İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüsnü ERSALICI

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüsnü ERSALICI
(504081036)

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **504081036** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hüsnü ERSALICI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN 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	.....
	Prof. Dr. Canbolat UÇAK Yeditepe Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **6 Haziran 2012**

Aileme;

ÖNSÖZ

Enerji, endüstriyel faaliyetleri ve günlük yaşamımızdaki faaliyetleri gerçekleştirilebilmesi için gerekli bir kaynaktır. Enerji kaynakları içerisinde elektrik enerjisi en önemli noktadadır. Elektrik enerjisi, kullanımı sürekli artan bir yapıda olup, günümüz koşullarında rekabet ortamında hayatta kalınabilmesi için doğru yönetim süreçlerine gereksinim duyan bir medeniyet aracıdır.

Her geçen gün artan talebinin karşılanabilmesi, ekonomik, kaliteli ve sürekli elektrik enerjisi ihtiyaçları göz önüne alındığında tüm sistem elemanlarının analizi ve gelecek planlamasının gerekliliği ortaya koyacaktır. Yapılan analizler sonucu sistem güvenilirliği ortaya konulup ileriye yönelip bakım, onarım ve iyileştirme planlamasına referans olabilecektir.

Bu çalışmada, elektrik enerjisinin tüketicilere ulaştırılmasındaki adımlar incelenip, geçmiş periyotlarda ortaya çıkan arıza verileri yardımıyla güvenilirlik değerlendirmesi uygulaması yapılmıştır. Ülkemiz gibi gelişen ülkelerde bu tip çalışmalara daha fazla destek verilmesini ve yaptığım bu tez çalışmasının dağıtım sitemlerinin güvenilirlik değerlendirmesi, bakım planlaması ve sistemi geliştirmeye yönelik çalışmalara 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 aileme ve ailemden ayırmadığım dostlarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mayıs 2012

Hüsnü ERSALICI
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 1
1.2 Literatür Özeti 1
2. GÜVENİLİRLİK TANIMI VE GENEL KAVRAMLAR **3**
2.1 Güvenilirlik Tanımı 3
2.1.1 Güvenilirliğin önemi 3
2.1.2 Sistem modellemesi 4
2.1.3 Sistem tipleri 4
2.1.3.1 Onarımsız (belirli bir göreve koşullanmış) sistemler 4
2.1.3.2 Onarımlı (sürekli devrede olan) sistemler 5
2.2 Güvenilirlik Kavramları Ve Fonksiyonları 6
2.2.1 Sürekli işletimde olan sistemlerde arıza – tamir döngüsü 9
2.2.2 Kullanılabilirlik 12
2.3 Onarımlı, Sürekli Devrede Olan Sistemler İçin Bağlantı Şekilleri 12
2.3.1 Seri bağlı fazlalıksız sistemler (non-redundant series systems) 13
2.3.2 Paralel bağlı fazlalıklı sistemler (redundant systems) 15
2.3.3 Karma sistemler (seri + paralel bağlı sistemler) 18
2.3.4 Yedek fazlalıklı sistemler (standby redundant systems) 18
2.3.5 Karmaşık sistemler 20
2.3.5.1 Minumum kesme yöntemi (Cut-set method) ve arıza olasılığının bulunması 20
3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ **23**
3.1 Güç Dağıtım Sistemleri İçin Güvenilirliğin Anlamı 23
3.2 Güç Sistemlerinde Güvenilirliğin Gerekliliği 23
3.2.1 Geçmiş değerlendirmeler ışığında güvenilirlik analizi 23
3.2.2 Güç sistemlerinde güvenilirlik analizinde kullanılan datalar 24
3.2.2.1 Kesintiler 24
3.2.2.2 Arızalı donanım 24
3.2.2.3 Arıza süresi 24
3.2.2.4 Arıza sırasındaki çevre koşulları 25
3.2.2.5 Sitemin yer aldığı coğrafi konum 25
3.3 Güvenilirlik Analizde Güç Sistemlerinin İşlevleri Bakımından Kademleri 25
3.3.1 Birinci aşama - üretim seviyesi 26
3.3.2 İkinci aşama - üretim ve iletim seviyesi 26

3.3.3 Üçüncü aşama - üretim, iletim ve dağıtım seviyesi 27
3.4 Güç Sistemlerinde Kullanılan Güvenilirlik İndisleri 27
3.4.1 Sistemin ortalama kesinti sıklığı indisi (SAIFI) 27
3.4.2 Sistemin ortalama kesinti süresi indisi (SAIDI) 28
3.4.3 Tüketici ortalama kesinti sıklığı indisi (CAIFI) 28
3.4.4 Tüketici ortalama kesinti süresi indisi (CAIDI) 29
3.4.5 Ortalama servis kullanılabilirliği indisi (ASAI) 29
3.4.6 Diğer indisler 30
3.5 Güç Sistemlerinde Güvenilirlik Maliyet İlişkisi 31
3.6 Sistem Modellemesi 32
3.6.1 Markov modeli 32
4. GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN GÜVENİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ UYGULAMASI 37
4.1 İndirici Merkez (154 / 34,5 kV) Tanımı 37
4.2 İndirici Merkez Bağlantı Tipleri Ve Bunlara Göre Güvenilirlik Analizi 39
4.2.1 Tek bara sistemi 40
4.2.1.1 Tek bara sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi 41
4.2.2 Bölünmüş baralı sistem 57
4.2.2.1 Bölünmüş baralı sistem için güvenilirlik değerlendirmesi 59
4.2.3 Bir buçuk kesici sistemi 71
4.2.3.1 Bir buçuk kesici sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi 72
4.2.4 Halka (ring) bara sistemi 81
4.2.4.1 Halka bara sistem için güvenilirlik değerlendirmesi 82
4.2.5 Çift Bara Çift Kesicili Sistemi 93
4.2.5.1 Çift bara çift kesicili sistem için güvenilirlik değerlendirmesi 95
4.2.6 Sistemlerin güvenilirlik indislerinin karşılaştırılması 104
4.3 İletim Sistemlerinin Tanımı 106
4.3.1 İletim sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi 106
4.4 Dağıtım Sistemlerinin Tanımı 113
4.4.1 Dağıtım sistemleri için güvenilirlik değerlendirmesi 114
4.4.1.1 Dağıtım sistemi-A için güvenilirlik değerlendirmesi 118
4.4.1.2 Dağıtım sistemi-B için güvenilirlik değerlendirmesi 121
4.4.1.3 Dağıtım sistemi-C için güvenilirlik değerlendirmesi 124
4.5 LOLE ve LOLP Hesabı 128
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 131
5.1 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler 132
KAYNAKLAR 137
EKLER 139
ÖZGEÇMİŞ 147

KISALTMALAR

λ	**:** Arıza hızı
μ	**:** Onarım hızı
R	**:** Güvenilirlik (reliability)
Q	**:** Güvenilmezlik
A	**:** Kullanılabilirlik
U	**:** Kullanılamazlık
LOLP	**:** Yük kaybı olasılığı (Loss of load probability)
LOLE	**:** Beklenen yük kaybı (Loss of load expectation)
MTTF	**:** Ortalama arıza zamanı (Mean time to failure)
MTTR	**:** Ortalama tamir süresi (Mean time to repair)
MTBF	**:** Arızalar arası ortalama süre (Mean time between failures)
f	**:** Frekans
t	**:** Zaman
sa	**:** Saat
m^2	**:** Metrekare
AC	**:** Altenatif Akım
kW	**:** Kilowatt
kVA	**:** Kilovolt Amper
MVA	**:** Megavolt Amper
kV	**:** Kilovolt
V	**:** Volt
AG	: Alçak gerilim
OG	**:** Orta gerilim
YG	**:** Yüksek gerilim

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : İndirici merkez şalt sahası ekipmanlarına ait datalar. 40
Çizelge 4.2 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_7 Arası). 49
Çizelge 4.3 : Güvenilmezlik fonksiyonu (kesitleme kesişimleri). 50
Çizelge 4.4 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (tek bara). 52
Çizelge 4.5 : Olay ağacında 2S'e karşılık gelen durumlar. 53
Çizelge 4.6 : Olay ağacında S'e karşılık gelen durumlar. 54
Çizelge 4.7 : Olay ağacı olasılıklarının belirlenmesinde kullanılan datalar. 55
Çizelge 4.8 : 2S, S ve O (Arıza) Çalışma olasılıkları. 56
Çizelge 4.9 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_7 Arası). 68
Çizelge 4.10 : Güvenilmezlik fonksiyonu pozitif(∑ **(+)**). 68
Çizelge 4.11 : Güvenilmezlik fonksiyonu (kesitleme kesişimleri). 69
Çizelge 4.12 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesişim(∑ **(-)**). 69
Çizelge 4.13 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (bölünmüş bara)..... 70
Çizelge 4.14 : Güvenilimezlik fonksiyonu (C_1-C_7 Arası). 79
Çizelge 4.15 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesişim kümeleri (∑ **(-)).** 79
Çizelge 4.16 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (bir buçuk kesici)..... 80
Çizelge 4.17 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_{10} Arası). 90
Çizelge 4.18 : Güvenilmezlik fonksiyonu pozitif(∑ **(+)**). 91
Çizelge 4.19 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesitleme kesişim(∑ **(-)**)..... 91
Çizelge 4.20 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (halka bara). 92
Çizelge 4.21 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_{10} Arası). 101
Çizelge 4.22 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesitleme kesişimi. 102
Çizelge 4.23 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesitleme kesişimi (∑ **(-)**)..... 102
Çizelge 4.24 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri(çift bara, çift kesici)... 103
Çizelge 4.25 : İndirici merkez farklı bağlantı tiplerine göre mttf değerleri..... 104
Çizelge 4.26 : İndirici merkezlere ait oransal maliyet değerleri [12]..... 105
Çizelge 4.27 : İletim sistemi güvenilirlik değerlendirmesi için sistem dataları..... 107
Çizelge 4.28 : İletim sistemine ait hesaplanan güvenilirlik verileri..... 110
Çizelge 4.29 : Bara-2' ye ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri..... 111
Çizelge 4.30 : Bara-2' ye ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri..... 111
Çizelge 4.31 : Bara-3' e ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri. 112
Çizelge 4.32 : Bara-3' e ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri. 112
Çizelge 4.33 : Dağıtım sistemi-A ana besleme hattı arıza verileri. 115
Çizelge 4.34 : Dağıtım sistemi-A yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri..... 115
Çizelge 4.35 : Dağıtım sistemi-A yük noktalarına ait güç ve kullanıcı bilgileri. 115
Çizelge 4.36 : Dağıtım sistemi-B ana besleme hattı arıza verileri. 116
Çizelge 4.37 : Dağıtım sistemi-B yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri. 116
Çizelge 4.38 : Dağıtım sistemi-B yük noktalarına ait güç ve kullanıcı bilgileri..... 116
Çizelge 4.39 : Dağıtım sistemi-C ana besleme hattı arıza verileri. 117
Çizelge 4.40 : Dağıtım sistemi-C yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri. 117
Çizelge 4.41 : Dağıtım sistemi-C yük noktalarına ait güç ve kullanıcı bilgileri..... 117

Çizelge 4.42 : Dağıtım sistemi-A için analiz sonuçları. 120
Çizelge 4.43 : Dağıtım sistemi-A için performans indisleri sonuçları. 121
Çizelge 4.44 : Dağıtım sistemi-B için analiz sonuçları. 123
Çizelge 4.45 : Dağıtım sistemi-B için performans indisleri sonuçları. 124
Çizelge 4.46 : Dağıtım sistemi-C için analiz sonuçları. 126
Çizelge 4.47 : Dağıtım sistemi-C için performans indisleri sonuçları. 128
Çizelge 4.48 : Sisteme ait yükler ve yük olasılıkları. 129
Çizelge 4.49 : İndirici merkez çalışma durumları ve olasıkları. 129
Çizelge 4.50 : Yük fonksiyonları. 129
Çizelge 5.1 : Performans indisleri ortalama değerleri [21]. 134
Çizelge 5.2 : Performans indisleri karşılaştırması. 135
Çizelge A.1: Olay ağacı (1-36.durumlar)……....140
Çizelge A.2: Olay ağacı (37-77.durumlar)…..……....141
Çizelge A.3: Olay ağacı (78-118.durumlar)……....142
Çizelge A.4: Olay ağacı (119-159.durumlar)…..……....143
Çizelge A.5: Olay ağacı (160-200.durumlar)……..……....144
Çizelge A.6: Olay ağacı (201-241.durumlar)……..……....145
Çizelge A.7: Olay ağacı (242-256.durumlar)..……....146

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Onarımsız sistemin zamana göre davranışı [9]…….. 5
Şekil 2.2 : Onarımlı sistemin zamana göre davranışı [3]……5
Şekil 2.3 : Küvet karakteristiği [3]……... 8
Şekil 2.4 : Arıza tamir döngüsü [3]…… 9
Şekil 2.5 : Sürekli işletimde olan bir elemana ait durum uzay diyagramı [9]…….... 10
Şekil 2.6 : Tek elemanlı sistem için durum geçiş diyagramı…… 11
Şekil 2.7 : Seri bağlı sistem blok diyagramı…….. 13
Şekil 2.8 : Paralel bağlı sistem blok diyagramı…… 16
Şekil 2.9 : Karma sistem blok diyagramı……... 18
Şekil 2.10 : Yedek fazlalıklı sisteme ait blok diyagramı……... 19
Şekil 2.11 : Yedek fazlalıklı sistem sürekli çalışma blok diyagramı…… 19
Şekil 2.12 : Karmaşık yapılı bir sisteme ait blok diyagramı [3]…… 20
Şekil 2.13 : Örnek bir blok diyagram…… 21
Şekil 2.14 : Temel kesitlemelerin ardından blok diyagram……... 21
Şekil 3.1 : Güç sistemleri güvenilirlik analizinde aşamalı seviyeler [4]. 25
Şekil 3.2 : Güvenilirlik – maliyet grafiği [3]. 32
Şekil 3.3 : Onarılabilir bir birimin markov modeli. 33
Şekil 3.4 : İki durumlu bir sistemde güvenilirlik ve kullanılabilirlik. 34
Şekil 4.1 : Tipik şalt sahası [8]. 37
Şekil 4.2 : Tek bara sistemine ait bir kesit [10]. 40
Şekil 4.3 : Tek bara sistemi blok diyagramı. 41
Şekil 4.4 : Tek bara sistem eşdeğer blok diyagramı. 44
Şekil 4.5 : Tek bara sistemi hata ağacı diyagramı. 51
Şekil 4.6 : Tek baralı sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği. 52
Şekil 4.7 : İki durum iki birimli markov modeli ve yaklaşık eşdeğeri [3]. 56
Şekil 4.8 : Bölünmüş baralı sisteme ait bir kesit [10]. 58
Şekil 4.9 : Bölünmüş baralı sistem blok diyagramı [11]. 59
Şekil 4.10 : Bölünmüş baralı sistem eşdeğer blok diyagramı. 61
Şekil 4.11 : Bölünmüş baralı sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği. 71
Şekil 4.12 : Bir buçuk kesici sistemine ait bir kesit [11]. 71
Şekil 4.13 : Bir buçuk kesici sistem blok diyagramı [11]. 73
Şekil 4.14 : Bir buçuk kesici sistem eşdeğer blok diyagramı. 75
Şekil 4.15 : Bir buçuk kesicili sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği. 81
Şekil 4.16 : Halka bara sistemine ait bir kesit [10]. 81
Şekil 4.17 : Halka bara sistemi blok diyagramı [11]. 83
Şekil 4.18 : Halka bara sistem eşdeğer blok diyagramı. 85
Şekil 4.19 : Halka bara sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği. 93
Şekil 4.20 : Çift bara çift kesicili sisteme ait bir kesit [11]. 94
Şekil 4.21 : Çift bara çift kesicili sistem blok diyagramı [11]. 95
Şekil 4.22 : Çift bara çift kesicili sistem eşdeğer blok diyagramı. 96

Şekil 4.23 : Çift bara çift kesicili sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği. 103
Şekil 4.24 : Farklı bağlantı tiplerine göre güvenilirlik-zaman grafiği. 104
Şekil 4.25 : Farklı bağlantı tiplerine göre MTTF ve maliyet karşılaştırılması. 105
Şekil 4.26 : İletim devresi modeli [18]. 106
Şekil 4.27 : Bara-2 noktası için güvenilirlik – zaman grafiği. 111
Şekil 4.28 : Bara-3 noktası için güvenilirlik – zaman grafiği. 112
Şekil 4.29 : Basit bir dağıtım sistemi. 113
Şekil 4.30 : Güvenilirlik analizi yapılacak olan dağıtım şebekeleri (A-B-C). 114
Şekil 4.31 : Düzenlenmiş yük eğrisi. 128

ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

ÖZET

Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtımını yapan kurumlar ve bu kurumların hizmet sunduğu tüketiciler için enerji kalitesi son yıllarda daha da önem kazanmıştır. Kesintisiz ve sürekli elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanabilmesi için güç sistemlerinde güvenilirlik analizi yapılması gerekmektedir. İşletme sırasında ortaya çıkabilecek sorunları çözmek için öncelikle sistemli bir çalışma yapılması, elde edilen verilere bağlı olarak bir güvenilirlik değerlendirmesi yapılması gerekmektedir.

Güvenilirlik bir sistemin tanımlı olan görevini belirli bir zaman aralığında başarma olasılığıdır. Güvenilirlik analizi yapılabilmesi için sistemin daha önceki çalışma periyotları dikkate alınarak sistemin arızasız ve arızalı gibi durumları arasındaki geçişi ifade eden arıza hızı, arızalı durumdan sağlam duruma bir onarım sonrası geçişi ifade eden onarım hızı gibi kavramlarla birlikte, bunlara bağlı olarak ifade edilebilen arızalar arası ortalama süresi, ortalama tamir süresi gibi kavramlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tezde ana indirici trafo merkezi dahil olmak üzere, iletim ve dağıtım sistemi için güvenilirlik değerlendirilmesi yapılmıştır. Elektrik güç sisteminin üretim, iletim ve dağıtım gibi fonksiyonlara sahip olduğu düşünüldüğünde bu çalışma iletim sisteminin bir bölümünü ve dağıtım sistemi ile ilgili güvenilirlik analizlerini içermektedir. Elektrik güç sisteminin büyüklüğü ve karmaşıklığı nedeniyle sistemin fonksiyonel alt bölgelere ayrılarak incelenmesi literatürde de sıklıkla görülen bir durumdur. Çalışmada önce farklı yapıdaki çeşitli indirici trafo merkezleri için güvenilirlik ifadeleri elde edilmiş, sonra tasarlanmış olan iletim ve dağıtım modelinde tüketici yük noktalarına kadar olan iletim sistemini güvenilirlik incelemesi yapılmıştır. Daha sonra güvenilirliği en düşük indirici trafo merkezi tipi olan tek baralı sistem ele alınıp tasarlanan iletim sistemi ile beraber elektrik enerjisinin tüketiciye ulaşan en bölümü olan ve farklı karakterdeki yükler için dağıtım sistemi güvenilirlik değerlendirmesi yapılmıştır. Buna uygun olarak tez aşağıdaki bölümlerden oluşmuştur.

