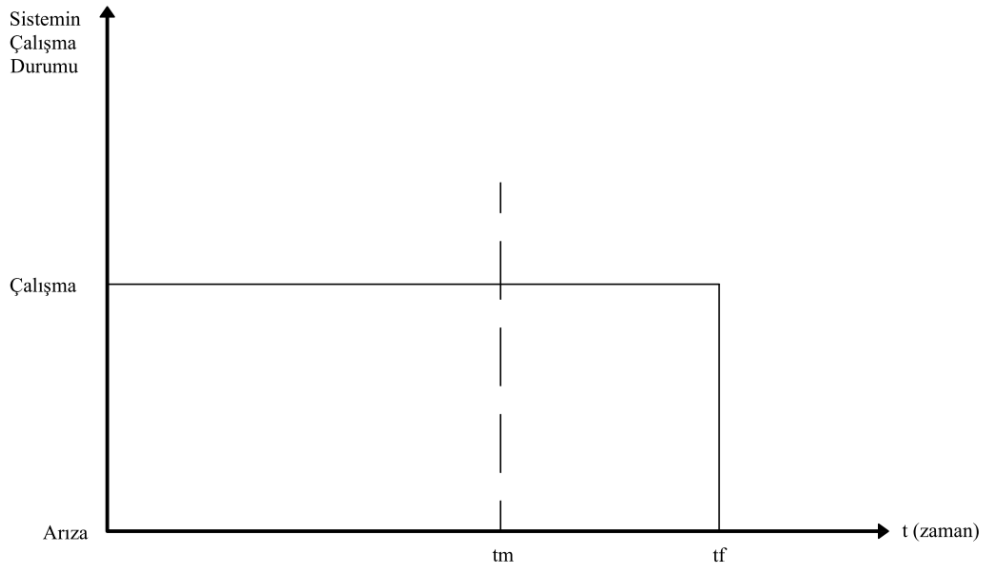
Güvenilirlik analizi yapılabilmesi için öncelikle sistemin daha önceki periyottaki davranışının bilinmesi gereklidir. Analiz yapılırken güvenilirliğin ölçütü olabilecek bazı değişkenler tanımlanır, daha sonra bu değişkenler birtakım yöntemlerle hesaplanır. Tüm bu yöntemlerde birimlerin gelecekteki davranışları incelenir. Gelecekteki davranış belirli olmamak ile birlikte rastlantısaldır ve her sisteme göre değişiklik göstermektedir.

Sistemler güvenilirlik analizi açısından 2 grupta incelenebilir [12];

1. Onarımsız birimler (belirli bir göreve koşullanmış sistemler)
2. Onarılabilir birimler (Sürekli işletmede olan sistemler)

3.1.1 Onarımsız birimler (belirli bir göreve koşullanmış sistemler)

Onarımsız birimlerde sistem herhangi bir kesintiye uğramadan işletimine devam etmektedir. Sistemde oluşabilecek herhangi bir arıza sistemin çalışmasını etkilemesi istenmemektedir. Yani bu birimler çalışması bitinceye kadar herhangi bir kesinti yaşanması istenmeyen sistemlerdir. Sistem t=0 anında çalışmaya başlat ve tm (görev süresi)'ye kadar hiçbir kesintiye uğramadan çalışmaya devam eder. tf güvenilirlik analizinde arızaya kadar olan süre anlamına gelmektedir ve Şekil 3.1'deki grafikten de görülebileceği gibi arızaya gelene kadar sistem görevini yerine getirmiştir.



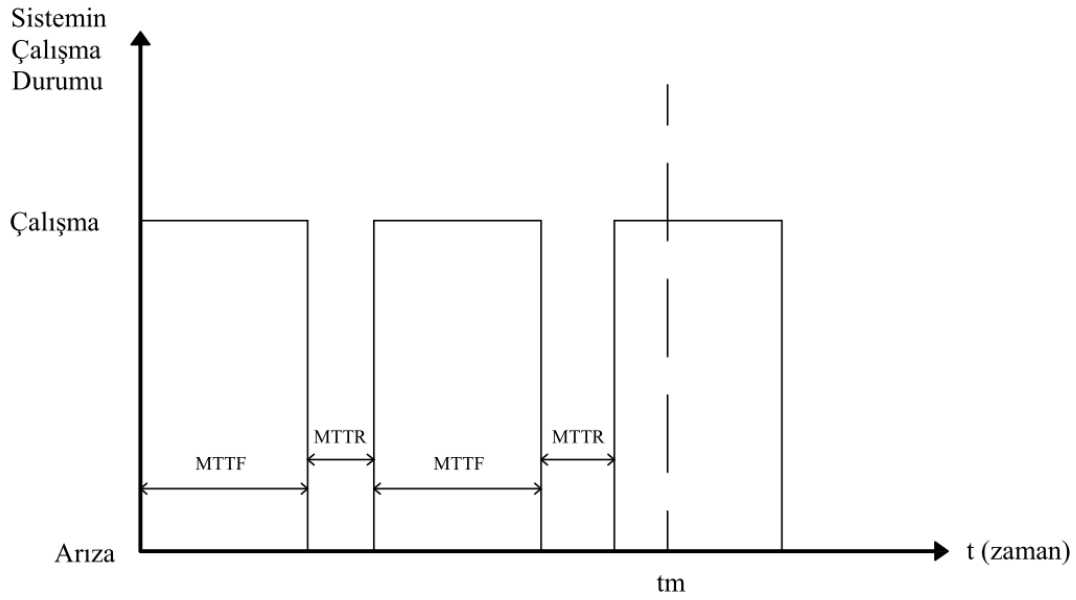
Şekil 3.1 : Onarımsız Birimler

3.1.2 Onarılabilir birimler (Sürekli işletmede olan sistemler)

Sürekli işletmede olan sistemlerde, sistemin arıza durumu ve onarım durumu vardır. Sistem çalışmaya başlar arızalanır sonra onarılır ve tekrar çalışmaya devam eder. Sistem bu döngü içerisinde çalışmasına devam eder. Arıza durumunda arızalı kısmın onarılması beklenebilir ya da yedek bir sistem arızalı kısmın yerine çalışmayı devam ettirebilir. Bu sistemlere en iyi örnek elektrik dağıtım sistemleridir.

Şekil 3.2'den de görüleceği gibi sistem çalışmaya başladıktan MTTF (mean time to failure) zamanı sonrasında arızalanmakta MTTR (mean time to repair) zamanı boyunca tamir yapılmakta ve sistem çalışmamaktadır.

Bu süre sonunda sistem çalışmaya devam etmektedir. Şekil 3.2'de onarılabilir sistemler grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Onarılabilir Sistemler

3.2 Temel Güvenilirlik İndisleri

Güvenilirlik analizinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için sistemin matematiksel olarak modellenmesi gerekir. Güvenilirlik problemleri analitik olarak çözülebileceği gibi çözüm için kullanılan çeşitli simülasyon yöntemleri de bulunmaktadır. Bir sistemin güvenilirlik analizinin yapılabilmesi için çeşitli verilere ihtiyaç vardır. Bu veriler ancak sistemin geçmiş çalışma periyodundaki arıza durumlarının tespiti ile elde edilebilir. Bu veriler aşağıda bahsedilmiştir.

λ : Arıza hızı (sistem arızalarının sıklığı). Birim zamandaki arıza sayısının arızalanabilecek birim sayısına oranıdır. Denklem **(3.1)**'deki gibi ifade edilir.

$$\lambda(t) = \frac{Birim\ Zamandaki\ Arıza\ Sayısı}{Arızalanabilecek\ Birim\ Sayısı} \qquad \textbf{(3.1)}$$

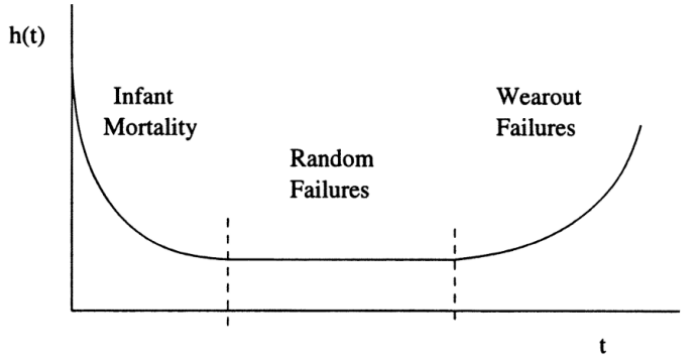
Arıza hızının zamanla değişimi 3 ana grup altında toplanmıştır.

1. Uyum Süreci: Sistemin üretim sürecinde yapılan hatalar sebebiyle arızalanma halidir. Arıza hızı zamanla azalmaktadır.

2. Normal Süreç: Bu süreçte arızalar rastlantısal gelişir. Arızalanmaya sebepleri rastlantısaldır ve arıza hızı sabittir.

3. Eskime Süreci: Sistem çalışmaya başladıktan sonra sistemi oluşturan elemanların özelliklerini kaybetmesi nedeni ile oluşan arızaları kapsamaktadır. Bu süreç malzemenin eskime ya da bakım eksikliği sebebiyle arızalanması sürecidir. Arıza hızı zamanla hızla artan bir karakteristiğe sahiptir.

Arıza hızının, uyum, normal çalışma ve eskime süreçlerindeki zamanla değişimini gösteren eğriye Küvet Karakteristiği (Bath tube Curve) adı verilir. Şekil 3.3'de küvet karakteristiği gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Küvet Karakteristiği [13]

μ : Arızalı bir birimin onarım hızıdır. Onarım-çalışma süreçleri arasındaki geçiş sıklığının bir ölçüsüdür. Denklem **(3.2)**'deki gibi ifade edilir.

$$\mu(t) = \frac{Birim\ Zamandaki\ Onarım\ Sayısı}{Onarılabilecek\ Birim\ Sayısı} \qquad \textbf{(3.2)}$$

m; Arızaya kadar geçen ortalama süre (MTTF),
r; Onarıma kadar geçen ortalama süre (MTTR)
MTBF; Arızalar arası ortalama süre temel güvenilirlik ölçütleri olarak kullanılırlar.

Bunların dışında, her birimin kendine özgü farklı güvenilirlik indisleri de olabilir. Amaca uygun olarak, yukarıda belirtilenlerden biri veya birkaçı güvenilirlik ölçütü olarak kullanılır. Güvenilirlik analizinde R(Reliability) sistemin güvenilirliğini Q ile ifade edilir.

Güvenilirlik analizinde rastlantısal değişken arızalanma zamanıdır. Arızalanma zamanının olası en küçük değeri başlangıç anındaki değer olarak alınır ve başlangıç anında sistemin çalıştığı varsayılır. Zamanla arıza olasılığı artarken güvenilirlik azalır ve teorik olarak sonsuz uzun bir süre sonra, arıza olasılığı bire güvenilirlik sıfıra gider. Bu ifade denklem **(3.3)**'teki gibi yazılabilir [12].

$$R(tmin) = R(0) = 1 \rightarrow Q(tmin) = Q(0) = 1 - R(0) = 0 \quad \textbf{(3.3)}$$

Arıza olasılığı dağılım fonksiyonu özelliklerini taşır ve arızalanma süresini karakterize eden olasılığa Arıza Dağılım Fonksiyonu (Q(t)) denir. Güvenilirlik (R(t)) ise arıza dağılım fonksiyonunun bütünleridir ve denklem **(3.4)** ile ifade edilir.

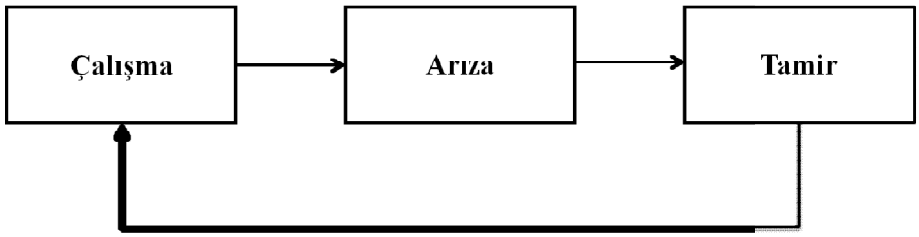
$$R(t) = 1 - Q(t) \quad \textbf{(3.4)}$$

Arıza dağılım fonksiyonunun zamana göre türevi Arıza Yoğunluk Fonksiyonu olarak isimlendirilir ve denklem **(3.5)** ile ifade edilir.

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad \textbf{(3.5)}$$

3.3 Güvenilirlik sistem çeşitleri

Sürekli işletimde olan sistemler bir işlerim süresi boyunca, çalışma-arıza-tamir - çalışma döngüsü içinde işletimlerini sürdürürler [14]. Şekil 3.4'te bir sistemin çalışma döngüsü gösterilmiştir.

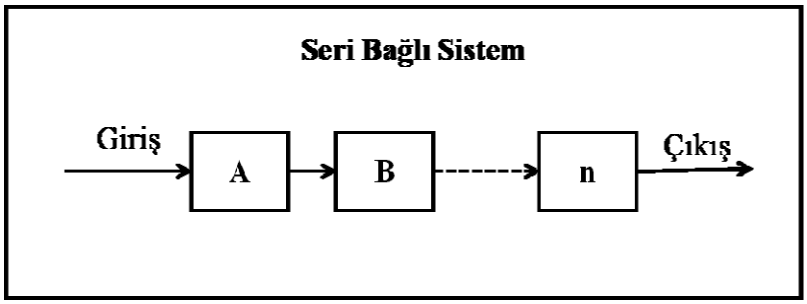


Şekil 3.4 : Çalışma Döngüsü

Güvenilirlik analizinde arıza ve tamir oranlarının sabit olduğu varsayılacaktır. Bu varsayımdan hareketle güvenilirlik analizinde kullanılan sistemler incelenecektir.

3.3.1 Seri bağlı sistemler (fazlalıksız sistemler, non-redundant systems)

Bu sistemlerde sistemi oluşturan tüm elemanlarını güvenilirliklerinin seri olarak birbirine bağlı olduğu varsayılır ve herhangi bir elemanın arızası tüm sistemin arızalanmasına sebep olmaktadır. Buradaki seri bağlılık kavramı sadece güvenilirlik açısından geçerlidir, elektriksel bir seri bağlılık şartı yoktur. Şekil 3.5'de gösterilen sistem seri bağlı bir sistemdir.



Şekil 3.5 : Seri Bağlı Sistem

Buradaki elemanların güvenilirlikleri R_A, R_B ... R_n olduğunu varsayarsak, tüm sistemin güvenilirliği denklem **(3.6)** ile ifade edilir [14].

$$R_{SERİ} = R_S = R_A.R_B \dots R_n \tag{3.6}$$

Bu durumda sistemin güvenilmezliği (Q) denklem **(3.7)** [14] ile ifade edilmektedir.

$$Q_{SERİ} = 1 - R_S = 1 - (R_A.R_B \dots R_n) \tag{3.7}$$

Aynı fonksiyonun zamana bağlı güvenilirliği ise denklem **(3.8)**'daki gibi ifade edilir.

$$R_{SERİ}(t) = R_S(t) = R_A(t).R_B(t) \dots R_n(t) \tag{3.8}$$

Seri bağlı sistemlerin arıza hızı cinsinden ifadesi denklem **(3.9)**'daki gibidir [14].

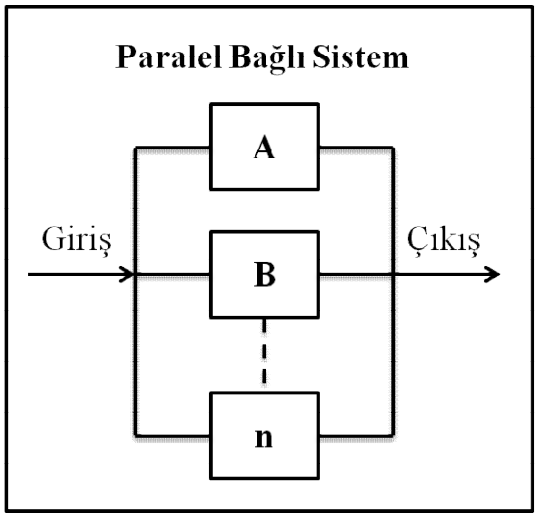
$$R_S(t) = e^{-\int_0^t \lambda_A(t)dt}.e^{-\int_0^t \lambda_B(t)dt} \dots e^{-\int_0^t \lambda_n(t)dt} \tag{3.9}$$

Bununla birlikte seri sistemlerin arızaya kadar geçen ortalama süresi denklem **(3.10)** yardımı ile hesaplanır [14].

$$MTTF = \int_0^\infty R_S(t)dt \tag{3.10}$$

3.3.2 Paralel bağlı sistemler (fazlalıklı sistemler, redundant systems)

Bu sistemlerde sistemi oluşturan tüm elemanlarını güvenilirliklerinin paralel olarak birbirine bağlı olduğu varsayılır ve sistemin arızalanması için sistemdeki tüm elemanların arızalanması gerekmektedir. Buradaki paralel bağlılık kavramı sadece güvenilirlik açısından geçerlidir, yani elektriksel bir paralel bağlılık şartı yoktur. Şekil 3.6'da gösterilen sistem paralel bağlı bir sistemdir.



Şekil 3.6 : Paralel Bağlı Sistem

Buradaki elemanların güvenilirlikleri R_A, R_B ... R_n olduğunu varsayarsak, tüm sistemin güvenilmezliği denklem **(3.11)** ile ifade edilir [14].

$$Q_{PARALEL} = Q_P = Q_A . Q_B \dots Q_n \quad \textbf{(3.11)}$$

Bu durumda sistemin güvenilirliği (R) denklem **(3.12)** ile ifade edilmektedir [14].

$$R_{PARALEL} = 1 - Q_P = 1 - (Q_A . Q_B \dots Q_n) \quad \textbf{(3.12)}$$

Aynı fonksiyonun zamana bağlı güvenilirliği ise denklem **(3.13)**'daki gibi ifade edilir[14].

$$Q_{PARALEL}(t) = Q_P(t) = Q_A(t) . Q_B(t) \dots Q_n(t) \quad \textbf{(3.13)}$$

Paralel bağlı sistemlerin arıza hızı cinsinden ifadesi denklem **(3.14)**'daki gibidir.

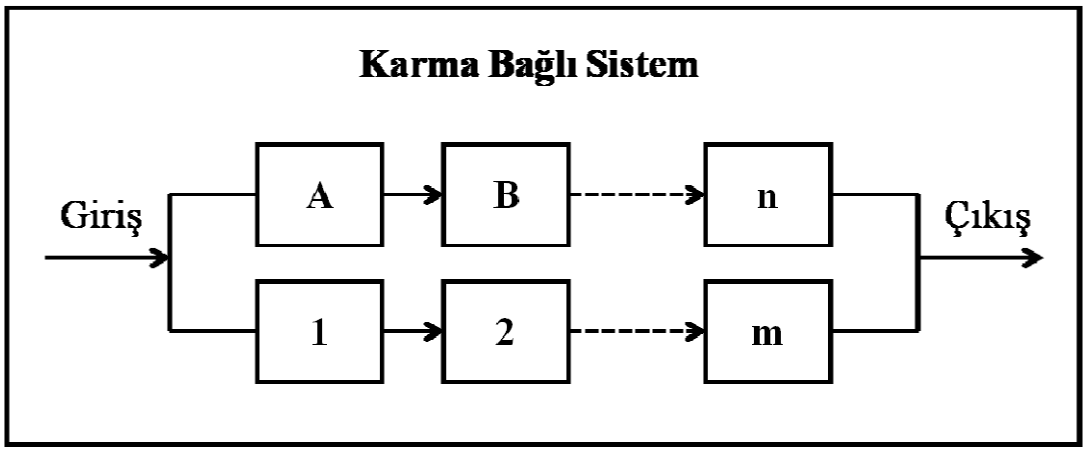
$$Q_P(t) = (1 - e^{-\int_0^t \lambda_A(t)dt}).(1 - e^{-\int_0^t \lambda_B(t)dt}) \dots (1 - e^{-\int_0^t \lambda_n(t)dt}) \quad \textbf{(3.14)}$$

Bununla birlikte paralel sistemlerin arızaya kadar geçen ortalama süresi denklem **(3.15)** yardımı ile hesaplanır.

$$MTTF = \int_0^\infty R_P(t)dt \quad \textbf{(3.15)}$$

3.3.3 Karma bağlı birimler

Seri ve paralel sistemlerin birlikte olduğu sistemlerdir. Bu sistemlerde analiz için seri ve paralel bağlı birimler en basit birime indirgeme yöntemi kullanılır. Şekil 3.7'de gösterilen sistem karma bağlı bir sistemdir.



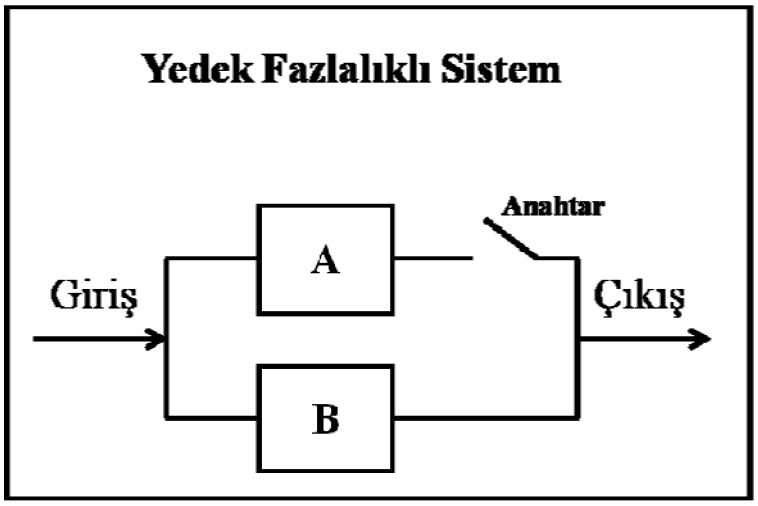
Şekil 3.7 : Karma Bağlı Sistem

Buradaki elemanların güvenilirlikleri R_1, R_2... R_m ve R_A, R_B... R_n olduğunu varsayarsak, tüm sistemin güvenilirliği için 1,2,...m ve A,B...n nolu seri sistemlerin eşdeğerini almak gerekir. Daha sonra eşdeğeri alınan bu iki seri sistem paralel olarak bağlamış hale gelir ve bu paralel olan 2 sistemin güvenilirlikleri hesaplanabilir [14].

3.3.4 Yedek fazlalıklı sistemler (standby redundant systems)

Uygulamalarda her zaman sistemler paralel bağlı olarak işletimde değillerdir. Genellikle birbirinin yerine geçecek sistemler birinin arızalanma şartında devreye girer. Bunun için bir anahtarlama sistemine ihtiyaç vardır. Bu anahtarlama çeşitli senaryolara göre gerçekleşebilir. Sistemin hangi durumunda anahtarın açıp kapanacağı çeşitli senaryolar ile belirlenebilir.

Bir anahtar iki eleman arasındaki açma kapama yapabileceği gibi çoklu elemanlar arasında geçişi sağlamak için de kullanılabilir. Birbirleri yerine kullanılabilen sistemlerin bir anahtar üzerinden bağlanması yedek fazlalıklı sistemdir. Şekil 3.8'de gösterilen sistem yedek fazlalıklı bir sistemdir.



Şekil 3.8 : Yedek Fazlalıklı Sistem

Buradaki elemanların güvenilirlikleri R_A ve R_B dir. Anahtarlama güvenilirliği ihmal edilirse sistemin güvenilirliği paralel sistemlerdeki ifade ile aynıdır. Bu iki sistem arasındaki fark, paralel sistemlerde birbirine paralel olan her eleman sürekli işletimde olmasına rağmen yedek fazlalıklı sistemlerde her bir eleman diğeri arızalandığı zaman devreye gireceği için iki sistemin zamana bağlı güvenilirlik ifadeler farklıdır.

Uygulamalarda genellikle bu sistemler birbirine eş sistemler olarak kabul edilir ve arıza hızları eşit kabul edilir. Arıza hızları sabit ve eşit sistemler için sistemin güvenilirliği denklem **(3.16)** ile hesaplanır [14].

$$R(t) = (1 + P_{anahtar}\lambda t)e^{-\lambda t} \tag{3.16}$$

Bununla birlikte yedek fazlalıklı sistemlerin arızaya kadar geçen ortalama süresi denklem **(3.17)** yardımı ile hesaplanır [14].

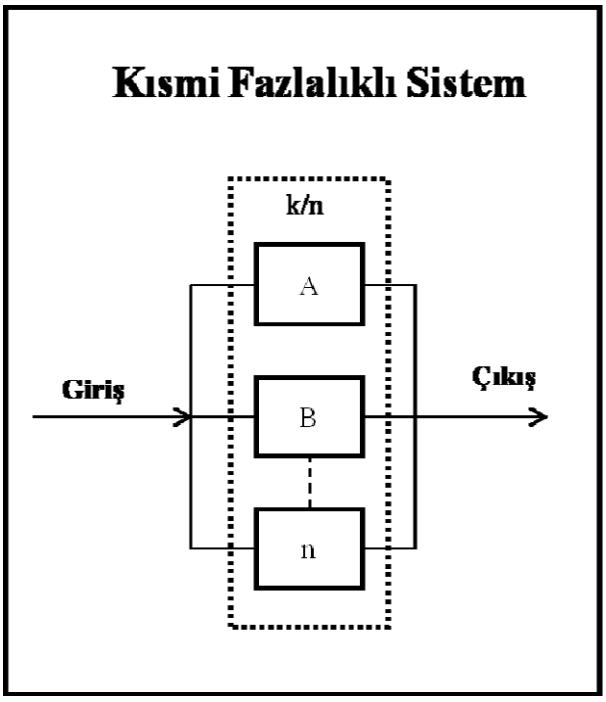
$$MTTF = \int_0^\infty R_P(t)dt \tag{3.17}$$

Bu tezde yapılacak güvenilirlik analizinde Cer trafoları ve DC panolar için yedek fazlalıklı sistem kullanılacaktır.

3.3.5 Kısmi fazlalıklı sistemler

Kısmi fazlalıklı sistemler birbirine paralel elemanlardan oluşmaktadır. Paralel bağlı sistemlerden farkı sistemin çalışması için belirli sayıda elemanın çalışması zorunluluğudur. Sistemdeki n adet elemandan en az k adedinin çalışması durumunda sistemin çalıştığı varsayılmaktadır. Tüm sitemin güvenilirliği denklem **(3.18)**'den hesaplanır [15]. Şekil 3.9'da kısmi fazlıklı sistemin örnek blok diyagramı gösterilmektedir.

$$[R(t) + Q(t)]^n \tag{3.18}$$



Şekil 3.9 : Kısmi Fazlılıklı Sistem

Burada n sistemde bulunan eleman sayısı, k ise sistemin çalışması için gerekli minimum eleman miktarıdır.

3.4 Sistem modellemesi

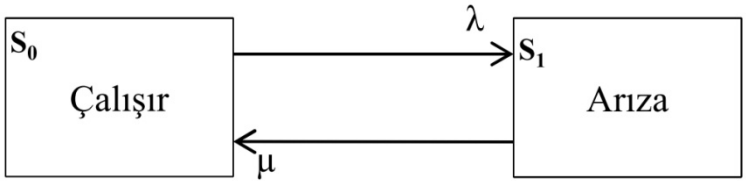
Güvenilirlik analizi yapılan sistemin davranışını belirleyebilmek için sistemin modellenmesi gereklidir. Sistemin modellenmesi çalışma durumunda arızaya geçtiği durumda ve arızadan sonraki durumda sistemin nasıl davranacağını tespit etmek ile beraber sistemden elde edilecek indislerin hesaplanabilmesini de sağlar. Bu nedenle sistemi analiz edebilmenin olmazsa olmaz koşulu sistemi modellemektir.

3.4.1 Markov modeli

Markov modeli onarılabilir birimlerden oluşmuş sistemlerde kullanılır. Markov modeli sistemlerin arıza ve çalışma durumları arasında geçiş hızlarına bağlı olarak durum uzay modelinin oluşturulmasıdır. Markov modeli kullanılırken bu geçiş hızları sabit kabul edilmektedir.

Markov Modellemesi ile güvenilirlik analizi yapılırken öncelikle olası tüm durum ve durum geçişleri belirlenerek (durum uzayı modeli kurularak) durum denklemleri yazılır. Sözkonusu diferansiyel denklemlerin çözümü ile durum olasılıkları saptanır. Sistemin çalışmasına karşı düşen durumların, olasılıkları toplamı hesaplanır. Bu olasılığa KULLANILABİLİRLİK (Availability) adı verilir. Kullanılabilirliğin bütünleri YOKLUK (unavailability) olarak adlandırılır ve sistemin arızalı olma olasılığını temsil eder [21].

Şekil 3.10'da onarılabilir bir birimin çalışır - arıza durumları arasındaki markov modeli gösterilmektedir. Burada S_0 durumu sistemin çalışır durumu S_1 durumu arıza durumudur. Sistem S_0'dan S_1'e λ arıza hızı ile geçerken S_1'den S_2'ye μ onarım hızı ile geçmektedir. Modelleme yapılırken bu geçiş hızları sabit kabul edilmektedir.



Şekil 3.10 : Onarılabilir bir birimin markov modeli

λ : arıza hızı,

μ : onarım hızı,

MTTF=m 1 =1/λ= Arızaya kadar geçen ortalama süre

MTTR=m 2 =1/μ= Onarıma kadar geçen ortalama süre

MTBF=MTTF+MTTR=Arızalar arası ortalama süre ile ifade edilmektedir [21].

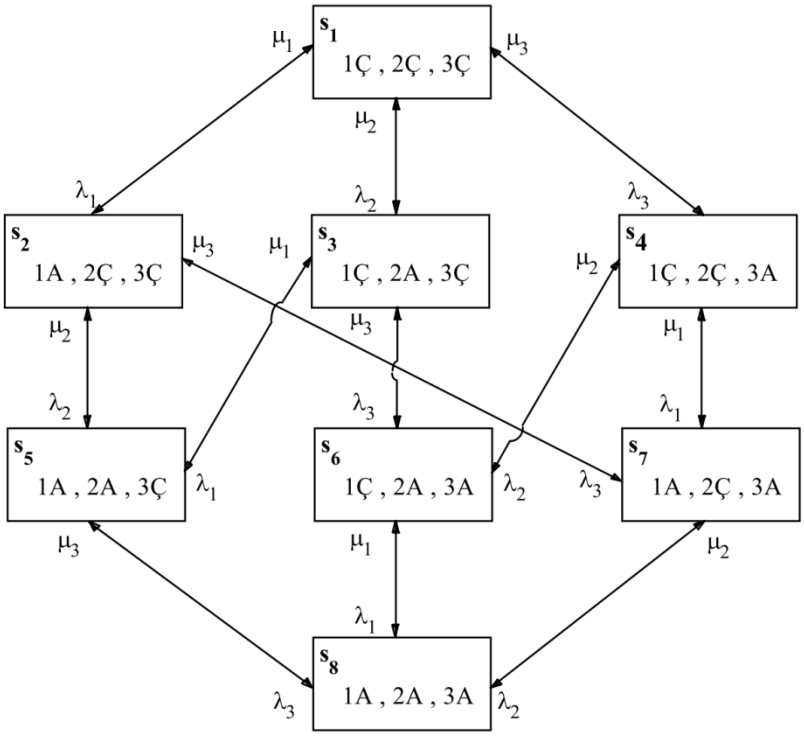
Sistem başlangıçta çalışır durumda olduğu varsayılırsa P_0 (sistemin çalışır durumda olma durum ve uç olasılıkları denklem **(3.19)** ile hesaplanır [21].

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu}.e^{-(\lambda+\mu)t},\ P_0 = \lim_{t\to\infty} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} \qquad \textbf{(3.19)}$$

Aynı şekilde P_1 (sistemin arızalı olma durum ve uç olasılıkları denklem **(3.20)** ile hesaplanır [21].

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} - \frac{\lambda}{\lambda+\mu}.e^{-(\lambda+\mu)t},\ P_1 = \lim_{t\to\infty} P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \qquad \textbf{(3.20)}$$

Sistemde tek birimin olduğu için kullanılabilirlik ifadesi çalışır duruma karşılık gelen $P_0(t)$ olasılığına eşittir. Yani $A(t)=P_0(t)$ olur. Aynı şekilde Yokluk ifadesi sistemin arıza durumuna karşılık gelen $P_1(t)$ olasılığına eşittir. Birden çok elemanlı sistemlerde kullanılabilirlik ifadesi tüm çalışır durum olasılıklarının toplamına, aynı şekilde yokluk ifadesi sistemin tüm arıza durum olasılıklarının toplamına eşit olacaktır. Şekil 3.11'de onarılabilir üç birimli bir sistemin markov modeli verimiştir.



Şekil 3.11 : Onarılabilir üç birimli sistemin markov modeli

Çok birimli bir sistemin Markov Modellemesi ile güvenilirlik analizi için aşağıdaki yol izlenir [21].

- Sistemin olası tüm durumları ve durumlararası geçişleri belirlenir (durum uzay gösterilimi elde edilir.
- Bu durumlara ilişkin diferansiyel denklem sistemi veya ayrık Stokastik Durum Geçiş Olasılığı Matrisi , P, oluşturulur.

- Başlangıç durum olasılıklarını kullanarak diferansiyel denklem takımı çözülür ve durum olasılığı ifadeleri elde edilir.
- Denklem **(3.21)** ifadesi yardımı ile sistemin durum uç olasılıkları belirlenir. (P_1,P_2,...P_n)

$$P_i = \lim_{t\to\infty} P_i(t)\,, i = 1,2,\dots n \qquad \textbf{(3.21)}$$

- Sistem arızasına/çalışmasına karşı düşen durum olasılıklarından yokluk ve kullanılabilirlik değerleri ve uç yokluk ve kullanılabilirlik değerleri hesaplanır.
- Sürekli veya ayrık Markov süreç tekniklerini kullanarak Güvenilirlik, MTTF ve MTTR parametreleri hesaplanır [21].

4. HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİNİN ÖNEMİ

Tüm elektrik güç beslemesinin olduğu sistemlerde güvenilirlik analizinin önemi olduğu gibi raylı sistemlerde de güvenilirlik analizi sistemin değerlendirilmesi ve geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

4.1 Hafif Raylı Sistemlerde Güvenilirlik Analizinin Anlamı

Hafif raylı sistemlerin aksamadan işletmede kalabilmeleri için kesintisiz elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Raylı sistemler genelde kendini oluşturan alt sistemlerin arızalanması veya hattı besleyen trafo merkezlerinin arızalanması göz önüne alınarak yedekli olarak tasarlanmışlardır. Tren hareketini sağlayacak cer gücü ihtiyacı en yüksek sefer sıklığına göre hesaplanmıştır. Sistemlerde oluşacak arıza gücü bir diğer deyişle beslenebilecek tren sayısını azaltır. Hatta beslenebilecek tren sayısının azalması ideal sefer sıklığı sayısı düşmesine neden olur. Raylı sistemlerde çok istisnai durumlarda enerji kesintisi veya işletme aksaması olur. Arıza durumlarında genelde sefer sıklığı düşürülür ve işletme arıza giderilene kadar kontrollü bir şekilde devam eder.

Sefer sıklığının azalması istenilen bir durum değildir. Özellikle sabah işe gidiş ve akşam iş çıkışı saatlerinde sefer sayısının azaltılması istasyonlarda yığılmalara ve işletmenin gelir kaybetmesine neden olmaktadır. Bu nedenle her zaman sistemin tam kurulu gücü ile çalışması beklenmektedir. Elektrik güç beslemesinden istenen en önemli şey kesintisizliktir.

Raylı sistemlerde tren hareketini sağlayan sistem çok elemanlı ve karmaşık bir sistemdir. En küçük elemanın bile arızalanması tüm sistemin arızalanmasına neden olabilir. Sistemin verimli çalışabilmesi için önceden tasarlanan optimum çalışma koşulları içerisinde bulunması gerekmektedir. Sistemi oluşturan en küçük elemanda oluşabilecek bir arıza daha büyük sistemlerin optimum çalışma koşullarını değiştirebilir, zorlanmalara ve hatalara neden olabilmektedir. Her bir arıza işletmeci tarafında gelir kaybı, yolcu tarafında da zaman kaybına neden olmaktadır.

Sistemlerde oluşacak arızalar rastlantısaldır ve önceden hesaplanması mümkün değildir. Tüm gerekli bakımlar yapılsa, sistemim her elemanı optimum çalışma koşullarında çalışsa bile sistemde her zaman bir arıza olasılığı bulunmaktadır. Güvenilirlik analizi sistemde oluşabilecek arıza olasılığının belirlenmesi ve sistemin gelecek davranışının öngörülebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Güvenilirlik analizin sayesinde sisteme ait geçmiş veriler analiz edilerek sistemin gelecekteki davranışı hakkında tahmin yapılabilir. Sistemin geçmiş performans verilerinin fazlalığı ve geçmiş bilgilerin periyodunun uzunluğu güvenilirlik analizi sonucunda elde edilen verilerin doğruya daha yaklaşmasını sağlamaktadır.

Raylı sistemler yatırım maliyetleri yüksek ve birçok elemanın birlikte çalıştığı sistemlerdir. Sistemim en az hata ile istenilen işletme şartlarına göre çalışabilmesi için sistemin çok detaylı olarak tasarlanması gereklidir. Sistemin doğru tasarlanması raylı sistemlerde hayati önem arz etmektedir. Ülkemizde DC beslemeli raylı ulaşım sistemlerinin simülasyonu yapılabilmektedir [16].

4.2 Güvenilirlik ve Maliyet

Bir sistemim güvenilirliğini artırmanın birçok yolu bulunmaktadır. Sistem güvenilirliğini artırmanın başlıca yolları aşağıda verilmektedir [17].

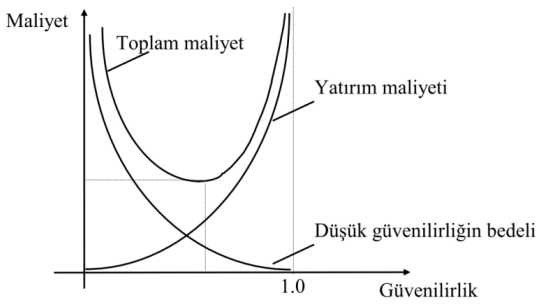
- Bileşen güvenilirliğini artırmak,

- Bileşenleri yedeklemek,

- Koruyucu bakım periyodunu küçültmek,

- Ölçme ve gözetim olanaklarını artırmak ve sıklaştırmak

Şekil 4.1'de güvenilirliğin değişimi ile sistemim toplam maliyetinin değişim grafiği verilmektedir.



Şekil 4.1 : Toplam maliyet ve güvenilirlik [17]

Şekil 4.1'den de anlaşılabileceği gibi güvenilirliği artırıcı önlemler güvenilirlik maliyetlerini arttırmakta ve bu da sistemin toplam maliyetinde artışa neden olmaktadır. Fakat güvenirliği artırmak için alınan ve maliyet getiren önlemlerin artması bir yerden sonra güvenilirliğin beklenen oranda arttırmaz. Yani yatırım arttıkça güvenilirlik artışı sürekli olmamaktadır. Bu nedenle yatırım yapılırken güvenilirliği arttırıcı önlemler iyi bir şekilde analiz edilerek tespit edilmelidir.

Özellikle raylı sistemlerde yatırım maliyeti yüksek sistemler oldukları için güvenilirliği arttırıcı her tedbir aşırı maliyetlere sebep olabilmektedir. Sistemin güvenilirlik sonucunda oluşan maliyetleri değerlendirirken sistemin arıza anındaki zararların da hesaplanıp dikkate alınmalıdır.

4.3 Raylı Sistemin güvenilirlik verilerinin önemi

Güvenilirlik analizinde kullanılacak verilerin elde edilebilir ve analizi destekleyici yönde olması gerekmektedir [18]. Verilerin doğru bir şekilde toplanması için işletmeyi yapan kurumun veri toplama, değerlendirme ve arşivleme prosedürüne sahip olması gerekmektedir. Raylı sistemlerde arıza verileri işletmeci kurum tarafından toplanmaktadır fakat bilgi paylaşımı veya verilerin değerlendirip sistemin gelecek performansının değerlendirilmesi konusunda sıkıntılar bulunmaktadır. Raylı sistemler özellikle şehirlerde yeni yeni gelişmekte olan sistemler olduğu için devlet ya da istatistik kurumları tarafından sistemin çalışma durumu kontrol edilmemektedir. Raylı sistemlerde yapılacak herhangi bir değişiklik büyük maliyetler gerektirdiğinden sistemlerde güvenilirliği arttırıcı önlemleri sonradan almak zordur. Fakat yeni yapılacak olan hatlarda veya sistemin devamı niteliğinde olacak uzatma hatlarında geçmiş verilerin değerlendirilmesi ve ona göre önlemler alınması gereklidir.

Gelecek performans tahmini için sistemin geçmiş tecrübelerin, gelecek tahmini için uygun modele sokulması gerekmektedir. Uygun ve doğru verilerin toplanması, güvenilirlik modeli, analiz yöntemi ve eşitliklerinde giriş verisi olarak kullanılacağı için oldukça gereklidir [18].

Sistemim analizinde kullanılabilecek tüm verilerin toplanması ne kadar eksiksiz doğru şekilde yapılırsa, yapılacak analiz de o derece doğru sonuçlara yaklaşabilir.

5. HAFİF RAYLI SİSTEMLERİN GÜÇ BESLEMESİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Bu bölümde hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesini oluşturan sistemler tanıtılıp görevleri anlatılacak ve daha sonra örnek olarak alınan Habipler - Topkapı Hafif Raylı Sistem hattının güvenilirlik analizi yapılacaktır.

5.1 Temel Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesi Sistemi

Hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinin asıl amacı tren hareketini sağlamaktır. Bu elektrik besleme sistemi bileşenleri bölümün devamında maddeler halinde açıklanmıştır.

5.1.1 Besleme noktası

Raylı sistem için gerekli enerjinin alındığı merkezdir. Ana besleme hattı olarak da değerlendirilebilir. Şehir içi ya da şehirlerarası iletim hatlarından alınan enerji indirici merkezler vasıtası ile şehir içi son kullanıcıya aktarılır. Raylı sistemler de bir çeşit son kullanıcıdır. Hafif raylı sistemler enerjiyi trafo merkezine en yakın bölgede bulunan indirici trafo merkezinden alır. Güç ihtiyacına göre raylı sistem enerjiyi bir kaç indirici merkezden de alabilir.

5.1.2 Orta gerilim sistemi

İndirici merkezden alınan orta gerilim seviyesindeki enerji orta gerilim hücre gruplarına gelir. Bu hücreler hem hattın güvenliğini sağlayacak kesicilerle donatılmakta hem de bir sonraki raylı sistem trafo merkezi ile irtibatlanıp ring besleme sisteminin uygulanmasının sağlamaktadır.

5.1.3 Cer trafoları

Tren hareketi için gerekli olan enerjiyi üreten trafolardır. Orta gerilimi alçak gerilime dönüştürürler. Doğrultucu grupları yardımı ile D.C. gerilim elde edilmesini sağlarlar.

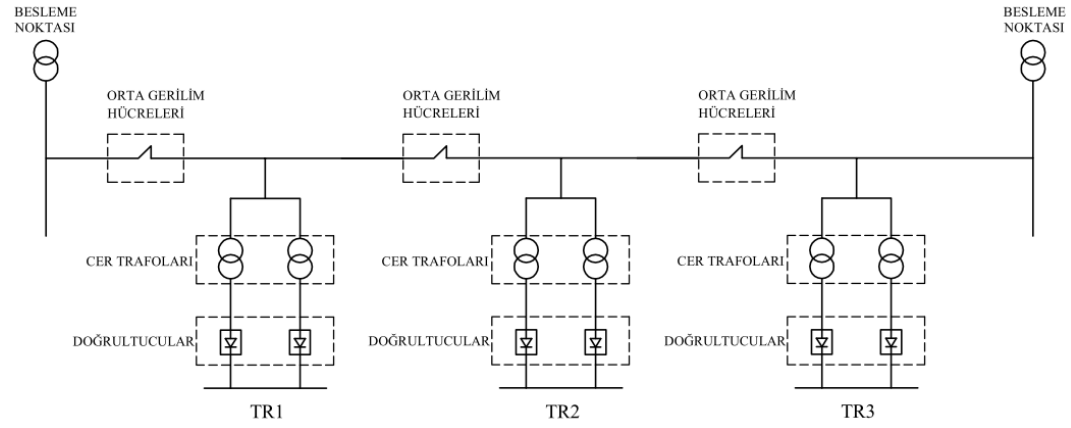
5.1.4 Doğrultucu grupları

Hafif raylı sistem beslemesinde genellikle DC gerilim kullanılmaktadır. Bu da Cer trafolarından alınan enerji doğrultucular üzerinden doğrultularak elde edilmektedir. Genelde 12 doğrultuculu DC grupları tercih edilmektedir. Bunun nedeni 3 fazlı alternatif akımı doğrultmada 12 doğrultuculu sistemin veriminin yüksek olmasıdır.

5.1.5 Yardımcı servis trafoları

Raylı sistemlerde kullanılan yardımcı servis trafoları orta gerilimi alçak gerilime dönüştürüp tren hareketi hariç tüm diğer yardımcı servislerin beslenmesi için kullanılırlar.

Hafif raylı sistemlerde bulunan bu gruplar birbirine kablolar veya baralar üzerinden bağlanmıştır ve bir bütün olarak hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesi olarak adlandırılabilir. Şekil 5.1'de örnek bir hafif raylı sistem elektrik güç beslemesi şeması verilmektedir. Burada TR1 - TR2 ve TR3 ile hattı besleyen trafo merkezlerini ifade edilmektedir.

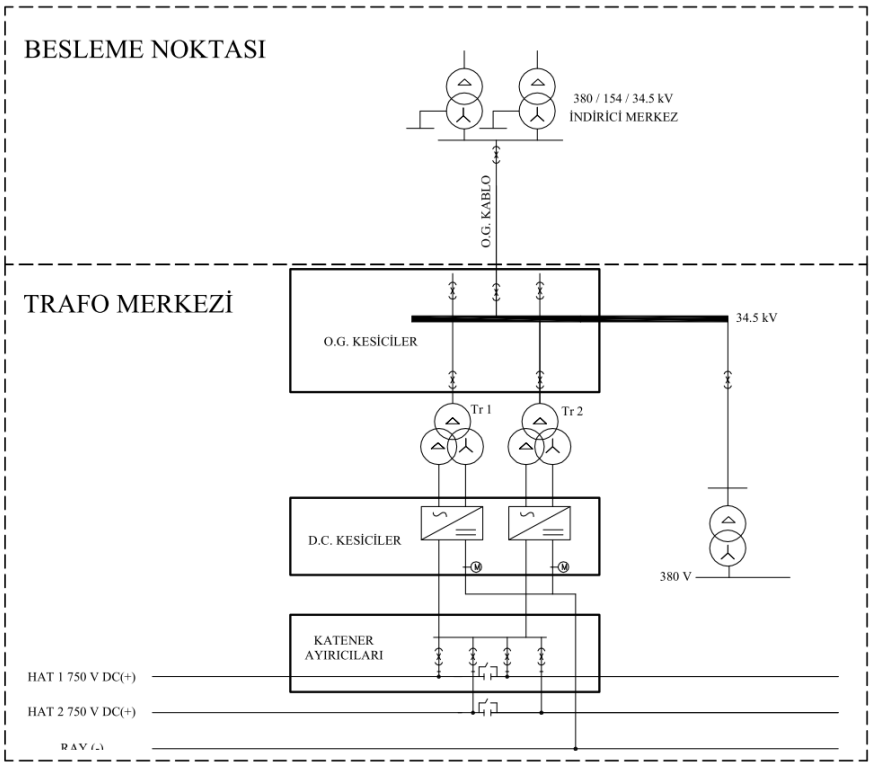


Şekil 5.1 : Örnek hafif raylı sistem elektrik güç beslemesi tek hat şeması

Elektrik dağıtım sistemlerinde elektrik beslemesi radyal, kapalı ring ya da açık ring olarak yapılmaktadır. Hafif raylı sistemlerde de enerji beslemesi benzer olarak genellikle açık ring şeklinde uygulanmakta bazı uygulamalarda ise enerji beslemesi kapalı ring olarak tasarlanmaktadır. Raylı sistemlerin enerji beslemesindeki en kritik durum tren hareketidir. Raylı sistemlerde tren hareketinin hiç bir şekilde kesintiye uğramaması istenmektedir. Tren hareketi demek yük noktasının hiç bir zaman enerjisiz kalmaması anlamına gelir. Bu nedenle raylı sistemlerin enerji besleme sistemi tasarlanırken yedekliliğe önem verilmektedir.

Hafif raylı sistemlerde hattın uzunluğuna ve güç ihtiyacına göre trafo merkezleri sayısı belirlenir. Hafif raylı sistemlerde ortalama 1 ila1,5 km'de bir adet trafo merkezine ihtiyaç duyulmaktadır. Trafo merkezi sayısı hattın tüm parametrelerinin ve işletme senaryolarının kullanılarak analiz edildiği bir simülasyonla belirlenebilir.

Raylı sistem hattının elektrik beslemesi trafo merkezlerine bölünmüştür. Her bir trafo merkezinin besleyeceği hat birbirinden izole edilmiştir. Bir trafo merkezinde oluşabilecek arıza o trafo merkezinin beslediği kısmı enerjisiz bırakır ve o bölgede tren hareketsiz hale gelir. Herhangi bir trafo merkezindeki arıza tren hareketini etkilememesi için arıza senaryoları üretilmektedir. Bu senaryolara göre genellikle bir trafo merkezinde arıza olması durumunda o trafo merkezinin beslediği hat komşu trafo merkezi tarafından geçici olarak beslenmektedir. Raylı sistemlerdeki trafo merkezleri tüm işletme senaryolarının analizi ve simülasyonu ile tasarlanmaktadır. Şekil 5.2'de örnek bir trafo merkezi tek hat şeması verilmiştir.



Şekil 5.2 : Örnek bir trafo merkezi tek hat şeması

Türkiye'de raylı sistemler yeni yeni gelişmeye ve uygulanmaya başlamıştır. Şu anda işletmede olan birçok sistem yakın geçmişte devreye alınmıştır. Sistemlerin yeni olması geçmişe yönelik toplanan bilgilerin kısıtlı bir periyot için toplanmış olduğu anlamına gelmektedir.

Türkiye'de bu sistemler yeni olduğu için sistemlerin ne kadar güvenilir olduğuna dair bir çalışma yapılmamıştır. Yapılacak güvenilirlik analizinin amacı sistemin geçmiş performansını değerlendirmek ve buradan yola çıkarak gelecekteki çalışma durumunu öngörmektir.

Hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesi uygulamasında genellikle ring besleme kullanılır. Trafo merkezileri birbirlerine orta gerilim hücreleri üzerinden kablolar vasıtası ile bağlıdır. Raylı sistem beslemesi ilk besleme noktasından başlamak üzere aşağıdaki şekilde bağlanmıştır.

Enerji ilk olarak indirici merkezdeki kesici üzerinden orta gerilim kablosu vasıtası ile hafif raylı sistem trafo merkezindeki orta gerilim kesicisine gelir. Bu kablo iki o.g. kesici arasına çekilir.

Orta gerilim kesici hücrelerinden çıkan kablolar Cer ve Yardımcı servis trafolarına girer.

Cer trafosundan çıkan kablo kesicili doğrultucu grubuna girer. Doğrultucu grubundan yine bir kesiciden çıkan kablo hattın üzerindeki ayırıcılara gelir. Bu ayırıcılar üzerinden katener hattı beslenmektedir.

Hatta oluşan herhangi bir arıza enerji otomasyon sistemi vasıtası ile merkeze bildirilir ve arıza bölgesi belirlenir.

5.2 Güvenilirlik Analizi Yapılacak Hafif Raylı Sistem Verileri

Güvenilirlik analizi 5 senedir işletmede olan ve İstanbul'daki ilk hafif raylı sistem projesi özelliği taşıyan Habipler - Topkapı Hafif Raylı Sistem hattı için yapılacaktır. Hat İstanbul Ulaşım tarafından T4 hattı olarak adlandırılmaktadır. Habipler - Topkapı hattı 17 Eylül 2007 tarihinde hizmete giren ve Şehitlik-Mescid-i Selam arasında hizmet veren T4 tramvayı 18 Mart 2009 tarihinde Edirnekapı-Topkapı etabının hizmete alınmasıyla birlikte 15,3 km lik hatta hizmet vermektedir. T4 hattında 7'si yer altı olmak üzere toplam 22 istasyon bulunmaktadır. T4 Topkapı-Habibler tramvay hattı Şehitlik istasyonunda Avcılar-Söğütlüçeşme Metrobüs hattıyla, Vatan istasyonunda M1 Aksaray-Havalimanı Metro hattıyla, Topkapı istasyonunda ise T1 Zeyinburnu-Kabataş Tramvay hattı ve Avcılar-Söğütlüçeşme Metrobüs hattıyla entegre durumdadır. Hattın son aşamasında kuzey yönünde Mescid-i Selam sonrasında Habibler istasyonu planlanmaktadır [19].

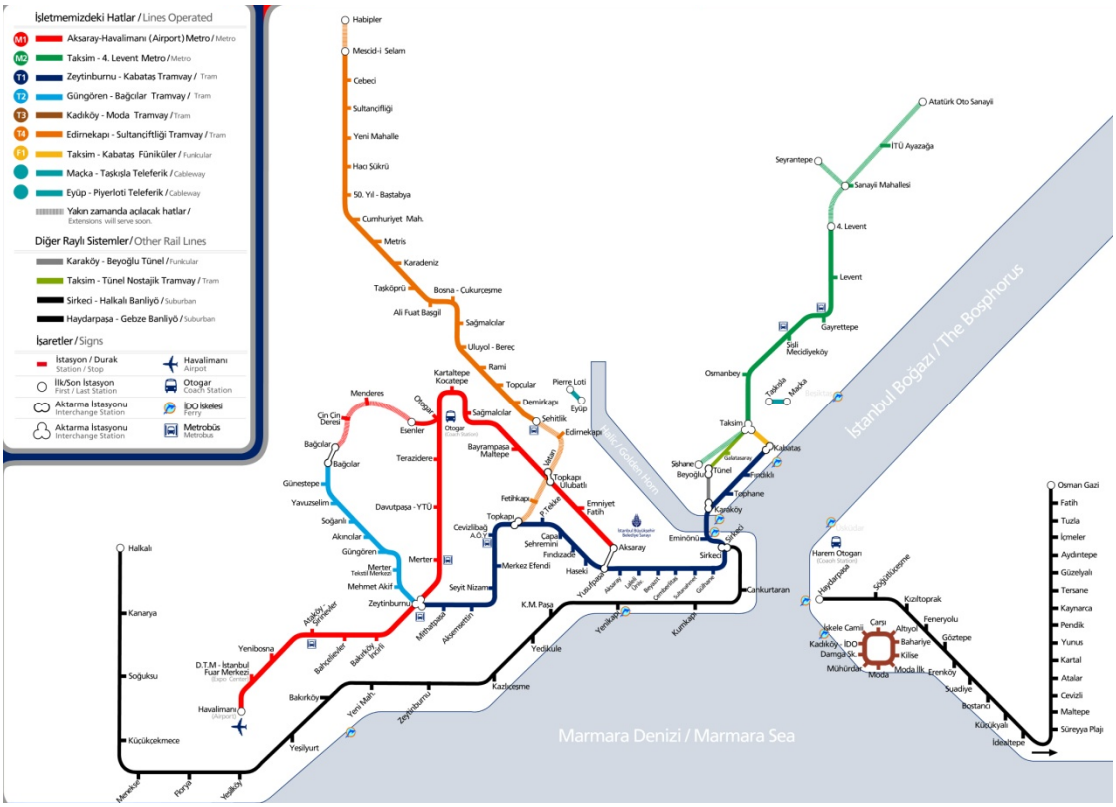
Çizelge 5.1'de Habipler - Topkapı hattının işletme bilgileri bulunmaktadır [19].

Çizelge 5.1 : Habipler - Topkapı hattı işletme bilgileri

İŞLETME BİLGİLERİ		
Hat Uzunluğu	:	15,3 Km.
İstasyon Sayısı	:	22
Vagon Sayısı	:	63
Sefer Süresi	:	42 dakika
İşletme Saatleri	:	06:00 / 00:00
Günlük Yolcu Sayısı	:	100.000 yolcu / gün
Günlük Sefer Sayısı	:	380
Sefer Sıklığı	:	pik saatte 5 dakika.

Yüksek tabanlı tramvay araçlarının kullanıldığı hat Sultangazi, Gaziosmanpaşa, Bayrampaşa ve Eyüp ilçelerinin arasından geçmektedir. Saatte tek yönde 25.000 yolcu kapasitesi hesaplanan hattın istasyonları 3'lü dizi çalıştırılacak şekilde tasarlandı, ayrıca özürlü ve yaşlı yolcuların erişimi için rampalar ile yer altı istasyonlarında asansör ve yürüyen merdivenler bulunmaktadır [19].

Şekil 5.3'de İstanbul'da bulunan raylı sistem hatları gösterilmektedir. Bu hatlardan T4 ile ifade edilen hat Habipler - Topkapı hafif raylı sistem hattıdır.