Bölüm 1'de elektrik güç sistemleri için güvenilirliğin öneminden bahsedilmiş ve konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar belirtilmiştir.

Bölüm 2'de güvenilirlik tanımı ve güvenilirlik analizinde kullanılan genel kavramlardan bahsedilmiştir. Sistemin güvenilirlik ifadeleri, fiziksel bağlantılarına uygun olarak seri, paralel ve karmaşık tipte blok diyagram modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu esas itibari ile görev yönelimli bir sistem modeline karşı gelmektedir, ancak onarılabilir sistemlerde güvenilirlik merkezli bakım için, öngörülen kullanılabilirlik için onarım hızlarının belirlenmesi oldukça önemli olmaktadır. Bu nedenle tezde yer almıştır.

Bölüm 3' de güç sistemleri için güvenilirliğin anlamı ve gerekliliği üzerinde durulmuştur. Yine bu bölümde güvenilirlik analizinde kullanılan performans indisleri

ve bunları hesaplama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Ardından güvenilirlik maliyet ilişkisi anlatılmış ve sistem modellemelerinden Markov modelinden bahsedilmiştir.

Bölüm 4' de güvenilirlik değerlendirmelerinde ilk önce indirici trafo merkezleri ele alınmıştır. Beş farklı tipteki indirici merkez için ayrı ayrı güvenilirlik fonksiyonları bulunmuş ve güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmıştır. İndirici merkezlerin ardından model alınan bir iletim sistemi için güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmıştır. İndirici trafo merkezi tipleri içerisinde güvenilirliği en düşük olan bağlantı tipi ve model alınan iletim sistemi ile beraber farklı noktalarda ve farklı yapılardaki dağıtım şebekeleri için güvenilirlik dataları ve performans indisleri saptanmıştır.

Son bölümde ise elde edilen sonuçlar ve performans indisleri doğrultusunda tüm sisteme ait güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmış ve güvenilirliği artırma yollarından bahsedilmiştir.

RELIABILITY ANALYSIS IN THE ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEMS

SUMMARY

The quality of energy gained more importance in recent years for the electrical energy generation, transmission and distribution institutions and the consumers of these institutions. Main function of electric power systems is to provide the consumers with economic, high-quality and acceptably reliable energy.

Reliability analysis should be performed on power systems to meet this need. To solve the problems which might arise during operation, firstly a systematic work should be conducted and reliability assessment should be performed based on the obtained data.

Reliability refers to the probability of achieving a certain task defined for a system in a certain period of time. The concepts such as failure rate, mean time between failures, mean time to repair which appeared in previous working period of the system are needed to conduct a reliability analysis.

In this thesis study, separate reliability assessments were conducted for substation, transmission system and distribution system in electric power systems. Among these, substation relieability was evaluated according to five different connection types. Then, reliability evaluation was performed for the system with the lowest reliability among the substations in such a way to include the modeled transmission system and the entire distribution system which constitutes the final part of the electric energy offered to the consumers.

In Chapter 1, Information about the subject and content of the study was presented in. Reliability evaluations were made on the aim of the study and applications in engineering. Finally, previous studies in the literature were presented in this section.

In Chapter 2, the reliability was defined and the importance of reliability was explained. General concepts and indexes about the system were explained; reliability models, basic reliability concepts and reliability system types were analyzed. Information was given about cut-set method, which is one of the solution methods of complex systems which is the most frequently encountered system among system types.

Chapter 3 mainly concentrated on the meaning and necessity of reliability for power systems. Data used in analysis of reliability systems was analyzed and interruptions in electric energy systems were also evaluated in this chapter. In addition, evaluation stages in terms of the functions of power systems were explained. Then, performance indexes and calculation methods of these indexes were analyzed. Optimum cost rate, which is the most important subject in system design, was evaluated and the chapter was completed with the expression of Markov Model.

In Chapter 4, reliability evaluation application was conducted for power systems. The first section, where reliability analysis was performed, was conducted for the systems of substations at different types and structures. Five different types were

preferred as system model: single bus system, sectionalized bar system, breaker and a half system, ring bus system and double bus double breaker system.

Firstly single bus system was analyzed among substation systems. Reliability function for this bus system was firstly calculated by cut-set method. Then, it was indicated that the same reliability function can be found with fault tree method.

Following the reliability function, mean time to failure of the system was calculated according to the assumption of constant failure rate. This time was calculated as 4.53 years according to the analyzed failure data. Although single bus systems are the systems with the lowest reliability level, this time was found to be still high.

However, transmission systems have an approximately 85% impact on reliability in an electrical power system consisting of production, transmission and distribution system. It was found that the obtained result for the substation was at a reliable level.

Secondly,sectionalized bus system was analyzed among substation connection types. Like in single bus system, reliability function was obtained by cut-set method and then mean time to failure of the system was calculated as 6.71 years with the assumption of constant failure rate.

Although this time seems as a high value at first sight due to above mentioned reasons, it is a reliable value. In addition, that, it was found that sectionalized bus system was a more reliable system than single bus system as expected by the sectionalizing of the entrance bus to which energy input lines are connected.

Thirdly, breaker and a half system was analyzed among substation connection types. According to the analysis performed within this system, mean time to failure was calculated as 23.87 years. In this system, where particularly bus safety is given prominence, due to high maneuver possibilities, this value was an expected one.

When other connection types are analyzed, although this system is the most reliable one, it is not preferred particularly in European countries. This system is mostly preferred in Northern America. The reasons for not preferring this system can be the high cost of the system and incompatibility of the existing systems with this structure.

Fourthly, ring bar system was analyzed among substation connection types. Mean time to failure was calculated using a similar method used in previously explained connection types. Mean time to failure was calculated as 8.73 years. When evaluated in terms of system costs, this system was expected to yield a higher value than single bus and sectionalized bus systems.

Lastly, double bus double breaker system was analyzed among substation types was. Using the same method used in previously explained systems, mean time to failure was calculated as 15.61 years in this system. These structures, which are particularly preferred in high-capacity systems are not preferred much due to high cost and requirement of a high-dimension facility area.

After finding reliability functions of substations at different types, a reliability evaluation was conducted for the transmission systems, which provide the connection between substations and distribution systems. According to the formed failure data and analyzed transmission system model, reliability evaluation of the section which was indicated as bus-2 was performed for two different situations. These situations are the inclusion and exclusion of the transmission line which is indicated as line-4 in the system. In case the transmission line, which is indicated as

line-4,was included in the system, failure rate was found to be 0.0008949 failure/year. On the other hand, when line-4 was included in the system, failure rate became 0.0000009807 failure/year.

This result proves that inclusion of a parallel line in the system has a positive impact on system reliability. Similar to Bus-2, in reliability evaluations conducted for Bus-3, it was observed that when Line-4 was not included in the system, failure rate was 0.3008949 failure/year; on the other hand, when line-4 was included in the system failure rate decreased to 0.000275 failure/year. Similar to the case in Bus-2, this result indicates that inclusion of a parallel line in the system had a positive impact on system reliability.

Following reliability evaluations for the modeled transmission system, a model was formed for distribution systems which are the final part of electric energy offered to the consumers.

Reliability evaluations were carried out using failure data which was used based on applications in practice and experiences.

Firstly evaluated distribution network was distribution system A. There were 3 distribution substations in distribution system A. Of these distribution substations, two served to residental load while one served to industrial loads.

Secondly evaluated distribution network was distribution system B. There were 3 distribution substations in distribution system B. All of these distribution substations served to residental loads.

Thirdly evaluated distribution network was distribution system C. There were 3 distribution substations in distribution system C. All of these distribution substations served to industrial loads.

Separate evaluations were conducted for each distribution networks (A,B,C). Reliability indexes previously calculated for the substations and transmission lines were used in evaluations made for distribution systems.

Performance indexes were calculated for single bus system, which has the lowest reliability among substation types, modeled transmission system and distribution networks at different locations and structures.

In the section of result and suggestions, where analysis results were discussed, reliability evaluations were performed for the entire system according to the data and performance indexes calculated in the previous section. These evaluations included the comparison of performance indexes which were separately calculated for each distribution system with the mean values of the indexes electric institutions frequently used in the USA.

Evaluations performed according to the related standards revealed that all three networks had low reliability. Finally, studies that should be conducted to improve reliability values of these systems were determined in light of conducted evaluations. Data obtained in the present thesis study provide information on the future behavior of the system. Further studies on this subject will enable a more reliable design of the system and will lead to analyses to determine the relationship between reliability and cost.

1. GİRİŞ

Güvenilirlik, bir birimin veya bir sistemin belirli bir zaman dilimini içerisinde ve belirlenen şartlar altında kendisinden beklenilen (istenilen) görevi yerine getirebilme kabiliyetidir. Matematiksel olarak ifade edilecek olursa güvenilirlik, bir nesnenin t=0 anında sahip olduğu özellikleri t > 0 iken istenilen şartlar altında ve belirli bir zaman aralığında hata vermeden çalışma olasılığı olarak karşımıza çıkar.

Elektrik güç sistemlerinde tüketiciye ekonomik, kaliteli ve sürekli elektrik enerjini güvenilir bir şekilde sağlanması amaçlanmaktadır. Sisteme ait bu yetenek yapılacak olan güvenilirlik analizi ile ortaya konmaktadır.

Bu tezde farklı bağlantı tiplerine sahip indirici trafo merkezleri, elektrik iletim hatları ve elektrik dağıtım sistemlerine ait incelemeler ve güvenilirlik analizleri yapılmış, çıkan sonuçlara göre güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapılan bu tez çalışmasında insanoğlu için vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisinin sahip olduğu önem nedeniyle güvenilirlik kavramı üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Tezin amacı elektrik enerjisinin tüketicilere ulaştırılması aşamalarında sistemlerin güvenilirlik değerlendirmesinin yapılması, işletmede olan ve bundan sonra işletmeye dahil olacak olan sitemler için model oluşturması için referans olmaktır.

1.2 Literatür Özeti

Elektrik güç sistemlerinin güvenilirlik analizi bazında ülkemizde sınırlı sayıda çalışma olmasına rağmen dünya genelinde birçok çalışma mevcuttur. Özellikle

Prof. Dr. Roy Billinton'ın konu hakkında birçok yayını bulunmaktadır.

Prof. Dr. Roy Billinton' ın (1973) "Power system reliability calculation" isimli çalışması ve yine (1998) "Reliability assessment of large electric power systems"

isimli çalışması ve (1996) “Reliability evaluation of power systems” gibi konu hakkında birçok çalışması yer almaktadır.

Bu tezde dağıtım sistemlerine ait güvenilirlik değerlendirmeleri yapılırken birçok kaynaktan faydalanılmıştır. Özellikle güvenilirlik analizi uygulamaları için Prof. Dr. R. Brown’ ın (2009) “Electrical power distribution reliability” isimli kitabından yararlanılmıştır.

Ülkemizde de yapılan çalışmalardan bazıları şu şekildedir.

Nurşen Dündar (2002) “ Elektrik dağıtım sistemlerinde güvenilirlik analizi” yüksek lisans tezi ve Hatice Türkan (2007) “ Güvenilirlik analizde kullanılan istatiksel dağılım modelleri” yüksek lisans tezleri bulunmaktadır. Bunlarla birlikte Ramazan Çağlar' ın (1999) "Elektrik enerji sistemlerinde güvenilirlik değerlendirmesi için kısıtlılık seçimi" doktora tezi çalışması da bulunmaktadır.

2. GÜVENİLİRLİK TANIMI VE GENEL KAVRAMLAR

2.1 Güvenilirlik Tanımı

Güvenilirlik, işletme süresi boyunca istenen işletme koşulları altında bir cihaz ya da bir sistemin işlevini yeterince karşılama olasılığı olarak ifade edilebilir.

Kuzey Amerika Elektrik Güvenilirlik Konseyi (NERC)' e göre güvenilirlik; talep edilen Kuzey Amerika Elektrik Güvenilirlik Konseyi (NERC)'e göre güvenilirlik; talep edilen miktarda ve kabul edilebilir standartlarda olan gücün müşteriye ulaştığında, elektrik sistemi elemanlarının performans sonucunun derecesidir. Başka bir deyişle güvenilirlik, müşteri tarafından talep edilen miktardaki enerjinin her noktaya kaliteli bir şekilde iletilmesini sağlamak amacıyla güç sistemi elemanlarının yetenekleriyle ilgilenir [1].

Güvenilirliği çevreleyen iki temel kavram vardır: Yeterlilik ve güvenlik. Yeterlilik, müşterinin talep ettiği elektrik enerjisinin kesintisiz olarak sistem tarafından karşılanabilmesidir. Bunun anlamı; rezerv oranı ve tepe durumlarını içeren enerji ihtiyaçlarının her zaman karşılanabilmesi için yeterli üretim ve iletim kaynaklarının mevcut olması gerekmektedir. Bu yüzden yeterlilik, statik sistem durumları, uzun süreli planlama ve yatırımla alakalıdır [2].

Güvenlik, sistemin ani değişikliklere karşı koyma yeteneği olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, planlı veya planlanmamış bir devre dışı durumunda veya herhangi bir eleman arızasında sistemin bozulmadan kalma yeteneğidir. Güvenlik sistem dinamikleri ve kısa süreli işletmelerle ilgilidir. Güvenilirlik, yeterlilik ve güvenlik şartlarını, yani hem kısa dönemde hem de uzun dönemde işletimleri inceleyen bilimdir [2].

2.1.1 Güvenilirliğin önemi

Genel olarak güvenilirlik bir birimin, bir sistemin ya da bir ürünün sahip olması gereken en önemli özellik olarak karşımıza çıkar. Güvenilirliğe bir firmanın ürünü açısından baktığımızda, ürün ne kadar güvenilir ise firma o kadar güvenilir kabul

edilmektedir. Ayrıca müşteri açısından baktığımızda da güvenilir ürünler müşteri memnuniyetini arttırırlar. Maliyet açısından ise güvenilirlik çoğu zaman maliyeti arttırıcı bir etmen olarak gözükmesine rağmen yapılan güvenilirlik değerlendirmeleri sonucunda maliyet ve güvenilirlik arasında optimum bir düzey yakalanarak maksimum performans elde edilebilir. Elektrik güç sistemleri açısından baktığımızda ise; sistemin temel görevi tüketicilere ekonomik, kaliteli ve kabul edilebilir derece güvenilir bir enerji sağlamaktır. Bu nedenle sistemin işletme sürecinde kendisinden beklenen bu görevleri yerine getirebilmesi yeteneği güvenilirlik olarak karşımıza çıkar.

2.1.2 Sistem modellemesi

Güvenilirlik analizi yapılabilmesi için öncelikli olarak sistemin işleyiş biçimleri karakteristikleri bilinmesi gereklidir. Analiz sırasında güvenilirliğin ölçütü olabilecek bazı değişkenler tanımlanmaktadır. Bu şekilde gerçeğe yakın değerler elde edilebilir. Tüm bu veriler ışığında bir model ortaya konması gerekmektedir.

Burada bahsedilen model, bir matematiksel modeldir. Matematiksel model sistem davranışını ve işleyişini matematiksel bağıntı ve fonksiyonlar ile gösterim şeklinde olmaktadır. Matematiksel model belirli ve belirsiz model olarak iki ayrı şekilde davranış göstermektedir. Belirsiz modelde sistem rastlantısal bir işleyiş içerisindedir. Yani sistem işleyişinde sistem cevabı olarak farklı sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle güvenilirlik değerlendirmesi yapılan sistemler belirsiz matematiksel model olarak adlandırılırlar.

2.1.3 Sistem tipleri

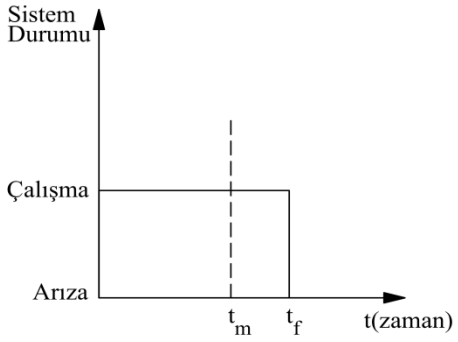
Belirli bir görevi yerine getirmek için yapılandırılan sistemlerde güvenilirlik analizi iki ayrı grupta değerlendirilmektedir.

1. Onarımsız, koşullandırılmış, sürekli devrede olmayan sistemler
2. Onarımlı, sürekli devrede olan sistemler

2.1.3.1 Onarımsız (belirli bir göreve koşullanmış) sistemler

Bu tip sistemlerde işlev kesinti olmaksızın işletim sürecini devam ettirir. Sistem içerisinde yer alan herhangi bir elemanda arıza olduğu takdirde bu tüm sistemin işlevini etkilemez. Sistem işlevi sırasında ortaya çıkan arızalı eleman ya arızalı

olarak bırakılır ya da tamiri gerçekleştirilir. Ancak her durumda da sistem işleyişi kesintiye uğramadan devam eder. Şekil 2.1'de onarımsız bir sistemin zamana bağlı davranış grafiği yer almaktadır. Bu grafikte (Şekil 2.1) t_m görev süresini, t_f ise arızaya kadar olan süreyi göstermektedir.

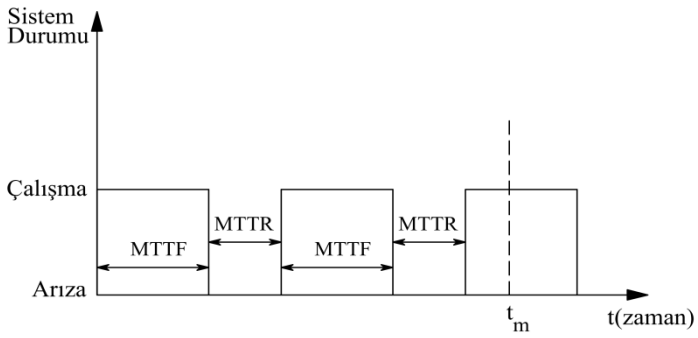


Şekil 2.1 : Onarımsız sistemin zamana göre davranışı [9].

Şekil 2.1' de görüldüğü gibi onarımsız sistemlerde görev süresi arızaya kadar geçen süreden küçük ise sistem başarılıdır şeklinde yorumlanır.