Şekil 5.3 : Raylı sistemler ağ haritası (istanbul) [19]

Habipler - Topkapı hattında 22 adet istasyon bulunmaktadır. Çizelge 5.2'de hatta bulunan istasyonların isimleri ve hat üzerindeki yerleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.2 : İstasyon bilgileri

TÜM İSTASYON HAT KİLOMETRELERİ				
SIRA NO	**İSTASYONLAR**	**BAŞLANGIÇ KM'Sİ**	**BİTİŞ KM'Sİ**	**PERON TİPİ**
1	Mescidi Selam İstasyonu	0+161	0+256	Orta Peron
2	Cebeci İstasyonu	0+880	1+080	Yan Peron
3	Sultançiftliği İstasyonu	1+560	1+760	Yan Peron
4	Yeni Mahalle İstasyonu	2+300	2+500	Yan Peron
5	Hacı Şükrü İstasyonu	3+080	3+280	Yan Peron
6	50. Yıl İstasyonu	3+788	3+988	Yan Peron
7	Metris İstasyonu	4+860	4+960	Orta Peron
8	Karadeniz İstasyonu	5+646	5+841	Tünel Peron
9	Taş Köprü İstasyonu	6+183	6+378	Tünel Peron
10	Ali Fuat Başgil İstasyonu	6+996	7+181	Tünel Peron
11	Ulubatlı İstasyonu	7+990	8+085	Orta Peron
12	Sağmalcılar İstasyonu	8+648	8+743	Orta Peron
13	Uluyol İstasyonu	9+050	9+245	Tünel Peron
14	Rami İstasyonu	10+035	10+230	Tünel Peron
15	Topçular İstasyonu	10+686	10+884	Tünel Peron
16	Demir Kapı İstasyonu	11+340	11+440	Orta Peron
17	Şehitlik İstasyonu	11+880	11+980	Orta Peron
18	Edirnekapı İstasyonu	12+469	12+569	Tünel Peron
19	Vatan İstasyonu	13+263	13+352	Orta Peron
20	Fetihkapı İstasyonu	13+818	13+918	Orta Peron
21	Topkapı İstasyonu	14+373	14+265	Orta Peron

Hat boyunca yerleştirilmiş ve tüm hattı besleyen 9 adet trafo merkezi bulunmaktadır. Trafo merkezi bilgileri çizelge 5.3'de verilmektedir.

Çizelge 5.3 : Trafo merkezi bilgileri

TRAFO MERKEZLERİNİN YER VE GÜÇ BİLGİLERİ				
SIRA NO	**TRAFO MERKEZİ ADI**	**HATTAKİ YERİ [KM]**	**CER TRAFOSU 1 GÜCÜ [kVA]**	**CER TRAFOSU 2 GÜCÜ [kVA]**
1	TM 1	0+100	1.500	1.500
2	TM 2	1+800	1.500	1.500
3	TM 3	3+560	1.500	1.500
4	TM 4	4+730	1.500	1.500
5	TM 5	6+300	1.500	1.500
6	TM 6	8+300	1.500	1.500
7	TM 7	10+120	1.500	1.500
8	TM 8	11+500	1.500	1.500
9	TM 9	13+100	1.500	1.500
TOPLAM KURULU GÜÇ [kVA]			**27.000**	

Hat üzerinde bulunan katener sistemine bağlı bölge ayırıcılarının hat üzerindeki yerleri çizelge 5.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.4 : Bölge ayırıcılarını hat üzerindeki yerleri

BÖLGE AYIRICILARI YER BİLGİLERİ	
SIRA NO	**HATTAKİ YERİ [KM]**
1	0+478
2	1+807
3	3+558
4	4+900
5	6+400
6	8+400
7	10+240
8	11+550
9	13+150

Sistemler birbirlerine kablolar vasıtası ile bağlanmışlardır. Sistemde bulunan bu kablolar trafo merkezlerini birbirine bağlayıp bir ring oluşmasını sağlayan O.G. kablolar ve doğrultulan gerilimin katener hattı ile irtibatlandırılmasını sağlayan D.C. kablolardır. Çizelge 5.5'te hat boyunca çekilmiş O.G. ring kablolarının uzunlukları verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Trafo merkezileri arası çekilen o.g. kablolar

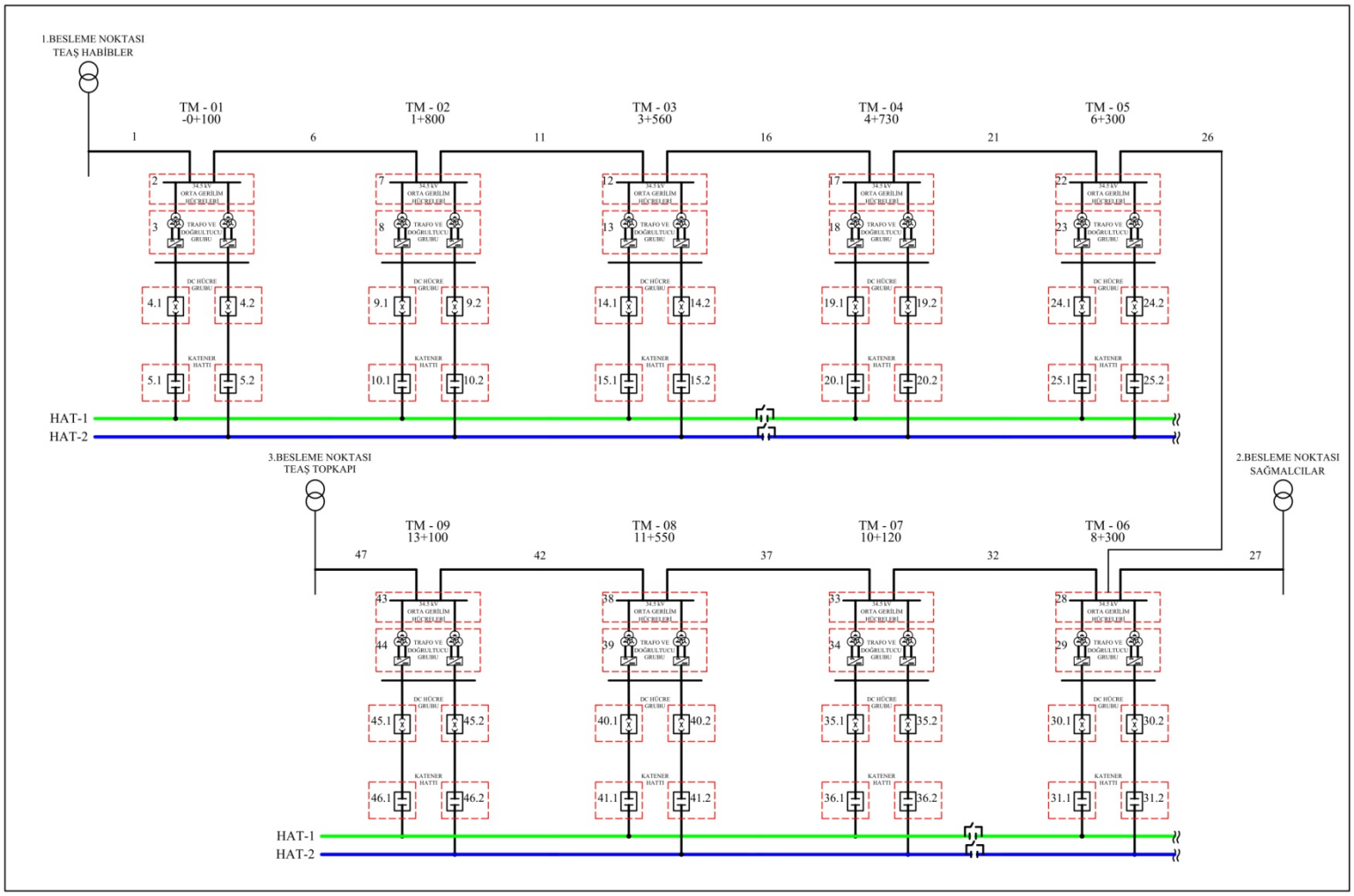
TRAFO MERKEZLERİ ARASI ÇEKİLEN O.G. KABLOLAR			
Kablo Başlangıç	**Kablo Bitiş**	**Kablo Tipi**	**Toplam Metraj (m)**
Habipler Besleme Noktası	TM1	3x(1x240) 20,3/35 kV	2200
TM1	TM2	3x(1x240) 20,3/35 kV	2100
TM2	TM3	3x(1x240) 20,3/35 kV	2000
TM3	TM4	3x(1x240) 20,3/35 kV	1500
TM4	TM5	3x(1x240) 20,3/35 kV	2070
TM5	TM6	3x(1x240) 20,3/35 kV	2450
TM6	TM7	3x(1x240) 20,3/35 kV	2150
TM7	TM8	3x(1x240) 20,3/35 kV	2150
TM8	TM9	3x(1x240) 20,3/35 kV	2350
Sağmalcılar Besleme Noktası	TM6	3x(1x240) 20,3/35 kV	2960
Topkapı Besleme Noktası	TM9	3x(1x240) 20,3/35 kV	410

Çizelge 5.6'da ise doğrultucu panolar ile katener hattı ve ray arasında çekilen D.C. kabloların uzunlukları verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Trafo merkezileri arası çekilen d.c kablolar

TRAFO MERKEZLERİ ARASI ÇEKİLEN D.C. KABLOLAR			
Trafo Merkezi İsmi	**Kablo Cinsi**	**Pozitif Besleme Metraj (m)**	**Negatif Geri Dönüş Metraj (m)**
TM1	1X240 N2XSYR	3060	1608
TM2	1X240 N2XSYR	1791	800
TM3	1X240 N2XSYR	1920	1160
TM4	1X240 N2XSYR	1437	712
TM5	1X240 N2XSYR	5742	4178
TM6	1X240 N2XSYR	2160	1073
TM7	1X240 N2XSYR	1452	1108
TM8	1X240 N2XSYR	10880	7860
TM9	1X240 N2XSYR	2040	1210

Bu bilgilerden de anlaşılacağı gibi hatta 9 adet trafo merkezi 22 adet istasyon bulunmaktadır. Şekil 5.4'te hattın elektriksel tek hat şeması gösterilmektedir. Bu tek hat şeması üzerinde hattaki arıza bölgeleri 1,2,4...47 ile numaralandırılmıştır.



Şekil 5.4 : Habitler - Topkapı Hafif Raylı Sistem Hattı Tek Hat Diyagramı

Çizelge 5.7'de tüm hatta ait arıza verileri verilmiştir. Bu veriler arıza bölgelerinin 5 senelik işletmedeki arıza sayılarını gösterilmektedir. Bu bilgiler İstanbul Ulaşım A.Ş'den alınmış fakat resmi geçerliliği olmayan bilgilerdir. Analizde kullanabilmek amacı ile İstanbul Ulaşım A.Ş.'den temin edilmiştir.

Çizelge 5.7 : Tüm Sistemin arıza verileri

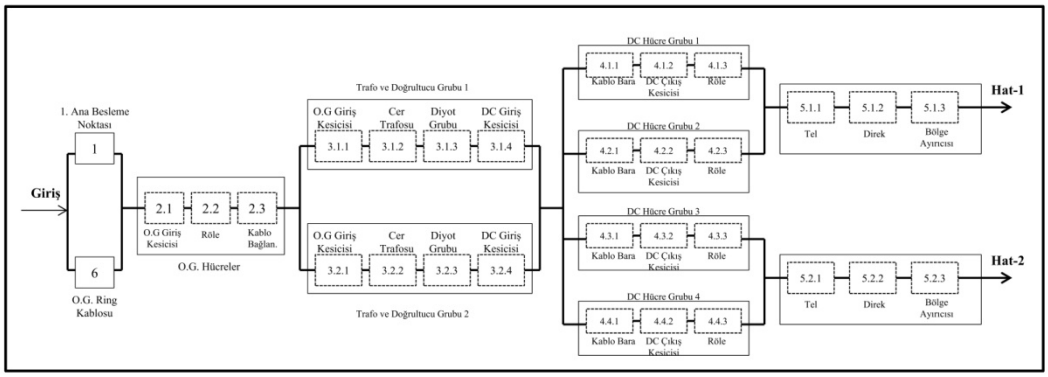
Arıza Bölgesi	**Toplam Arıza Adedi (5 Yıl)**
Besleme Noktaları	
1. Besleme Noktası Arızası	7,00
O.G Ring Kablo Arızası	8,00
O.G. Hücreler	
O.G Giriş Kesicisi Arızası	4
Röle Arızası	4
Kablo - Bara Arızası	12
Trafo ve Doğrultucu Grubu 1	
O.G Giriş Kesicisi Arızası	2
Cer Trafosu Arızası	6
Diyot Grubu Arızası	12
DC Giriş Kesicisi Arızası	9
Trafo ve Doğrultucu Grubu 2	
O.G Giriş Kesicisi Arızası	2
Cer Trafosu Arızası	5
Diyot Grubu Arızası	10
DC Giriş Kesicisi Arızası	9
DC Hücre Grubu 1	
Kablo - Bara Arızası	5
DC Çıkış Kesicisi Arızası	5
Röle Arızası	3
DC Hücre Grubu 2	
Kablo - Bara Arızası	4
DC Çıkış Kesicisi Arızası	4
Röle Arızası	3
DC Hücre Grubu 3	
Kablo - Bara Arızası	5
DC Çıkış Kesicisi Arızası	5
Röle Arızası	3
DC Hücre Grubu 4	
Kablo - Bara Arızası	4
DC Çıkış Kesicisi Arızası	4
Röle Arızası	2
Katener Hattı 1	
Tel Kopması	2
Direk Devrilmesi	1
Bölge Ayırıcısı Arızası	3
Katener Hattı 2	
Tel Kopması	1
Direk Devrilmesi	2
Bölge Ayırıcısı Arızası	2

5.3 Tren Besleme Sistemleri Güvenilirlik Hesabı

Güvenilirlik analizi örnek bir trafo merkezi için yapılacaktır. 9 adet trafo merkezi bağlantı şeması ve ekipmanlar cinsinden birbiri ile aynı olduğu için örnek alınan trafo merkezinin hesaplanan analiz değerleri tüm trafo merkezleri için aynı kabul edilecektir. Trafo merkezleri hatta bulunduğu noktaya ve beslediği bölgeye göre sıralanarak TM-1, TM-2...TM-9 ile adlandırılacaktır. Her trafo merkezi bölgesi gidiş ve dönüş hattı olmak üzere 2 adet hattı beslemektedir.

5.3.1 Örnek bir trafo merkezi güvenilirlik analizi

Örnek bir trafo merkezi için analiz yapılırken bölüm 3'de anlatılanlardan bilgilerden yaralanılacaktır. Şekil 5.5'de örnek bir trafo merkezi için güvenilirlik analizi blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.5 : Örnek bir trafo merkezi için güvenilirlik analizi blok diyagramı

Güvenilirlik analizi bu blok diyagram referans alınarak yapılacaktır. Blok diyagramından da anlaşılacağı gibi trafo merkezi Hat-1 ve Hat-2 olmak üzere 2 hattı beslemektedir. Bu iki hat, ana besleme noktası, O.G. hücreler, Trafo ve doğrultucu grupları, DC Hücre grubu ve katener hattı olmak üzere 5 ana sistem üzerinden beslenmektedir. Hatların ana besleme noktaları, O.G. hücreleri trafo ve doğrultucu grupları ortaktır fakat her bir hattın DC hücre grupları ile katener sistemleri farklıdır. Ana besleme noktasına enerji ana indirici merkezden veya komşu trafo merkezinden gelmektedir. Gelen bu enerji O.G. hücrelere bağlanır. Buradan çıkan 34,5 kV'luk gerilim Cer trafoları üzerinden doğrultucu grubu bağlanarak doğrultulur. Doğrultulan gerilim, kesicili DC hücre grubu üzerinden ilgili katener hattına bağlanır. Bu şekilde tren hareketi sağlanmış olur. Trafo merkezini oluşturan 5 ana sistemden birinin bile arızalanması sistemin arızalanmasına sebep olacaktır.

TM-1 bölgesine ait arıza hızı bilgileri çizelge 5.8'da verilmiştir.Buradaki değerler çizelge 5.7'ye görehesaplanmıştır. Çizelge 5.7'de 9 adet trafo merkezinin 5 yıllık arıza sayıları verilmiştir. Çizelge 5.8'de arıza sayılarının 9 trafo merkezine göre ortalaması alınıp 5 yıllık arıza sayıları 1 yıl olacak şekilde oranlanarak elde değerler elde edilmiştir..

Çizelge 5.8 : TM-1 bölgesine ait arıza hızı verileri

Arıza Bölgesi	**Toplam Arıza Adedi (5 Yıl)**	**λ - Arıza Hızı (Arıza / Yıl)**
Besleme Noktaları		
1. Besleme Noktası Arızası	7,00	0,1556
O.G Ring Kablo Arızası	8,00	0,1778
O.G. Hücreler		
O.G Giriş Kesicisi Arızası	4	0,0889
Röle Arızası	4	0,0889
Kablo - Bara Arızası	12	0,2667
Trafo ve Doğrultucu Grubu 1		
O.G Giriş Kesicisi Arızası	2	0,0444
Cer Trafosu Arızası	6	0,1333
Diyot Grubu Arızası	12	0,2667
DC Giriş Kesicisi Arızası	9	0,2000
Trafo ve Doğrultucu Grubu 2		
O.G Giriş Kesicisi Arızası	2	0,0444
Cer Trafosu Arızası	5	0,1111
Diyot Grubu Arızası	10	0,2222
DC Giriş Kesicisi Arızası	9	0,2000
DC Hücre Grubu 1		
Kablo - Bara Arızası	5	0,1111
DC Çıkış Kesicisi Arızası	5	0,1111
Röle Arızası	3	0,0667
DC Hücre Grubu 2		
Kablo - Bara Arızası	4	0,0889
DC Çıkış Kesicisi Arızası	4	0,0889
Röle Arızası	3	0,0667
DC Hücre Grubu 3		
Kablo - Bara Arızası	5	0,1111
DC Çıkış Kesicisi Arızası	5	0,1111
Röle Arızası	3	0,0667
DC Hücre Grubu 4		
Kablo - Bara Arızası	4	0,0889
DC Çıkış Kesicisi Arızası	4	0,0889
Röle Arızası	2	0,0444
Katener Hattı 1		
Tel Kopması	2	0,0444
Direk Devrilmesi	1	0,0222
Bölge Ayırıcısı Arızası	3	0,0667
Katener Hattı 2		
Tel Kopması	1	0,0222
Direk Devrilmesi	2	0,0444
Bölge Ayırıcısı Arızası	2	0,0444

Bu bilgiler ışığında tüm sistemlerin arıza hızı sabit kabul edilecek ve sabit arıza hızı için güvenilirlik fonksiyonu denklem **(5.1)** referans alınacaktır

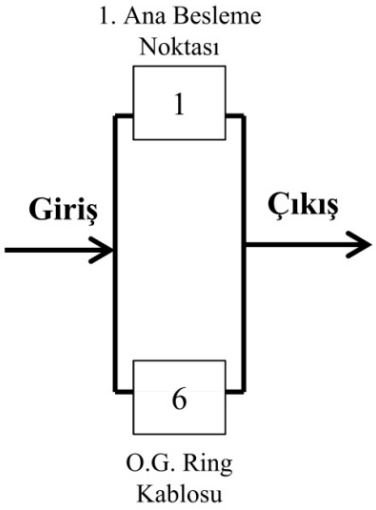
$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t} \tag{5.1}$$

5.3.1.1 Alt sistemlerin güvenilirlik analizi

Örnek bir trafo merkezi için şekil 5.5'deki blok diyagramında gösterilen her bir alt sistem için güvenilirlik analizi yapılarak güvenilirlik fonksiyonu belirlenecektir. Alt sistemler birbirine seri ve paralel bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Bölüm 3.3.1'de anlatılan hesaplama yöntemleri ile güvenilirlik fonksiyonu belirlenecektir.

5.3.1.2 Besleme noktası analizi

Besleme noktası birbirine paralel bağlı elemanlardan oluşmaktadır.Birbirine paralel bağlı olan bu sistemlerin blok diyagramı şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Besleme noktası blok diyagramı

Bu elemanların toplam güvenilirlik fonksiyonu denklem **(5.2)** ile ifade edilir.

$$R_{paralel}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} \left[1 - e^{-\lambda_i . t}\right] \tag{5.2}$$

R_A ile ifade ettiğimiz birbirine paralel arıza hızları farklı iki adet elemana sahip sistemin güvenilirlik fonksiyonu sistem aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_A(t) = R_1(t) + R_6(t) - R_1(t)R_6(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_6 t} - e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_6 t}$$

Arıza verileri yerine konulduğunda $R_A(t)$ fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_A(t) = e^{-0,1556t} + e^{-0,1778t} - e^{-0.3334t}$$

Bu durumda sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi denklem **(5.3)** den hesaplanabilir.

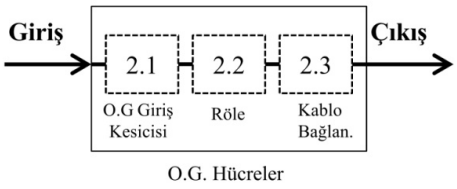
$$MTTF_i = m_i = \int_0^\infty R_i(t)\, dt \qquad \textbf{(5.3)}$$

Hesaplanan mA değeri aşağıda verilmiştir.

$$MTTF_A = m_A = \int_0^\infty R_A(t)\, dt = 9,05163\ yıl$$

5.3.1.3 O.G. hücreler analizi

O.G. hücreler birbirine seri bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Birbirine seri bağlı olan bu sistemlerin blok diyagramı şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : O.G. hücreler blok diyagramı

Tüm bu elemanların toplam güvenilirliği denklem **(3.6)**'dan hesaplanabilir. Bu durumda sistemin güvenilirlik fonksiyonu $R_2(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_2(t) = R_{2.1}R_{2.2}R_{2.3}$$

Arıza verileri yerine konduğunda $R_2(t)$ ile ifade ettiğimiz güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

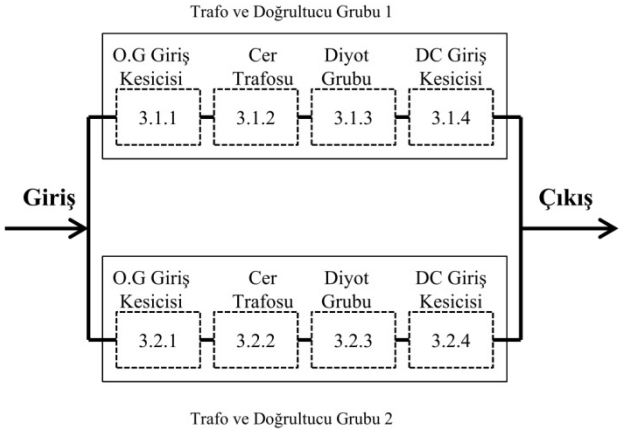
$$R_2(t) = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-(0,0889+0,0889+0,2667)t} = (e^{-0,4445t})$$

Bu durumda sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi m_2 aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF_2 = m_2 = \int_0^\infty R_2(t)\, dt = 2,24972\ yıl$$

5.3.1.4 Trafo ve doğrultucu grubu analizi

Trafo merkezlerinde aynı özelliklere sahip birbirine paralel çalışan 2 adet cer trafosu ve doğrultucu grubu bulunmaktadır. Birbirine paralel bağlı olan bu sistemlerin blok diyagramı şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : Trafo ve doğrultucu grubu blok diyagramı

Bu gruplar paralel çalışarak hatları beslemektedirler. Trafo ve Doğrultucu Grubu 1'in toplam güvenilirlik fonksiyonu denklem **(3.6)**'dan hesaplanabilir. Bu durumda sistemin güvenilirlik fonksiyonu $R_{3.1}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_{3.1}(t) = R_{3.1.1}(t).R_{3.1.2}(t).R_{3.1.3}(t).R_{3.1.4}(t)$$

$R_{3.1}$ ile ifade ettiğimi güvenilirlik fonksiyon aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$\mathrm{R}_{3.1}(\mathrm{t}) = e^{-\sum \lambda_i t}$$

Arıza verilerini yerine konulup fonksiyonu toparlandığında güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$\mathrm{R}_{3.1}(\mathrm{t}) = e^{-(0{,}0444+0{,}1333+0{,}2667+0{,}20)t} = (\mathrm{e}^{-0{,}6444\mathrm{t}})$$

Aynı şekilde Trafo ve Doğrultucu Grubu 2 için $R_{3.2}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mathrm{R}_{3.2}(\mathrm{t}) = \mathrm{R}_{3.2.1}(\mathrm{t}).\mathrm{R}_{3.2.2}(\mathrm{t}).\mathrm{R}_{3.2.3}(\mathrm{t}).\mathrm{R}_{3.2.4}(\mathrm{t})$$

$R_{3.2}$ ile ifade ettiğimi güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$\mathrm{R}_{3.2}(\mathrm{t}) = e^{-\sum \lambda_i t}$$

Arıza verilerini yerine konulup fonksiyonu toparlandığında güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{3.2}(t) = e^{-(0,0444+0,1111+0,2222+0,20)t} = (e^{-0,5777t})$$

R_3 ile ifade edilen tüm sistemin güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_3(t) = R_{3.1}(t) + R_{3.2}(t) - R_{3.1}(t)R_{3.2}(t)$$

Bulunan değerler yerine konduğunda $R_3(t)$ güvenilirlik fonksiyonu elde edilmiş olur.

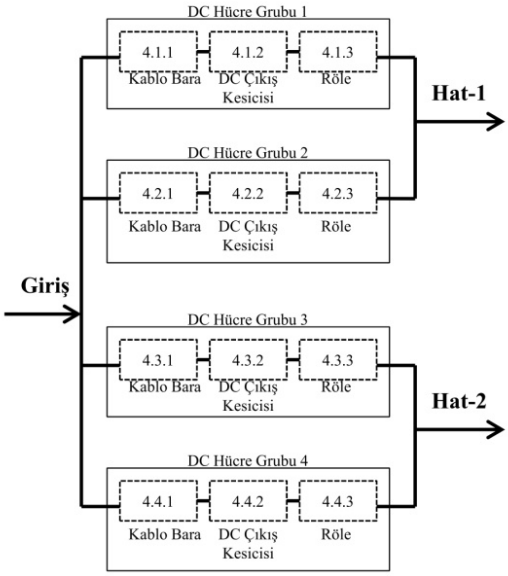
$$R_3(t) = e^{-\lambda_{3.1}t} + e^{-\lambda_{3.2}t} - e^{-\lambda_{3.1}t}e^{-\lambda_{3.2}t} = e^{-0,6444t} + e^{-0,5777t} - e^{-1,2221t}$$

Bu durumda sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi m_3 aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF_3 = m_3 = \int_0^\infty R_3(t)\,dt = 2,46457\ yıl$$

5.3.1.5 DC hücreler analizi

Tüm hattı besleyen toplam 4 adet DC Hücre grubu bulunmaktadır. Birbirine ikişerli gruplar halinde paralel olarak bağlanan bu gruplardan 2 tanesi Hat-1'i beslerken diğer 2 tanesi Hat-2'yi beslemektedir. DC hücre grupları birbirine seri bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Sistemlerin blok diyagramı şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : DC hücreler blok diyagramı

Hat-1 için DC Hücre Grubu 1'in toplam güvenilirlik fonksiyonu denklem **(3.6)**'dan hesaplanabilir. Bu durumda sistemin güvenilirlik fonksiyonu $R_{4.1}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_{4.1}(t) = R_{4.1.1}(t).R_{4.1.2}(t).R_{4.1.3}(t)$$

Arıza verilerini yerine konulup fonksiyon toparlandığında $R_{4.1}(t)$ ile ifade ettiğimiz güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{4.1}(t) = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-(0{,}1111+0{,}1111+0{,}0667)t} = e^{-0{,}2889t}$$

Aynı şekilde Hat-1'i DC Hücre Grubu 1'e paralel olarak besleyen diğer hücre grubu olan DC Hücre Grubu 2'nin güvenilirliği $R_{4.2}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_{4.2}(t) = R_{4.2.1}(t).R_{4.2.2}(t).R_{4.2.3}(t)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda $R_{4.2}(t)$ ile ifade ettiğimiz güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{4.2}(t) = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-(0{,}0889+0{,}0889+0{,}0667)t} = e^{-0{,}2445t}$$

Birbirine paralel olarak Hat-1'i besleyen DC hücre gruplarının $R_{(4.H1)}$ ile ifade edilen tüm sistemin güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{4.H1}(t) = R_{4.1}(t) + R_{4.2}(t) - R_{4.1}(t)R_{4.2}(t)$$

Güvenilirlik fonksiyonunu $R_{4.H1}$ ile ifade ettiğimiz sistemin güvenilirliği arıza verileri yerine konulduğunda aşağıdaki şekilde hesaplanmış olur.

$$R_{4.H1}(t) = e^{-\lambda_{4.1}t} + e^{-\lambda_{4.2}t} - e^{-\lambda_{4.1}t}e^{-\lambda_{4.2}t} = e^{-0{,}2889t} + e^{-0{,}2445t} - e^{-0{,}5334t}$$

Bu durumda sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi $m_{4H\text{-}1}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF_{4H-1} = m_{4H-1} = \int_0^\infty R_{4.H1}(t)\, dt = 5{,}67662\ yıl$$

Aynı şekilde Hat-2 için DC Hücre Grubu 3'in toplam güvenilirlik fonksiyonu denklem **(3.6)**'dan hesaplanabilir. Bu durumda sistemin güvenilirlik fonksiyonu $R_{4.3}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_{4.3}(t) = R_{4.3.1}(t).R_{4.3.2}(t).R_{4.3.3}(t)$$

Arıza verilerini yerine konulup fonksiyon toparlandığında $R_{4.3}(t)$ ile ifade ettiğimiz güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{4.3}(t) = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-(0{,}1111+0{,}1111+0{,}0667)t} = e^{-0{,}2889t}$$

Aynı şekilde Hat-2'yi DC Hücre Grubu 3'e paralel olarak besleyen diğer hücre grubu olan DC Hücre Grubu 4'ün güvenilirliği $R_{4.4}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R_{4.4}(t) = R_{4.4.1}(t).R_{4.4.2}(t).R_{4.4.3}(t)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda $R_{4.2}(t)$ ile ifade ettiğimiz güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{4.4}(t) = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-(0{,}0889+0{,}0889+0{,}0444)t} = e^{-0{,}2222t}$$

Birbirine paralel olarak Hat-2'yi besleyen DC hücre gruplarının $R_{(4.H2)}$ ile ifade edilen tüm sistemin güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{4.H2}(t) = R_{4.3}(t) + R_{4.4}(t) - R_{4.3}(t)R_{4.4}(t)$$

Güvenilirlik fonksiyonunu $R_{4.H2}$ ile ifade ettiğimiz sistemin güvenilirliği arıza verileri yerine konulduğunda aşağıdaki şekilde hesaplanmış olur.

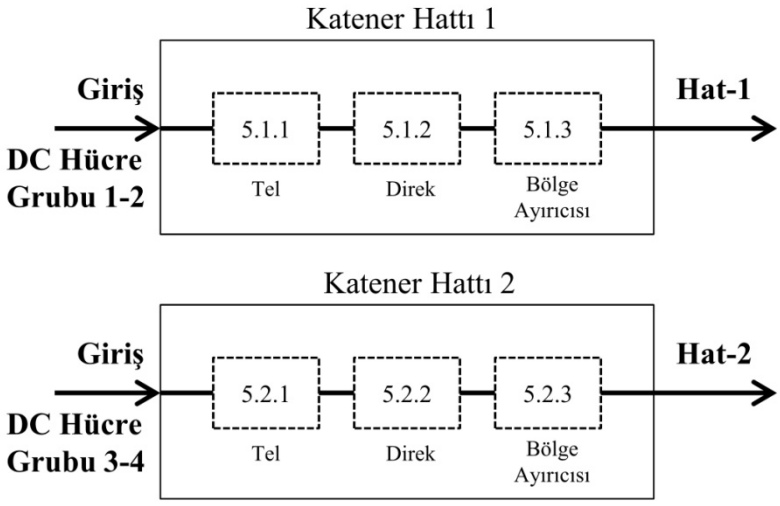
$$R_{4.H2}(t) = e^{-\lambda_{4.3}t} + e^{-\lambda_{4.4}t} - e^{-\lambda_{4.3}t}e^{-\lambda_{4.4}t} = e^{-0{,}2889t} + e^{-0{,}2222t} - e^{-0{,}5111t}$$

Bu durumda sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi $m_{4H\text{-}1}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF_{4H-2} = m_{4H-2} = \int_0^\infty R_{4.H2}(t)\,dt = 6{,}00529\ yıl$$

5.3.1.6 Katener hattı analizi

Sistemde Hat-1'i ve Hat-2'yi besleyen 2 adet katener hattı bulunmaktadır. Katener hatları birbirine seri bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Sistemlerin blok diyagramı şekil 5.10'da gösterilmiştir



Şekil 5.10 : Katener hattı blok diyagramı

Hat-1 için sistemin güvenilirlik fonksiyonu denklem **(3.6)**'dan hesaplanabilir.

$$R_{5.1}(t) = R_{5.1.1}(t).R_{5.1.2}(t).R_{5.1.3}(t)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda $R_{5.1}(t)$ ile ifade edilen güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{5.1}(t) = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-(0{,}0444+0{,}0222+0{,}0667)t} = (e^{-0{,}1333t})$$

Aynı şekilde Hat-2 için de sistemin güvenilirlik fonksiyonu denklem **(3.6)**'dan hesaplanabilir.

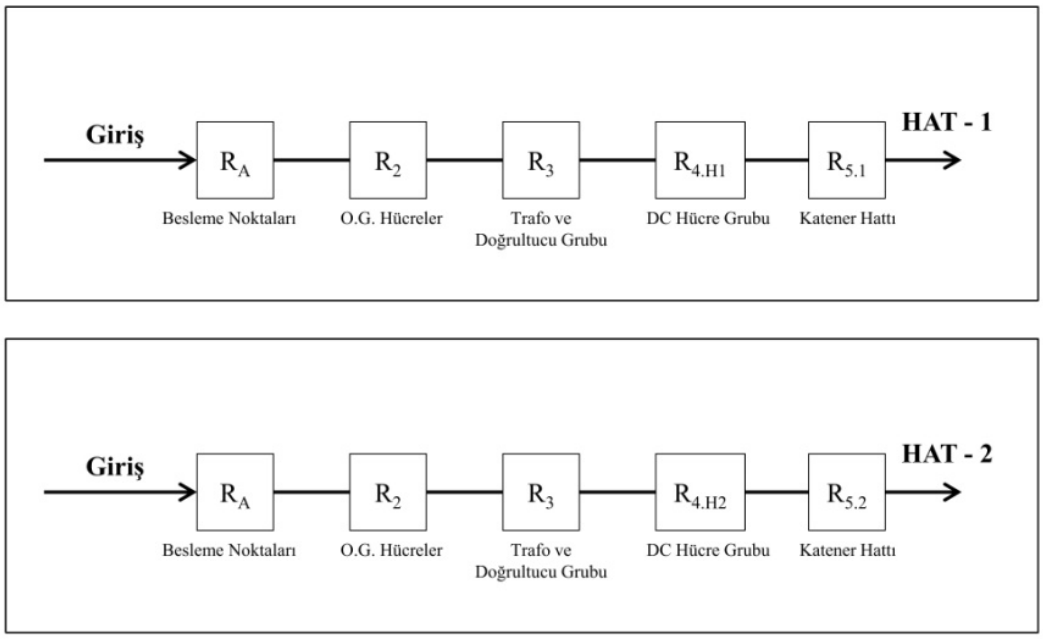
$$R_{5.2}(t) = R_{5.2.1}(t).R_{5.2.2}(t).R_{5.2.3}(t)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda $R_{5.2}(t)$ ile ifade edilen güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{5.2}(t) = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-(0{,}0444+0{,}0222+0{,}0444)t} = (e^{-0{,}1110t})$$

5.3.1.7 Tüm sistemin toplam güvenilirlik analizi

Alt sistemlerin güvenilirlik hesabı yapıldıktan sonra sistem birbirine seri bağlı 5 elemana indirgenmiş olur. Şekil 5.11'de Hat-1 ve Hat-2 için tüm sistemin indirgenen blok diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 5.11 : Toplam güvenilirlik hesabı için indirgenmiş blok diyagramı

Sistem şekil 5.11'deki hale indirgendikten sonra son olarak seri bağlı sistemler için bölüm 3.3.1'de anlatılan kurallar kullanılır ve güvenilirlik analizi yapılarak sistemin toplam güvenilirlik fonksiyonu elde edilir.

5.3.1.8 Sistemin toplam güvenilirlik hesabı

Tüm sistem birbirine seri olarak bağlanmış 5 elemandan oluşmaktadır. Seri bağlı elemanların güvenilirlik fonksiyonu denklem **(3.6)**'dan hesaplanır. Bu durumda Hat-1'in toplam güvenilirliği aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{TM1.1}(t) = R_A.R_2.R_3.R_{4.H1}.R_{5.1}$$

Daha önceden bulunan fonksiyonlar yerine konulursa Hat-1 için $R_{TM1.1}$ ile ifade edilen güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{TM1.1}(t) = (e^{-0,1556t} + e^{-0,1778t} - e^{-0.3334t}).(e^{-0,4445t}).(e^{-0,6444t} + e^{-0,5777t} - e^{-1,2221t}).(e^{-0,2889t} + e^{-0,2445t} - e^{-0,5334t}).(e^{-0,1333t})$$

Son olarak tüm sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi $m_{TM1.1}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF_{TM1.1} = m_{TM1.1} = \int_0^{\infty} R_{TM1.1}(t)\, dt = 1{,}04817\ yıl$$

Aynı şekilde Hat-2'in toplam güvenilirliği aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{TM1.2}(t) = R_A . R_2 . R_3 . R_{4.H2} . R_{5.2}$$

Daha önceden hesaplanan fonksiyonlar yerine konulduğununda Hat-2 için $R_{TM2.1}$ ile ifade edilen güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$R_{TM1.2}(t) = (e^{-0{,}1556t} + e^{-0{,}1778t} - e^{-0.3334t}).(e^{-0{,}4445t}).(e^{-0{,}6444t} + e^{-0{,}5777t} - e^{-1{,}2221t}).(e^{-0{,}2889t} + e^{-0{,}2222t} - e^{-0{,}5111t}).(e^{-0{,}1110t})$$

Son olarak tüm sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi $m_{TM1.1}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF_{TM1.2} = m_{TM1.2} = \int_0^{\infty} R_{TM1.2}(t)\, dt = 1{,}07512\ yıl$$

Sonuç olarak bir trafo merkezi için güvenilirlik fonksiyonları belirlenmiş ve güvenilirlik değerleri hesaplanmıştır. Tüm bu hesaplar 9 trafo merkezinde 5 yıl içerisinde oluşan arıza sayıları baz alınarak her bir trafo merkezi için arıza hızları eşit olacak şekilde ve sistemin sabit arıza hızına sahip olduğu kabul edilerek hesablanmıştır. Trafo merkezleri arasında ekipman ve bağlantı şekilleri açısından bir farklılık yoktur. Trafo merkezleri arasındaki farklılık sadece besledikleri alanlardır. Her bir trafo merkezi hattın belirli bir kesimini beslemektedir. Bununla beraber her bölge gün içerisinde farklı saatlerde farklı sayıda treni besleyebilir. Bu tamamen işletme senaryoları ile bağlantılıdır. Burada hesaplanan değerler örnek bir trafo merkezinin gelecekte nasıl davranacağı hakkında bilgi vermektedir. 5 yıldır işletmede olan sistemin aynı çalışma koşullarında hangi zaman aralıklarında ile arızalanacağının olasılığı hesaplanmıştır. Bu hesaplara sistemin tamir edilme durumları dahil edilmemiştir. Bu sistem onarılabilir birimlerden oluşmuş bir sistem olduğu için arıza durumunda sistem belirli bir zaman sonra onarılacak ve işletmeye devam edecektir. Sistemin onarım zamanları da dikkate alınarak yapılacak analiz bir sonraki bölümde Markov modellemesi ile ifade edilecektir.

5.3.1.9 Örnek bir trafo merkezi için güvenirlik fonksiyonları ve sonuçları

Güvenilir analizinden elde edilen sonuçlar bu bölümde verilecektir. Çizelge 5.9'da trafo merkezini oluşturan tüm alt sistemler ile Hat-1 ve Hat-2 için güvenilirlik fonksiyonları verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Trafo merkezi güvenilirlik fonksiyonları

Analiz Bölgesi	Güvenilirlik Fonksiyonu
Besleme Noktası	$R_A = e^{-0,1556t} + e^{-0,1778t} - e^{-0.3334t}$
O.G. Panolar	$R_2 = e^{-0,4445t}$
Trafo ve Doğrultucu grubu	$R_3 = e^{-0,6444t} + e^{-0,5777t} - e^{-1,2221t}$
DC Hücre Grubu Hat-1	$R_{4.H1} = e^{-0,2889t} + e^{-0,2445t} - e^{-0,5334t}$
DC Hücre Grubu Hat-2	$R_{4.H2} = e^{-0,2889t} + e^{-0,2222t} - e^{-0,5111t}$
Katener Hattı Hat-1	$R_{5.1} = (e^{-0,1333t})$
Katener Hattı Hat-2	$R_{5.2} = (e^{-0,1110t})$
Hat-1 için Toplam Güv. Fonk.	$R_{TM1.1} = (e^{-0,1556t} + e^{-0,1778t} - e^{-0.3334t}).(e^{-0,4445t}).(e^{-0,6444t} + e^{-0,5777t} - e^{-1,2221t}).(e^{-0,2889t} + e^{-0,2445t} - e^{-0,5334t}).(e^{-0,1333t})$
Hat-2 için Toplam Güv. Fonk.	$R_{TM1.2} = (e^{-0,1556t} + e^{-0,1778t} - e^{-0.3334t}).(e^{-0,4445t}).(e^{-0,6444t} + e^{-0,5777t} - e^{-1,2221t}).(e^{-0,2889t} + e^{-0,2222t} - e^{-0,5111t}).(e^{-0,1110t})$

Güvenilirlik fonksiyonları elde edilen sistemlerin arızaya kadar geçen ortalama süreleri, Arıza hızları (λ), onarım hızları (μ) ve senelik onarım sayıları (r) hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 5.10'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.10 : Örnek Trafo merkezi için hesaplanan MTTF,r, λ ve μ değerleri

Analiz Bölgesi	**Trafo Merkezleri MTTF,λ, μ ve r değerleri**		
	Arızaya kadar geçen ortalama süre (Yıl)		**Arıza Hızı (λ) (Yıl)**
Besleme Noktası	$\mathbf{m_A}$ =	9,05163	0,1105
O.G. Panolar	$\mathbf{m_2}$ =	2,24972	0,4445
Trafo ve Doğrultucu grubu	$\mathbf{m_3}$ =	2,46457	0,4058
DC Hücre Grubu Hat-1	$\mathbf{m_{4H_1}}$ =	5,67662	0,1762
DC Hücre Grubu Hat-2	$\mathbf{m_{4H_2}}$ =	6,00529	0,1665
Katener Hattı Hat-1	$\mathbf{m_{5_1}}$ =	7,50188	0,1333
Katener Hattı Hat-2	$\mathbf{m_{5_2}}$ =	9,00901	0,1110
Hat-1 için MTTF	$\mathbf{m_{TM1_1}}$ =	1,04817	0,9540
Hat-2 için MTTF	$\mathbf{m_{TM1_2}}$ =	1,07512	0,9301
Bölge	**Onarım Hızı μ [Saat]**		**Senelik Onarım Sayısı [r]**
Hat-1	μ_{TM1_1} =	8	1.095
Hat-2	μ_{TM1_2} =	8	1.095

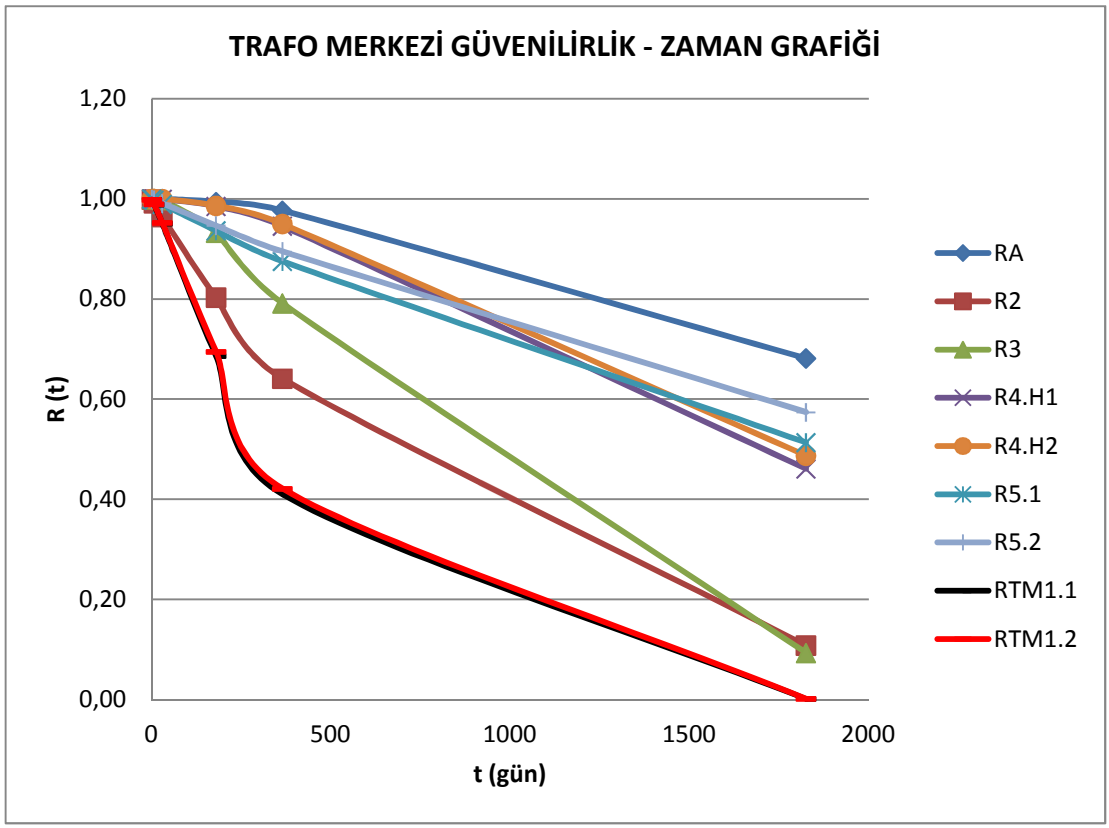
5.3.1.10 Çeşitli t zamanları için sistemin güvenilirliği

Bu bölümde örnek bir trafo merkezi için tüm sistemin belirli t zamanlarına göre güvenilirlik davranışı hesaplanacaktır. Bu hesap yapılırken t zamanları çizelge 5.10'da verilen güvenilirlik fonksiyonlarında yerine konulacak ve sistemin o süre zarfındaki güvenilirliği elde edilecektir. Çizelge 5.11'de çeşitli t zamanlarına göre sistemin güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.11 : Çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	*t=7 Gün*	*t=30 Gün*	*t=180 Gün*	*t=1 Yıl*	*t=5 Yıl*
R_A	0,99999979	0,99998986	0,99981565	0,99379926	0,97652777	0,68157770
R_2	0,99878293	0,99151157	0,96412508	0,80315667	0,64114477	0,10833793
R_3	0,99999721	0,99986467	0,99760782	0,93250981	0,79155421	0,09331543
$R_{4.H1}$	0,99999947	0,99997415	0,99953315	0,98491671	0,94557599	0,46089670
$R_{4.H2}$	0,99999952	0,99997651	0,99957534	0,98621828	0,95000691	0,48744015
$R_{5.1}$	0,99963486	0,99744683	0,98910364	0,93637711	0,87520249	0,51350270
$R_{5.2}$	0,99969594	0,99787350	0,99091820	0,94673153	0,89493875	0,57407226
$R_{TM1.1}$	**0,99841472**	**0,98881065**	**0,95071895**	**0,68644010**	**0,41013454**	**0,00163078**
$R_{TM1.2}$	**0,99847577**	**0,98923595**	**0,95250330**	**0,69494788**	**0,42134849**	**0,00192813**

Bir trafo merkezi için çizelge 5.11'de elde edilmiş olan değerler şekil 5.12'de grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.12 : Trafo merkezi güvenilirlik - zaman grafiği

5.4 Sistemin Arıza Hızının Belirlenmesi

Örnek bir trafo merkezi için bulunan güvenilirlik fonksiyonları çizelge 5.9'da verilmişti. Bu güvenilirlik fonksiyonları tüm trafo merkezleri için eşdeğer kabul edilmiştir. Çizelge 5.10'da ise güvenilirlik fonksiyonu belirlenen sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi ve buna bağlı olarak hesaplanan arıza hızı değeri bulunmuştur. Arıza hızının bulunabilmesi için arıza hızının sabit olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak markov modeli elde edilecek ve çeşitli senaryo durumlarına göre sistem çalışma durumu tespit edilecektir.

Bu analizi yaparken sistemin markovian bir süreç gösterdiği kabul edilecektir. Bu bölümde belirli hata sınırları içinde sistemin yaklaşık Markovian bir süreç gibi ele alınıp alınamayacağı araştırılmıştır. Bunun için güvenilirlik fonksiyonu, hem frekans yaklaşımı ve hem de en küçük kareler yöntemi ile sabit katsayılı bir üstel dağılımlı bir ifade ile verilmeye çalışılmıştır. Sistemin Markovian olmayan bir karaktere sahip olmasına karşın güvenilirlik eğrilerinin değişimi incelendiğinde sistemin rastlantı sürecinin yarı markovian karakter gösterdiği kabul edilebilir. Bu kabul altında ve göreceli olarak kısa dönemli bir periyotta yaklaşık olarak sistemin Markovian bir rastlantı süreci davrandığını varsayarak bazı güvenilirlik indislerinin yaklaşık değerlerinin hesaplanabilir. Bu bölümde arıza hızının elde edilmesi için kullanılan yöntem açıklanacak ve farklı bir yöntem ile elde edilen arıza hızına göre değerler karşılaştırılacaktır.

5.4.1 Sabit arıza hızı varsayımı

Güvenilirlik analizi yaparken her alt sistemin arıza hızlarının sabit olduğu varsayılmıştır. Arıza hızı sabit olan sistemler için arıza yoğunluk fonksiyonu denklem **(5.4)** ile ifade edilir.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \;\; t \geq 0, \qquad \lambda > 0 \tag{5.4}$$

Burada λ arıza hızınıdır. Bölüm 5'de yapılan analizlerde her bir alt sistemin güvenilirlik fonksiyonu denklem **(5.4)**'den elde edilmiştir. Her bir alt sistem bu denklem ile ifade edilmiş olmasına rağmen tüm sistem için elde edilen güvenilirlik fonksiyonu denklem **(5.4)** gibi üstel olarak ifade edilememektedir. Sistemin arıza hızını bulabilmek için önce denklem **(5.5)** yardımı ile sistemin MTTF değeri bulunmuştur.

Bu değer R(t) fonksiyonunun (0 - ∞) aralığında t'ye bağlı integrali alınarak bulunur.

$$R(t) = \int_0^{\infty} R(t)dt \qquad \textbf{(5.5)}$$

Sistemi sabit arıza hızına sahip ve üstel bir ifade ile tanımlanacağı varsayılırsa MTTF değeri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda}$$

Bu durumda arıza hızı λ=1/MTTF ile ifade edilebilir. Çizelge 5.9'da elde edilen fonksiyonlar için MTTF ve λ değerleri çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12 : Trafo merkezkeri MTTF ve λ değerleri

Analiz Bölgesi	Trafo Merkezleri MTTF, λ değerleri	
	Arızaya kadar geçen ortalama süre (Yıl)	**Arıza Hızı (λ) (Yıl)**
Hat-1 için MTTF	$\mathbf{m_{TM1_1}}$ = 1,04817	0,9540
Hat-2 için MTTF	$\mathbf{m_{TM1_2}}$ = 1,07512	0,9301

Sabit arıza hızı varsayımı ile elde edilen λ ya göre oluşturulan R(t) fonksiyonu ile $R_{TM1.1}$ (t) fonksiyonunun aldığı değerler ve arasındaki mutlak hatalar çizelge 5.13'de gösterilmiştir. Bu tablo sadece Hat-1 için oluşturulmuştur.

Çizelge 5.13 : Sabit arıza hızı varsayımına göre mutlak hata oranları

t (yıl)	**Gerçek Değer $R_{TM1.1}(t)$**	**Sabit Arıza Hızı Varsayımı $R(t)= e^{(-0,9540*t)}$**	**Mutlak Hata %**
0,002739726	0,99841472	0,997389604	0,10267
0,019178082	0,98881065	0,981869705	0,70195
0,02739726	0,98395189	0,974200554	0,99104
0,054794521	0,96750642	0,949066719	1,90590
0,082191781	0,95071895	0,924581324	2,74925
0,164383562	0,89880891	0,854850624	4,89073
0,246575342	0,84550966	0,790378922	6,52041
0,410958904	0,73859616	0,675655915	8,52161
0,575342466	0,63586258	0,577584881	9,16514
0,657534247	0,58723606	0,534024194	9,06141
0,739726027	0,54082828	0,493748796	8,70507
0,821917808	0,49681970	0,456510915	8,11336
0,904109589	0,45531885	0,422081467	7,29980
1,095890411	0,36842911	0,351507737	4,59284
1,369863014	0,26765035	0,270656593	1,12320
1,643835616	0,19125992	0,208402216	8,96282

5.4.2 Fonksiyona bağlı değişen arıza hızı varsayımı

Bu bölümde arıza hızının sabit olmadığı belirli bir fonksiyona bağlı olarak değişeceği varsayılacaktır. Burada arıza hızı fonksiyonunun değişimini belirleyebilmek için en küçük kareler yöntemi uygulanmıştır. En küçük kareler yöntemi uygulanarak sistemin güvenilirlik fonksiyonu $R(t)=1/1,1567\ e^{(-1,1556t)}$ şeklinde elde edilmiştir. Fonksiyona bağlı değişen arıza hızı varsayımı ile elde edilen λ ya göre oluşturulan R(t) fonksiyonu ile $R_{TM1.1}$ (t) fonksiyonunun aldığı değerler ve arasındaki mutlak hatalar çizelge 5.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.14 : Fonksiyona bağlı değişen arıza hızına göre mutlak hata oranlar

t (yıl)	Gerçek Değer $R_{TM1.1}(t)$	Fonksiyona Bağlı Değişen Arıza Hızı Varsayımı $R(t)= e^{(-1,1556*t)}/1,1567$	Mutlak Hata %
0,002739726	0,99841472	0,996838979	0,15782
0,019178082	0,98881065	0,978081585	1,08505
0,02739726	0,98395189	0,968835665	1,53628
0,054794521	0,96750642	0,938642546	2,98333
0,082191781	0,95071895	0,909390375	4,34709
0,164383562	0,89880891	0,826990854	7,99036
0,246575342	0,84550966	0,752057522	11,05276
0,410958904	0,73859616	0,621944692	15,79367
0,575342466	0,63586258	0,514342572	19,11105
0,657534247	0,58723606	0,467738184	20,34921
0,739726027	0,54082828	0,425356602	21,35090
0,821917808	0,49681970	0,3868152	22,14174
0,904109589	0,45531885	0,35176602	22,74293
1,095890411	0,36842911	0,281841349	23,50188
1,369863014	0,26765035	0,205355286	23,27479
1,643835616	0,19125992	0,149625999	21,76824

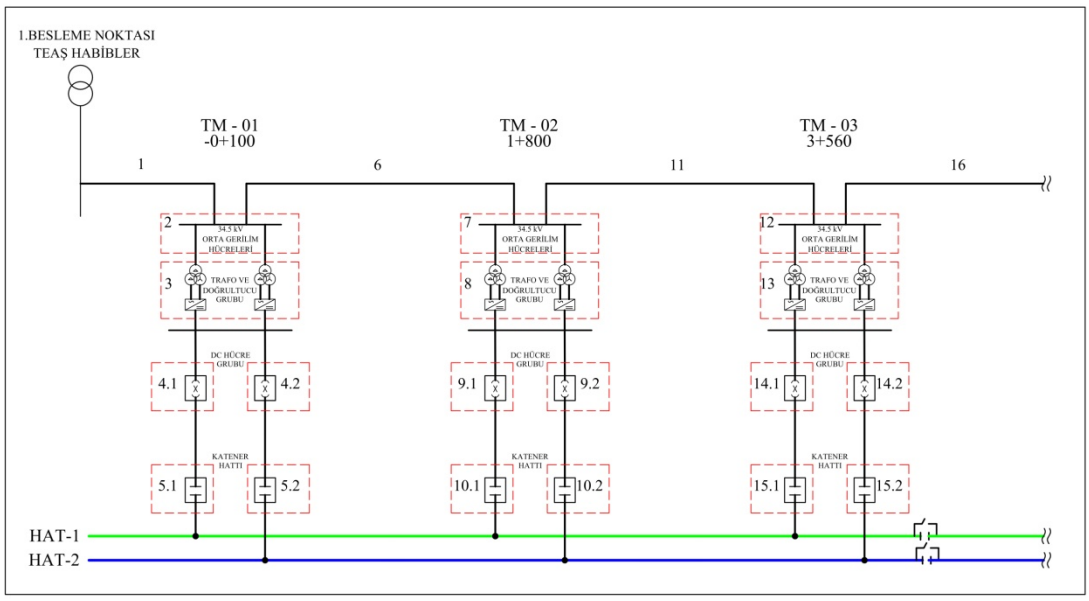
Sonuçlar gerçek sistem güvenilirlik verileri kullanılarak elde edilen güvenilirlik değeri ile karşılaştırılmıştır. Sabit arıza hızı yaklaşımıyla elde edilen R(t) fonksiyonun sonuçlarının daha az hatalı olduğu ve mutlak hata sınırının bir yıllık bir surede %9 olduğu görülmüştür. Bu hata sınırları içinde sistemin güvenilirlik fonksiyonun değişimi de dikkate alındığında sistemin yarı markovian bir davranış gösterdiği söylenebilir. Yaklaşık bir hesaplamada baştan hata sınırlarını da belirleyerek, örneğin hatanın etkisinin nispeten az olduğu periyotta (çünkü non-Markovian karakter özellikle sistemin stasyoner olmaması nedeniyle zamanla daha belirgin hale gelmektedir) Morkov modelinin kullanılması baştan hata sınırları belirtilerek kullanılabilir. Tezin bu aşamasında, bazı güvenilirlik indislerinin belirlenmesinde yaklaşık bir hesap yöntemi olarak Markov modeli kullanılacak ve buradaki arıza hızı sabit olduğu varsayılacaktır.