2.1.3.2 Onarımlı (sürekli devrede olan) sistemler

Bu tip sistemlerde çalışma, arıza ve onarım şeklinde bir döngüden söz edilebilir. Arıza durumunda arızalı sistem onarılabilir, yenisi ile değiştirilebilir ya da arıza giderilene kadar benzer bir eleman bu arıza durumundaki elemanın yerine ilgili görevi üstlenebilir. Bu tip sistemler arıza durumu sık ve uzun olmadığı takdirde kabul gören sistemlerdir. Elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemleri bu kategoride değerlendirilmektedirler.. Çeşitli iklim ve çevre şartları, kısa devre, aşırı yük gibi sistemi oluşturan elemanlarda oluşacak bir arıza sonucunda ilgili sistem arıza giderilene kadar devre dışı kalacaktır. Şekil 2.2' de onarımlı, sürekli işletimde olan bir sistemin zamana bağlı davranış grafiği yer almaktadır



Şekil 2.2 : Onarımlı sistemin zamana göre davranışı [3].

Şekil 2.2' de görüleceği üzere ilk arıza MTTF (mean time to failure – ortalama arıza zamanı) olarak ifade edilen süre sonucunda ortaya çıkmaktadır. İlgili arızanın giderilmesi gereken süre ise MTTR (mean time to repair – ortalama tamir süresi) olarak gösterilmiştir. Arıza tamir döngüsü içerisinde yer alan bu sistemde arıza süresi ve arızayı giderme süreleri farklılıklar göstermesi beklenmektedir.

2.2 Güvenilirlik Kavramları Ve Fonksiyonları

Modern istatistik ve mühendislik değerlendirmelerinin ışığında, sistemlere ait geçmiş değerlendirmeleri vasıtasıyla gelecek tahminleri yapma ve sistem güvenilirliği analizi ihtiyacı, gelişen teknoloji ve dünya şartlarıyla ayrı bir önem arz etmektedir.

Bu nedenle sürekli işletimlerde olan sitemlerde yaşanan çalışma – arıza – tamir döngüsü içerisinde yapılan değerlendirmelerde bazı kavramlar ele alınarak değerlendirmeler ortaya konabilmektedir.

Matematiksel olarak sitemin ifadesi için öncelikli olarak güvenilirlik fonksiyonu R(t), ve arıza dağılım fonksiyonu Q(t) modele dahil edilmelidir. Denklem **(2.1)**' de R(t) ve Q(t) fonksiyonları arasındaki bağıntı gösterilmektedir[3].

$$R(t) + Q(t) = 1 \tag{2.1}$$

R(t), güvenilirlik fonksiyonu olarak adlandırılır ve t zamanında elemanın veya sistemin işlevini sürdürebilme olasılığını göstermektedir. Arıza olasılığı olarak da ifade edilen Q(t) dağılım fonksiyonu özellikleri taşır. Bu nedenle Q(t)' ye arıza dağılım fonksiyonu da denilmektedir [3]. Denklem **(2.2)**'de güvenilirlik fonksiyonunun matematiksel ifadeleri yer almaktadır[3].

$$R(t) = 1 - Q(t) \tag{2.2}$$

Denklem **(2.3)**'de arıza olasılık fonksiyonunun matematiksel ifadesi yer almaktadır[3] .

$$F(t) = Q(t) \tag{2.3}$$

Arıza dağılım fonksiyonunun türevi ise arıza yoğunluk fonksiyonu olarak karşımıza çıkar. Bu ifade denklem **(2.4)**' de belirtilmiştir[3].

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \tag{2.4}$$

Güvenilirlik hesaplamalarında sistemde yer alan elemanlar için arıza ve tamir süreleri sabit olarak kabul edilmektedir. Arıza ve tamir oranları sistemin çalışmakta olan durumundan bir diğerine geçişi ile ilgilenir. Sistemin genel olarak çalışma hızı ile ilgilenmez. Bu nedenle bu oranlar birer üstel fonksiyon cinsinden ifade edilebilirler. Bu durumda; denklem **(2.5)**'de arıza yoğunluk fonksiyonu arıza hızı (λ) ve zaman (t) cinsinden ifadesi yer almaktadır[3].

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}\,; t \geq 0\,,\ \lambda > 0 \tag{2.5}$$

Denklem **(2.6)**'da ise arıza olasılık fonksiyonunun üstel yoğunluk fonksiyonu olması durumunda ifadesi yer almaktadır[3].

$$Q(t) = \int_0^t f(\xi)d\xi = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2.6}$$

Denklem **(2.7)**'da ise güvenilirlik fonksiyonunun üstel yoğunluk fonksiyonu olması durumuna ait ifadesi yer almaktadır[3].

$$R(t) = 1 - Q(t) = e^{-\lambda t} \tag{2.7}$$

Ortalama arıza zamanı (MTTF) için ise üstel yoğunluk fonksiyonu olması durumundaki ifadesi denklem **(2.8)**' de gösterilmiştir[3].

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)\,dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda} \tag{2.8}$$

Ortalama onarım süresi (MTTR) ise denklem **(2.9)**'de olduğu gibi ifade edilmektedir[3].

$$MTTR = \int_0^\infty t.f_0(t)\,dt \tag{2.9}$$

Arızaya kadar geçen ortalama süre, MTBF olarak ifade edilmektedir. Bu durumunda MTBF ifadesi denklem **(2.10)**' daki gibi ifade edilmelidir[3].

$$MTBF = MTTF + MTTR \tag{2.10}$$

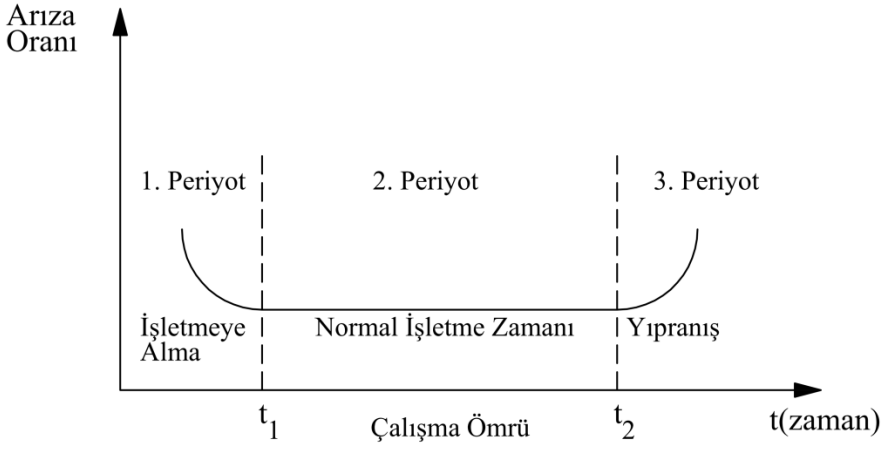
Ancak incelenen sistemler göz önüne alındığında MTTF>>MTTR şeklinde bir ifade ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle MTBF karşılığı denklem **(2.11)**'deki şekliyle gibi kabul edilir[3].

$$MTBF = MTTF \tag{2.11}$$

Yukarıda bahsedilen güvenilirlik indisleri içerisinde yer alan λ , arıza hızı (normal işletimden arızaya geçiş oranı). Birim zamandaki arıza sayısının arızalanabilecek birim sayısına oranıdır[3]. Denklem **(2.12)**'deki gibi ifade edilir.

$$\lambda(t) = \frac{Birim\ Zamandaki\ Arıza\ Sayısı}{Arızalanabilecek\ Birim\ Sayısı} \tag{2.12}$$

Sabit arıza oranı, üstel fonksiyonlu rastgele arıza zamanına sebep olur. Şekil 2.3' de arıza hızının çalışma ömrü ile değişimini gösteren küvet karakteristiği yer almaktadır.



Şekil 2.3 : Küvet karakteristiği [3].

Arıza hızının zamanla değişimini ele alan küvet karakteristiği 3 ayrı periyottan oluşmaktadır. Bunlardan ilki işletmeye alma şeklinde isimlendirdiğimiz üretim kaynaklı hatalar bütünüdür. Bu hatalar montaj ve fabrikasyon hatalarından meydana gelir. Zamanla birlikte arızaların düzeltilmesiyle arıza hızında da bir düşüş gözlemlenir.

İkinci olarak ele aldığımız periyot ise normal işletme zamanı olarak adlandırılır. Bu süreç için faydalı ömür sürecide denilmektedir. Sistemde üretim ve montaj kaynaklı hataların giderildiği süreçtir. Arızalar rastlantısal olarak gelişir ve arıza oranı bu periyot boyunca sabittir.

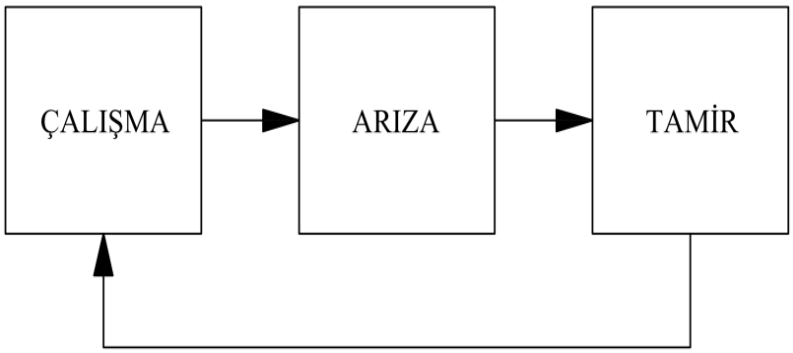
Son olarak ele aldığımız periyot ise yıpranma süreci olarak kabul edilir. Sistem elemanlarının yıpranmasından dolayı zamanla performansları düşer. Bu durum gerekli bakım çalışmalarının eksikliği ile birlikte arıza hızının artması olarak karşımıza çıkar.

Güvenilirlik değerlendirmelerinde kullanılan bir diğer indis arızadan normal işletime geçiş oranı olan μ (onarım hızı)' dır. Denklem **(2.13)**' de gibi ifade edilmektedir[3].

$$\mu(t) = \frac{Birim\ Zamandaki\ Onarım\ Sayısı}{Onarılabilecek\ Birim\ Sayısı} \qquad \textbf{(2.13)}$$

2.2.1 Sürekli işletimde olan sistemlerde arıza – tamir döngüsü

Tamir edilebilen elemanlardan kurulan ve sürekli işletimde olan sistemler, işletim süreleri boyunca çalışma – arıza – tamir – çalışma döngüsü içerisinde yer alırlar. Şekil 2.4' de çalışma – arıza – tamir döngüsü yer almaktadır[4].

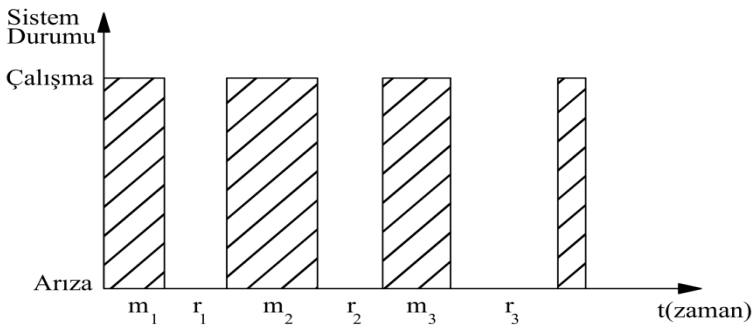


Şekil 2.4 : Arıza tamir döngüsü [3].

Sistemde yer alan tüm elemanlar için yukarıda bahsedilen döngüden söz edilebilir.

Güvenilirlik analizindeki asıl amaç seçilen model üzerinde arıza ve tamir işlevlerini olasılıksal olarak tahmin etmektir.

Arıza – tamir döngüsü içerisinde yer alan bir elemana ait çalışma devresini gösteren durum uzay diyagramı şekil 2.5'de yer almaktadır.



Şekil 2.5 : Sürekli işletimde olan bir elemana ait durum uzay diyagramı [9].

Şekil 2.5' de yer alan modele göre sitemde yer alan eleman ya devrededir ya da devre dışıdır. Burada m arızaya kadar geçen ortalama süre (MTTF), r ise onarıma kadar geçen ortalama süreyi (MTTR) ifade etmektedir. N arıza sayısı olmak üzere, m' ye (arızaya kadar geçen ortalama süre) ilişkin ifade denklem **(2.14)**' de yer almaktadır [4].

$$\bar{m} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} m_i \qquad \textbf{(2.14)}$$

N arıza sayısı olmak üzere, r' ye (onarıma kadar geçen ortalama süre) ilişkin ifade denklem **(2.15)**' de yer almaktadır[4].

$$\bar{r} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} r_i \qquad \textbf{(2.15)}$$

Arızaya kadar olan ortalama süre ile tamire kadar olan ortalama sürelerin toplamı elemana ait periyot (T) olarak karşımızı çıkar. Denklem (2.16)' da periyot yer almaktadır[4].

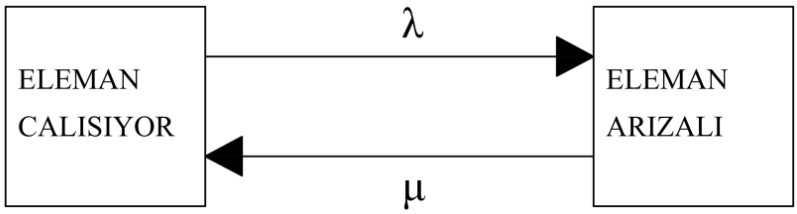
$$T = \bar{m} + \bar{r} \qquad \textbf{(2.16)}$$

Denklem **(2.17)**' de ise arıza frekansı gözükmektedir[4].

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\bar{m} + \bar{r}} \qquad \textbf{(2.17)}$$

Güvenilirlik analizi problemlerinde sistemde yer alan elemanların arıza – tamir oranlarının sabit olduğu varsayımı yapılmaktadır. Burada bahsedilen arıza – tamir oranları sistemin bir durumdan diğer duruma geçiş oranıdır, sistemin çalışma hızı ile karıştırılmamalıdır. Bu durum daha önce denklem **(2.5)**, denklem **(2.6)**, denklem **(2.7)**' de gösterildiği gibi üstel dağılımlarla ifade edilebilmektedir.

Şekil 2.6' da tamir oranının sabit ve üstel şekilde ifade edilen bir elemanın durum geçiş diyagramı yer almaktadır.



Şekil 2.6 : Tek elemanlı sistem için durum geçiş diyagramı.

Normal işletimden arızaya geçiş oranı olan λ ifadesi, denklem **(2.18)** 'deki gibi elde edilmektedir [4].

$$\lambda = \frac{1}{\bar{m}} \qquad \textbf{(2.18)}$$

Arızadan normal işletime geçiş oranı olan μ ifadesi ise, denklem **(2.19)** 'daki gibi elde edilmektedir [4].

$$\mu = \frac{1}{\bar{r}} \qquad \textbf{(2.19)}$$

Denklem **(2.17)**, denklem **(2.18)**, ve denklem **(2.19)** birlikte düşünüldüğü takdirde, frekans bağıntısı denklem **(2.20)**' deki gibi olacaktır[4].

$$f = \frac{\lambda\mu}{\lambda + \mu} \qquad \textbf{(2.20)}$$

2.2.2 Kullanılabilirlik

Şekil 2.6' da verilen iki durum modeline göre bir eleman çalışır durumda ya da arızalı durumdadır. Çalışır durum için kullanılabilirlik (A), arıza durumu için ise kullanılamazlık (U) karşımıza çıkmaktadır. Kullanılamazlık tamir edilen bir eleman veya sistemin bakım için ihtiyaç duyduğu bir performans ölçüsüdür. Sistemin düzgün çalışabilme olasılığı olarak da tanımlanabilir. Kullanılabilirlik ifadesi denklem **(2.21**)' de gösterilmiştir[4].

$$A = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTBF}} = \frac{\overline{m}}{\overline{T}} \tag{2.21}$$

MTBF ifadesinin karşılığı denklem **(2.22)**' de gösterilmiştir[4].

$$MTBF = MTTF + MTTR \tag{2.22}$$

Bu durumda kullanılabilirlik ifadesi denklem **(2.23)**' deki gibi olur[4].

$$A = \frac{\overline{m}}{\overline{m} + \bar{r}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tag{2.23}$$

Denklem **(2.24)**'de kullanılabilirlik (A) ve kullanılamazlık (U) arasındaki eşitlik yer almaktadır[4].

$$A + U = 1 \tag{2.24}$$

Denklem **(2.23)** ve denklem **(2.24)** dikkate alındığında kullanılamazlık (U) ifadesi denklem **(2.25)**' deki gibi olacaktır[4].

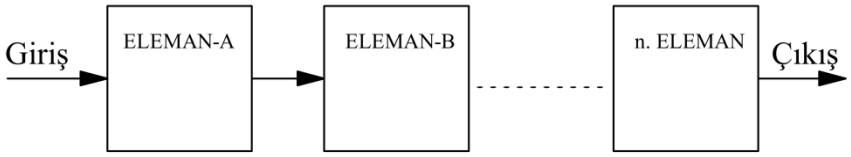
$$U = \frac{\bar{r}}{\overline{\overline{m} + r}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \tag{2.25}$$

2.3 Onarımlı, Sürekli Devrede Olan Sistemler İçin Bağlantı Şekilleri

Güvenilirlik analizi yapılacak olan sistemler, seri ve paralel sistemler olduğu gibi daha karışık sistemlerden oluşabilmektedir. Bu nedenle analizi gerçekleştirilecek olan sistemlere ait güvenilirlik indislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sabit güvenilirlik parametresi üzerinden sistemleri oluşturan elemanların bağlantı tiplerinin güvenilirliğe etkileri, güvenilirlik değerlendirmeleri aşağıda verilmiştir.

2.3.1 Seri bağlı fazlalıksız sistemler (non-redundant series systems)

Seri bağlı elemanlardan oluşan sistemlerde, sistemin başarılı olabilmesi için tüm elemanların işletimde olması gerekmektedir. Seri bir sistemde elemanlardan birinde oluşan bir arıza tüm sistemin arızalanmasına sebep olur. Burada konu olan seri bağlılık güvenilirlik açısından değerlendirilmelidir, birimlerin (elektrik devrelerindeki gibi) seri olduğu anlamına gelmez [3]. Şekil 2.7'de güvenilirlik açısından seri bağlı bir sisteme ait blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.7 : Seri bağlı sistem blok diyagramı.

Burada n elemanlı bir sistem için elemanların güvenilirlikleri sırasıyla R_A, R_B ... R_n n adet seri bağlı birim için tüm sistem güvenilirliği denklem **(2.26)**'da verilmiştir [3].

$$R_{SERİ} = R_S = R_A.R_B \dots R_n = \prod_{i=1}^{n} R_i \qquad \textbf{(2.26)}$$

Bu durumda sistemin güvenilmezliği (Q) denklem **(2.27)** ile ifade edilir [3].

$$Q_{SERİ} = 1 - R_S = 1 - (R_A.R_B \dots R_n) = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - Q_i) \qquad \textbf{(2.27)}$$

Güvenilmezlik ifade edilirken yüksek mertebeden arıza olasılıkları çarpımları sıfır kabul edilmiştir [3].