5.5 Seksiyonlara Göre Güvenilirlik Analizi

Raylı sistem hat boyunca 9 trafo merkezi tarafından beslenmektedir. Tüm hat TM1, TM2...TM9 olmak üzere 9 adet elektrik besleme bölgesine ayrılmıştır. Hafif raylı sistem elektrik enerjisini TM1, TM6 ve TM9'a bağlanan TEAŞ ana besleme üzerinden almaktadır. Bu nedenle hat üzerinde bulunan bu 3 ana besleme bölgesi (seksiyon) tüm sistemi 3 kısma ayırmıştır. Her kısım kendi bölgesi kapsamındaki hattı beslemektedir. Bununla birlikte her kısım da 3 adet trafo merkezi besleme bölgesinden (TM1,TM2,...) oluşmuştur. Bu bölümde her kısım çeşitli senaryolara göre sistemin güvenilirlik davranışı tespit edilecektir. Bu davranış tespit edilirken markov modellemesinden yararlanılacaktır.

5.5.1 Seksiyon 1 için toplam güvenilirlik analizi

Bu bölümde seksiyon 1 için güvenilirlik analizi yapılacaktır. Diğer seksiyon bölgeler birbirine eşdeğer kabul edildiği için tekrar hesap yapılmayacaktır. Seksiyon 1 birbirine güvenilirlik anlamında seri bağlı olan Tm-1, Tm-2 ve Tm-3 tarafından beslenmektedir. Bu elemanların güvenilirliği bölüm 5'te detaylı olarak hesaplanmıştır. 1. Seksiyon tekhat şeması şekil 5.13'de gösterilmektedir.

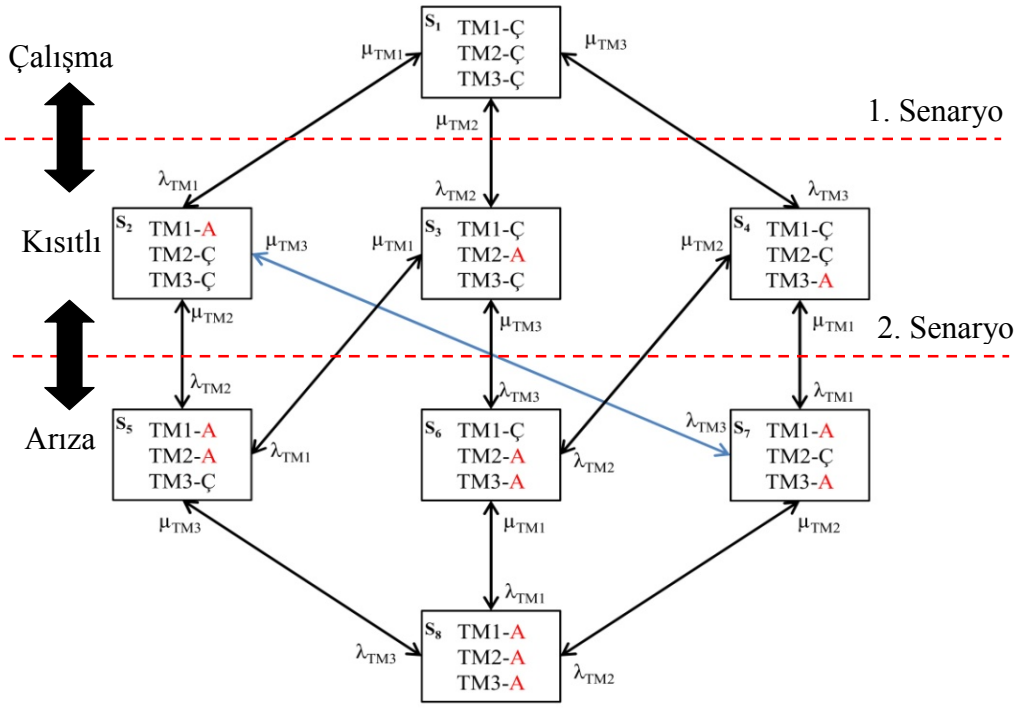


Şekil 5.13 : 1. Seksiyon tekhat şeması

Sekil 5.13'de tek hat şeması gösterilen sistemin güvenilirliğinin olasılıksal hesabı markov modellemesine göre yapılacaktır.

5.5.1.1 Seksiyon 1 için markov modeli

Birinci bölgeyi (Seksiyon 1) birbirine güvenilirlik anlamında seri bağlı olan TM-1, TM-2 ve TM-3 beslemektedir. Şekil 5.14'de bu bölge için oluşturulan markov modeli durum diyagramı gösterilmektedir. Sistemin analizi bu diyagram baz alınarak yapılacaktır.



Şekil 5.14 : Markov modeli durum diyagramı

Hesaplamalar hat-1 ve hat-2 için ayrı ayrı yapılacaktır. Hat-1 ve hat-2'nin arıza geçiş hızları (λ) ve onarım hızları (μ) çizelge 5.10'da verilmişti. Bu değerler her trafo merkezi için eşdeğer olarak kabul edilmiştir. Çizelge 5.15'de 1. seksiyonu oluşturan elemanların hesaplanan değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.15 : 1. Seksiyonun arıza ve onarım hızları

Sistem parametreleri	**TM-1**	**TM-2**	**TM-3**
	Hesaplanan değerler	**Hesaplanan değerler**	**Hesaplanan değerler**
Hat-1 Arıza Hızı (λ)	$\lambda_{TM1_1} = 0{,}9540$	$\lambda_{TM2_1} = 0{,}9540$	$\lambda_{TM3_1} = 0{,}9540$
Hat-1 Onarım Hızı μ (saat)	$\mu_{TM1_1} = 8$	$\mu_{TM2_1} = 8$	$\mu_{TM3_1} = 8$
Hat-1 Senelik Onarım Sayısı [r]	$r_{TM1_1} = 1.095$	$r_{TM2_1} = 1.095$	$r_{TM3_1} = 1.095$
Hat-2 Arıza Hızı (λ)	$\lambda_{TM1_2} = 0{,}9301$	$\lambda_{TM2_2} = 0{,}9301$	$\lambda_{TM3_2} = 0{,}9301$
Hat-2 Onarım Hızı μ (saat)	$\mu_{TM1_2} = 8$	$\mu_{TM2_2} = 8$	$\mu_{TM3_2} = 8$
Hat-2 Onarıma kadar geçen ortalama süre (r) (Yıl)	$r_{TM1_2} = 1.095$	$r_{TM2_2} = 1.095$	$r_{TM3_2} = 1.095$

Şekil 5.14'deki markov diyagramına göre durum geçiş olasılığı matrisi çizelge 5.16'da belirtildiği şekilde olur.

Çizelge 5.16 : Durum geçiş olasılığı matrisi

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}P_1(t)\\P_2(t)\\P_3(t)\\P_4(t)\\P_5(t)\\P_6(t)\\P_7(t)\\P_8(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-(\lambda_{TM1}+\lambda_{TM2}+\lambda_{TM3}) & \mu_{TM1} & \mu_{TM2} & \mu_{TM3}\\ \lambda_{TM1} & -(\mu_{TM1}+\lambda_{TM2}+\lambda_{TM3}) & 0 & 0\\ \lambda_{TM2} & 0 & -(\lambda_{TM1}+\mu_{TM2}+\lambda_{TM3}) & 0\\ \lambda_{TM3} & 0 & 0 & -(\lambda_{TM1}+\lambda_{TM2}+\mu_{TM3})\\ 0 & \lambda_{TM2} & \lambda_{TM1} & 0\\ 0 & 0 & \lambda_{TM3} & \lambda_{TM2}\\ 0 & \lambda_{TM3} & 0 & \lambda_{TM1}\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\cdots$$

$$\cdots\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ \mu_{TM2} & 0 & \mu_{TM3} & 0\\ \mu_{TM1} & \mu_{TM3} & 0 & 0\\ 0 & \mu_{TM2} & \mu_{TM1} & 0\\ -(\mu_{TM1}+\mu_{TM2}+\lambda_{TM3}) & 0 & 0 & \mu_{TM3}\\ 0 & -(\lambda_{TM1}+\mu_{TM2}+\mu_{TM3}) & \mu_{TM1} & \mu_{TM1}\\ 0 & 0 & -(\mu_{TM1}+\lambda_{TM2}+\mu_{TM3}) & \mu_{TM2}\\ \lambda_{TM3} & \lambda_{TM1} & \lambda_{TM2} & -(\mu_{TM1}+\mu_{TM2}+\mu_{TM3})\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_1(t)\\P_2(t)\\P_3(t)\\P_4(t)\\P_5(t)\\P_6(t)\\P_7(t)\\P_8(t)\end{bmatrix}$$

Çizelge 5.15'de hat-1 ve hat-2 için bulunan değerler çizelge 5.16'da yerine konulduktan sonra sistemin limit olasılıkları hesaplanmış ve bulunan durum olasılıkları çizelge 5.17'de verilmiştir.

Çizelge 5.17 : 1. Seksiyon durum olasılıkları

Durum	1. Seksiyon Bölge Hat-1	1. Seksiyon Bölge Hat-2
	Olasılık	Olasılık
P1	0,9973908490457830	0,997456103648644
P2	0,0008689596986210	0,000847245590871
P3	0,0008689596986210	0,000847245590871
P4	0,0008689596986210	0,000847245590871
P5	0,0000007570662580	0,000000719655821
P6	0,0000007570662580	0,000000719655821
P7	0,0000007570662580	0,000000719655821
P8	0,0000000006595810	0,000000000611280

5.5.1.2 Seksiyon 1 için sistem başarı durumları

Durum olasılıkları bulunan sistem için durum başarı durumları 2 senaryoya göre hesaplanacaktır. 1. senaryo sistemin başarı durumu için 3 TM'nin de çalışıyor olması gerektiğidir. 2. Senaryo ise TM'lerden 2 tanesinin arızalanması durumunda sistemin arızalı olması durumudur. Sistem olasılıkları ve kullanılabilirlik (avability) ve yokluk (unavability) durumları frekans yaklaşımından yararlanılarak çözülecektir.

Senaryo 1'e göre sistem çözümü

Senaryo 1'e göre sistemde 3 elamanın da çalışması durumunda sistemin başarılı olacağı öngörülmüştür. 1 elemanın bile arızası sistemin arızaya gitmesine denk gelmektedir. İşletmede 1 elemanın arızalanması sistem arıza olarak kabul edilmediğinden, bu durum kısıtlı çalışma durumu olarak adlandırılmıştır. Bu senaryoya göre sistemin kullanılabilirlik olasılığı $A= P_1$ ile hesaplanacaktır.Sistemin yokluk durumu olasılığı ise $U= P_2+ P_3+ P_4+ P_5+ P_6+ P_7+ P_8$ ile ifade edilir.

Durum frekansı ise aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

$$f=P_1.\lambda_{TM1}+ P_1.\lambda_{TM2} + P_1.\lambda_{TM3}= P_2.\mu_{TM1}+ P_3.\mu_{TM2}+P_4.\mu_{TM3}$$

Bu durumda sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF) denklem **(5.6)** ile hesaplanabilir.

$$MTTF = A/f \qquad \textbf{(5.6)}$$

Ortalama tamir süresi (MTTR) ise denklem **(5.7)** ile hesaplanabilir.

$$MTTR = U/f \qquad \textbf{(5.7)}$$

Bu denklemler vasıtası ile 1. seksiyonda 1. senaryoya göre hat-1 ve hat-2 için kullanıbilirlik (A), yokluk (U), frekans(f), arızaya kadar geçen ortalama süre (MTTF) ve ortalama tamir süresi (MTTR) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler çizelge 5.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.18 : 1. Seksiyon 1.senaryoya göre analiz sonuçları

Hesaplanan Değerler	**Hat-1**	**Hat-2**
Kullanılabilirlik (A)	0,997390849045783	0,997456103648644
Yokluk (U)	0,002609150954218	0,002543896351356
Frekans (f)	2,85453261	2,783201766
Arızaya kadar geçen ortalama süre (MTTF) YIL	0,34940601	0,358384403
Ortalama Tamir süresi (MTTR) YIL	0,997390849045783	0,997456103648644

Çizelge 5.18'de gösterildiği gibi analiz sonucunda sistemin yaklaşık 0,35 yılda bir arızaya geçeceği elde edilmiştir. Bu durum arızaya geçme durumu değil kısıtlı çalışma durumudur ve sistemin sefer sayısını etkilememektedir. Bu nedenle işletme durumunda arıza durumu olarak kabul edilmemektedir.

Senaryo 2'ye göre sistem çözümü

Senaryo 2'ye göre sistemde 3 elamanın en az 2'sinin çalışması durumunda sistemin başarılı olacağı öngörülmüştür. 2 elemanın arızası sistemin arızaya gitmesine denk gelmektedir. Bu senaryoya göre sistemin kullanılabilirlik ve yokluk durumları aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

$$A= P_1 +P_2+ P_3+ P_4 \ , U= P_5+ P_6+ P_7+ P_8$$

Durum frekansı ise $f=P_2.\lambda_{TM2}+ P_2.\lambda_{TM3}+ P_3.\lambda_{TM3}+ P_3.\lambda_{TM1}+P_4.\lambda_{TM1}+P_4.\lambda_{TM2}$ ile hesaplanacaktır. Bu durumda sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF) denklem **(5.6)** ile hesaplanacaktır. Ortalama tamir süresi (MTTR) ise denklem **(5.7)** ile hesaplanacaktır.

Bu denklemler vasıtası ile 1 seksiyonda 2. senaryoya göre hat-1 ve hat-2 için kullanıbilirlik (A), yokluk (U), frekans(f), arızaya kadar geçen ortalama süre (MTTF) ve ortalama tamir süresi (MTTR) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler çizelge 5.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.19 : 1. Seksiyon 2.senaryoya göre analiz sonuçları

Hesaplanan Değerler	**Hat-1**	**Hat-2**
Kullanılabilirlik (A)	0,999997728141646	0,999997840421257
Yokluk (U)	0,000002271858355	0,000002159578743
Frekans (f)	0,004973925	0,004728139
Arızaya kadar geçen ortalama süre (MTTF) YIL	201,0479983	211,4992589
Ortalama Tamir süresi (MTTR) YIL	0,999997728141646	0,999997840421257

Çizelge 5.19'da gösterildiği gibi analiz sonucunda sistemin ortalama 205 yılda bir arızaya geçeceği elde edilmiştir. Bu durum işletme için arızalı durumdur ve istenilen sefer sayısının aksamasına neden olmaktadır. Fakat sefer sayısının aksaması sistemin tümünün duracağı anlamına gelmemektedir. Bu şekilde de raylı sistemde işetme sefer sayıları yüklenme durumuna göre devam eder.

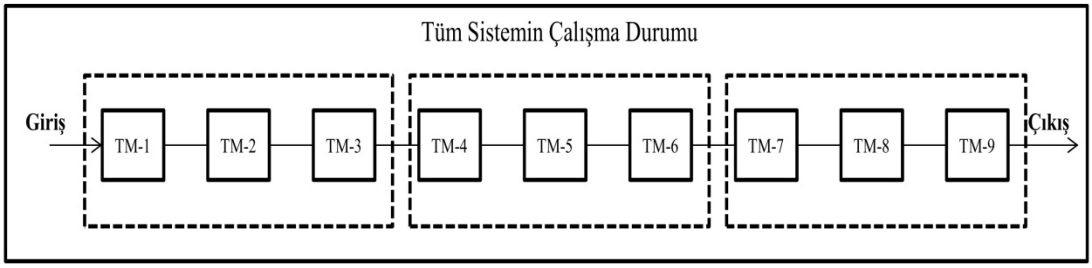
Tüm trafo merkezleri birbirine eşdeğerdir. Bu nedenle tüm seksiyon bölgeler için hesaplanan değerler eşdeğerdir. Çizelge 5.19'da elde edilen değerler TM-4, TM-5 ve TM-6'yı içeren 2. seksiyon için TM-7, TM-8 ve TM-9'u içeren 3. seksiyon bölgesi için eşittir.

5.6 Tüm Sistemin Güvenilirlik Analizi

Bu bölümde sistemin tamamı için güvenilirlik analizi yapılacaktır. Habipler - Topkapı hafif raylı sistemi hat boyunca 9 trafo merkezi tarafından beslenmektedir. Bu bölümde tüm sistem çeşitli senaryolara göre sistemin güvenilirlik davranışı tespit edilecektir. Bu bölümde sistemin tümünün çalışması durumuna, daha sonra her bir seksiyonun en az 2/3 oranında çalışma durumuna göre güvenilirliği değerlendirilecek son olarak seksiyonların her birinin en fazla 1/3 oranında çalışması durumunda sistemin güvenilmezliği değerlendirilecektir.

5.6.1 Tüm sistemin çalışma durumuna göre güvenilirlik analizi

Hattı besleyen 3 kısım birbirine paralel 3 elemandan oluşmaktadır. Bu elemanların güvenilirlik analizi bölüm 5'te ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu 3 elamandan 3 tanesinin de çalıştığı takdirde sistemin çalışacağı varsayılarak analiz yapılacaktır. Yani bu 3 elemanın da birbirine seri bağlı olduğu ve bu durumda sistemi tam kapasitede çalıştıracağı düşünülmüştür. Sistemin blok diyagramı şekil 5.15'de gösterilmektedir



Şekil 5.15 : Tüm sistemin çalışma duruma göre sistemin blok diyagramı

Şekil 5.15'de blok diyagramı gösterilen sistemin güvenilirlik hesabı Hat-1 için denklem **(5.8)**'e göre Hat-2 için denklem **(5.9)**'a göre yapılacaktır. Bu denklem denklem **(3.6)**'dan elde edilmiştir. Sistemin toplam güvenilirliği Hat-1 için $R_{3H1\text{-}123}$ (t), Hat-2 için $R_{3H2\text{-}123}$ (t) ile ifade edilecektir. Buradaki 3, üç adet trafo merkezi bölgesinin de devrede olduğu anlamını taşımaktadır. Bununla beraber her trafo besleme bölgesi için (TM-1,TM2,...,TM-9) hat-1 ve hat-2 olmak üzere güvenilirlik fonksiyonları tablolar halinde sadece bu bölümde verilecektir.

$$R_{3H1-123}(t) = R_{TM1.1}(t)R_{TM2.1}(t)R_{TM3.1}(t) \quad \textbf{(5.8)}$$

$$R_{3H3-123}(t) = R_{TM1.2}(t)R_{TM2.2}(t)R_{TM3.2}(t) \quad \textbf{(5.9)}$$

5.6.1.1 Tm1, tm2, tm3 için güvenilirlik hesabı

Çizelge 5.20'de hesaplanan TM1, TM2 ve TM3 besleme bölgelerinin hat-1 için güvenilirlik fonksiyonları verilmiştir.

Çizelge 5.20 : TM1,TM2 ve TM3 hat-1 için güvenilirlik fonksiyonu

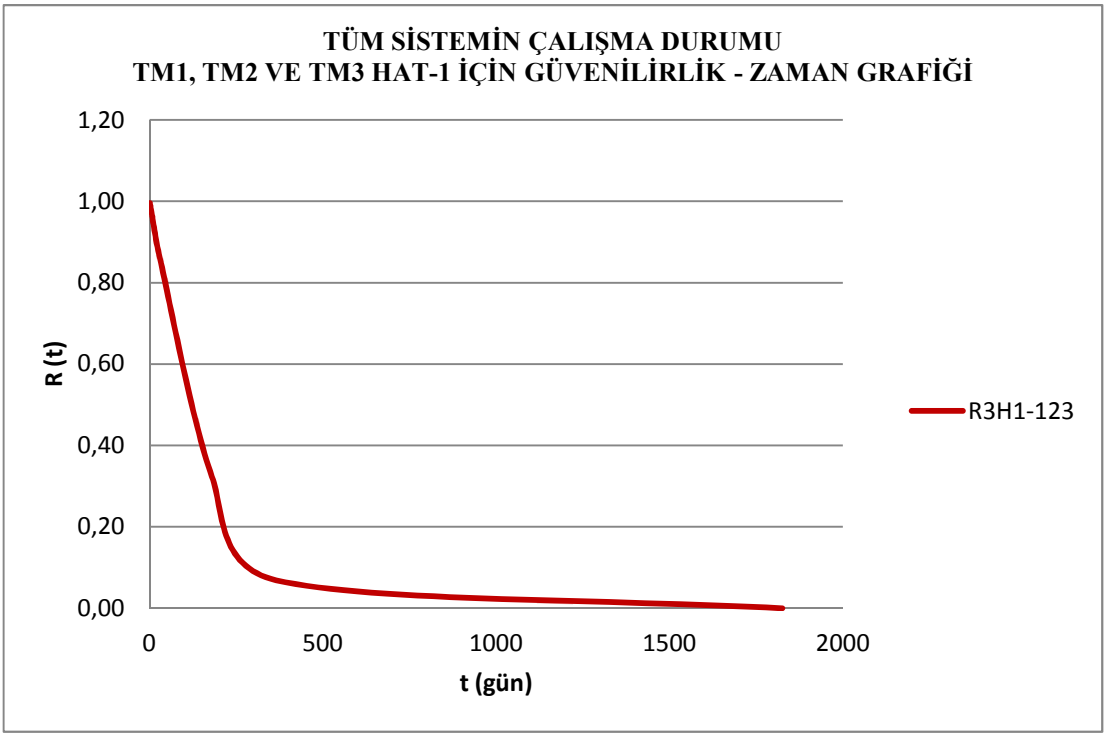
Sistem İsmi	Güvenilirlik Fonksiyonu
$R_{TM1.1}(t)$ $R_{TM2.1}(t)$ $R_{TM3.1}(t)$	$(e^{-0,1556t} + e^{-0,1778t} - e^{-0.3334t}).(e^{-0,4445t}).(e^{-0,6444t} + e^{-0,5777t} - e^{-1,2221t}).(e^{-0,2889t} + e^{-0,2445t} - e^{-0,5334t}).(e^{-0,1333t})$

Çizelge 5.21'de çeşitli t zamanlarına göre sistemin $R_{3H1-123}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.21 : $R_{3H1-123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{TM1.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{TM2.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{TM3.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{3H1-123}$	**0,995251687**	**0,96680615**	**0,859323021**	**0,323450576**	**0,068988871**	**4,33698E-09**

Şekil 5.16'da $R_{3H1-123}(t)$ için çizelge 5.21'de elde edilmiş olan güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.16 : $R_{3H1-123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

Çizelge 5.22'de hesaplanan TM1, TM2 ve TM3 besleme bölgelerinin hat-2 için güvenilirlik fonksiyonları verilmiştir.

Çizelge 5.22 : TM1,TM2 ve TM3 hat-2 için güvenilirlik fonksiyonları

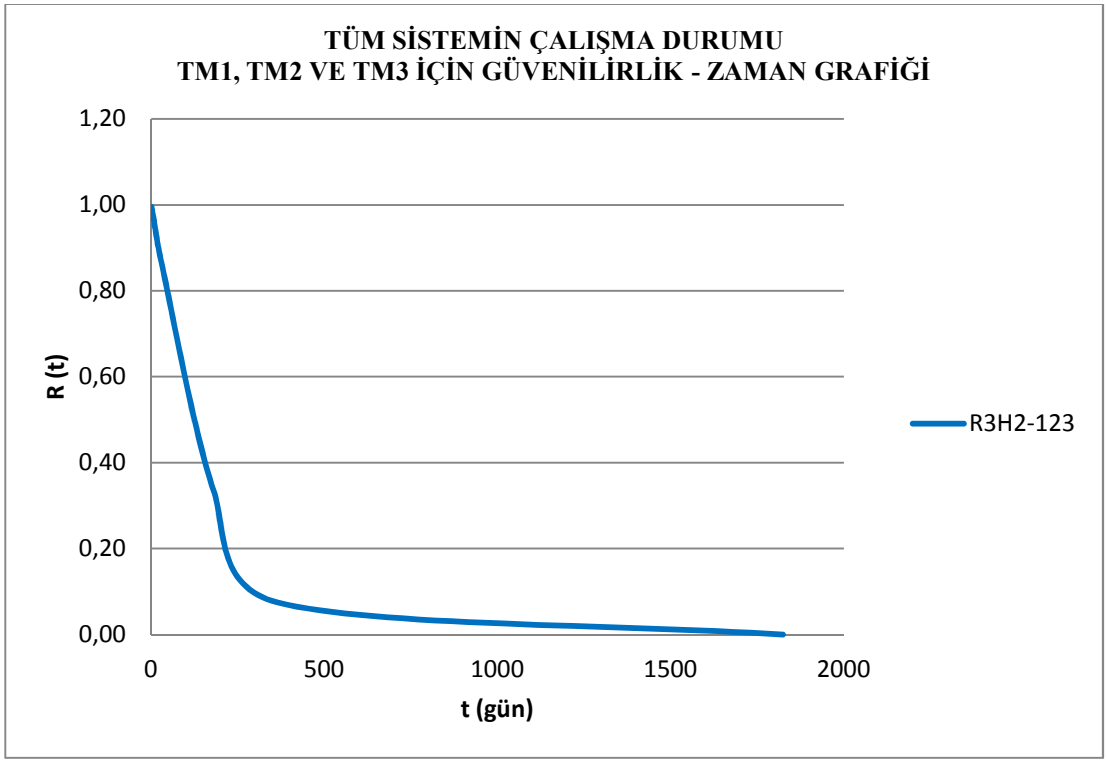
Sistem İsmi	**Güvenilirlik Fonksiyonu**
$R_{TM1.2}(t)$ $R_{TM2.2}(t)$ $R_{TM3.2}(t)$	$(e^{-0,1556t} + e^{-0,1778t} - e^{-0.3334t}).(e^{-0,4445t}).(e^{-0,6444t} + e^{-0,5777t} - e^{-1,2221t}).(e^{-0,2889t} + e^{-0,2222t} - e^{-0,5111t}).(e^{-0,1110t})$

Çizelge 5.23'de çeşitli t zamanlarına göre sistemin $R_{3H2-123}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.23 : $R_{3H2\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{TM1.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{TM2.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{TM3.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{3H2\text{-}123}$	**0,995434265**	**0,9680542**	**0,864170561**	**0,335626854**	**0,074803915**	**7,16822E-09**

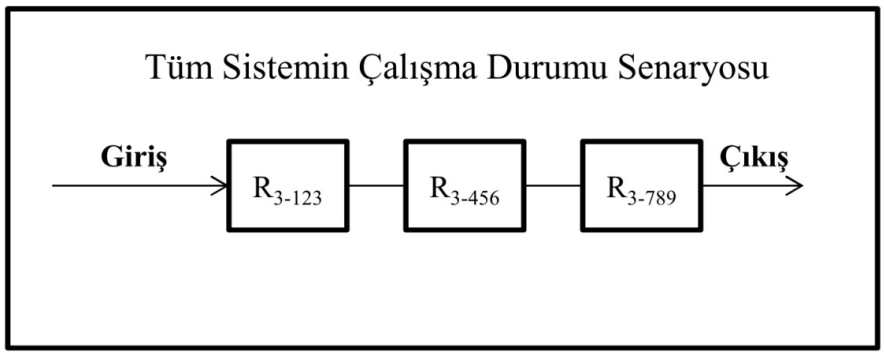
Şekil 5.17'de $R_{3H2\text{-}123}(t)$ için çizelge 5.23'de elde edilmiş olan güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.17 : $R_{3H2\text{-}123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

5.6.1.2 Tüm sistemin çalışma durumuna göre toplam güvenilirlik analizi

Bölüm 5.6.1.1 de TM-1, TM-2 ve TM-3 için toplam güvenilirlik analizi yapılmıştır. Tüm sistemin çalıştığı varsayılarak sistem şekil 5.15'deki blok diyagram ile gösterilmişti. Bölüm 5.6.1.1 de Hat-1 için $R_{3H1\text{-}123}(t)$ ve Hat-2 için $R_{3H2\text{-}123}(t)$ değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler diğer trafo merkezleri için de eşdeğer olduğu için $R_{3H1\text{-}456}(t)$ ve $R_{3H1\text{-}789}(t)$, $R_{3H2\text{-}456}(t)$ ve $R_{3H2\text{-}789}(t)$ güvenilirlik fonksiyonları da aynı değerleri alacaktır. Sonuçta sistem şekil 5.18'deki blok diyagramda belirtildiği gibi seri bağlı 3 sisteme indirgenmiştir. Bu blok diyagramı hat-1 ve hat-2 için ayrı ayrı çizilmemiştir. İki hattı da aynı diyagram ifade edebilir.



Şekil 5.18 : Tüm sistemlerin duruma göre toplam blok diyagramı

Şekil 5.18'de gösterilen sistemin güvenilirliği hat-1 için aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{3H1-HRS}(t) = R_{3H1-123}(t).R_{3H1-456}(t).R_{3H1-789}(t)$$

Aynı şekilde hat-2 için sistemin güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

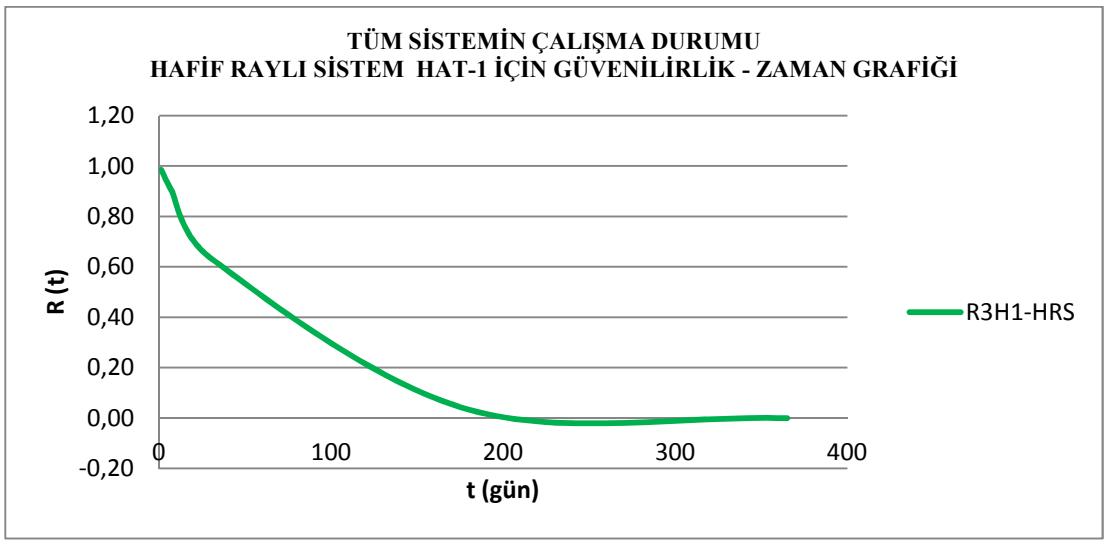
$$R_{3H2-HRS}(t) = R_{3H2-123}(t).R_{3H2-456}(t).R_{3H2-789}(t)$$

Bu duruma göre çizelge 5.24'de çeşitli t zamanlarına göre hat-1 için sistemin hesaplanmış olan $R_{3H1\text{-}HRS}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.24 : $R_{3H1\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{3H1\text{-}123}$	0,995251687	0,96680615	0,859323021	0,323450576	0,068988871	4,33698E-09
$R_{3H1\text{-}456}$	0,995251687	0,96680615	0,859323021	0,323450576	0,068988871	4,33698E-09
$R_{3H1\text{-}789}$	0,995251687	0,96680615	0,859323021	0,323450576	0,068988871	4,33698E-09
$R_{3H1\text{-}HRS}$	**0,985822593**	**0,903687375**	**0,6345551**	**0,033839488**	**0,00032835**	**8,15757E-26**

Şekil 5.19'da $R_{3H1\text{-}HRS}(t)$ için çizelge 5.24'de elde edilmiş olan sonuçların güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



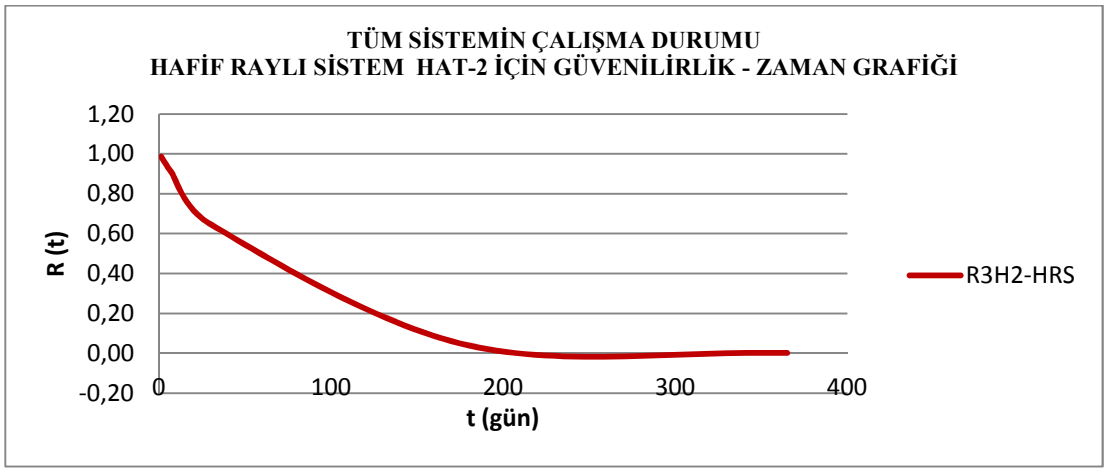
Şekil 5.19 : $R_{3H1\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

Aynı şekilde çizelge 5.25'de çeşitli t zamanlarına göre hat-2 için sistemin hesaplanmış olan $R_{3H2\text{-}HRS}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.25 : $R_{3H2\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{3H2\text{-}123}$	0,995434265	0,9680542	0,864170561	0,335626854	0,074803915	7,16822E-09
$R_{3H2\text{-}456}$	0,995434265	0,9680542	0,864170561	0,335626854	0,074803915	7,16822E-09
$R_{3H2\text{-}789}$	0,995434265	0,9680542	0,864170561	0,335626854	0,074803915	7,16822E-09
$R_{3H2\text{-}HRS}$	**0,986365238**	**0,907191614**	**0,645354588**	**0,037806816**	**0,000418575**	**3,68328E-25**

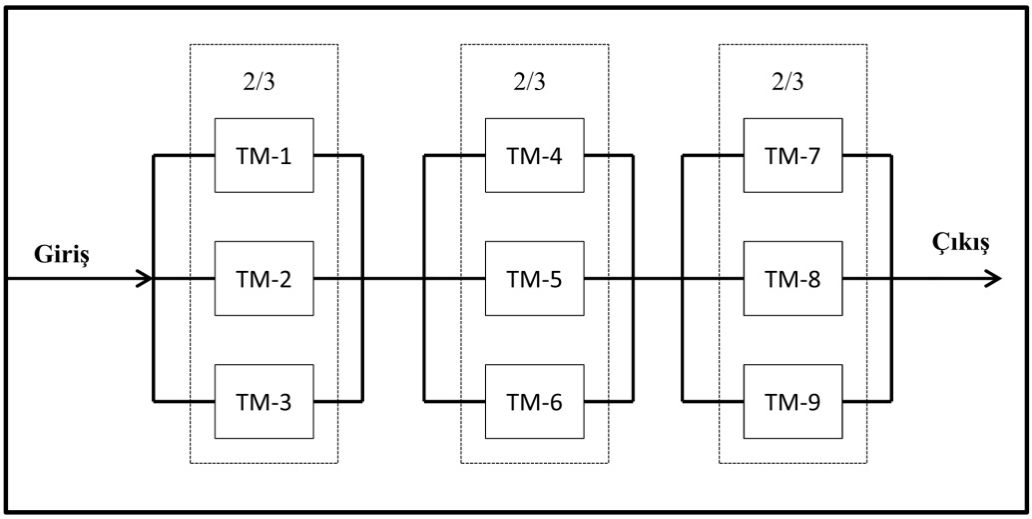
Şekil 5.20'da $R_{3H2\text{-}HRS}(t)$ için çizelge 5.25'de elde edilmiş olan güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.20 : $R_{3H2\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

5.6.2 En az 2/3 çalışma durumuna göre güvenilirlik analizi

Bölüm 5.6.1'de tüm sistemin çalışma durumu analizi yapılmış olan sistemde bulunan paralel 3 elamandan en az 2'sinin çalıştığı düşünülecektir. Sistemi oluşturan her bir seksiyon bölgenin 2/3'den kapasite ile çalışacağı varsayılmıştır. Sistemin blok diyagramı şekil 5.21'de gösterilmektedir.



Şekil 5.21 : En az 2/3 çalışma duruma göre sistemin blok diyagramı

Sekil 5.21'de blok diyagramı gösterilen sistemin güvenilirlik hesabı Hat-1 için denklem **(5.10)**'a, Hat-2 için denklem **(5.11)**'e göre yapılacaktır. Bu denklem, denklem **(3.18)**'in açılımından elde edilmiş en az 2 adet bileşenin çalışması şartı ile sadeleşmiştir. Bu denklemler 1. seksiyon bölge için verilmiştir. Diğer seksiyon bölgeler için de aynı denklem kullanılacaktır.

Sistemin toplam güvenilirliği Hat-1 için $R_{2H1\text{-}123}$ (t), Hat-2 için $R_{2H2\text{-}123}$ (t) ile ifade edilecektir. Bununla beraber her trafo besleme bölgesi için (TM-1,TM2,...,TM-9) hat-1 ve hat-2 olmak üzere güvenilirlikfonksiyonları tekrardan verilmeyecektir.

$$R_{2H1-123}(t) = R_{TM1.1}(t)R_{TM2.1}(t)R_{TM3.1}(t) + R_{TM1.1}(t)R_{TM2.1}(t)Q_{TM3.1}(t) + R_{TM1.1}(t)Q_{TM2.1}(t)R_{TM3.1}(t) + Q_{TM1.1}(t)R_{TM2.1}(t)R_{TM3.1}(t) \quad \textbf{(5.10)}$$

$$R_{2H2-123}(t) = R_{TM1.2}(t)R_{TM2.2}(t)R_{TM3.2}(t) + R_{TM1.2}(t)R_{TM2.2}(t)Q_{TM3.2}(t) + R_{TM1.2}(t)Q_{TM2.2}(t)R_{TM3.2}(t) + Q_{TM1.2}(t)R_{TM2.2}(t)R_{TM3.2}(t) \quad \textbf{(5.11)}$$

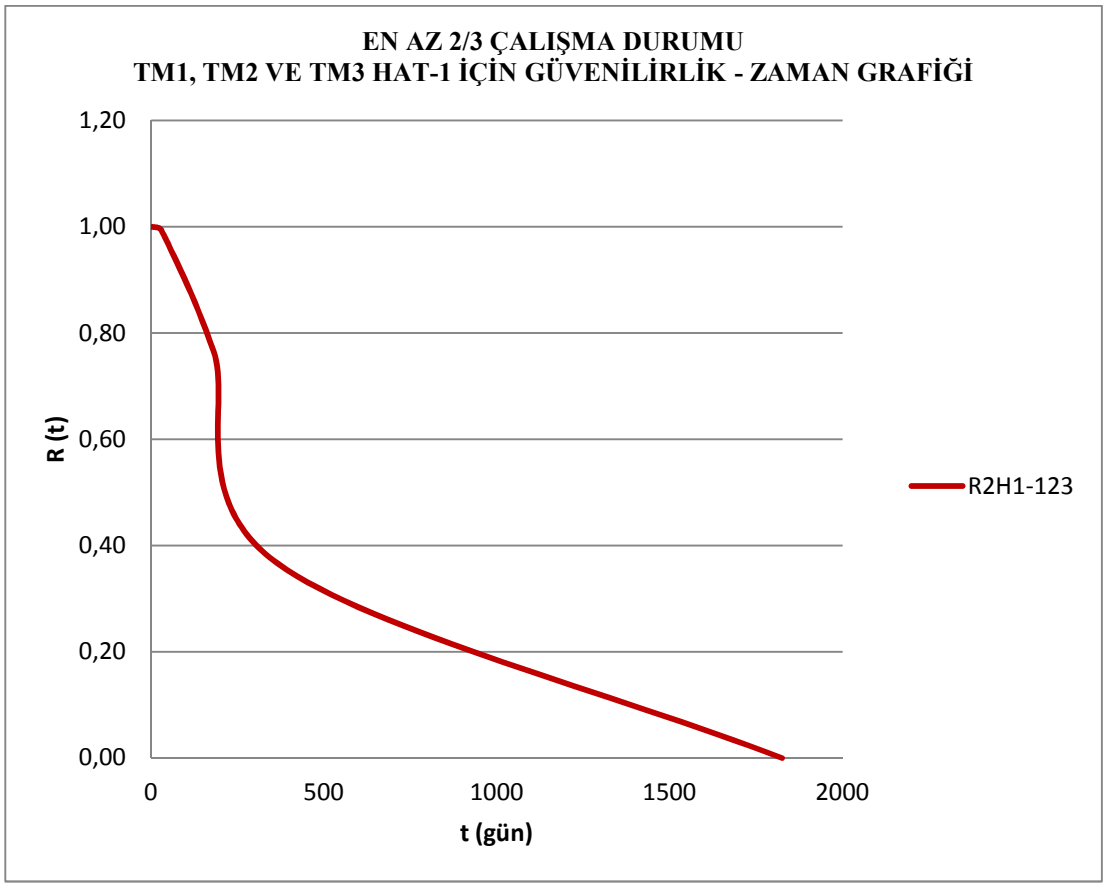
5.6.2.1 Tm1, tm2, tm3 için güvenilirlik hesabı

En az 2/3 çalışma durumuna göre çizelge Hat-1 için çizelge 5.20'de güvenilirlik fonksiyonları verilen TM1, TM2 ve TM3 besleme bölgelerinin toplam güvenilirliği hesaplanmış ve çizelge 5.26'da çeşitli t zamanlarına göre sistemin $R_{2H1-123}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.26 : $R_{2H1-123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{TM1.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{TM2.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{TM3.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{2H1-123}$	**0,9999925**	**0,9996272**	**0,9929535**	**0,7666989**	**0,3666533**	**0,0000080**

Şekil 5.22'de $R_{2H1-123}(t)$ için çizelge 5.26'da elde edilmiş olan güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



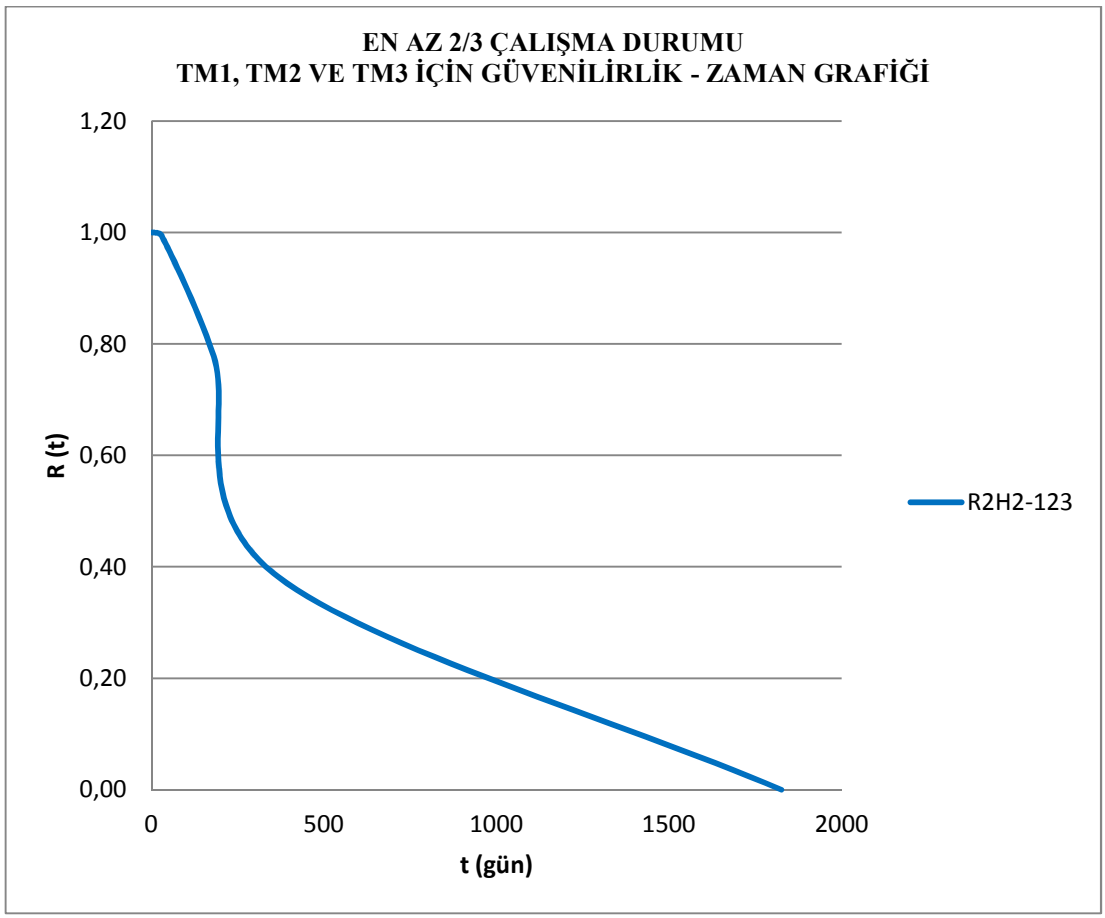
Şekil 5.22 : $R_{2H1-123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

En az 2/3 çalışma durumuna göre çizelge Hat-2 için çizelge 5.22'de güvenilirlik fonksiyonları verilen TM1, TM2 ve TM3 besleme bölgelerinin toplam güvenilirliği hesaplanmış ve çizelge 5.27'de çeşitli t zamanlarına göre sistemin $R_{2H2-123}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.27 : $R_{2H2\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{TM1.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{TM2.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{TM3.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{2H2\text{-}123}$	**0,9999930**	**0,9996549**	**0,9934465**	**0,7776040**	**0,3829958**	**0,0000111**

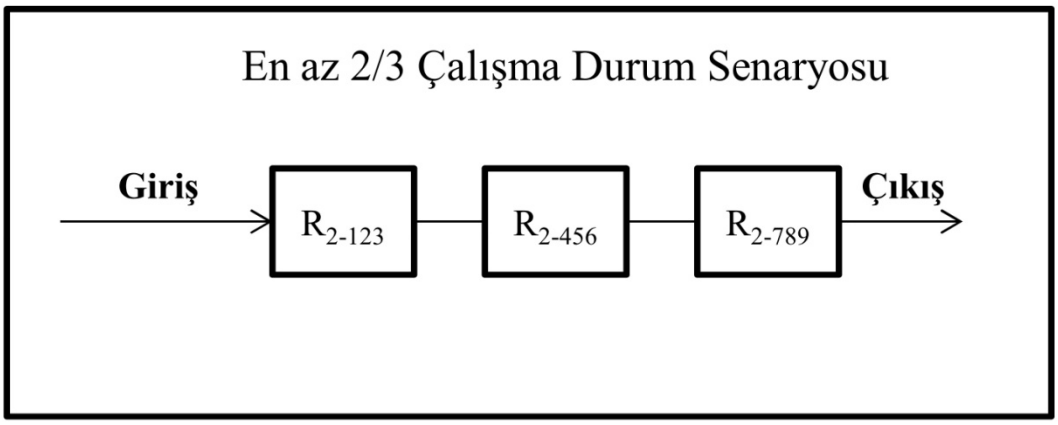
Şekil 5.23'de $R_{2H2\text{-}123}(t)$ için çizelge 5.27'de elde edilmiş olan güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.23 : $R_{2H2\text{-}123}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

5.6.2.2 En az 2/3 çalışma durumuna göre toplam güvenilirlik analizi

En az 2/3 sistemin çalıştığı varsayılan şekil 5.21'de blok diyagramı verilen sistemde Hat-1 için $R_{2H1\text{-}123}(t)$ ve Hat-2 için $R_{2H2\text{-}123}(t)$ güvenilirlik fonksiyonları hesaplanmıştır. Bu değerler diğer trafo merkezleri için de eşdeğer olduğu için $R_{2H1\text{-}456}(t)$, $R_{2H1\text{-}789}(t)$, $R_{2H2\text{-}456}(t)$ ve $R_{2H2\text{-}789}(t)$ güvenilirlik fonksiyonları da aynı değerleri alacaklardır. Sonuçta sistem şekil 5.24'deki blok diyagramda belirtildiği gibi seri bağlı 3 sisteme indirgenmiştir. Bu blok diyagramı hat-1 ve hat-2 için ayrı ayrı çizilmemiştir. İki hattı da aynı diyagram ifade edebilir.



Şekil 5.24 : En az 2/3 çalışma duruma göre toplam blok diyagramı

Şekil 5.24'de gösterilen sistemin güvenilirliği hat-1 için aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{2H1-HRS}(t) = R_{2H1-123}(t).R_{2H1-456}(t).R_{2H1-789}(t)$$

Aynı şekilde hat-2 için sistemin güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

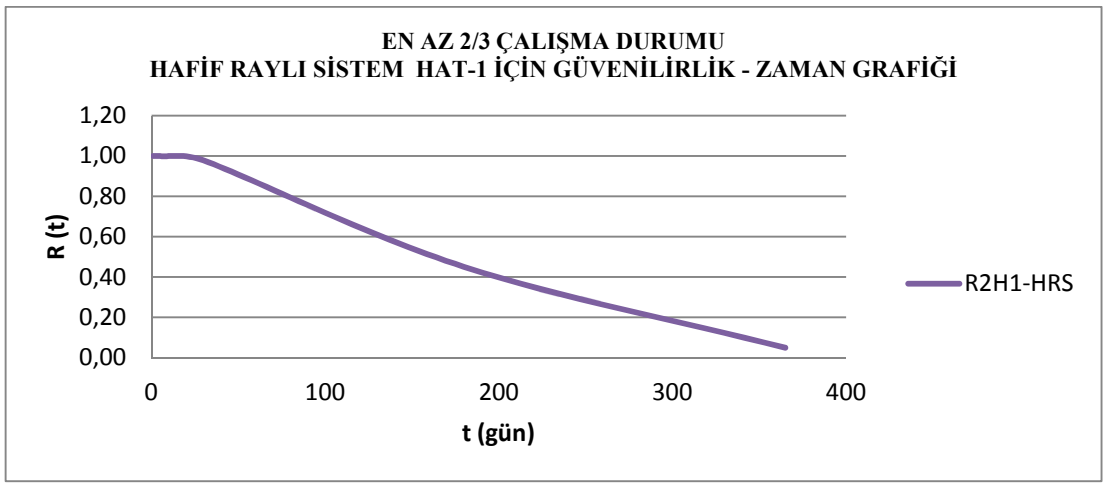
$$R_{2H2-HRS}(t) = R_{2H2-123}(t).R_{2H2-456}(t).R_{2H2-789}(t)$$

Bu duruma göre çizelge 5.28'de çeşitli t zamanlarına göre hat-1 için sistemin hesaplanmış olan $R_{2H1\text{-}HRS}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.28 : $R_{2H1\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{2H1\text{-}123}$	0,9999925	0,9996272	0,9929535	0,7666989	0,3666533	0,0000080
$R_{2H1\text{-}456}$	0,9999925	0,9996272	0,9929535	0,7666989	0,3666533	0,0000080
$R_{2H1\text{-}789}$	0,9999925	0,9996272	0,9929535	0,7666989	0,3666533	0,0000080
$R_{2H1\text{-}HRS}$	**0,999977406**	**0,998882008**	**0,97900912**	**0,450686402**	**0,049290898**	**5,06198E-16**

Şekil 5.25'de $R_{2H1\text{-}HRS}(t)$ için çizelge 5.28'de elde edilmiş olan güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



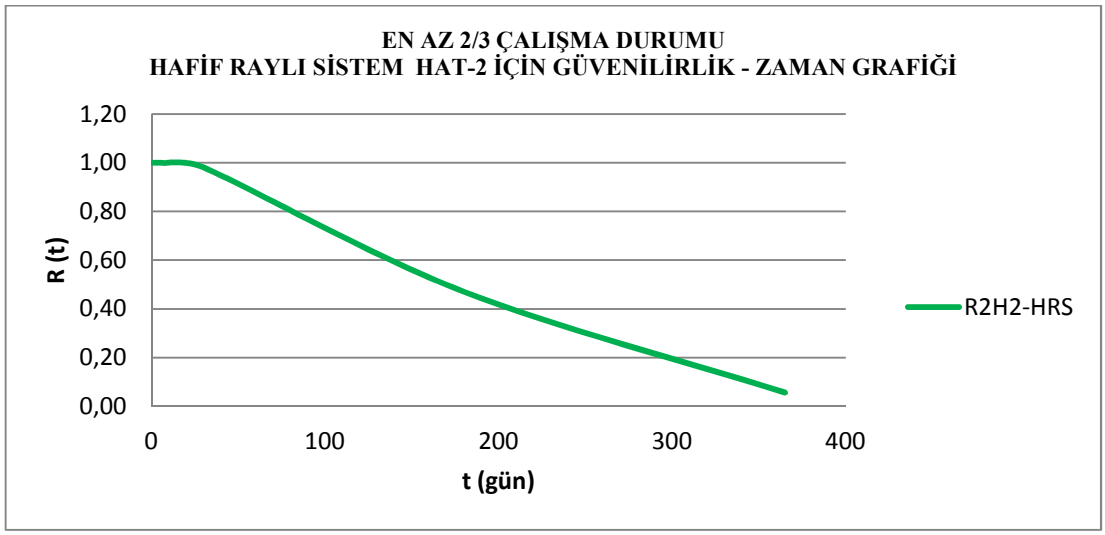
Şekil 5.25 : $R_{2H1\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

Aynı şekilde çizelge 5.29'da çeşitli t zamanlarına göre hat-2 için sistemin hesaplanmış olan $R_{2H2\text{-}HRS}(t)$ güvenilirlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.29 : $R_{2H2\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilirlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{2H2\text{-}123}$	0,9999930	0,9996549	0,9934465	0,7776040	0,3829958	0,0000111
$R_{2H2\text{-}456}$	0,9999930	0,9996549	0,9934465	0,7776040	0,3829958	0,0000111
$R_{2H2\text{-}789}$	0,9999930	0,9996549	0,9934465	0,7776040	0,3829958	0,0000111
$R_{2H2\text{-}HRS}$	**0,999979112**	**0,998965058**	**0,980468033**	**0,470192162**	**0,056180048**	**1,38201E-15**

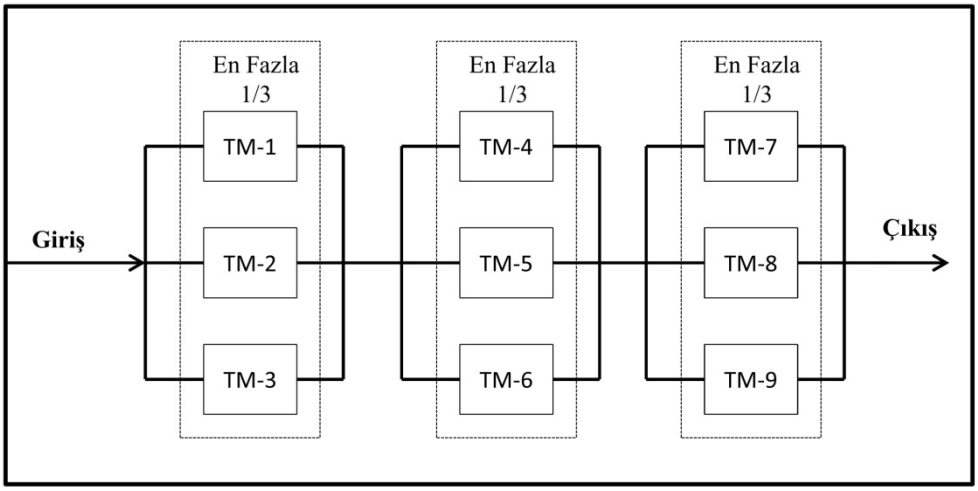
Şekil 5.26'da $R_{2H2\text{-}HRS}(t)$ için çizelge 5.29'da elde edilmiş olan güvenilirlik zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.26 : $R_{2H2\text{-}HRS}$ için güvenilirlik - zaman grafiği

5.6.3 En fazla 1/3 çalışma durumuna göre güvenilmezlik analizi

Bölüm 5.6.2'de en az 2/3 çalışma durumu için analiz yapılmış olan sistemde bulunan paralel 3 elamandan en fazla 1 tanesinin çalıştığı düşünülecektir. Sistemi oluşturan her bir seksiyonun en fazla 1/3 oranında kapasite ile çalışacağı varsayılmıştır. Sistemin blok diyagramı şekil 5.27'de gösterilmektedir. Sistemin bu çalışma durumu sistemin sefer sayısını karşılayamaması anlamına gelmektedir. Arıza olarak kabul edilir. Bu nedenle bu bölümde sistemin güvenilmezliği hesaplanacaktır.