Güvenilirlik fonksiyonun zamana bağlı ifadesi ise denklem **(2.28)**'deki gösterilmiştir [3].

$$R_{SERİ}(t) = R_S(t) = R_A(t).R_B(t) \dots R_n(t) \qquad \textbf{(2.28)}$$

Seri bağlı sistemlerin arıza hızı cinsinden ifadesi denklem **(2.29)**'daki gibidir [3].

$$R_{SERİ}(t) = e^{-\int_0^t \lambda_A(t)dt}.e^{-\int_0^t \lambda_B(t)dt} \dots e^{-\int_0^t \lambda_n(t)dt} \qquad \textbf{(2.29)}$$

Güvenilirlik açısından seri sistemlerin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF) denklem **(2.30)** yardımı ile hesaplanır (arıza hızı sabit kabul edilmiştir) [15].

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_s(t)dt \tag{2.30}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı seri bir sistem için kullanılabilirlik (A) ifadesi denklem **(2.31)**'de gösterilmiştir[4].

$$A_{SERİ} = A_1 \,.\, A_2 \tag{2.31}$$

Denklem **(2.31)**'de birinci elemanın kullanılabilirliğine karşılık gelen A_1, ortalama arıza zamanı (m_1), ve ortalama tamir zamanı (r_1) cinsinden ifadeleri denklem **(2.32)**'de belirtilmiştir[4].

$$A_1 = \frac{\overline{m}_1}{\overline{m_1} + \overline{r_1}} \tag{2.32}$$

Denklem **(2.31)**'de ikinci elemanın kullanılabilirliğine karşılık gelen A_2, ortalama arıza zamanı (m_2), ve ortalama tamir zamanı (r_2) cinsinden ifadeleri denklem **(2.33)**'de belirtilmiştir[4].

$$A_2 = \frac{\overline{m}_2}{\overline{m_2} + \overline{r_2}} \tag{2.33}$$

Denklem **(2.32)** ve denklem **(2.33)**, denklem **(2.31)**' de yerine yazılırsa seri sisteme ait kullanılabilirlik ifadesi (A_{sis}) denklem **(2.34)**'deki gibi olur[4].

$$A_{SERİ} = \frac{\overline{m}_1}{\overline{m_1} + \overline{r_1}} \;.\; \frac{\overline{m}_2}{\overline{m_2} + \overline{r_2}} \tag{2.34}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı seri bir sistem için arıza sıklığı (f) ifadesi denklem **(2.35)**'de gösterilmiştir[4].

$$f_{SERİ} = f_1 A_2 \;.\; f_2 A_1 \tag{2.35}$$

Denklem **(2.35)**'de yer alan f_1 birinci elemanın arıza sıklığı, f_2 ise ikinci elemanın arıza sıklığını ifade etmektedir.

Tamir edilebilen iki elemanlı seri sistemden oluşan sistemin arıza oranı (λ_s) iki elemanın arıza oranı toplamları olarak denklem **(2.36)**' daki gibi ifade edilir[4].

$$\lambda_{SERİ} = \lambda_1 + \lambda_2 \tag{2.36}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı seri sistemden oluşan sistemin tamir oranı (r_s) denklem **(2.37)**'deki gibi ifade edilir[4].

$$r_{SERİ} = \frac{1}{\mu_s} = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \tag{2.37}$$

Denklem **(2.36)** ve denklem **(2.37)**'de belirtilen ifadeler N tane seri bağlı elamandan oluşan sistemler için düşünülebilir. Bu durumda denklem **(2.38)**' de N adet seri elamanlı bir sisteme ilişkin arıza oranı verilmiştir[4].

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \tag{2.38}$$

Denklem **(2.39)**'da N adet seri elamanlı bir sisteme ilişkin ortalama tamir süresi yer almaktadır[4].

$$r_s = \frac{1}{\mu_s} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \, r_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i} \tag{2.39}$$

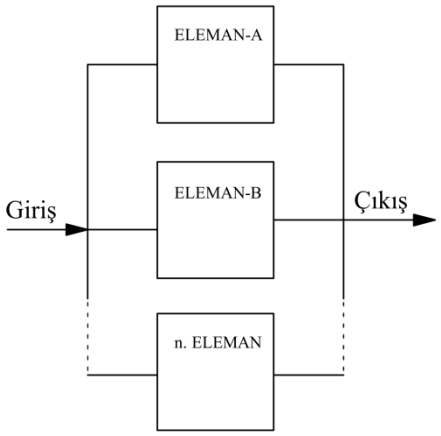
N adet seri elemanlı bir sisteme ait kullanılamazlık (U) ifadesi ise denklem **(2.40)**'da gösterilmiştir[4].

$$U_s = \lambda_s \, . \, r_s = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \, r_i \tag{2.40}$$

2.3.2 Paralel bağlı fazlalıklı sistemler (redundant systems)

Bu tip sistemler çalışması için bir birleşeninin sağlam olmasının yeterli olduğu sistemlerdir. Kritik sistemlerde kullanılırlar. Seri sistemlere göre daha pahalı bir yapıdırlar. Buradaki paralellik aynı seri sistemlerde olduğu gibi güvenilirlik analizi bakımından değerlendirilmektedir, elektrik devrelerindeki elemanların birbirine

paralel bağlanması anlamı çıkarılmamalıdır [3]. Şekil 2.8' de güvenilirlik açısından paralel bağlı bir sisteme ait blok diyagramı verilmiştir[3].



Şekil 2.8 : Paralel bağlı sistem blok diyagramı.

Güvenilirlik açısından paralel bir sistemi oluşturan elemanların güvenilmezliklerinin çarpımı sistem güvenilmezliğini verir. Denklem **(2.41)**'de sistem güvenilmezliğine ait ifade yer almaktadır [3].

$$Q_{PARALEL} = Q_P = Q_A . Q_B \dots Q_n = \prod_{i=1}^{n} Q_i \qquad \textbf{(2.41)}$$

Denklem **(2.42)**'de paralel bağlı sistemlerde sistem güvenilirliğine ait ifade yer almaktadır [3].

$$R_{PARALEL} = 1 - Q_P = 1 - (Q_A . Q_B \dots Q_n) = 1 - (\prod_{i=1}^{n} Q_i) \qquad \textbf{(2.42)}$$

Güvenilmezlik fonksiyonunun zamana bağlı ifadesi denklem **(2.43)**'de gösterilmiştir[3].

$$Q_{PARALEL}(t) = Q_P(t) = Q_A(t) . Q_B(t) \dots Q_n(t) \qquad \textbf{(2.43)}$$

Paralel bağlı sistemlerin arıza hızı (λ) cinsinden güvenilmezlik ifadesi ise denklem **(2.44)**'de ifade edilmiştir [3].

$$Q_P(t) = (1 - e^{-\int_0^t \lambda_A(t)dt}) . (1 - e^{-\int_0^t \lambda_B(t)dt}) \dots (1 - e^{-\int_0^t \lambda_n(t)dt}) \qquad \textbf{(2.44)}$$

Güvenilirlik açısından paralel bağlı sistemlerin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF) denklem **(2.45)**'de ifade edilmiştir [3].

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_P(t)dt \tag{2.45}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı paralel bir sistem için kullanılamazlık (U) ifadesi denklem **(2.46)**'de gösterilmiştir[4].

$$U_p = U_1 \,.\, U_2 \tag{2.46}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı paralel bir sistem için tamir oranı (μ_p) ifadesi denklem **(2.47)**'de gösterilmiştir[4].

$$\mu_p = \mu_1 \,.\, \mu_2 \tag{2.47}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı paralel bir sistem için kesintide olduğu ortalama sürei ifade eden (r_p) denklem **(2.48)**'de gösterilmiştir[4].

$$r_p = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{\mu_p} = \frac{r_1 . r_2}{r_1 + r_2} \tag{2.48}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı paralel bir sistem için sistemin arıza oranı (λ_p) denklem **(2.49)**'de gösterilmiştir[4].

$$\lambda_p = \lambda_1 . \lambda_2 (r_1 + r_2) \tag{2.49}$$

Tamir edilebilen üç elemanlı paralel bir sistem için tamir oranı (μ_p) ifadesi denklem **(2.50)**'de gösterilmiştir[4].

$$\mu_p = \mu_1 \,.\, \mu_2 . \mu_3 \tag{2.50}$$

Tamir edilebilen üç elemanlı paralel bir sistem için kesintide olduğu ortalama süresi ifade eden (r_p) denklem **(2.51)**'de gösterilmiştir[4].

$$r_p = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{\mu_p} = \frac{r_1 . r_2 . r_3}{(r_1 . r_2) + (r_2 . r_3) + (r_1 . r_3)} \tag{2.51}$$

Tamir edilebilen üç elemanlı paralel bir sistem için sistemin arıza oranı (λ_p) denklem **(2.52)**'de gösterilmiştir[4].

$$\lambda_p = \lambda_1.\lambda_2\,\lambda_3[(r_1.r_2) + (r_2.r_3) + (r_1.r_3)] \quad \textbf{(2.52)}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı paralel bir sistem için arıza sıklığı (f_p) denklem **(2.53)**'de gösterilmiştir[4].

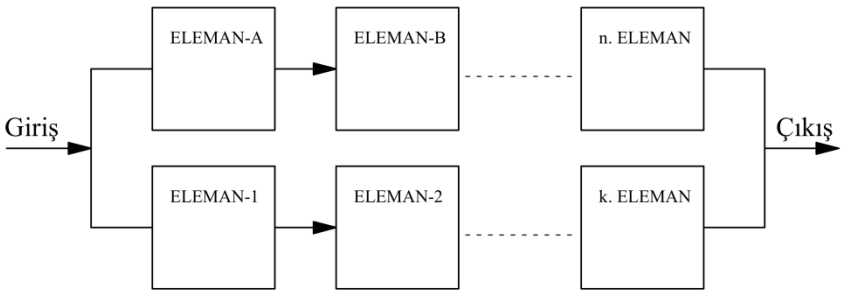
$$f_p = \frac{\lambda_1.\lambda_2\,(r_1 + r_2)}{(1 + \lambda_1 r_1).(1 + \lambda_2 r_2)} \quad \textbf{(2.53)}$$

Tamir edilebilen iki elemanlı paralel bir sistem için sağlanmazlık (U_p), sıklık (f_p) ve ortalama arıza süresi (r_p) ifadesi denklem **(2.54)**'de gösterilmiştir[4].

$$U_p = r_p.f_p \quad \textbf{(2.54)}$$

2.3.3 Karma sistemler (seri + paralel bağlı sistemler)

Seri ve paralel sistemlerin bir arada bulunduğu sistemlerdir. Sistem güvenilirliği hesaplanırken seri bağlı olanlar kendi içerisinde en basite indirgenir. Yine aynı şekilde paralel bağlı olanlarda kendi içerisinde en basite indirgenerek sistem güvenilirliği hesaplanır. Şekil 2.9'da karma bir sisteme ait blok diyagram yer almaktadır.

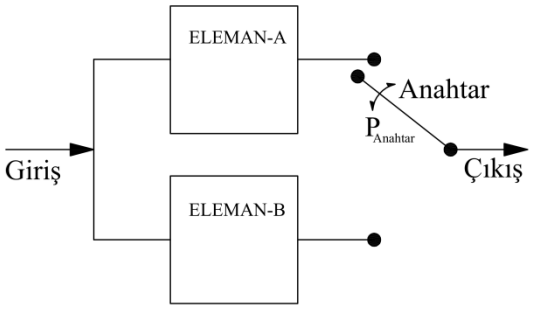


Şekil 2.9 : Karma sistem blok diyagramı.

2.3.4 Yedek fazlalıklı sistemler (standby redundant systems)

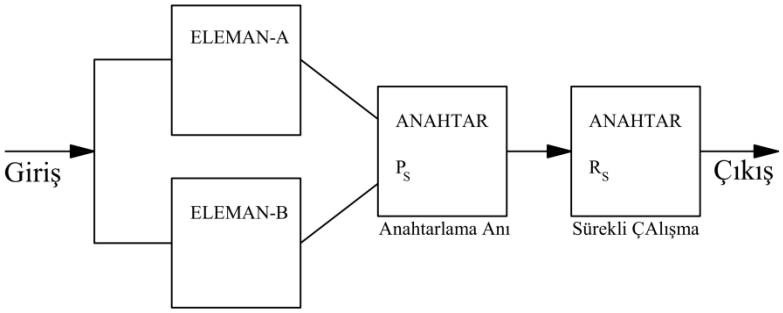
Uygulamada sitemler her zaman birbirine paralel bir şekilde fazlalıklı olarak tesis edilmezler. Fazlalık şeklinde ifade edilen elemanlar bir anahtar vasıtasıyla sisteme entegre edilirler.

Şekil 2.10’ da yedek fazlalıklı sisteme ait blok diyagramları yer almaktadır.



Şekil 2.10 : Yedek fazlalıklı sisteme ait blok diyagramı.

Anahtarlamanın anahtarlama anı dışındaki, sürekli çalışma anı için genel gösterim Şekil 2. 11’de yer almaktadır [3].



Şekil 2.11 : Yedek fazlalıklı sistem sürekli çalışma blok diyagramı.

Arıza hızları sabit sistemler için sisteme ait güvenilirlik ifadesi denklem **(2.55)**’da gösterilmiştir [3].

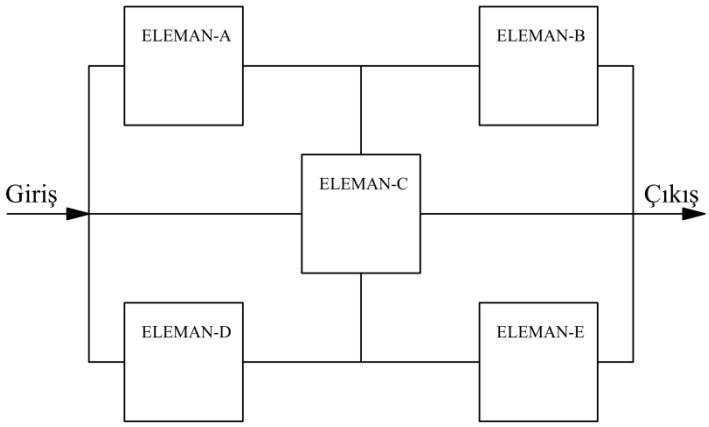
$$R(t) = (1 + P_{anahtar}\lambda t)e^{-\lambda t} \tag{2.55}$$

Güvenilirlik açısından yedek fazlalıklı sistemlerin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF) denklem **(2.56)**’de ifade edilmiştir [3].

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt \tag{2.56}$$

2.3.5 Karmaşık sistemler

Güvenilirlik analizi yapılacak olan sistemler her zaman seri ya da paralel olmazlar. Sistem analizi yapılırken genellikle karmaşık bağlantılı sistemlerle karşılaşılmaktadır. Bu tip karmaşık sistemlerin analizleri yapılırken, sistemin seri ya paralel yapılara benzetilmesi hedeflenmektedir. Şekil 2.12' de karmaşık yapılı bir sisteme ait örnek blok diyagramı yer almaktadır[3].



Şekil 2.12 : Karmaşık yapılı bir sisteme ait blok diyagramı [3].

Bu tip sistemlerde yer alan elemanlar birbirlerine seri ya da paralel olarak basit bir şekilde bağlanmamışlarıdır. Bu nedenle bu tip sistemlerin analizinde koşullu olasılık yaklaşımı, olay ağacı yöntemleri, mantıksal diyagramlar ve bağlama matrisleri gibi yöntemler kullanılmaktadır.

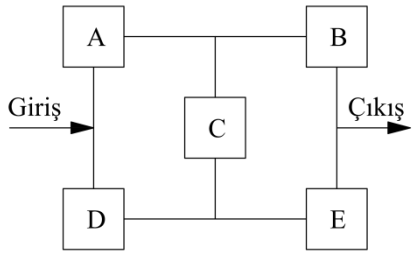
2.3.5.1 Minumum kesme yöntemi (Cut-set method) ve arıza olasılığının bulunması

Bu yöntem için ilk önce sisteme ait blok diyagramı ortaya konur. Blok diyagramı yöntemi sistem karakteristiğini ve güvenilirliğini ortaya çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir. Sitemde yer alan her bir eleman bir blok şeklinde ifade edilir. Sisteme ait her yol bu bloklar ve bloklar arası bağlantılardan oluşturulur. Bu diyagram ile ortaya konulan sistemde yollardan herhangi biri başarı ile işletilebiliyorsa sistem başarılıdır demektir. Ancak yollar arızalı ise sistemde arızalıdır.

Blok diyagramın oluşturulmasındaki sıra şu şekildedir. İlk önce analiz edilecek olan sistem belirlenir. Sistemde yer alan tüm elemanlar ve bunların seri-paralel bağlantı şekilleri ortaya konur. Sistemde yer alan her elemanın ayrı bir blok ile ifade edilecek

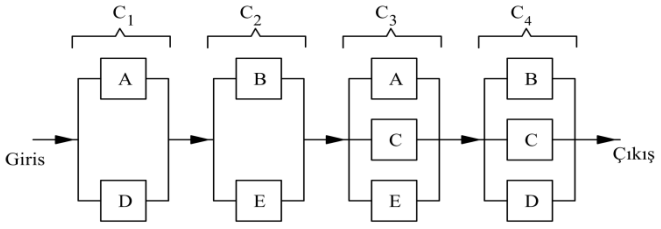
şekilde diyagram oluşturulur. Burada sistemde yer alan elemanları ifade eden blokları her birinin güvenilirlik değerleri bilinmesi gereklidir.

Minumum kesme (cut-set) methodunda ise arızalandığında sistemin durmasına sebep olacak elemanlar kümesi ile araştırılır. Şekil 2.13'de minumum kesme methodunun uygulanabildiği örnek bir blok diyagram yer almaktadır[3].



Şekil 2.13 : Örnek bir blok diyagram.

Sistemin güvenilirliği için, ilk önce temel yollar bulunur. Şekil 2.13'de yer alan örnek blok diyagram için bu temel yollar AB, DE, ACE ve BCD'dir. Belirlenen bu temel yolların ardından temel kesitlemeler bulunur. Bunun için sırasıyla birinci merteben, ikinci mertebeden ve üçüncü mertebeden temel kesitlemeler bulunur. Birinci mertebeden temel kesitlemeler bulunurken tüm temel yollarda bulunan birleşenler olup olamadığına bakılır. Var olan bu bileşenler birinci mertebeden temel kesitlemeleri oluştururlar. İkinci mertebeden olan temel kesitlemeler için ise, birinci mertebede yer alan temel kesitlemeler ayrılarak ikişerli birleşen grupları oluşturulur ve bu gruplardan temel bileşenlerin tümünde yer alanlar işaretlenir ve ikinci bileşeni oluşturulur. Üçüncü mertebeden temel kesitlemelerin bulunmasında ise ikinci mertebede ortaya konulduğu gibi benze şeklide hesaplanır. Şekil 2.13'de yer alan örnek diyagramdan en fazla üç elemanlı temel yol çıkardığımız için işlem bu noktada kesilir. Yukarıda bahsedilen işlemler sırasıyla uygulandığında temel kesitlemeler AD, BE, ACE ve BCD şeklinde olacaktır. Ortaya konulan temel kesitlemelerin ardından sistem şekil 2.14'deki olacaktır.



Şekil 2.14 : Temel kesitlemelerin ardından blok diyagram.

Sisteme ait güvenilmezlik (Q) ifadesi denklem **(2.57)**'deki şekliyle ifade edilir

$$\mathrm{Q}_{SİSTEM} = Q\left[\bigcup_{i=1} C_i\right] = Q(C_1\ U\ C_2\ U\ C_3\ U\ C_4) \qquad \textbf{(2.57)}$$

Sisteme ait güvenilirlik ifadesi ise denklem **(2.58)**'deki gibi olacaktır.

$$\mathrm{R}_{sis} = 1 - Q_{sis} \qquad \textbf{(2.58)}$$

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

3.1 Güç Dağıtım Sistemleri İçin Güvenilirliğin Anlamı

Güvenilirlik değerlendirmesi arıza sıklıkların fazla olduğu zayıf noktaların tayininde oldukça önemlidir. Güç sistemlerinin ana görevi büyük ya da küçük tüketicilere mümkün olan en yüksek seviyede kaliteli, ekonomik ve kabul edilebilir derecede güvenilir enerji sağlamaktır. Güvenilirlik analizi düşük güvenliği olan potansiyel noktaları tanımlamaya yardımcı olur.

3.2 Güç Sistemlerinde Güvenilirliğin Gerekliliği

Sistem kendisine tanınan görevi yerine getirirken kendisi için tanımlanmış bazı işletme koşullarını sağlamalıdır. Bu koşullar bara gerilim seviyesindeki farklılık, frekans kaymaları gibi enerji kalitesi ile bağlantılıdırlar. Tüketicinin doğrudan doğruya etkilenmediği malzeme performansları, arıza limitleri ve sistem kararlıkları da önem taşımaktadır. Bu tip kesinti olaylarının adetlerinin ve etkileme sürelerinin azaltılması için planlama ve işletme yatırımlarında bazı artışlar gereklidir.

Artan enerji gereksinimleri işletmenin genişlemesi gerekliliğini ortaya koyar. Tüketicinin enerji ihtiyacının artması işletim sürecinde ya da işletmenin planlama aşamasında yapılacak yatırımlar sayesinde karşılanabilmektedir. Yeterli ve emniyetli çalışma koşullarının ortaya konması için yapılacak planlama ile ortaya konacaktır.

3.2.1 Geçmiş değerlendirmeler ışığında güvenilirlik analizi

Geçmişe ait güvenilirlik değerlendirmeleri sistem performanslarını değerlendirmek için kullanılan güvenilirlik indisleri elde edilen veriler geçmişte yeterli performans göstermeyen noktaları belirlemede yardımcı olurlar. Bir çok hizmet kuruluşu kendi servis bölgelerinde yer alan bilgileri düzenleyerek yıllık planlar hazırlarlar.

Güvenilirlik değerlendirmesi yapan hizmet kuruluşları geniş bir veritabanı kullanırlar. Olayların meydana geldiği yer, tarih, saat, arıza olayı gerçekleşen bileşen ve kesintiden etkilenen tüketici sayıları bu veri tabanının bileşenlerinin ilk

verileridirler. Bu datalarla birlikte tamir süresi, sistemin devreye alınış süresi ve arıza sebebi bu veri tabanına kaydedilir. Arıza sırasında sistem üzerinden gerçekleşen manevralar yani sistemin yeni yapılandırılması yine bu veri tabanı üzerinde yazılırlar.

3.2.2 Güç sistemlerinde güvenilirlik analizinde kullanılan datalar

Veri tabanını oluşturan tüm datalar sayesinde ilgili sistemde yer alan tüm olaylar hakkında bilgi sunmaktadır. Bu datalara ait açıklamalar aşağıda verilmiştir.

3.2.2.1 Kesintiler

Kesinti, tüketicilere ulaştırılan güçte yer alan kayıplardır. Hava koşuları, iklim şartları, bitki örtüsü, hayvanlar, işletme şartları (yüklenmeler, sistem üzerindeki revizyon sırasında) ve yaşlanma kesintiye sebep olarak gösterilebilirler. Kesintilerin ev kullanıcıları ile endüstriyel kullanıcılar üzerinde farklı etkiler gösterebilirler. Ancak bu etki milyonlarla ölçülecek şekilde ürün kaybı anlamına gelmektedir.

Kesinti ani ve geçici olarak iki gruba ayrılabilir. Bunlardan ani olanı, 5 dakikadan az süreli kesintiler olarak tanımlanırlar. Özellikle dağıtım fiderlerinde görülen ağaç dallarının iletim hattına teması sonucu rölenin hata verip devreyi aç – kapa yapmasına neden olurlar. Ayrıca bu şekilde kısa süreli ani kesintilerle, büyük güçlü yüklerin sisteme dahil olması sırasında da karşılaşılırlar. Sürekli kesinti ise 5 dakikadan uzun süreli kesintiler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu arızalar kendiliğinden düzelmezler. Bu durumla karşı karşıya kalındığında ilgili ekiplerin arıza noktasına ulaşıp sistemi onarması gereklidir.

3.2.2.2 Arızalı donanım

Arıza modeli çıkarılmasında ve bu modelde arızalı donanımın etkisini değerlendirmek için kullanılırlar. Bakım ile ayırıcılar, kesiciler, baralar, trafolar, iletim hatları, röleler gibi mevcut donanımların güvenilirliği en üst seviyeye çıkarma hedeflenir.

3.2.2.3 Arıza süresi

Kesintilerin süresi ile yapılan analizde ortaya konan problemli noktaların planlanması için gereklidir. Özellikle sürekli kesintilerde şebeke yapısında yenilik,

sistemin bakım süresinin kısaltılması ve hızlı sürede müdahale ve yeni ekipmanların sisteme entegresi için ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2.2.4 Arıza sırasındaki çevre koşulları

Kesintilerde hava şartlarının etkisinin ortaya konması için gereklidir. Arızayı meydana getiren olaylar ortaya çıkışları hava şartlarına göre sınıflandırılmaktadır. Buradan elde edilen veriler ışığında işletmeci olan kuruluşun hava ve iklim şartları için hazırlıklı olması ve gerekli iyileştirmeleri daha önceden yapması konusunda yardımcı olmaktadır.

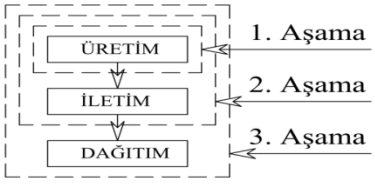
3.2.2.5 Sitemin yer aldığı coğrafi konum

Servis merkezleri, trafo merkezleri ve fiderler hangi alanlar üzerinde işletimde olduğu hakkındaki bilgiler veri tabanında saklanmaktadır.. Bu sayede işletimde olan sistemler coğrafi konumları itibariyle karşılaştırılarak, gerekli iyileştirmeler gerçekleştirilecektir. Ayrıca yeni planlanacak sistemler için yol gösterici olacaktır.

Geçmiş datalar sayesinde şu anda işletimde olan sistemin çalışma koşulları hakkında değerlendirmeler yapılabilir. Entegre edilecek olan yeni sistemler için önemli olan potansiyel noktalar belirlenebilir.

3.3 Güvenilirlik Analizde Güç Sistemlerinin İşlevleri Bakımından Kademleri

Elektrik güç sistemleri işlevleri bakımından değerlendirildiklerinde üç ayrı bölgeye ayrılmaktadırlar. Bunlar üretim, iletim ve dağıtım bölgeleridir. Güç sitemleri güvenilirlik açısından karmaşık bir yapıya sahiptirler. Bununla beraber üretim, iletim ve dağıtım bölgeleri faklı güvenilirlik indislerine sahiptirler. Bu nedenle güvenilirlik analizi yapılacak olan bir güç sistemi aşamalı olarak değerlendirilmelidir. İlk aşama üretim aşaması, ikinci aşama üretim ve iletim aşaması, üçüncü aşama ise üretim, iletim ve dağıtım aşaması şeklindedir. Şekil 3.1'de aşamalı seviyeler yer almaktadır [4].



Şekil 3.1 : Güç sistemleri güvenilirlik analizinde aşamalı seviyeler [4].

3.3.1 Birinci aşama - üretim seviyesi

Bu noktada gerçekleştirilecek olan güvenilirlik analizi üretim sistemin ihtiyaç duyulan yükü karşılamasıyla ilgilidir. Bu aşama için üretim kapasitesi değerlendirmesi denilebilir.

Birinci aşama olarak ifade edilen üretim seviyesi güvenilirlik analizinde bir risk modeli oluşturulur. Model sistem başarısının değerlendirilebileceği indislerden meydana gelmektedir. İhtiyaç duyulan yük ve tesis edilen kapasite karşılaştırılması yapılır.

Üretim sisteminin yeterliliğini değerlendirmek için tanımlanan indislerden en sık kullanılanları ise tahmin edilen yük kaybı olasılığı (LOLP – loss of load probability) ve umulan yük kaybıdır (LOLE – loss of load expectation). Denklem **(3.1)** 'de LOLP ifadesi yer almaktadır[4].

$$LOLP = \sum_{K=1}^{N} P(C = C_K) F_D(IC - C_K) \qquad \textbf{(3.1)}$$

Yukarıda yer alan denklem **(3.1)**'de C güç kapasitesini, C_K devre dışı kalmış gücü, P olasılık fonksiyonunu, F_D yükün birikmeli olasılığını ifade edilmektedir.

Umulan yük kaybı ifadesi (LOLE – loss of load expectation) bir periyottaki (genellikle 1 yıl ya da 1 ay) tepe yükün tahmin edilen üretim kapasitesinden fazla çıktığı süreyi ifade eden veridir. Denklem **(3.2)**'de LOLE ifadesi yer almaktadır[4].

$$LOLE = LOLP \times T \qquad \textbf{(3.2)}$$

3.3.2 İkinci aşama - üretim ve iletim seviyesi

Bu aşamada, ilk aşamada elde edilen üretim modelinin üzerine iletim hattı modelinin eklemesi olarak ifade edilebilir. Bu aşamadaki güvenilirlik indisleri hem üretim hem de iletim sisteminin, mevcut kısımlara ya da sisteme yeni entegre olacak olan alanlara etkilerinin değerlendirilmesi için gereklidir. Ortaya konulan sistem indisleri sistemin yeterliliğinin ölçümü için gereklidir. Ayrıca bir sonraki aşamaya (üçüncü aşama) ait giriş verileri bu aşamada elde edilen veriler ışığında ortaya çıkarlar.

Bu aşamadaki güvenilirlik değerlendirmelerinde üretim gücü kaybı, istasyon arızaları ve iletim hatlarındaki aşırı yüklenme etkileri görülmektedir.

3.3.3 Üçüncü aşama - üretim, iletim ve dağıtım seviyesi

Güvenilirlik değerlendirmesinin son seviyesi üretim, iletim ve tüketici yük noktalarının tamamını kapsamaktadır. İkinci aşamada elde edilen veriler bu aşama için giriş verisi olarak kabul görmektedirler. Ancak ikinci aşamada elde edilen verilerin genellikle yük noktası indislerine etkisi oldukça azdır [5].

Bu aşamada kullanılan indisler her yük noktasındaki arıza sıklıkları ve ortalama arıza süresidir. Sistem performansı için kesintideki tüketici sayısı, kesintideki yük miktarı ve sistemin maliyet açısından değerlendirilmesi için indisler ortaya konulmaktadır.

3.4 Güç Sistemlerinde Kullanılan Güvenilirlik İndisleri

Elektrik güç dağıtım sistemlerinde güvenilirlik değerlendirmesi ele alınırken üç ayrı indis göz önünde bulundurulur. Bunlar her yük noktası için ayrı olmak üzere, arıza hızı (λ), tamir süresi (r) ve yıllık bazda alınan kesinti süresi (U)' dur. Bu veriler yardımıyla IEEE, EEI, EPRI, CEA gibi uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından tanınmış olan bazı performans indisleri bulunabilir. Performans değerlendirmesi için kullanılan indisler üç sınıfa ayrılabilir. Bunlardan ilki arıza nedeniyle sistemden yararlanamayan tüketici sayısını baz alan performans indisleridir. Bu indislere tüketiciye dayalı indislerde denilebilir. İkinci performans indisi ise arıza sebebiyle sağlanamayan yük miktarını baz alan indislerdir. Üçüncü ve son performans indisi grubu ise maliyet değerlendirmelerinde kullanılan performans indisleridir.

Dağıtım sistemlerine ilişkin geçmiş ve gelecek değerlendirmeleri bu indisler sayesinde ortaya konulabilmektedir. Bu indisler sayesinde her kesinti süresi için tüketici sayısını baz alarak güvenilirlik değerlendirmesini yapılabilmektedir[9].

3.4.1 Sistemin ortalama kesinti sıklığı indisi (SAIFI)

Sistemin ortalama kesinti sıklığı indisi SAIFI (System avarage interruption frequency index) olarak gösterilir.

Denklem **(3.3)**' de SAIFI performans indisine ait ifade yer almaktadır[9].

$$SAIFI = \frac{\sum Tüketicilerin\ kesinti\ sayıları\ toplamı}{Hizmet\ verilen\ toplam\ tüketici\ sayısı} \qquad \textbf{(3.3)}$$

SAIFI ifadesinin arıza oranları (λ) ve tüketici sayısı (N) cinsinden ifadesi ise denklem **(3.4)**' de SAIFI performans indisine ait ifade yer almaktadır.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i \, . \, N_i}{\sum N_i} \tag{3.4}$$

3.4.2 Sistemin ortalama kesinti süresi indisi (SAIDI)

Sistemin ortalama kesinti süresi indisi SAIDI (System average interruption duration index) olarak gösterilir. SAIDI ifadesi bir yıl içerisinde tüketicinin kesintiye uğradığı ortalama süreyi belirler. SAIDI verisi kesinti sayısını azaltarak ve/veya kesinti sürelerini azaltarak düzeltilebilir. Örneğin kırsal alanlarda oluşan arızalar, ekiplerin ilgili noktaya ulaşma sürelerinin fazlalığı dolayısıyla kesinti sürelerinin fazla olmasına neden olurlar. Arıza noktasını daha kısa sürede ulaşmak için otomasyon sistemlerinin gelişimi ve kırsal alanlarda da onarım ekiplerinin daha fazla olması gerekmektedir. Denklem **(3.5)**' de SAIDI performans indisine ait ifade yer almaktadır[9].

$$SAIDI = \frac{\sum Tüketicilerin\ kesinti\ sürelerinin\ toplamı}{Hizmet\ verilen\ toplam\ tüketici\ sayısı} \tag{3.5}$$

SAIDI ifadesinin yıllık kesinti süresi (U) ve tüketici sayısı (N) cinsinden ifadesi ise denklem **(3.6)**'de yer almaktadır[9].

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \, . \, N_i}{\sum N_i} \tag{3.6}$$

3.4.3 Tüketici ortalama kesinti sıklığı indisi (CAIFI)

CAIFI(Customer average interrption frequency index) indisi kesintiye uğrayan tüketiciler için sürekli kesintilerin ortalama sıklığı belirtmektedir. SAIFI indisinden farkı ise, CAIFI indisinde kesintiye uğramayan müşterilerin bulunmamasıdır. CAIFI indisi hesabında en az bir kez kesintiye uğrayan tüketici sayısı hesaba dahil edilir.

Denklem **(3.7)**' de CAIFI ifadesi yer almaktadır[9].

$$CAIFI = \frac{\sum Tüketicilerin\ kesinti\ sayılarının\ toplamı}{En\ az\ bir\ kesintiye\ uğrayan\ tüketicilerin\ sayısı} \tag{3.7}$$

CAIFI ifadesinin arıza oranları (λ), toplam tüketici sayısı (N), ve kesintiden etkilenen tüketici sayısı (M) cinsinden ifadesi denklem **(3.8)**' de yer almaktadır[9].

$$CAIFI = \frac{\sum \lambda_i \, . \, N_i}{M_i} \tag{3.8}$$

3.4.4 Tüketici ortalama kesinti süresi indisi (CAIDI)

CAIDI (Customer average interruption duration index) indisi toplam tüketici kesinti süresinin toplam tüketici kesinti sayısına oranı olarak ifade edilmektedir. Yani bu indeks SAIDI indeksinin SAIFI indeksine oranı şeklinde tanımlanabilir. CAIDI indeksi arızaya hızlı müdahale ve hızlı onarım sayesinde kesinti sürelerindeki azalma ile iyileştirilebilir. Denklem **(3.9)**' de CAIDI ifadesi yer almaktadır[9].

$$CAIDI = \frac{\sum Tüketicilerin\ kesinti\ süreleri\ toplamı}{\sum Tüketicilerin\ kesinti\ sayılarının\ toplamı} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \tag{3.9}$$

CAIDI ifadesinin arıza oranları (λ), toplam tüketici sayısı (N) ve yıllık kesinti süresi (U) cinsinden ifadesi denklem **(3.10)**'da yer almaktadır[9].

$$CAIDI = \frac{\sum U_i . N_i}{\sum \lambda_i \, . \, N_i} \tag{3.10}$$

3.4.5 Ortalama servis kullanılabilirliği indisi (ASAI)

ASAI (Average service availability index) indisi raporlanan süre içerisinde tüketicinin sahip olduğu güç/zaman oranına karşılık gelmektedir. Yüksek ASAI değeri güvenilirliğin yüksek olduğunu ifade etmektedir. Denklem **(3.11)**'de ASAI ifadesi yer almaktadır[9].

$$ASAI = \frac{\sum Toplam\ tüketici\ servis\ sağlanabilirliği}{\sum Toplam\ servis\ talebi\ oranı} \tag{3.11}$$

ASAI ifadesinin toplam tüketici sayısı (N) ve yıllık kesinti süresi (U) cinsinden ifadesi denklem **(3.12)**'da yer almaktadır[9].

$$ASAI = \frac{(\sum N_i \text{ x } 8760) - (\sum N_i \text{ x } U_i)}{\sum N_i \text{ x } 8760} \tag{3.12}$$

Denklem **(3.12)**'da yer alan 8760 değeri bir yıldaki toplam saat sayısıdır.

3.4.6 Diğer indisler

Yukarıda bahsedilen indisler dışında güvenilirlik değerlendirmelerinde kullanılan bazı indisler şu şekildedir.

CTAIDI (Customer total average interruption duration index) indisi toplam tüketici ortalama kesinti süresi olarak ifade edilir. Kesintilerle karşılaşan tüketicilerin geçirdiği ortalama süredir. CAIDI' den farkı, raporlanan süre boyunca kesinti sayısı göz önüne alınmayıp kesintiye uğrayan tüketicilerin sadece bir kez dikkate almasıdır [9].