Şekil 5.27 : En fazla 1/3 çalışma duruma göre sistemin blok diyagramı

Şekil 5.27'de blok diyagramı gösterilen sistemin güvenilirlik hesabı Hat-1 için denklem **(5.12)**'ye, Hat-2 için denklem **(5.13)**'e göre yapılacaktır. Bu denklemler, en az 2 adet bileşenin çalışması şartını sağlayan denklem **(5.10)** ve denklem **(5.11)**'in tümleyenidir ve güvenilmezlik (Q(t)) denklemidir. Bu denklemler 1. seksiyon bölge için verilmiştir. Diğer seksiyon bölgeler için de aynı denklem kullanılacaktır.

Sistemin toplam güvenilmezliği Hat-1 için $Q_{1H1\text{-}123}$ (t), Hat-2 için $Q_{1H2\text{-}123}$ (t) ile ifade edilecektir. Bununla beraber her trafo besleme bölgesi için (TM-1,TM2,...,TM-9) hat-1 ve hat-2 olmak üzere bu fonksiyonlar tekrardan verilmeyecektir.

$$Q_{1H1-123}(t) = 1 - \left(R_{TM1.1}(t)R_{TM2.1}(t)R_{TM3.1}(t) + R_{TM1.1}(t)R_{TM2.1}(t)Q_{TM3.1}(t) + R_{TM1.1}(t)Q_{TM2.1}(t)R_{TM3.1}(t) + Q_{TM1.1}(t)R_{TM2.1}(t)R_{TM3.1}(t)\right) \quad \textbf{(5.12)}$$

$$Q_{1H2-123}(t) = 1 - \left(R_{TM1.2}(t)R_{TM2.2}(t)R_{TM3.2}(t) + R_{TM1.2}(t)R_{TM2.2}(t)Q_{TM3.2}(t) + R_{TM1.2}(t)Q_{TM2.2}(t)R_{TM3.2}(t) + Q_{TM1.2}(t)R_{TM2.2}(t)R_{TM3.2}(t)\right) \quad \textbf{(5.13)}$$

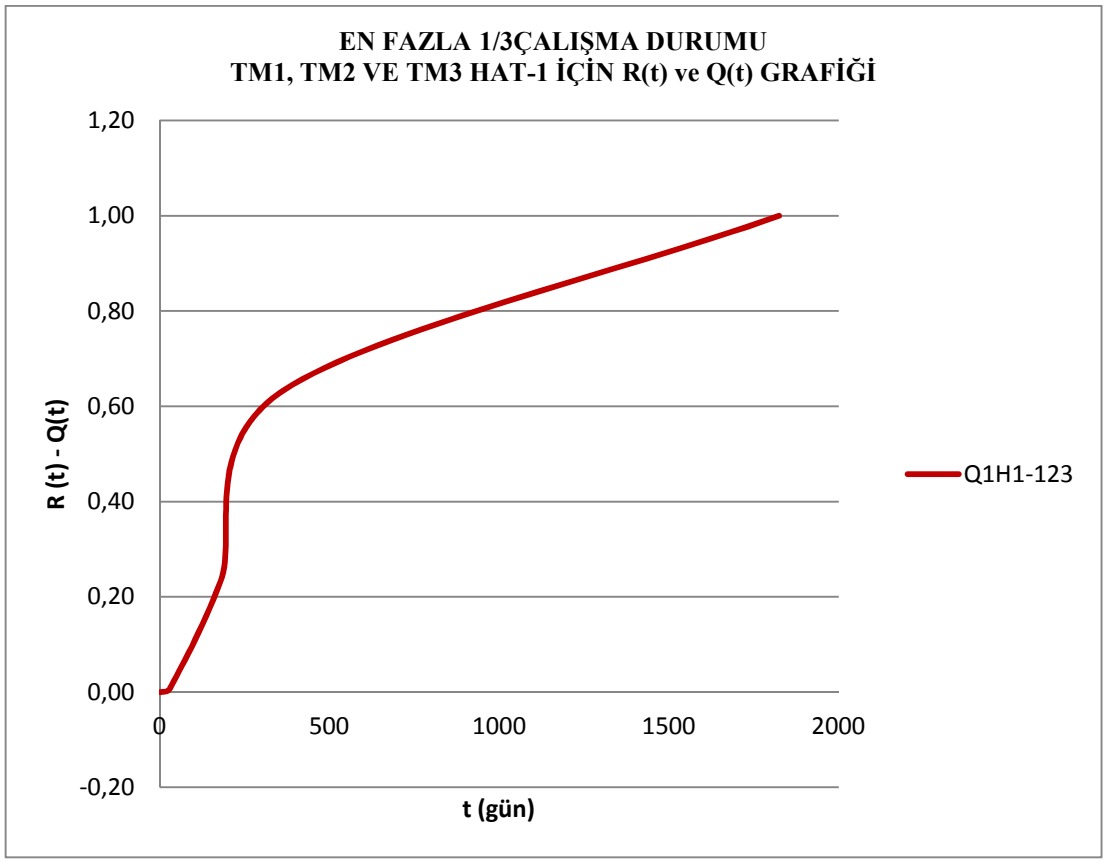
5.6.3.1 Tm1, tm2, tm3 için güvenilmezlik hesabı

En fazla 1/3 çalışma durumuna göre çizelge Hat-1 için çizelge 5.20'de güvenilirlik fonksiyonları verilen TM-1, TM-2 ve TM-3 besleme bölgelerinin toplam güvenilmezliği hesaplanmış ve çizelge 5.30'da çeşitli t zamanlarına göre sistemin $Q_{1H1-123}(t)$ R ve Q değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.30 : $Q_{1H1\text{-}123}(t)$ için çeşitli t zamanları için R ve Q değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{TM1.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{TM2.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$R_{TM3.1}$	0,9984147	0,9888106	0,9507189	0,6864401	0,4101345	0,0016308
$Q_{1H1\text{-}123}$	**0,0000075**	**0,0003728**	**0,0070465**	**0,2333011**	**0,6333467**	**0,9999920**

Şekil 5.28'de $Q_{1H1\text{-}123}(t)$ için çizelge 5.30'da elde edilmiş olan R(t) ve Q(t) grafiği gösterilmektedir.



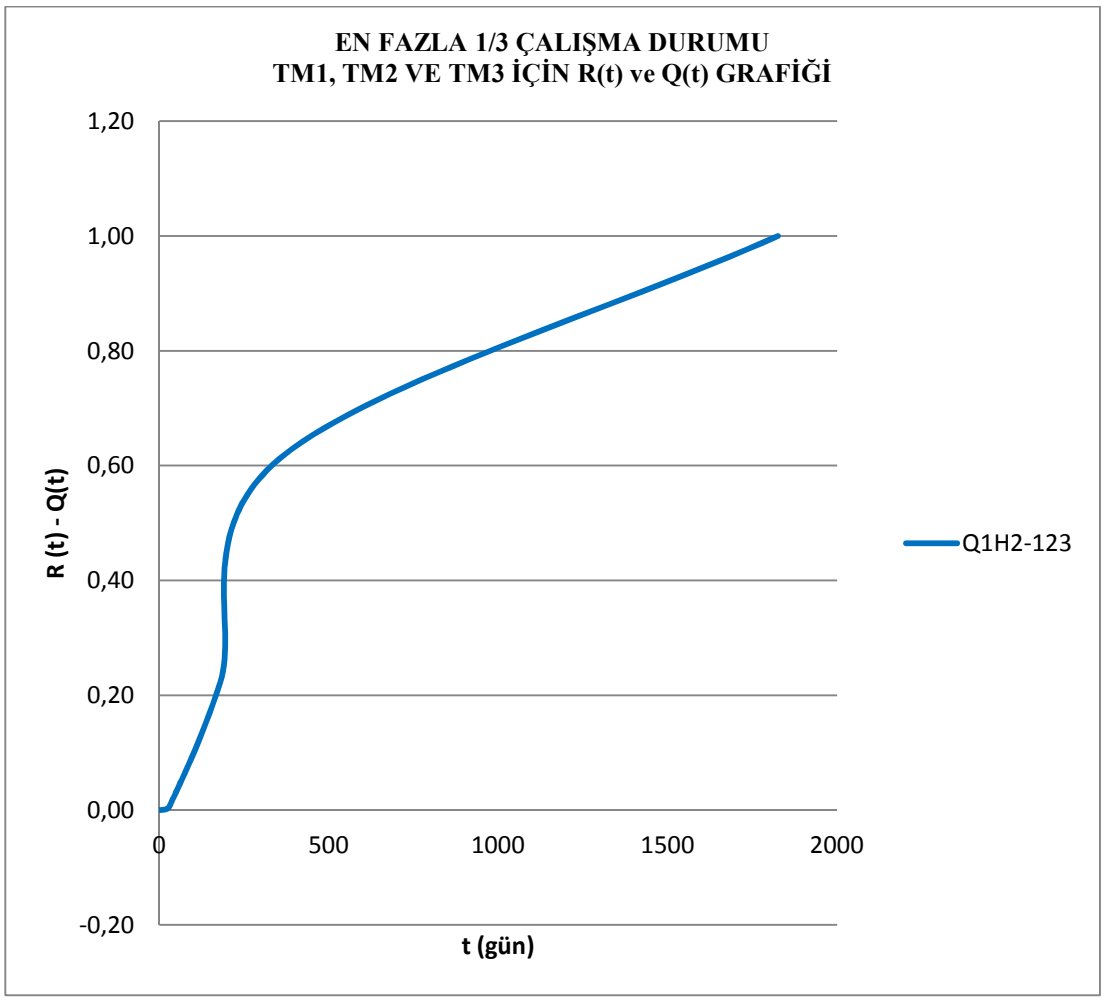
Şekil 5.28 : $Q_{1H1\text{-}123}$ için R(t) ve Q(t) grafiği

En fazla 1/3 çalışma durumuna göre çizelge Hat-2 için çizelge 5.22'de güvenilirlik fonksiyonları verilen TM-1, TM-2 ve TM-3 besleme bölgelerinin toplam güvenilmezliği hesaplanmış ve çizelge 5.31'de çeşitli t zamanlarına göre sistemin $Q_{1H2-123}(t)$ R ve Q değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.31 : $Q_{1H2-123}(t)$ için çeşitli t zamanları için R ve Q değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$R_{TM1.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{TM2.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$R_{TM3.2}$	0,9984758	0,9892360	0,9525033	0,6949479	0,4213485	0,0019281
$Q_{1H2-123}$	**0,0000070**	**0,0003451**	**0,0065535**	**0,2223960**	**0,6170042**	**0,9999889**

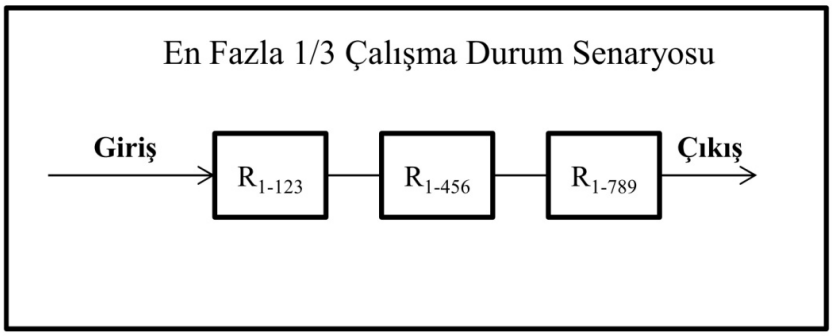
Şekil 5.29'da $Q_{1H2-123}(t)$ için çizelge 5.31'de elde edilmiş olan R(t) ve Q(t) grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.29 : $Q_{1H2-123}$ için R(t) ve Q(t) grafiği

5.6.3.2 En fazla 1/3 çalışma durumuna göre toplam güvenilmezlik analizi

En fazla 1/3 sistemin çalıştığı varsayılan şekil 5.27'de blok diyagramı verilen sistemde Hat-1 için $Q_{1H1\text{-}123}(t)$ ve Hat-2 için $Q_{1H2\text{-}123}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonları hesaplanmıştır. Bu değerler diğer trafo merkezleri için de eşdeğer olduğu için $Q_{1H1\text{-}456}(t)$, $Q_{1H1\text{-}789}(t)$, $Q_{1H2\text{-}456}(t)$ ve $Q_{1H2\text{-}789}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonları da aynı değerleri alacaklardır. Sonuçta sistem şekil 5.30'daki blok diyagramda belirtildiği gibi seri bağlı 3 sisteme indirgenmiştir. Bu blok diyagramı hat-1 ve hat-2 için ayrı ayrı çizilmemiştir. İki hattı da aynı diyagram ifade edebilir.



Şekil 5.30 : En fazla 1/3 çalışma duruma göre toplam blok diyagramı

Şekil 5.30'da gösterilen sistemin toplam güvenilmezliği hat-1 için aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$Q_{1H1-HRS}(t) = Q_{1H1-123}(t).Q_{1H1-456}(t).Q_{1H1-789}(t)$$

Aynı şekilde hat-2 için sistemin toplam güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

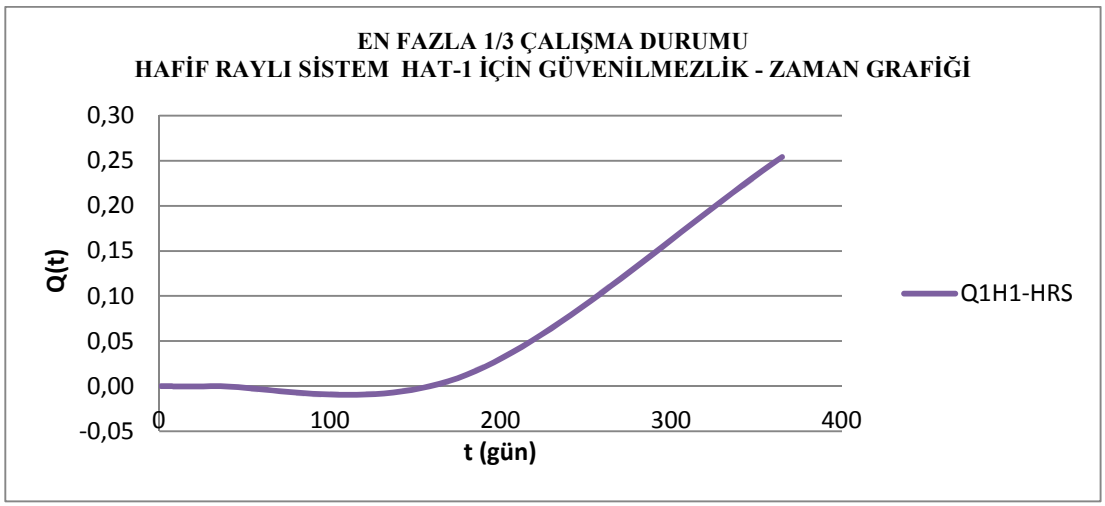
$$Q_{1H2-HRS}(t) = Q_{1H2-123}(t).Q_{1H2-456}(t).Q_{1H2-789}(t)$$

Bu duruma göre çizelge 5.32'de çeşitli t zamanlarına göre hat-1 için sistemin hesaplanmış olan $Q_{1H1\text{-}HRS}(t)$ değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.32 : $Q_{1H1\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilmezlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$Q_{1H1\text{-}123}$	0,0000075	0,0003728	0,0070465	0,2333011	0,6333467	0,9999920
$Q_{1H1\text{-}456}$	0,0000075	0,0003728	0,0070465	0,2333011	0,6333467	0,9999920
$Q_{1H1\text{-}789}$	0,0000075	0,0003728	0,0070465	0,2333011	0,6333467	0,9999920
$Q_{1H1\text{-}HRS}$	**4,27195E-16**	**5,18129E-11**	**3,49881E-07**	**0,012698446**	**0,254053143**	**0,999976091**

Şekil 5.31'de $Q_{1H1\text{-}HRS}(t)$ için çizelge 5.32'de elde edilmiş olan güvenilmezlik zaman grafiği gösterilmektedir.



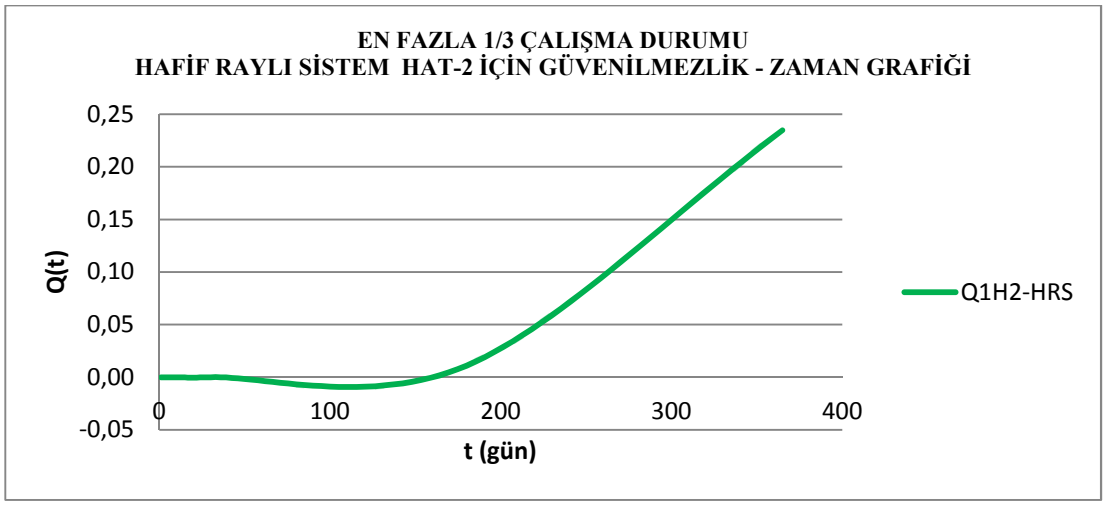
Şekil 5.31 : $Q_{1H1\text{-}HRS}$ için güvenilmezlik - zaman grafiği

Aynı şekilde çizelge 5.33'de çeşitli t zamanlarına göre hat-2 için sistemin hesaplanmış olan $Q_{1H2\text{-}HRS}(t)$ değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.33 : $Q_{1H2\text{-}HRS}(t)$ için çeşitli t zamanları için güvenilmezlik değerleri

	t=1 Gün	t=7 Gün	t=30 Gün	t=180 Gün	t=1 Yıl	t=5 Yıl
$Q_{1H2\text{-}123}$	0,0000099	0,0004875	0,0089991	0,2669209	0,6723386	0,9999917
$Q_{1H2\text{-}456}$	0,0000033	0,0001692	0,0035073	0,1621622	0,5300076	0,9999339
$Q_{1H2\text{-}789}$	0,0000063	0,0003146	0,0060591	0,2172885	0,6164558	0,9999888
$Q_{1H2\text{-}HRS}$	**2,08398E-16**	**2,59529E-11**	**1,91239E-07**	**0,009405219**	**0,219670691**	**0,999914439**

Şekil 5.32'de $Q_{1H2\text{-}HRS}(t)$ için çizelge 5.33'de elde edilmiş olan güvenilmezlik zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.32 : $Q_{1H2\text{-}HRS}$ için güvenilmezlik - zaman grafiği

5.7 Sistemin Güvenilirlik İndisleri (LOLP- LOLE)

Sistemden elde edilen değerler kullanılarak bazı güvenilirlik indisleri hesaplanabilir. Bu indislerden en çok kullanılabilecek olanı LOLP (loss of load probability) yani yük kaybı olasılığıdır. Yük kaybı olasılığı belirlenen periyotlarda üretilen ya da sağlanan enerjinin talep edilen enerjiden düşük olduğu durumların olasılığıdır. Senelik yada günlük olarak hesaplanabilir.LOLP olasılığı denklem **(5.14)**'den elde edilebilir [22].

$$LOLP = \sum_{K=1}^{N} P(C = C_K) F_D(IC - C_K) \quad \textbf{(5.14)}$$

Burada; P, Olasılık kütle fonksiyonu, F_D Yükün birikmeli olasılığı, C Mevcut güç kapasitesi, Ck Devredışı kalmış ünite gücü göstermektedir.Bununla birlikte LOLE (loss of load expectation) yük kaybı beklentisi denklem**(5.15)**'den hesaplanabilir. Yük kaybı beklentisi indisi yük kaybı olasılığından daha fazla kullanılmaktadır. "T" zamanı ifade etmektedir.Sistemin saatlik yada yıllık yüküne göre değerler alabilir.

$$LOLE = LOLP \times T \quad \textbf{(5.15)}$$

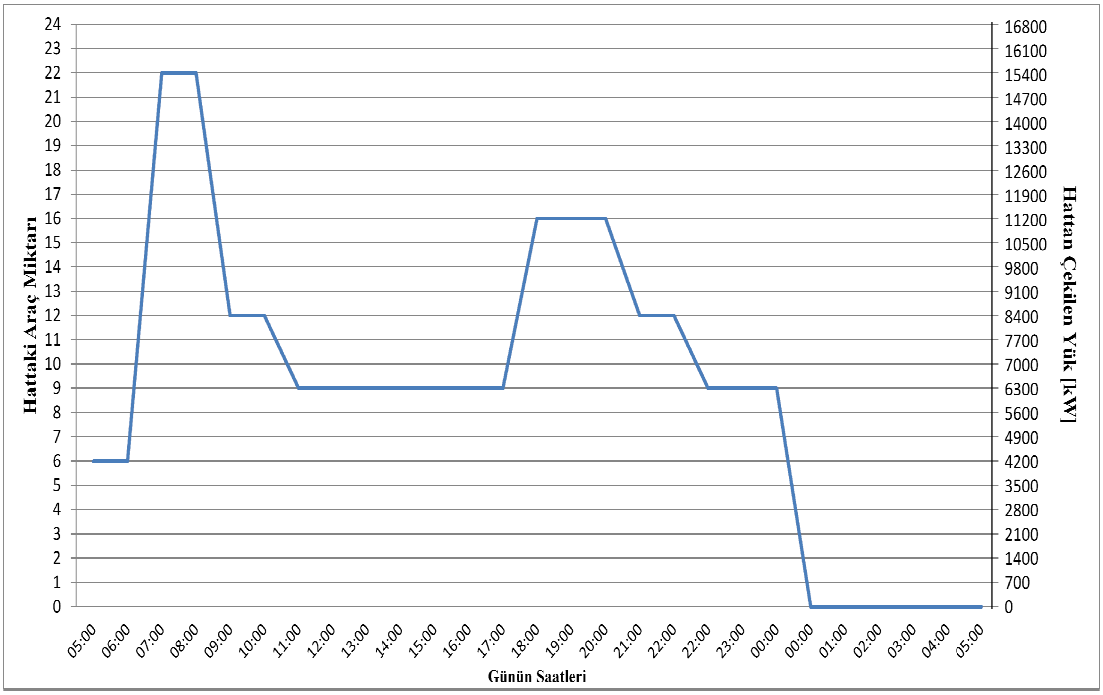
5.7.1 Tüm hattın işletme bilgileri

Bu bölümde tüm hattın işletme bilgileri verilecektir. Bu bilgiler hattın işletmeci firması olan Ulaşım A.Ş.'den temin edilmiştir. Bu bilgilerden yararlanarak sistemin günlük yük durumları ve yük olasılıkları tespit edilecek daha sonra seksisyon bölgeler bazında güvenilirlik indisleri olan LOLP ve LOLE hesaplanacaktır. Çizelge 5.34'de raylı sistem hattının günlük tren işletme bilgileri verilmektedir.

Çizelge 5.34 : Raylı sistem hattının günlük tren işletme bilgileri

Sistemin İşletme verileri						
Başlanguç Saati	**Bitiş Saati**	**Süre (Saat)**	**Araç Sayısı**		**Yük olasılığı P(L)**	**Hattan Çekilen Güç (KW)**
05:00	06:00	1	6	Araç	0,0417	4200
06:00	08:00	2	22	Araç	0,0833	15400
08:00	10:00	2	12	Araç	0,0833	8400
10:00	17:00	7	9	Araç	0,2917	6300
17:00	20:00	3	16	Araç	0,1250	11200
20:00	22:00	2	12	Araç	0,0833	8400
22:00	00:00	2	9	Araç	0,0833	6300
00:00	05:00	5	0	Araç	0,2083	0

Şekil 5.33'de çizelge 5.34'de verilen günlük tren işletme bilgilerinin ve hattan çekilen yükü gösteren grafik verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi sistemden en çok yük çekilen pik saatler 06:00-08:00 ve 17:00-20:00 saatleri arasında olmaktadır.



Şekil 5.33 : Tüm hattın günlük yük eğrisi

Hattın günlük tren işletme bilgilerinden yararlanılarak her bir seksiyona düşen tren sayısıları hesaplanmış ve buna göre çizelge 5.35 oluşturulmuştur. Çizelge 5.35'de seksiyonlar bazında hattaki tren sayıları gösterilmektedir.

Çizelge 5.35 : Seksiyonlar bazında hattaki tren sayıları

Hattaki Tren Sayısı	SÜRE	Toplam Yük (kW)	1. Seksiyondaki tren sayısı	2. Seksiyondaki tren sayısı	3. Seksiyondaki tren sayısı
22	2	15400	8	7	7
16	3	11200	6	5	5
12	4	8400	4	4	4
9	9	6300	3	3	3
6	1	4200	2	2	2
0	5	0	0	0	0

Çizelge 5.35'den de anlaşılacağı gibi sistemin işletme durumuna göre en çok tren 1. seksiyonda bulunmaktadır.

5.7.2 Seksiyon 1 için güvenilirlik indisleri hesabı

Bu bölümde 1. seksiyon için LOLP ve LOLE indisleri hesaplanacaktır. Çizelge5.36'da 1. Seksiyonun günlük yükleri ve yük olasılıkları verilmiştir.

Çizelge 5.36 : 1. Seksiyon günlük yükleri ve yük olasılıkları

1. Seksiyon Verileri						
Hattaki Toplam Tren Sayısı [Sıra]	**Süre [Saat]**	**Toplam Yük [kW]**	**Hat-1 yükü [kW]**	**Hat-2 yükü [kW]**	**P(L)**	**Birikmeli yük olasılığı P(L ≤ x)**
8	2	5600	2800	2800	0,083	0,083
6	3	4200	2100	2100	0,125	0,208
4	4	2800	1400	1400	0,167	0,375
3	9	2100	1050	1050	0,375	0,750
2	1	1400	700	700	0,042	0,792
0	5	0	0	0	0,208	1,000

İndisleri hesaplayabilmek için seksiyonun çalışma durumu olasılıklarına ihtiyaç vardır. Bu olasılıklar daha önce hesaplanmış ve çizelge 5.17'de verilmişti. Bu olasılıklar yardımı ile 1. seksiyondaki trafo merkezlerinin çalışır ve devre dışı kalma durumlarının olasılıkları hesaplanmış bu olasılıkları çizelge 5.37'de verilmiştir.

Çizelge 5.37 : 1. Seksiyon çalışma durumu olasılıkları

1. Seksiyon Çalışma Durum Olasılık Tablosu				
Çalışır	**Devre Dışı**	**Devredışı kalan kapasite [kW]**	**Seksiyon 1 Hat - 1 Durum olasılıkları**	**Seksiyon 1 Hat - 2 Durum olasılıkları**
3	0	3600	0,997390849045783	0,997456103648644
2	1	2400	0,002606879095863	0,002541736772613
1	2	1200	0,000002271198774	0,000002158967463
0	3	0	0,000000000659581	0,000000000611280

Çizelge 5.38'de güvenilirlik indislerini hesaplamak için gerekli olan yük fonksiyonları gösterilmektedir. Bu fonksiyonlar çizelge 5.36'daki yük olasılıklarından yararlanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.38 : 1. Seksiyon için Yükün birikmeli olasılığı

k	**Ck**	**Hat 1 ve Hat 2 için yük fonksiyonları**	**F_D (IC-C_K)**
1	0	F_D (3600-0)	0,000
2	1200	F_D (3600-1200)	0,083
3	2400	F_D (3600-2400)	0,375
4	3600	F_D (3600-3600)	1,000

Bu bilgiler ışığında Denklem **(5.14)** ve **(5.15)**'den yararlanılarak LOLP ve LOLE değerleri hesaplanabilir. Hesaplanan değerler çizelge 5.39'da verilmiştir.

Çizelge 5.39 : 1. Seksiyon LOLP ve LOLE değerleri

1. Seksiyon Bölge	LOLP	LOLE [SAAT]
HAT 1	0,000218092	1,910488406
HAT 2	0,000212622	1,862565407

Çizelge 5.39'dan de görüldüğü gibi hesaplamalar sonucunda sistemin yükü karşılayamama beklentisi yılda 1,9 saat olarak elde edilmiştir.

5.7.3 Seksiyon 2 için güvenilirlik indisleri hesabı

Bu bölümde 2. Seksiyon için güvenilirlik indisleri olan LOLP ve LOLE indisleri hesaplanacaktır. Çizelge 5.40'da 2. Seksiyonun günlük yükleri ve yük olasılıkları verilmiştir.