ASIFI (Average service interruption frequency index), ortalama servis kesinti sıklığı indisi olarak ifade edilir. SAIFI indisinin aksine kesintiye uğrayan tüketici sayısının değil yükün ifadesidir. Kesintiye uğrayan toplam yükün hizmet verilen yüke oranı şeklinde bulunur [9].

ASIDI (Average service interruption duration index) , ortalama servis kesinti süresi olarak ifade edilir. Yük temelli bir indistir. Kesintiye uğrayan yük için ortalama süreyi hesaplar. Toplam yük kesinti süresinin hizmet verilen toplam yüke oranı şeklinde ifade edilir. Eğer yük sistemde tüketicilere eşit olarak dağıtılabilirse ASIDI değeri SAIDI değerine eşit olur. ASIDI için saat veya dakika birimi kullanılır [9].

MAIFI (Momentary average interruption frequency index), anlık ortalama kesinti sıklığı indisi olarak ifade edilir. Bu indis, anlık müşteri kesintileri toplam sayısının hizmet verilen toplam tüketici sayısına oranı şeklinde ifade edilir. Ayrıca bu indeks tüketici tarafından görülen anlık kesilme sıklığına karşılık gelmektedir. Anlık kesintilere örnek olarak fırtına gibi doğa olayları sebep gösterilebilir [9].

ENS (Energy not supplied) , yıllık olarak sağlanamayan enerji miktarını ifade etmektedir. İncelenecek olan yük noktasına ait aktif gücün, yine aynı yük noktasına ait senelik kesinti süresi çarpımı sonucu bulunur [9].

AENS (Avarage energy not supplied), sistemdeki yıllık tüketici başına düşün sağlanamayan ortalama enerji miktarını ifade etmektedir. ENS ifadesinin tüketici sayısına bölünmesi ile bulunabilir [9].

EIC (Expected interruption cost), sistem kesintileri nedeniyle tüketicilerin talep ettikleri zararın yıllık bakımdan karşılığıdır. Performans değerlendirmeleri yapılırken maliyet konusu da güvenilirlik maliyetlerinin de hesaplanması gerekmektedir.

Güvenilirlik bedeli olarak kesinti maliyetleri hesaplanmalıdır. Güvenilirlik maliyetleri hesaplanmasında sistem yapısına bağlı olarak, devre dışı kalma nedeniyle tüketicinin uğrayacağı zararlarda hesaba katılmalıdır [9].

IEAR (interruptd energy assessment rate), kesinti maliyetlerinden bir diğeridir. Sistem kesintileri sebebiyle tüketicilerin kWh bazında talep ettikleri zararın karşılığıdır. Ülkemizde dağıtım sistemi belirli kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Özelleştirmeler sonucunda rekabet ortamı doğması hedeflenmektedir. Fakat özelleştirmeler olmasına karşın, elektrik enerjisindeki kesintilerden dolayı tüketicilerin maddi olarak zararlarının karşılanması henüz gerçekleşmemektedir. Ülkemizde rekabetçi bir ortamın oluşmasının ardından yukarıda bahsedilen EIC ve IEAR gibi performans indisleri tanımlanacak ve üretici firmaların mali açıdan da güvenilirlik değerlendirmesi yapmasına olanak sağlanacaktır [9].

3.5 Güç Sistemlerinde Güvenilirlik Maliyet İlişkisi

Bir güç sisteminin güvenilirliğinin yüksek olması, dolayısıyla arızaların azlığı arzu edilen bir durumdur. Güç sistemlerinde güvenilirlik artırımında birçok yol vardır. Bunlardan birkaçı;

- Bileşen güvenilirliğini artırmak,

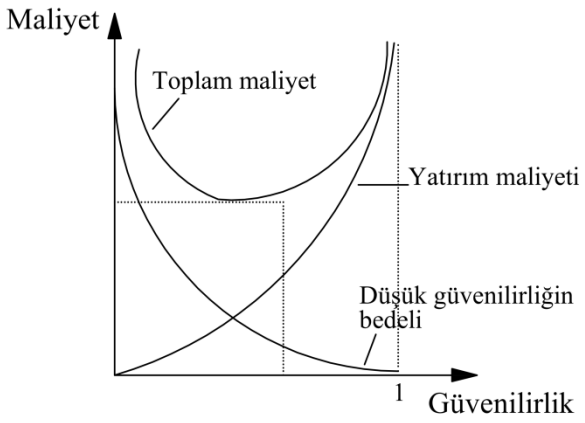
- Bileşenleri yedeklemek,

- Koruyucu bakım periyodunu küçültmek,

- Ölçme ve gözetim olanaklarını artırmak ve sıklaştırmak şeklinde sıralanmaktadır [3].

Güvenilirlik ile ekonomik koşulla birbirine ters kavramlar olması nedeniyle yukarıda sayılan güvenilirlik artırma yollarına başvurulması halinde güvenilirlik maliyetlerinde de belirli artışlar gözlemlenecektir. Özellikle yatırım aşamasında çıkan bu maliyetler belirli bir noktadan sonra güvenilirliğin beklenen oranda arttıramazlar. Bu nedenle yatırım aşamasına en önemli maliyet kalemlerinden olan güvenilirlik maliyetlerinin en iyi şekilde analizi gerçekleştirilmeli ve optimum bir düzey sağlanmalıdır.

Şekil 3.2’ de maliyet ve güvenilirliğinin grafiği yer almaktadır [3].



Şekil 3.2 : Güvenilirlik – maliyet grafiği [3].

Güvenilirliği arttırmak için yapılan yatırımların arttırılması gereklidir. Ancak iyi analiz yapılmadan yapılacak yatırımın beklenen düzeyde olmamasının yanında bazen yatırıma ayrılan maliyetin, kesintilerden dolayı meydana gelecek maliyetlerden çok daha düşük olduğu görülebilir.

Elektrik güç dağıtım sistemlerinde maliyetlerin fazla olmasından dolayı, sistemin arıza anındaki zararlarında hesaplanıp güvenilirlik sonucu ortaya çıkan maliyetlerin bu sayede optimum düzeyde olması sağlanmalıdır.

3.6 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.

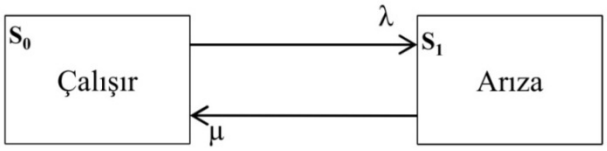
3.6.1 Markov modeli

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. Söz konusu diferansiyel denklemlerin çözümü ile durum olasılıkları saptanır.

Sistemin çalışmasına karşı düşen durumların, olasılıkları toplamı hesaplanır. Bu olasılığa kullanılabilirlik (Availability) adı verilir. Kullanılabilirliğin bütünleri yokluk (unavailability) olarak adlandırılır ve sistemin arızalı olma olasılığını temsil eder [7].

Şekil 3.3' de 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 3.3 : 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 [3].

Sistem başlangıçta çalışır durumda olduğu varsayılırsa P_0 (sistemin çalışır durumda olma durum ve uç olasılıkları denklem **(3.13)** ile hesaplanır [3].

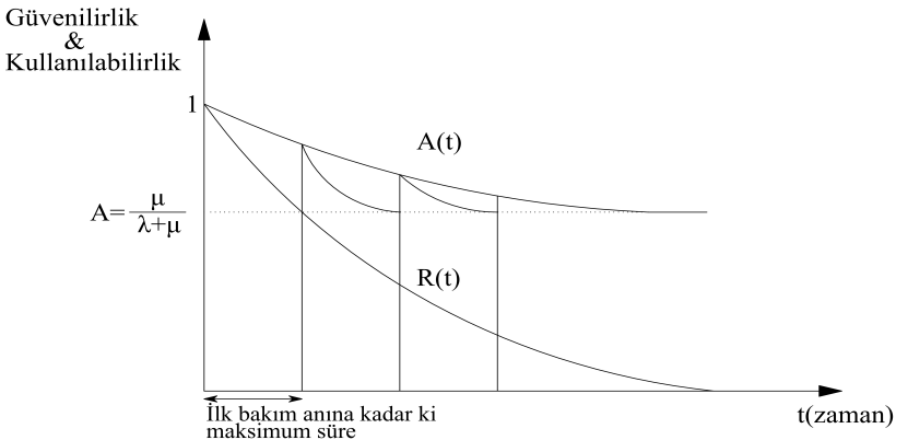
$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu}.e^{-(\lambda+\mu)t},\ P_0 = \lim_{t\to\infty} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} \qquad \textbf{(3.13)}$$

Aynı şekilde P_1 (sistemin arızalı olma durum ve uç olasılıkları denklem **(3.14)** ile hesaplanır [21].

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} - \frac{\lambda}{\lambda+\mu}.e^{-(\lambda+\mu)t},\ P_1 = \lim_{t\to\infty} P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \qquad \textbf{(3.14)}$$

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 3.4' de iki durumlu bir sistem için güvenilirlik - R(t) ve kullanılabilirlik - A(t) fonksiyonları verilmiştir [3].



Şekil 3.4 : İki durumlu bir sistemde güvenilirlik ve kullanılabilirlik.

Burada güvenilmezlik ve kullanılamazlık ifadeleri sırasıyla güvenilirlik ve kullanılabilirliğin bütünleri alınarak bulunur. Ayrıca arızalanan bir birimin onarımı söz konusu değilse, μ=0 kabul edilerek model kullanılabilir. Bu durumda A(t)=R(t) olur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta bakım süresinin optimum düzeye çekilmesidir. Bu şekilde sistemin kullanılabilirliği artmaktadır.

Çok birimli bir sistemin Markov Modellemesi ile güvenilirlik analizi için aşağıdaki yol izlenir [3].

- Sistemin olası tüm durumları ve durumlar arası 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 **(3.15)** ifadesi yardımı ile sistemin durum uç olasılıkları belirlenir. (P_1,P_2,...P_n)

$$P_i = \lim_{t\to\infty} P_i(t)\,, i = 1,2,\dots n \qquad \textbf{(3.15)}$$

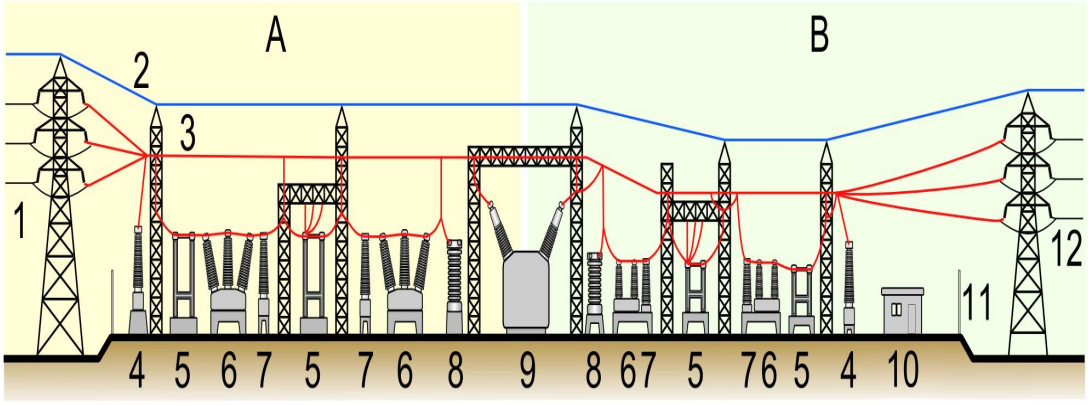
- Sistem arızasına/çalışmasına karşı düşen durum olasılıklarından yokluk ve kullanılabilirlik değerleri ve uç yokluk ve kullanılabilirlik değerleri hesaplanır.
- Sürekli veya ayrık Markov süreç tekniklerini kullanarak Güvenilirlik, MTTF ve MTTR parametreleri hesaplanır [3].

4. GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN GÜVENİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ UYGULAMASI

Elektrik güç sistemlerinin güvenilirliği bir çok faktöre bağlı kalmaktadır. Sistemin tasarımı, gerilim seviyeleri, otomasyon bilgisi, hat bilgisi(havai yada yer altı), çevre koşulları, personel nitelikleri ve sistemde yer alan elemanlar bir bütün olarak sistem güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu bölümde uygulanacak güvenilirlik analizi değerlendirmeleri, indirici merkez şalt sahalarının (154/34,5 kV) farklı düzenlemelerinin etkilerinin araştırılması ile başlamıştır. Ardından indirici merkezlerden beslenen ve elektrik enerjisini tüketiciye ulaştıran son bölüm olan dağıtım sisteminin güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmıştır.

4.1 İndirici Merkez (154 / 34,5 kV) Tanımı

İletim hatları ve/veya dağıtım çıkışlarının (fider) yük akış kontrolünün ve bakım ve koruma amaçlı açma-kapamaların yapıldığı, yerine göre çekilen enerjinin gerilim kademelerinin değiştirildiği açık/kapalı tip trafo merkezlerine şalt sahaları denir. Bir başka şekilde ifade ile şalt sahası, transformatörler kullanılarak gerilimin yüksek formdan alçak forma dönüştürüldüğü veya tam tersi forma yani gerilimin alçak formdan yüksek forma dönüştürüldüğü elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin bir alt istasyonudur [8]. Şekil 4.1' de tipik bir şalt sahsına ait kesit görülmektedir [8].



Şekil 4.1 : Tipik şalt sahası [8].

Şekil 4.1’ da yer alan ekipmanlar ise şu şekildedir.

A ve B şeklinde sağ ve solda yer alan bölümler sırasıyla birincil (A) ve ikincil (B) güç hatları olarak ifade edilmiştir. Bunun dışında numaralandırılan ekipmanlar aşağıdaki gibidir [8].

1. Birincil (Primary) güç hatları
2. Topraklama hattı
3. Şalt sahası havai hatları
4. Gerilim trafosu
5. Ayrıcı
6. Kesici
7. Akım trafosu
8. Parafudur
9. Güç trafosu
10. Kontrol ve kumanda binası
11. Güvenlik çiti
12. İkincil (Secondary) güç hatları

Üretim merkezi ve tüketici arasında yer alan güç iletimi konusunda önemli bir noktada olan şalt tesisleri açık ve kapalı olmak üzere iki farklı alanda tesis edilebilmektedir.

Günümüzde 36 kV’ tan 800 kV’ a kadar açık şalt tesisleri bulunmaktadır. Açık şalt tesislerinde yer alan ekipmanlar direkt olarak çevre ve iklim şartlarından etkilenmektedir. Bu sebepten bu tesislerde kullanılan ekipmanlar çevre ve iklim şartlarına uygun seçilip gerekli bakım ve onarım çalışmaları sürekli olarak yapılmalıdır.

Genel olarak kesici, ayırıcı, baralar, güç ve ölçü transformatörleri, parafudurlar, hat tıkaçları ve yardımcı teçhizatlarından oluşan şalt tesislerindeki bu ekipmanlar kapalı bir alan içerisinde bulunuyorsa bunlara şalt salonları (kapalı şalt sahası) adı verilmektedir.

4.2 İndirici Merkez Bağlantı Tipleri Ve Bunlara Göre Güvenilirlik Analizi

Enerjinin sürekliliği ve kalitesi temel prensipleri göz önüne alındığında tüm sitemde olduğu gibi şalt tesislerinde de bazı tasarım kriterlerine gereksinim duyulmaktadır. Bu safhadaki en önemli aşama güvenilirlik ve maliyet açısından optimum düzeyin sağlanması olacaktır. Bununla birlikte endüstriyel gelişimlere paralel olarak ortaya çıkacak olan gelecekteki gereksinimlerin karşılanması amacıyla esnek bir yapı olması da şarttır.

Bu bölümde indirici merkez şalt sahalarının (154 / 34,5 kV) farklı düzenlemelerinin güvenilirliğe etkileri ortaya konmuştur. Bu düzenlemeler farklı bara dizaynları ile ortaya çıkmaktadır.

Bara, frekansı ve gerilimi aynı olan elektrik enerjisinin toplandığı bir ünitedir. Başka bir deyişle bara enerjinin kontrol ve kumanda edilmesinde kullanılan ekipmanların birbiriyle entegre olabileceği iletkenlerdir. Baralar bakır, alüminyum ve çelik özlü alüminyum (St-Al) gibi malzemelerden imal edilirler[9].

Güvenilirlik değerlendirmelerine konu olacak olan farklı bara düzenlemeleri seçilirken sisteme en uygun olan tip seçilmesi gerekecektir. Bu seçim yapılırken güvenilirliğin yanı sıra yükün cinsi, yükün miktarı, baranın kullanılacağı yerin özellikleri, indirici merkezde kullanılacak kaynakların sayısı, beslemenin sürekliliği, emniyet şartları ve maliyet göz önünde bulundurulmaktadır[9].

Baralar yukarıda belirtilen kriterlere göre farklı tiplerde dizayn edilirler. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır [10].

- Tek bara sistemi
- Bölünmüş bara sistemi
- Bir buçuk kesicili sistem
- Çift bara ve çift kesicili sistem
- Ring Sistem

Yukarıda bahsedilen beş ayrı bağlantı şekline göre güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmıştır.

Çizelge 4.1' de indirici merkez şalt sahası ekipmanlarına güvenilirlik dataları yer almaktadır. Burada yer alan bilgiler literatürde yer alan çalışmalardan faydalanılarak, analizde kullanılmak üzere kabul edilmiştir.

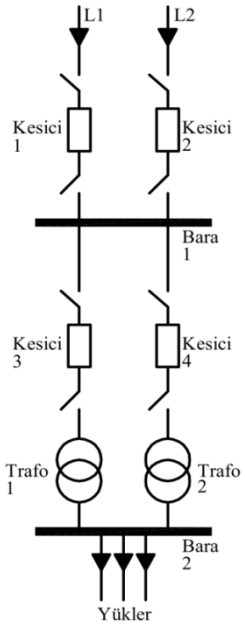
Çizelge 4.1 : İndirici merkez şalt sahası ekipmanlarına ait datalar.

Arıza Noktası	λ - Arıza Hızı (arıza / yıl)	MTTR (saat)
Trafo	0,15	15
Kesici	0,4	4
Bara	0,1	2

Güvenilirlik değerlendirmesi yapılacak olan indirici merkez tiplerinin tamamı için çizelge 4.1' de yer alan datalardan faydalanılmıştır. Ayrıca yapılacak tüm güvenilirlik değerlendirmelerinde aktif arızalar değerlendirilmiştir. Çizelge 4.1' de yer alan arıza hızları aktif arızaları belirtmektedir.