Çizelge 5.40 : 2. Seksiyon günlük yükleri ve yük olasılıklar

2. Seksiyon Verileri						
Hattaki Toplam Tren Sayısı [Sıra]	**Süre [Saat]**	**Toplam Yük [kW]**	**Hat-1' yükü [kW]**	**Hat-2' yükü [kW]**	**P(L)**	**Birikmeli yük olasılığı P(L ≤ x)**
7	2	4900	2450	2450	0,083	0,083
5	3	3500	1750	1750	0,125	0,208
4	4	2800	1400	1400	0,167	0,375
3	9	2100	1050	1050	0,375	0,750
2	1	1400	700	700	0,042	0,792
0	5	0	0	0	0,208	1,000

1. seksiyondaki gibi güvenilirlik indisleri hesaplayabilmek için seksiyonun çalışma durumu olasılıklarına ihtiyaç vardır. Bu olasılıklar daha önce hesaplanmış ve çizelge 5.17'de verilmişti. Bu olasılıklar yardımı ile 2. seksiyon bölgedeki trafo merkezlerinin çalışır ve devre dışı kalma durumlarının olasılıkları hesaplanmış bu olasılıkları çizelge 5.41'de verilmiştir.

Çizelge 5.41 : 2. seksiyon çalışma durumu olasılıkları

2. Seksiyon Çalışma Durum Olasılık Tablosu				
Çalışır	**Devre Dışı**	**Devredışı kalan kapasite [kW]**	**Seksiyon 2 Hat - 1 Durum olasılıkları**	**Seksiyon 2 Hat - 2 Durum olasılıkları**
3	0	3600	0,997390849045783	0,997456103648644
2	1	2400	0,002606879095863	0,002541736772613
1	2	1200	0,000002271198774	0,000002158967463
0	3	0	0,000000000659581	0,000000000611280

Çizelge 5.42'de güvenilirlik indislerini hesaplamak için gerekli olan yük fonksiyonları gösterilmektedir. Bu fonksiyonlar çizelge 5.40'daki yük olasılıklarından yararlanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.42 : 2. Seksiyon için Yükün birikmeli olasılığı

k	**Ck**	**Hat 1 ve Hat 2 için yük fonksiyonları**	**$F_D (IC-C_K)$**
1	0	F_D (3600-0)	0,000
2	1200	F_D (3600-1200)	0,083
3	2400	F_D (3600-2400)	0,375
4	3600	F_D (3600-3600)	1,000

Bu bilgiler ışığında Denklem **(5.14)** ve **(5.15)**'den yararlanılarak LOLP ve LOLE değerleri hesaplanabilir. Hesaplanan değerler çizelge 5.43'de verilmiştir.

Çizelge 5.43 : 2. Seksiyon LOLP ve LOLE değerleri

2. Seksiyon Bölge	**LOLP**	**LOLE [SAAT]**
HAT 1	0,000218092	1,910488406
HAT 2	0,000212622	1,862565407

Çizelge 5.43'dan de görüldüğü gibi hesaplamalar sonucunda sistemin yükü karşılayamama beklentisi yılda 1,91 saat olarak elde edilmiştir.

5.7.4 Seksiyon 3 için güvenilirlik indisleri hesabı

Bu bölümde 3. Seksiyon için güvenilirlik indisleri olan LOLP ve LOLE indisleri hesaplanacaktır. Çizelge 5.44'de 3. Seksiyonun günlük yükleri ve yük olasılıkları verilmiştir.

Çizelge 5.44 : 3. Seksiyon günlük yükleri ve yük olasılıkları

3. Seksiyon Bölge Verileri						
Hattaki Toplam Tren Sayısı [Sıra]	**Süre [Saat]**	**Toplam Yük [kW]**	**Hat-1 yükü [kW]**	**Hat-2 yükü [kW]**	**P(L)**	**Birikmeli yük olasılığı P(L ≤ x)**
7	2	4900	2450	2450	0,083	0,083
5	3	3500	1750	1750	0,125	0,208
4	4	2800	1400	1400	0,167	0,375
3	9	2100	1050	1050	0,375	0,750
2	1	1400	700	700	0,042	0,792
0	5	0	0	0	0,208	1,000

İndisleri hesaplayabilmek için seksiyon bölgenin çalışma durumu olasılıklarına ihtiyaç vardır. Bu olasılıklar daha önce hesaplanmış ve çizelge 5.17'de verilmişti. Bu olasılıklar yardımı ile 3. seksiyondaki trafo merkezlerinin çalışır ve devre dışı kalma durumlarının olasılıkları hesaplanmış bu olasılıkları çizelge 5.45'de verilmiştir.

Çizelge 5.45 : 3. Seksiyon çalışma durumu olasılıkları

3. Seksiyon Çalışma Durum Olasılık Tablosu				
Çalışır	**Devre Dışı**	**Devredışı kalan kapasite [kW]**	**Seksiyon 3 Hat - 1 Durum olasılıkları**	**Seksiyon 3 Hat - 2 Durum olasılıkları**
3	0	3600	0,997390849045783	0,997456103648644
2	1	2400	0,002606879095863	0,002541736772613
1	2	1200	0,000002271198774	0,000002158967463
0	3	0	0,000000000659581	0,000000000611280

Çizelge 5.46'da güvenilirlik indislerini hesaplamak için gerekli olan yük fonksiyonları gösterilmektedir. Bu fonksiyonlar çizelge 5.44'deki yük olasılıklarından yararlanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.46 : 3. Seksiyon için Yükün birikmeli olasılığı

k	**Ck**	**Hat 1 ve Hat 2 için yük fonksiyonları**	**$F_D(IC-C_K)$**
1	0	F_D(3600-0)	0,000
2	1200	F_D (3600-1200)	0,083
3	2400	F_D (3600-2400)	0,375
4	3600	F_D (3600-3600)	1,000

Bu bilgiler ışığında Denklem **(5.14)** ve **(5.15)**'den yararlanılarak LOLP ve LOLE değerleri hesaplanabilir. Hesaplanan değerler çizelge 5.47'de verilmiştir.

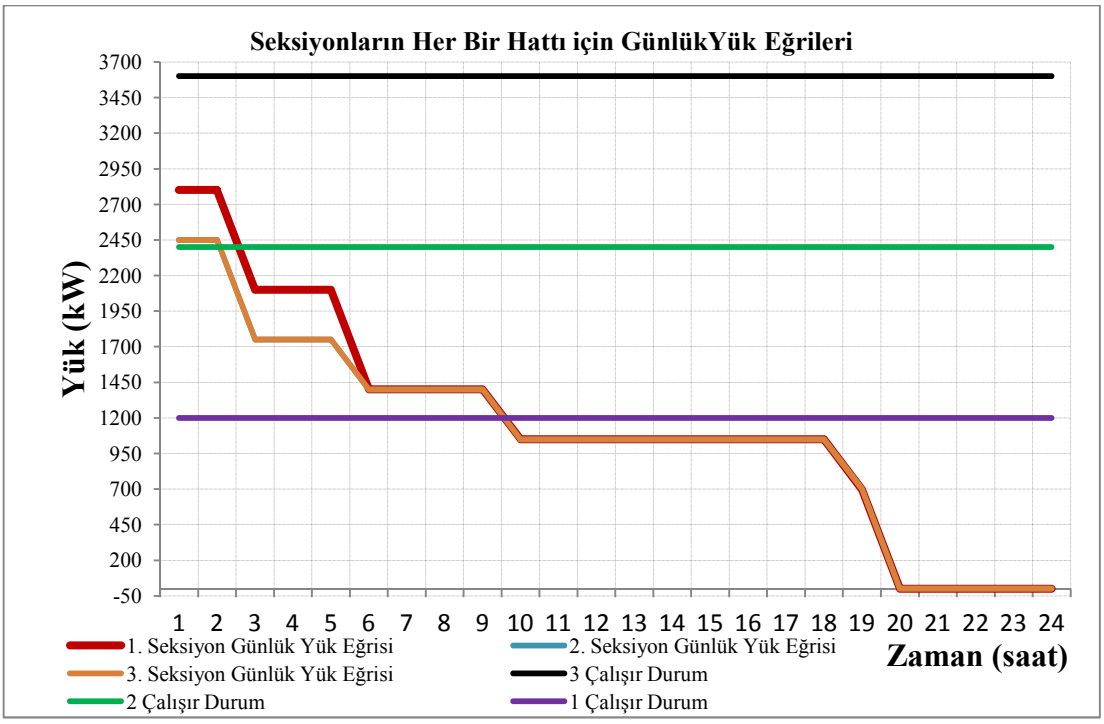
Çizelge 5.47 : 3. Seksiyon LOLP ve LOLE değerleri

3. Seksiyon Bölge	LOLP [YIL]	LOLE [SAAT]
HAT 1	0,000218092	1,910488406
HAT 2	0,000212622	1,862565407

Çizelge 5.47'den de görüldüğü gibi hesaplamalar sonucunda sistemin yükü karşılayamama beklentisi Hat-1'de 1,91 saat, Hat-2'de 1,86 saat olarak elde edilmiştir.

5.7.5 Tüm hattın seksiyonlar bazında yük eğrisi

Seksiyonlar bazında tüm sistemin yük durumları grafiksel olarak şekil 5.34'de gösterilmiştir. Bu tabloda ayrıca her bir seksiyonman bölgedeki trafo merkezlerinin çeşitli çalışma durumu senaryolarına göre hatta verebildikleri güç değerleri de gösterilmiştir.



Şekil 5.34 : Seksiyonların her bir hat için günlük yük eğrileri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Raylı Sistemlerle İlgili Araştırmaların Ülkemiz İçin Önemi

Raylı sistemler uzun yıllardan sonra ülkenizde yeni yeni uygulanmaya ve geliştirilmeye başlamıştır. Bu nedenle bu sistemler için yapılan her çalışma raylı sistemlerin ülkemizdeki gelişimi için büyük önem arz etmekte, yeni çalışmaların da önünü açmaktadır. Ülkemizde ilk raylı sistemler devlet kuruluşu olan TCDD'nin yapımı, işletilmesi ve denetimi altında hayata geçmiştir. Cumhuriyetin ilk dönemi olan 1923-1940 yılları arası raylı sisteme savaş sonrası bir dönem olması ve tüm maddi olanaksızlıklara rağmen büyük önem verilmiş 3208 km [20] demiryolu hattı yapılmıştır. 1940-1960 yılları arası ekonomik imkansızlıklar nedeni ile sadece 370 km yeni demiryolu hattı yapılabilmiştir. 1960-2000 yılları arasında ise raylı sistemler devletin ulaşım politikalarının değişmesi nedeni ile tamamen ikinci plana atılmıştır. Cumhuriyet dönemindeki tüm maddi olanaksızlıklara rağmen senede 240 km demiryolu yapılırken bu ortalama 1960-2000 yılları arasında 39 km'ye inmiştir [20].

2000'li yılların başlarından itibaren raylı sistemlere verilen önem de artmaya başlamış ve bir çok proje hayata geçirilmiştir. Günümüzde ise raylı sistemler çok büyük bir sektör haline gelmiştir. Bununla birlikte raylı sistemlere olan ihtiyaç da gün geçtikçe artmaktadır.

Ülkemizde raylı sisteme olan yatırımların geç yapılması birçok sorunu beraberinde getirmiş ve günümüz de de bu sorunlar kısmen de olsa devam etmektedir. Bu sorunun başlıcalarını ve çözüm yollarını bir kaç madde ile açıklayalım.

6.1.1 Ulaşım Sorunu

Raylı sistemlere olan yatırımın gecikmesi artan nüfus ve ihtiyaçlar sebebiyle gün geçtikçe sorun haline gelmiş ve hatta bazı durumlarda çözülemez noktalara varmıştır. Örneğin İstanbul şu anda Türkiye'de en çok raylı sistemin bulunduğu ve yatırımların sürekli arttığı bir şehir olmasına rağmen raylı sistemlerin eksikliği sebebiyle ulaşım konusunda büyük problemler yaşamaktadır.

13 milyona ulaşan nüfusu sebebi ile birçok Avrupa şehrinin dışında birçok ülkenin nüfusundan fazla nüfusa sahip olan İstanbul'da ulaşım en büyük problemdir. Güncel toplu taşıma yöntemleri özellikle pik saatlerde yetersiz kalmakta, özellikle köprülerde aşırı yoğunluk yaşanmaktadır. Dünyadaki bir çok metropol şehir (Londra, Moskova v.b.) raylı sisteme yıllar öncesinden gerekli yatırımı yapmış ve ulaşım sorununu büyük ölçüde çözmüşlerdir.

Bu nedenle ulaşım sorununun çözümü için raylı sisteme önem verilmesi ve araştırmaların ve yatırımların hızlı bir şekilde artması gerekmektedir. Ülkemizde İstanbul başta olmak üzere Ankara, İzmir, Bursa, Konya, Eskişehir, Kayseri'de raylı sistemlere güncel yatırımlar bulunmakta ve yeni projeler yavaş yavaş uygulanmaya başlamışlardır. Yolcu yoğunluğunun ve nüfus sayısının fazla olduğu şehirlerde raylı sistemler genelde metro olarak tasarlanırken, nüfusu daha az olan şehirlerimizde raylı sistemler hafif metro veya hafif raylı sistemler olarak tasarlanmaktadır. Bununla birlikte TCDD yatırımları gün geçtikçe artmakta ve şehirlerarası hızlı tren (Ankara-Konya Hızlı Treni) projeleri de hayata geçirilmektedir.

6.1.2 Yüksek Maliyetler

Raylı sistemler yatırım maliyetleri oldukça yüksek sistemlerdir. Özelikle istasyonların yeraltında olan metro projeleri maliyetleri 600milyon - 1milyar usd mertebelerine kadar çıkabilmektedir. Hafif raylı sistemlerin yapım maliyetleri 50milyon - 300milyon usd aralığında olabilmektedir. Bu nedenle raylı sistemlere yatırım yapmak özellikle şehir belediyeleri için kolay değildir. Genellikle kaynak yurtdışı kredi kurumları vasıtası ile sağlanmaktadır.

Ülkemizde şehirlerde yapılan ilk raylı sistemler yabancı ortaklı firmalar tarafından yapılmıştır. Günümüzde de bir çok büyük proje yine yabancı ortaklı firmalar tarafından üstlenilmekte ve yapılmakta olmasına rağmen yerli yüklenici firmalar da yavaş yavaş raylı sistem yapımını üstlenmektedir. Burada en önemli eksiklik teknoloji eksikliğidir. Ülkemizde raylı sistemlerin bu derece pahalı olması raylı sistemlerde kullanılan ekipman ve sistemlerin genelde yurtdışından tedarik edilmesi sebebiyledir. Raylı sistemlerde büyük maliyetleri bulunan araçlar, sinyalizasyon sistemleri, raylar, katener sistemleri gibi sistemler ve sistem bileşenleri yurtdışından tedarik edilmektedir.

Yapılması gereken raylı sistemlere malzeme üretebilecek tesislerin kurulması ve devlet tarafından teşvik edilmesidir. Yerli üretimin artması rekabeti arttıracağından maliyetlerin düşmesini sağlayacaktır. Bu da ülke ekonomisinin gelişimini ve canlanmasını beraberinde getirecektir.

6.1.3 Eğitim ve yetişmiş personel

Ülkemizde bazı meslek liselerinde raylı sistemler ile ilgili eğitim olmasına rağmen üniversite düzeyinde raylı sistemlerle ilgili bir bölüm bulunmamaktadır. Raylı sistemler sektörü uzmanlık gerektiren bir sektördür ve raylı sistemlere olan yatırımların artması, sektörde çalışacak yetişmiş ve konusunda uzman mühendis veya personel eksikliğini de beraberinde getirecektir. Ülkemizde 2000'li yıllardan önce raylı sistemlere olan yatırımın azlığı uzman mühendis ve personel eksikliğine sebep olmuştur.

Yeni yapılan raylı sistem uygulamaları ve yeni projeler ülkemizde bu alanda birçok mühendis ve personelin yetişmesine imkan tanıyacaktır. Fakat raylı sistemlerle ilgili uzman kişilerin yetişmesi sadece kişilerin sektördeki çalışmalarından dolayı edineceği tecrübeye bağlı olmamalı, bu kişiler üniversiteler tarafından verilecek önlisans, lisans, yüksek lisans eğitimleri ile desteklenmelidir. Eğitimlerin artması hem sektörde uzman sayısını arttıracak hem de raylı sistemlerle ilgili araştırmaların artmasına sebep olacaktır.

6.2 Çalışmanın Uygulama Alanı

Bu tezde örnek bir hafif raylı sistemin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi yapılmıştır. Bu tezden yola çıkarak raylı sistemlerin bir çok uygulaması için de güvenilirlik analizi yapılabilir. Ülkemizde raylı sistemler ile ilgili araştırma sayısı az olmak ile beraber bu konuda herhangi bir araştırma bulunmamaktadır. Güvenilirlik analizi geçmiş verilere dayanılarak yapılmış bir analizdir. Bu tür araştırmaların artması raylı sistemlerde arıza verilerinin toplanması, arşivlenmesi ve analiz çalışmalarının daha doğru temellerde yapılmasına imkan tanıyacaktır. Geçmiş tecrübelerden elde edilen verilerle yapılan bir güvenilirlik analizi bundan sonra tasarlanacak sistemler için fikir vermek ile birlikte güncel çalışan sistemlerin gelecek çalışma durumunu öngörmede yardımcı olacaktır.

Güvenilirlik analizi çalışmalarının daha doğru yapılması ölçümlerin doğru alınmış olmasına ve istatistiksel verilerin fazlalığı ile bağlantılıdır. Ülkemizde çalışan raylı sistemlerin artması ve çalışma sürelerinin uzunluğu yeni yapılacak analizlere veri olarak geri dönebilirse yeni çalışmaların önü açılmış olacaktır.

Bu tezde yapılan güvenilirlik analizi böyle bir sistemin hangi sürelerde arızalanabileceği ve arızalanma olasılıklarının değişimi hakkında fikir vermektedir. Raylı sistemlerin diğer uygulamaları için bu tür bir güvenilirlik analizi yapılabilir.

6.3 Analiz Sonuçlarının değerlendirilmesi

Güvenilirlik analizi yapılan sistem 15 km'lik bir hafif raylı sistem hattının elektrik güç beslemesidir. Hattı besleyen 9 adet trafo merkezi bulunmakta ve her trafo merkezinin beslediği 9 adet bölge bulunmaktadır. Bölgeler TM-1,TM2,...,TM9 ile adlandırılmışlardır. TM-1,TM-6 ve TM-9 bölgesinde TEAŞ besleme noktaları bulunmaktadır. Bu üç besleme bölgesi referans alınarak sistemin 3 ana seksiyon bölgeden oluştuğu düşünülmüştür.

Her bir trafo merkezi bölgesi 5 adet ana sistemden oluşmuştur. Bu ana sistemler; besleme noktaları, o.g. hücreler, trafo ve doğrultucu grubu, d.c. hücre grubu ve katener sistemleridir. Her bir trafo merkezi bölgesinde bulunan bu ana sistemlerde oluşacak bir arıza o trafo merkezi bölgesinin enerjisiz kalmasına sebep olmaktadır.

Her 3 trafo merkezi bölgesinin birbirine paralel bir şekilde kendi seksiyon bölgesini beslemektedir. Bununla birlikte seksiyon bölgeler seri halde birbirine bağlı bir şekilde hattın tamamını beslemektedir. Seri bağlı bu 3 seksiyon bölge birbirinden bağımsız bölgeler olarak kabul edilmiştir. Bunun anlamı herhangi bir seksiyon bölgesinin arıza durumu ortaya çıktığında diğer seksiyon bölgelerin arızalı bölgeyi besleyemeyeceği düşünülmüştür. Sistemde başarı durumu analizi her bir seksiyonman bölge için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu analizde seksiyonman bölgeyi besleyen 3 trafo merkezinden 1 tanesinin arızalanması durumunun kısıtlı çalışma, 2 tanesinin arızalanması durumunun ise sistem arızası anlamını taşımaktadır. Tüm sisteme bakıldığında uygulamada seksiyon bölgenin arızası sistem arızası anlamına gelmemektedir.

Bir bölge arızalanırsa veya kısıtlı çalışırsa o bölgedeki enerji beslemesinin değerine göre belirli sayıda tren işletmeye devam edecektir. Hatta hiç tren çalışmaması tüm seksiyon bölgelerin enerjisiz kalması anlamına gelmektedir.

Bu tezde güvenilirlik analizi yapılan hafif raylı sistemin tamamen enerjisiz kalma olasılığının son derece düşük olduğu görülmüştür. Çizelge 6.1'de tüm seksiyon bölgelerinin senaryolara göre arızaya kadar olan ortalama süreleri verilmiştir. Bu çizelgeden de anlaşılacağı gibi sistemin sefer sıklığını etkileyecek arıza durumu (senaryo 2)'nin gerçekleşme olasılığı çok düşüktür.

Çizelge 6.1 : Seksiyon bölgelerin arızaya kadar olan süreleri

Bölge ve MTTF	**1. Senaryo**	**2. Senaryo**
MTTF Hat-1 (Yıl)	0,34940601	201,0479983
MTTF Hat-2 (Yıl)	0,358384403	211,4992589

Bununla birlikte bölüm 5.6'da sistemin güvenilirlik indisleri hesaplanmış ve her bir seksiyon bölgenin senedeki yük kaybı olasılığı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu indisler çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Tüm seksiyonlar için LOLP ve LOLE indisleri

	LOLP	**LOLP [SAAT]**
Seksiyon 1, Seksiyon 2 ve Seksiyon 3		
HAT 1	0,000218092	1,910488406
HAT 2	0,000212622	1,862565407

Çizelge 6.2'de de gösterildiği gibi hesaplanan sonuçlara göre seksiyon bölgelerdeki hatlarda senede 1,86 ile 1,91 saat arasında değişen değerlerde yük kaybı beklentisi olacağı görülmektedir. Bu değerlerden anlaşılacağı gibi işletmenin aksaması durumu çok düşük bir olasılıktır. İşletmede yükün karşılanamadığı durumlarda bile tren seferleri hatta çıkarılan tren sayısı düşürülerek devam etmektedir.

Bu bilgilerden yola çıkarak daha sonraki araştırmalarda çeşitli performans indisleri belirlenebilir. Belirlenen bu indisler ile sistemin çeşitli yük koşullarında ne kadar süre ile çalışacağı, arızanın ne kadar süreyle tamir edilebileceği, sistemin tam yükünde tekrardan ne kadar sürede çalışacağı, sistemin çalışmaması durumunda işletmeye ne kadar maliyeti olacağı gibi ihtiyaca göre bir çok yeni analiz yapılabilir.

6.3.1 Güvenilirliği arttırmanın yöntemleri

Analizden elde edilen sonuçlar tüm sistemin enerjisiz kalma olasılığının oldukça düşük olduğunu göstermiştir. Raylı sistemlerde birbirine seri bağlı ve sistemin arızalanmasına neden olacak bir çok sistem bulunmaktadır. Herhangi bir elemanda arıza meydana gelmesi tüm sistemi etkileyebilmektedir.

Hafif raylı sistemlerde enerji beslemesinin en kritik olduğu dönemler pik saatlerdir. Pik saatlerin dışında oluşacak genel arızalar yolcu taşınmasını etkilemeyecektir. Bu nedenle alınacak tedbirler pik saatlerdeki tam yüklü durumlar için alınmalıdır.

Sistemi oluşturan en önemli elemanlar Cer trafoları ve D.C. hücrelerdir. Bu sistemlerde arıza olasılığı yüksek olduğu için kritik durumlarda sistemin enerjisiz kalması durumunu minimize etmek amacı ile bu sistemler yedekli olarak tasarlanmıştır.

Cer trafolarının ve D.C. hücrelerin yedekli olması sistemin güvenilirliğini arttırmaktadır. Trafo merkezleri birbirlerine ring kablolar ile bağlı oldukları için sistemin besleme noktaları da tam fazlalıklı yedekli sistemlerdir. Sistemde yedekli olmayan sadece O.G. panolar ve katener sistemlerdir. Katener sistemleri mekanik sistemler oldukları için arızalanma olasılıkları düşüktür. Oluşan arızalar direk devrilmesi, tel kopması gibi çok zor karşılaşılabilecek arızalardır. Bu nedenle sistemde en zayıf noktanın o.g. panolar olduğu açıktır. O.G. panolar diğer sistemlere göre müdahalesi daha kolaydır. Arıza giderme ve devreye alma işlemi daha hızlıdır. Yani yedekleme yapılması çok da mantıklı değildir. Bununla birlikte raylı sistemler işletmeye alındıktan sonra değiştirilmesi ve geliştirilmesi zor sistemler olmakla beraber pahalı sistemlerdir.

Böyle bir sistemde güvenilirliği arttırmak için yedeklemeyi arttırmak yerine bakıma ve işletmeye önem verilmedir. Raylı sistemleri oluşturan elemanlar hassastır ve işletme koşullarının değişiminden ve bakım eksikliğinden çabuk etkilenebilmektedirler. Sistemde oluşan arızanın hemen tespiti için de işletmenin tetikte olması ve arızaya hazır olması gerekmektedir. Bu nedenle bakım ve işletmede alınacak ek tedbirler sistemin güvenilirliğini arttıracaktır.

KAYNAKLAR

[1]**Url-1**<*http://tr.wikipedia.org/wiki/Demiryolu*>, alındığı tarih: 28.04.2011.

[2]**Üstünışık, B. ve Bayazıt, S.** (1996). Türkiyede Kentsel Ulaşım Planlaması Yaklaşımları ve Kent İçi Raylı Taşımacılık Projeleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 384,Ankara, sf53-62.

[3]**Url-2** <*http://www.istanbul-ulasim.com.tr/default.asp?page=raylisistemler&category=t1*>, alındığı tarih: 15.06.2011.

[4]**Url-3**<*http://tr.wikipedia.org/wiki/H%C4%B1zl%C4%B1_tren*>, alındığı tarih: 21.06.2011.

[5]**Url-4**<*http://en.wikipedia.org/wiki/Moscow_Monorail*>, alındığı tarih: 21.06.2011.

[6] **UITP** (2001). Yaşanabilir Şehirler için Hafif Raylı Sistemler, UITP bilgilendirme dosyası.

[7]**Demirer, O.** (1995). Elektrikli ulaşım sistemleri besleme düzenlerinin incelenmesi, değerlendirilmesi ve optimizasyonu, doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, sf 15-17

[8]**Url-5**<*http://www.siemens.com.tr/web/109-469-1-1/siemens_tr/urunler_ve_cozumler/ray_elektrifikasyonu/demiryollari_elektrifikasyonu*>, alındığı tarih: 21.06.2011.

[9]**Kulesz, B.** (2005). Rectifier Transformers In Electrıc Traction Substations – Different Designs Transport – 2005, Vol XX, No 2, 66–72

[10]**Url-6** <*http://www.railway-technical.com/etracp.shtml*>, alındığı tarih: 02.09.2011.

[11]**Açıkbaş S.** (2008). Çok hatlı çok araçlı raylı sistemlerde enerji tasarrufuna yönelik sürüş kontrolü, doktora tezi, i.t.ü.

[12]**Özdemir, A.** (1996). Güvenilirlik analizi ve elektrik enerji sistemlerine uygulanması, ders notları, bölüm 3.

[13]**Klutke, G.A, Kiessler, P.C. ve Wortman, M.A.** (2003). A Critical Look at the Bathtub Curve, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 52, No. 1.

[14]**Billinton, R. ve Allan, R.N.** (1983). Reliability Evaluation of Engineering Systems, Plenum Press (1st Ed.), Sf 62-79.

[15]**Billinton, R. ve Allan, R.N.** (1983). Reliability Evaluation of Engineering Systems, Plenum Press (1st Ed.), Sf 174-176.

[16]**Söylemez, M.T. ve Açıkbaş, S.** (2005). DC Beslemeli Raylı Ulaşım Sistemlerinin Simülasyonu, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, İstanbul, sf 492-495.

[17]**Özdemir, A.** (1998). Güvenilirlik analizi ve elektrik enerji sistemlerine uygulanması, ders notları, Bölüm 1.

[18]**Nurşen, D.** (2002). Elektrik güç sistemlerinde güvenilirlik analizi, yüksek lisans tezi, i.t.ü., sf 27-29..

[19]**Url-7** <*http://www.istanbul-ulasim.com.tr/default.asp?page=raylisistemler&category=t4*>, alındığı tarih: 26.10.2011.

[20]**Url-8** <*http://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye_Cumhuriyeti_Devlet_Demiryollar%C4%B1*>, alındığı tarih: 10.12.2011.

[21]**Özdemir, A.** (1998). Güvenilirlik analizi ve elektrik enerji sistemlerine uygulanması, ders notları, Bölüm 9

[22]**Phoon, H. Y.** (2006). Generation System Reliability Evaluations with Intermittent Renewables, Strathclude University Energy Systems and Environment, yüksek lisans tezi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Tayfun AYDIN

Doğum Yeri ve Tarihi: Hopa, 21.06.1984

Adres: Atatürk Cad. Osman Nuri Ergin Sok. Çağatay Apt. 3/3 Erenköy / İST.

E-Posta: tayfunaydin1@gmail.com

Lisans: Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 5 Yıl - Raylı Sistem Sektörü