4.2.1 Tek bara sistemi

Tek bara sisteminde tesis maliyeti açısından değerlendirildiğinde diğer sistemlere göre çok daha ucuz bir maliyet ortaya çıkmaktadır. Ancak herhangi bir arıza sırasında sistemin tamamen enerjisiz kalması sebebiyle güvenilir bir yapı değildir. Bu tip sistemlerde enerji girişleri ve çıkışlar aynı barada toplanırlar. Hat üzerinde oluşacak herhangi bir arıza tüm sistemi etkilemektedir. Tek bara sistemine ait bir kesit şekil 4.2' de yer almaktadır [10].



Şekil 4.2 : Tek bara sistemine ait bir kesit [10].

Tek bara sisteminin avantajları ise şu şekildedir.

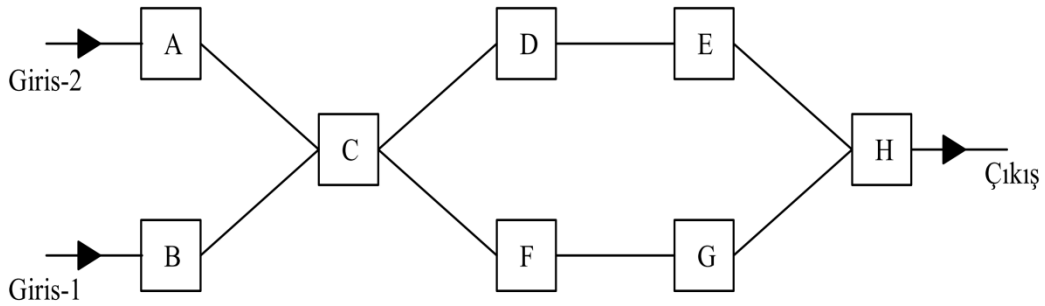
- En düşük maliyet ortaya çıkarma
- Tesis edilecek alanların küçüklüğü
- Kolay uygulanabilirlik
- Kolay düşünce ve uygulama
- Koruyucu röle uygulamaları için nispeten basittirler [11].

Tek bara sisteminin avantajları olduğu kadar dezavantajları da vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- Tek bara uygulamaları bağlantı tipleri göz önüne alındığında en düşük güvenilirlik seviyesine sahip oldukları görülmektedir
- Kesici yada bara arızalarında sistemin tamamı enerjisiz kalır
- Bakım gerektiren durumlarda da sistem tamamen enerjisiz bırakıldığından bu durumlarda oldukça sıkıntılıdır. Bakım zamanlarında koruma düzenleri, genel röle davranışları etkisiz kalır [11].

4.2.1.1 Tek bara sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi

Örnek bir tek baralı sisteme ait güvenilirlik değerlendirmesi yapılırken bölüm 2' de yer alan güvenilirlik değerlendirmelerine ait bilgilerden yaralanılmıştır. Güvenilirlik dataları olarak çizelge 4.1' de yer alan datalardan yararlanılmıştır. Şekil 4.3' de örnek bir tek baralı sisteme ait güvenilirlik analizi blok diyagramı yer almaktadır [11].



Şekil 4.3 : Tek bara sistemi blok diyagramı.

Şekil 4.3’ de yer alan güvenilirlik blok diyagramındaki her bir elaman, şekil 4.2’ de yer alan bir ekipmanın güvenilirlik datalarını temsil etmektedir. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- A bloğu, kesici-1 güvenilirlik datalarına,
- B bloğu, kesici-2 güvenilirlik datalarına,
- C bloğu, bara-1 güvenilirlik datalarına,
- D bloğu, kesici-4 güvenilirlik dataların,
- E bloğu, trafo-2 güvenilirlik datalarına,
- F bloğu, kesici-3 güvenilirlik datalarına,
- G bloğu, trafo-1 güvenilirlik datalarına,
- H bloğu, bara-2 güvenilirlik datalarına karşılık gelmektedir.

Ekipmanlar arasındaki kablo ve kablo uçları güvenilirlik indisleri bağlı bulunduğu ekipmana dahil edilmiştir.

Sistem güvenilirliğinin tespiti için üç ayrı yol izlenecek olup iki ayrı yol için ortaya çıkan veriler değerlendirilmiştir. Bu yollardan birincisi kesitleme yöntemi (cut set method), ikincisi ise hata ağacı (fault tree) analizidir. Ayrıca son olarak sisteme ait kullanılabilirlik (A) ve kullanılamazlık (U) ifadelerinin tespiti için olay ağacı (event tree) methodundan yararlanılmıştır.

Sistem güvenilirliğinin tespiti için ilk önce kesitleme yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntemle çözümleme işlemi için ilk önce şekil 4.9’ dan yararlanılarak temel yollar tespit edilir. Temel yollar, sistemin giriş ve çıkışı arasında bir bağlantı noktasından (düğümden) birden fazla geçilmeden ilerlenebilen yollara denir. Bir başka deyişle temel yol sistemin kendisine atanan işi yerine getirmesi için gerekli minumum birimlerden oluşan kümedir. N düğümlü bir sisteme ilişkin temel yollar en çok (N-1) adet bileşen içerebilirler[3].

Belirtilen bu tanımlamalara göre tek baralı sistem ilişkin temel yollar şu şekildedir.

Temel yollar : ACDEH, ACFGH, BCDEH, BCFGH

Temel yolların bulunmasının ardından sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü mertebeden temel kesitlemeler bulunacaktır. Buna göre temel yol - bileşen bağlantı matrisleri oluşturulur.

Birinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$M_{BT} = \begin{array}{c|cccccccc} & \multicolumn{8}{c}{Bileşen\ »} \\ Yol & A & B & \boldsymbol{C} & D & E & F & G & \boldsymbol{H} \\ \hline ACDEH & 1 & 0 & \mathbf{1} & 1 & 1 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ ACFGH & 1 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 1 & 1 & \mathbf{1} \\ BCDEH & 0 & 1 & \mathbf{1} & 1 & 1 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ BCFGH & 0 & 1 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 1 & 1 & \mathbf{1} \end{array}$$

"C" ve "H" bileşenlerinin bulunduğu sütunlar sıfır içermediği için birinci mertebeden temel kesitlemeler "C" ve "H" kümeleridir.

İkinci mertebenden temel yol - bileşen matrisi oluşturulurken C ve H kümelerini içermeyen ikişerli gruplar içerisinden temel kesitlemeler aranmıştır. Bu bilgi ışığında ikinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$\overline{M}_{BT} = \begin{array}{c|ccccccccccccccc} & \multicolumn{15}{c}{Bileşen\ »} \\ Yol & \boldsymbol{AB} & AD & AE & AF & AG & BD & BE & BF & BG & DE & \boldsymbol{DF} & \boldsymbol{DG} & \boldsymbol{EF} & \boldsymbol{EG} & FG \\ \hline ACDEH & \mathbf{1} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & 0 \\ ACFGH & \mathbf{1} & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & 1 \\ BCDEH & \mathbf{1} & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & 0 \\ BCFGH & \mathbf{1} & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & 1 \end{array}$$

AB, DF, DG, EF, EG bileşenlerinin bulunduğu sütunlar sıfır içermediği için ikinci mertebeden temel kesitlemeler AB, DF, DG, EF, EG kümeleridir.

Üçüncü mertebeden temel yol – bileşen bağlantı matrisi oluşturulurken birinci ve ikinci mertebeden temel kesitleme kümelerini içermeyen üçerli gruplar içerisinden temel kesitlemeler aranmıştır.

Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında ikinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$\overline{\overline{M}}_{BT} = \begin{array}{c|cccc} & \multicolumn{4}{c}{Bileşen\ »} \\ Yol & ADE & AFG & BDE & BFG \\ \hline ACDEH & 1 & 1 & 1 & 0 \\ ACFGH & 1 & 1 & 0 & 1 \\ BCDEH & 1 & 0 & 1 & 1 \\ BCFGH & 0 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Tüm sütunlar sıfır içerdiği için üçüncü mertebeden temel kesitleme yoktur.

Dördüncü mertebeden temel yol – bileşen bağlantı matrisi oluşturulurken birinci, ikinci ve üçüncü mertebeden (tek baralı sistem blok diyagramı için üçüncü mertebeden temel kesitleme olmadığı daha önce belirtilmişti) temel kesitleme kümelerini içermeyen dörderli gruplar içerisinden temel kesitlemeler aranmıştır. Ancak tüm dörderli gruplarda birinci ve ikinci mertebeden temel kesitlemeler yer almaktadır. Bu nedenle dördüncü mertebeden temel kesitlemeler yoktur.

Bu durumda tek baralı sistem blok diyagramı için temel yollar ve temel kesitlemeler şu şekilde ortaya konulmuştur.

Temel yollar : ACDEH, ACFGH, BCDEH, BCFGH

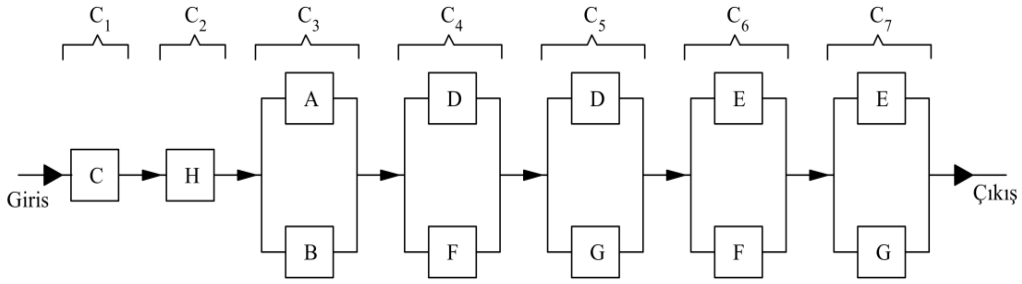
Temel kesitlemeler : C, H, AB, DF, DG, EF, EG

Literatürde temel yollar ifadesinin karşılığı "Minimal Paths" ve temel kesitlemerlin karşılığı ise " Minimal Cut Sets" şeklinde ifade edilir.

Temel kesitlemeler, temel yol –bağlantı matrisinden bulunacağı gibi farklı bir metod kullanılarakta bulunabilir. Bu yöntem her temel yoldan, gerekiyorsa bir bileşen alarak temel kesitlemelerin tespit edilmesi ilkesine dayanmaktadır [3]. Bu yöntem tespit edilen ilk temel yolun bileşenlerinin ikinci temel yol bileşenleri ile birleştirilip lojik "ve" şeklinde ifade edilmesine dayanır. Elde edilen tekli ve ikili kümeler tekli ve ikili kesitlemeleri oluşturur. Bu işlem tüm temel yollar için sırasıyla uygulanır.

Sonuçta elde edilen kümeler her temel yoldan en az bir elemanı içerir ve bu nedenle bu kümeler temel kesitlemeleri oluşturur [3].

Temel yollar ve temel kesitlemeler belirlendikten sonra tek baralı sistemin eşdeğer blok diyagramı şekil 4.4' da yer almaktadır.



Şekil 4.4 : Tek bara sistem eşdeğer blok diyagramı.

Eşdeğer blok diyagramı kullanılarak tüm sistem için güvenilmezlik fonksiyonun ifadesi ($Q_{SİSTEM}(t)$) yazılması gerekecektir. Bu ifade de denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki yazılır

$$Q_{SİSTEM} = Q\left[\bigcup_{i=1} C_i\right] = Q(C_1\ U\ C_2\ U\ C_3\ U\ C_4\ U\ C_5 U\ C_6\ U\ C_7)$$

Bu durumda tüm sistemin güvenilmezlik fonksiyonunun ifadesi denklem (**2.57)**'ye göre aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} = \sum Q(C_i) - \sum Q(C_i \cap C_J) + \sum Q(C_i \cap C_J \cap C_k) \mp \dots$$

C_1 kümesine ait güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.7)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{C_1}(t) = 1 - R_C(t) = 1 - e^{-\lambda_C t} = 1 - e^{-0,1t}$$

C_2 kümesine ait güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.7)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{C_2}(t) = 1 - R_H(t) = 1 - e^{-\lambda_H t} = 1 - e^{-0,1t}$$

C_3 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (A ve B) oluşmaktadır. Bu durumda C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_3}(t) = Q_A(t).Q_B(t) = \left(1 - R_A(t)\right).\left(1 - R_B(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_3}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_A t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_B t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_4 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (D ve F) oluşmaktadır. Bu durumda C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_4}(t) = Q_D(t).Q_F(t) = \left(1 - R_D(t)\right).\left(1 - R_F(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_4}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_D t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_F t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_5 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (D ve G) oluşmaktadır. Bu durumda C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_5}(t) = Q_D(t).Q_G(t) = \left(1 - R_D(t)\right).\left(1 - R_G(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_5}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_D t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_G t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_6 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (E ve F) oluşmaktadır. Bu durumda C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_6}(t) = Q_E(t).Q_F(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_F(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_6}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_E t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_F t}\right) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_7 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (E ve G) oluşmaktadır. Bu durumda C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_7}(t) = Q_E(t).Q_G(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_G(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_7}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_E t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_G t}\right) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Kesitleme kesişimlerinin arıza olasılıkları ise koşullu olasılık eşitlikleri kullanılarak elde edilecektir [3].

Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında kesitleme kesişimleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$Q_{CH}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{CH}(t) = Q_C(t).Q_H(t) = \left(1 - R_C(t)\right).\left(1 - R_H(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan $Q_{CH}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CH}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_C t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_H t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{ABC}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{ABC}(t) = Q_A(t).Q_B(t).Q_C(t) = \left(1 - R_A(t)\right).\left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_C(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan $Q_{ABC}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{ABC}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{CDF}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CDF}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

$Q_{CDG}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CDG}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{CEF}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CEF}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

$Q_{CEG}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CEG}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{ABH}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{ABH}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{DFH}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{DFH}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{DGH}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{DGH}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

Q_{EFH}(t) güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EFH}(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

Q_{EGH}(t) güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EGH}(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

Q_{ABDF}(t) güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{ABDF}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

Çizelge 4.2' de tek baralı sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (C_1-C_7 kümeleri arası) yer almaktadır.

Çizelge 4.2 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_7 Arası).

Analiz Kümesi	**Güvenilmezlik Fonksiyonu**
C_1	$Qc_1(t) = 1 - e^{-0,1t}$
C_2	$Qc_2(t) = 1 - e^{-0,1t}$
C_3	$Qc_3(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$
C_4	$Qc_4(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$
C_5	$Qc_5(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_6	$Qc_6(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$
C_7	$Qc_7(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
∑ (+)	$\sum(+) = \left(1 - e^{-0,1t}\right) + \left(1 - e^{-0,1t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right) + \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right) + \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$

Çizelge 4.3' de tek baralı sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (kesitleme kesişimleri) yer almaktadır

Çizelge 4.3 : Güvenilmezlik fonksiyonu (kesitleme kesişimleri).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu		
CH	Q_{CH} (t)	=	$(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t})$
ABC	Q_{ABC} (t)	=	$(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
CDF	Q_{CDF} (t)	=	$(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t})$
CDG	Q_{CDG} (t)	=	$(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,15t})$
CEF	Q_{CEF} (t)	=	$(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,4t})$
CEG	Q_{CEG} (t)	=	$(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,15t})$
ABH	Q_{ABH} (t)	=	$(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
DFH	Q_{DFH} (t)	=	$(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
DGH	Q_{DGH} (t)	=	$(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})$
EFH	Q_{EFH} (t)	=	$(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
EGH	Q_{EGH} (t)	=	$(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})$
ABDF	Q_{ABDF} (t)	=	$(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t})$
∑ (-)	**∑ (-)**	≅	$(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t})+(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t})+(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t})+(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,15t})+(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,4t})+(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,15t})+(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})+(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})+(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})+(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})+(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t})$

Çizelge 4.2 ve çizelge 4.3 yer alan veriler doğrultusunda denklem **(2.57)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} \cong \sum(+) - \sum(-)$$

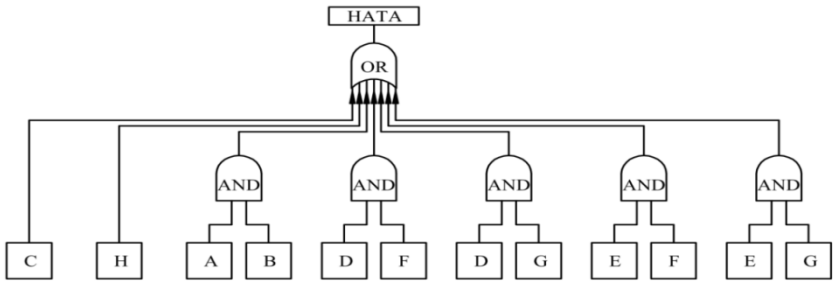
Buna göre denklem **(2.58)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_{SİSTEM}(t) = 1 - Q_{SİSTEM}(t)$$

Yukarıda yer alan tek baralı sisteme ait güvenilirlik fonksiyonunu bulmak için bir başka yol ise "Hata Ağacı Analizi" (FTA)'dır.

Hata Ağacı Analizi (FTA) 1962 ylında Amerikan Hava Kuvvetleri' nde yer alan Bell Telefon Laboratuarları'nda geliştirilmiştir. Bir tepe olayının gerçekleşmesi için

alınması gereken önlemler ayrıntılı şekilde analiz edilmektedir. Karşılaşılmak istenmeyen olay (bu sistem için arıza durumu) saptanıp, bu olaya neden olabilecek tüm faktörlerin analizine dayanmaktadır [14]. Hata ağaçları her biri kendisinden bir alt düzeydeki arızların lojik birer fonksiyonu olarak tanımlanan, çeşitli arızalar zinciridir [3]. Yani hata ağaçlarında olaylar ve lojik kapılar temel kavramlardır. Hata ağacında semboller iki türlüdür. Bunlar kapılar ve olaylardır. Bir olay ya oluşuyordur ya da oluşmuyordur. Daha sonra olay ifadesi "doğru" veya "yanlış" olarak belirtilebilir. Bu aynı zamanda ikili mantığın ve yanlış veya doğru şeklinde değer alan cebirin uygulanabileceği anlamına gelen mantıksal değerler "1" ve "0" şeklinde de ifade edilebilir [14]. Hata ağacı hakkında yukarıda bahsedilen ifadeler göz önüne alındığında tek bara sistemine ait hata ağacı diyagramı şekil 4.5' de yer almaktadır.



Şekil 4.5 : Tek bara sistemi hata ağacı diyagramı.

Hata ağacını oluşturduktan sonra lojik işlemlerle temel kesitlemeler belirlenip, minimal kesitleme metodunua benzer şekilde ilk önce güvenilmezlik fonksiyonu ardından da güvenilirlik fonksiyonu elde edilir.

Bu durumda denklem **(2.30)**'dan yararlanılarak tüm sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF ≅ $m_{SİSTEM}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt$$

Denklem **(2.30)**'dan elde edilen sistem güvenilirlik fonksiyonu yerine konulduğunda arızaya kadar geçen ortalama süre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt = 4{,}53yıl$$

Burada hesaplanan değerler tek baralı bir sisteme ilişkin 5 yıllık çalışma koşulları altında sistemin çalışmaya devam etmesi durumunda sistemin güvenilirliğini ve ne kadar sıklıkla arızaya geçeceği hakkında bilgi vermektedir.

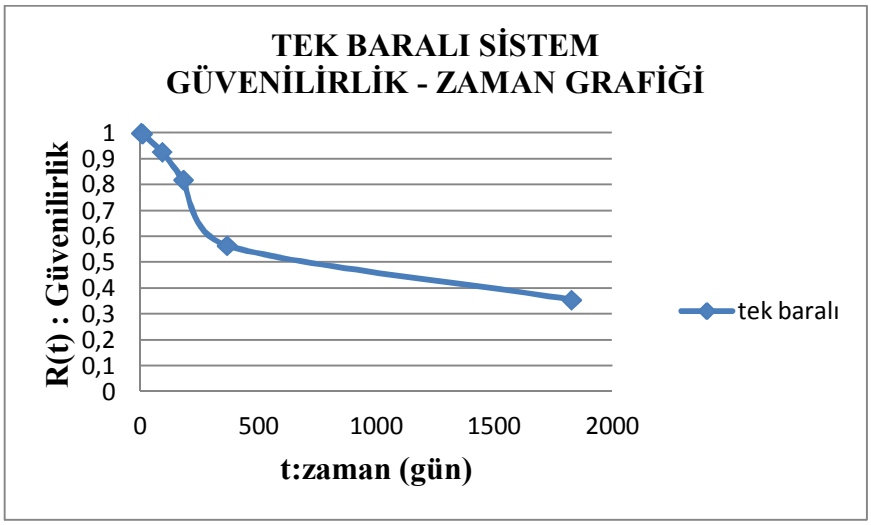
Tek baralı sisteme ilişkin elde edilen güvenilirlik fonksiyonu sayesinde sistemin farklı zamanlar için güvenilirlik davranışı da bulunabilir.

Çizelge 4.4' de çeşitli t zamanları (1 gün - 5 yıl) için tek baralı sisteme ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.4 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (tek bara).

	t=1 Gün	*t=7 Gün*	*t=3Ay*	*t=6 Ay*	*t=1 Yıl*	*t=5 Yıl*
$R_{SİSTEM}$	0,999448739	0,996003429	0,926147089	0,818257798	0,564465775	0,35454022

Çizelge 4.4' de yer alan bilgiler şekil 4.16' da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Tek baralı sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği.

Şekil 4.2' de yer alan tek baralı sistemde iki ayrı trafo görülmektedir. Her bir trafo gücünün S olduğu varsayımıyla, işletmede sistemin çalışma şekli şu şekilde olacaktır.

- 2 Trafo devrede, aktarılan güç 2S
- 1 Trafo devrede, aktarılan güç S
- 0 Trafo devrede, aktarılan güç 0

Örneğin iki trafonun devrede olması için sistemi oluşturan ekipmanların çalışma durumları şu şekilde olmalıdır. Şekil 4.8' e ele alındığında sonsuz güç kabul edilen L1 ve L2 enerji hatları kesici 1 veya kesici 2 vasıtasıyla bara 1' i enerjilendirecektir. Burada kesici 1 yada kesici 2' nin herhangi birisinin çalışması yeterli olduğu kabul edilmiştir. Bundan sonra iki trafonun da sisteme katkıda bulunması için (toplam 2S) diğer tüm ekipmanların çalışır durumunda olması gerekecektir.

Yukarıda anlatılanlara göre tek trafo ya da hiç trafo çalışmaması yani sisteme sırasıyla S ve sıfır güç aktarımı için gereken en az çalışma şartları benzer şekilde ortaya konulabilir.

İki trafodan meydana gelen tek baralı sisteme ilişkin üç farklı çalışma koşulunun (2S, S, 0) olasılıklarının bulmak için sisteme ait kullanılabilirlik (A) ve kullanılamazlık (U) ifadeleri ortaya konulmuştur. Bu değerleri elde etmek için olay ağacından yararlanılmıştır.

Olay ağaçları (Event Trees), sistemde olası tüm durumları gösteren grafik gösterimleridir.

Şekil 4.3' den yararlanılarak sistemde yer alan her ekipman bir harf ile gösterilecektir. Toplam 8 adet ekipman olduğuna göre olay ağacını oluşturan 2^8 adet durum söz konusudur.

Bu 256 adet durumun tamamı Ek A'da yer almaktadır.

Çizelge 4.5'de olay ağacında 2S çalışmaya karşılık gelen durumlar listelenmiştir.

Çizelge 4.5 : Olay ağacında 2S'e karşılık gelen durumlar.

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
1	+	+	+	+	+	+	+	+	2S	0,998874039
65	+	-	+	+	+	+	+	+	2S	0,000182443
129	-	+	+	+	+	+	+	+	2S	1,93845E-05

Çizelge 4.6'da ise olay ağacında S çalışmaya karşılık gelen durumlar listelenmiştir.

Çizelge 4.6 : Olay ağacında S'e karşılık gelen durumlar.

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
3	+	+	+	+	+	+	-	+	S	0,000256518
5	+	+	+	+	+	-	+	+	S	0,000182413
7	+	+	+	+	+	-	-	+	S	4,68526E-08
9	+	+	+	+	-	+	+	+	S	0,000256518
17	+	+	+	-	+	+	+	+	S	0,000182413
25	+	+	+	-	-	+	+	+	S	4,68526E-08
67	+	-	+	+	+	+	-	+	S	4,68526E-08
69	+	-	+	+	+	-	+	+	S	3,33174E-08
71	+	-	+	+	+	-	-	+	S	8,55756E-12
73	+	-	+	+	-	+	+	+	S	4,68526E-08
81	+	-	+	-	+	+	+	+	S	3,33174E-08
89	+	-	+	-	-	+	+	+	S	8,55756E-12
131	-	+	+	+	+	+	-	+	S	4,68526E-08
133	-	+	+	+	+	-	+	+	S	3,33174E-08
135	-	+	+	+	+	-	-	+	S	8,55756E-12
137	-	+	+	+	-	+	+	+	S	4,68526E-08
145	-	+	+	-	+	+	+	+	S	3,33174E-08
153	-	+	+	-	-	+	+	+	S	8,55756E-12

Çizelge 4.5 ve çizelge 4.6 dışında kalan tüm durumlar 0'a (sıfıra) yani arıza durumuna karşılık gelmektedir.

Olay ağacında "+" şeklinde gösterilen ekipmanlar çalışır durumunda "–" ile gösterilen ekipmanlar ise arıza durumunu ifade etmektedir.

Yukarıda bahsedilen durum olasılıkları için çizelge 4.1'de yer alan bilgilerden yararlanılmıştır. Çizelge 4.1' de yer alan datalar ile çizelge 4.7 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.7' de tek baralı sistem olay ağacındaki durumların olasılıklarının belirlenmesi için gerekli datalar yer almaktadır.

Çizelge 4.7 : Olay ağacı olasılıklarının belirlenmesinde kullanılan datalar.

Ekipman	Blok	λ arıza/yıl	r saat	r yıl	A Kullanılabilirlik	U Kullanılamazlık
KESİCİ	A	0,4	4	0,000456621	0,999817385	0,000182615
KESİCİ	B	0,4	4	0,000456621	0,999817385	0,000182615
BARA	C	0,1	2	0,000228311	0,999977169	2,28305E-05
KESİCİ	D	0,4	4	0,000456621	0,999817385	0,000182615
TRAFO	E	0,15	15	0,001712329	0,999743217	0,000256783
KESİCİ	F	0,4	4	0,000456621	0,999817385	0,000182615
TRAFO	G	0,15	15	0,001712329	0,999743217	0,000256783
BARA	H	0,1	2	0,000228311	0,999977169	2,28305E-05

Bu durumda sırasıyla 2S, S ve 0 (arıza) çalışma durumları için olasılıklar şu şekilde elde edilir.

P(2S) : Sistemin iki trafo tarafından enerjilendirilmesi olasılığına karşılık gelmektedir. Burada tarif edilen durum iki trafo tarafından, şekil 4.2' de bara-2 şeklinde ifade edilen baradan 2S gücünde enerji alınabilmesidir.(Tek trafo gücü S oalarak kabul edilmiştir). Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda P(2S) denklem **(2.23)**'den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P(2S) = P(1) + P(65) + P(129) = 0{,}999075836$$

P(S) : Sistemin tek trafo tarafından enerjilendirilmesi olasılığına karşılık gelmektedir. Burada tarif edilen durum tek trafo tarafından, şekil 4.2' de bara-2 şeklinde ifade edilen baradan sadece S gücünde enerji alınabilmesidir.(Tek trafo gücü S oalarak kabul edilmiştir). Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda P(S) denklem **(2.23)**'den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P(S) = \sum Olay\ Ağacında\ S\ Gücüne\ Karşılık\ Gelen\ Olasılık\ lar = 0{,}0006958$$

P(0) : Sistemin hiç bir trafo tarafından enerjilendirilememesi olasılığına karşılık gelmektedir. Burada tarif edilen durum hiçbir trafo tarafından enerjilendirilememe, şekil 4.2' de bara-2 şeklinde ifade edilen baradan hiçbir güç alınamamasına karşılık gelmektedir.

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda P(0) denklem **(2.24)**'den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P(0) = 1 - P(2S) - P(S) = 0{,}000228347$$

Çizelge 4.8' de tek baralı sistem olay ağacı durumlarından yararlanılarak hazırlanan üç durum olasılıkları yer almaktadır (İlgili olasılıklar tekil ve her durum için ayrı ayrı verilmiştir).

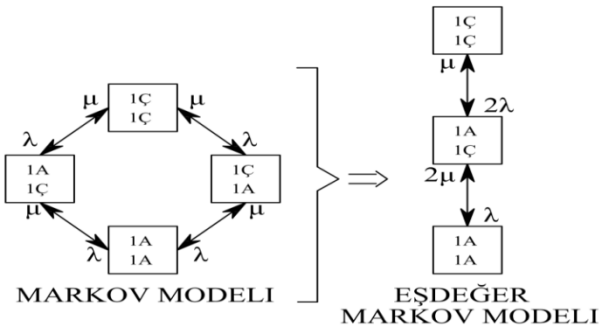
Çizelge 4.8 : 2S, S ve O (Arıza) Çalışma olasılıkları.

Çalışma Durumu	P - Olasılık
P(2S) - 2 Trafo Çalışma	0,999075836
P(S) – Tek Trafo Çalışma	0,000695817
P(0) - Arıza	0,000228347

Bu durumda sistemin başarısı en az S gücü kadar kabul edilirse kullanılabilirlik (A) ifadesi denklem **(2.23)**'den yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A = P(2S) + P(S) = 0{,}999771653$$

Bu durumda sistemin arıza hızı (λ) ve ortalama onarım süresinin (r) tespiti için şekil 4.7' de yer alan iki durumlu iki birimli bir onarılabilir sistem için Markov modeline yaklaşık olarak benzer bir model elde edilmek amaçlanmıştır.



Şekil 4.7 : İki durum iki birimli markov modeli ve yaklaşık eşdeğeri [3].

Sistem başarısının en az S gücü kadar olması durumu için daha önce bulunan arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF ≅ $m_{SİSTEM}$) ve denklem **(2.8)** dikkate alındığında sisteme ait arıza hızı (λ') aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\lambda' = \frac{1}{m} = 0{,}220750552\ arıza/yıl$$

Bu durum için şekil 4.7' de yer alan yaklaşık eşdeğer model göz önüne alındığında başarı durumunun en az S gücü kadar olması halindeki arıza oranı olan λ' ifadesi tüm sistemin arıza oranı olan λ cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda' = \lambda = 0{,}220750552\ arıza/yıl$$

Sistem başarısının en az S gücü kadar olması durumu için daha önce bulunan arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF ≅ $m_{SİSTEM}$) ve denklem **(2.23)** dikkate alındığında sisteme ait ortalama onarım oranı (μ') aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\mu' = \frac{A * \lambda'}{(1 - A)} = 966{,}513\ (1/yıl)$$

Bu durum için şekil 4.7' de yer alan eşdeğer modele bakıldığında başarı durumunun en az S gücü kadar olması halindeki ortalama oranı olan μ' ifadesi denklem **(2.23)**'den yararlanılarak tüm sistemin ortalama onarım oranı olan μ cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mu' = 2\mu$$

Bu durumda sisteme ait ortalama onarım oranı ifadesi μ denklem **(2.23)**'den yararlanılarak aşağıdaki değeri alır

$$\mu = \frac{\mu'}{2} = 483{,}256\ (1/\text{yıl})$$

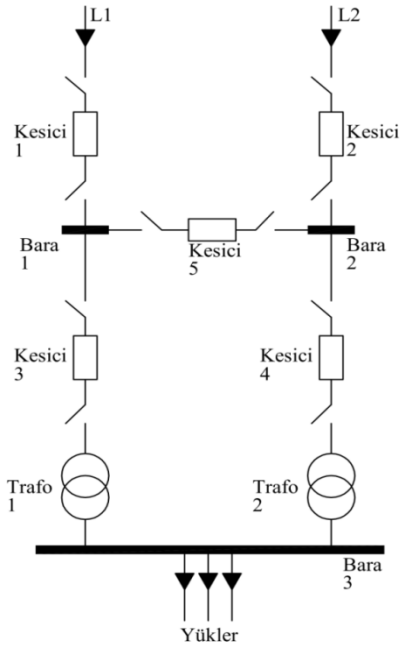
Buna göre bu duruma karşılık gelen ortalama onarım süresi denklem **(2.23)**'den yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$r = \frac{1}{\mu} = 0{,}00206929\ yıl$$

4.2.2 Bölünmüş baralı sistem

Bu sistemde güç trafoları ayrı baralardan beslenebilmektedirler. İşletme durumuna göre her iki bara paralel olarak bağlanabilir. Enerji sürekliliği istendiği durumlarda bu tip sistemlerin tercihi yapılabilir. Enerji beslemesinin sağlandığı hatlar üzerinde yer alan kesiciler yada bara üzerinde herhangi bir arıza durumunda hatalı olan bölüm diğer bölümden izole edilerek enerjinin sürekliliği sağlanmaktadır.

Bölünmüş baralı sisteme ait bir kesit şekil 4.8’ de yer almaktadır [10].



Şekil 4.8 : Bölünmüş baralı sisteme ait bir kesit [10].

Bölünmüş baralı sistemin avantajları şu şekildedir.

- Tek baralı sistemlere göre daha esnek işletilebilme,
- Bakım zamanında bölümlerin izole edilebilmesi,
- Kesici yada bara arızasında indirici merkezin sadece bir bölümünden faydalanılamaz,
- Kolay kurulum ve basit işletilebilme,
- Tek baralı sistemlere göre daha güvenilir olmaları [12].

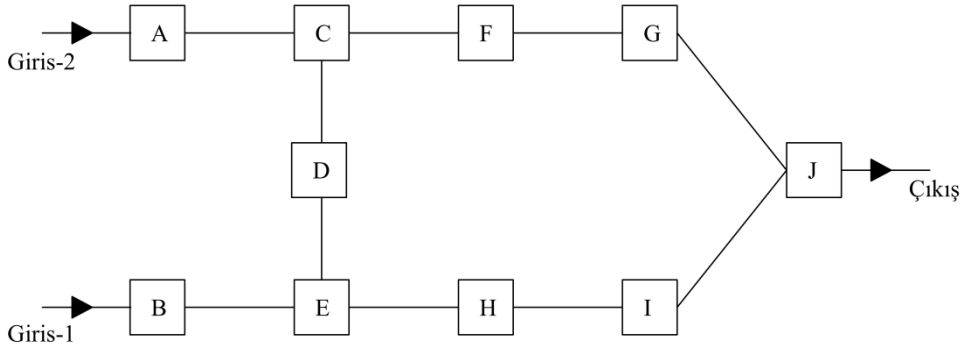
Bölünmüş baralı sistemin avantajları gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- Bu tip sistemlerde bölünen iki bara arasına kesici konulması gerekmektedir. Bu durumda tek baralı sistem göz önüne alındığında ilave bir maliyet ortaya koymaktadır,
- Devre kesici bakımı, iletim hattının yada servis trafosunun sistemden ayrılmasını gerektirir,

4.2.2.1 Bölünmüş baralı sistem için güvenilirlik değerlendirmesi

Örnek bir bölünmüş baralı sisteme ait güvenilirlik değerlendirmesi yapılırken bölüm 2' de yer alan güvenilirlik değerlendirmelerine ait bilgilerden yaralanılmıştır. Güvenilirlik dataları olarak çizelge 4.1' de yer alan datalardan yararlanılmıştır.

Şekil 4.9'da örnek bir bölünmüş baralı sisteme ait güvenilirlik analizi blok diyagramı yer almaktadır [11].



Şekil 4.9 : Bölünmüş baralı sistem blok diyagramı [11].

Şekil 4.9' da yer alan güvenilirlik blok diyagramındaki her bir elaman, şekil 4.8' de yer alan bir ekipmanın güvenilirlik datalarını temsil etmektedir. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- A bloğu, kesici-1 güvenilirlik datalarına,
- B bloğu, kesici-2 güvenilirlik datalarına,
- C bloğu, bara-2 güvenilirlik datalarına,
- D bloğu, kesici-5 güvenilirlik dataların,
- E bloğu, bara-1 güvenilirlik datalarına,
- F bloğu, kesici-4 güvenilirlik datalarına,
- G bloğu, trafo-2 güvenilirlik datalarına,
- H bloğu, kesici-3 güvenilirlik datalarına
- I bloğu, trafo-1 güvenilirlik datalarına
- J bloğu, bara-3 güvenilirlik datalarına karşılık gelmektedir.

Ekipmanlar arasındaki kablo ve kablo uçları güvenilirlik indisleri bağlı bulunduğu ekipmana dahil edilmiştir.

Sistem güvenilirliği hesaplamasında ilk önce şekil 4.9' dan yararlanılarak bölüm 4.2.1.1 tek baralı sistem güvenilirlik değerlendirmelerine benzer şekilde temel yollar elde edilir. Bu tanımlamalara göre temel yollar aşağıdaki gibidir.

Temel yollar : ACFGJ, ACDEHIJ, BEDCFGJ, BEHIJ

Temel yolların tespit edilmesinden sonra sırasıyla birinci ve ikinci mertebeden temel kesitlemeler bulunmuştur. İlgili sistem için güvenilirlik değerlendirmelerinde etkileri çok daha az olacak olan üçüncü, dördüncü, beşinci ve altıncı mertebeden temel kesitlemeler ihmal edilmiştir. Buna göre temel yol - bileşen bağlantı matrisleri oluşturulmuştur.

Birinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$M_{BT} = \begin{array}{c|cccccccccc} & \multicolumn{10}{c}{Bileşen\,»} \\ Yol & A & B & C & D & E & F & G & H & I & \boldsymbol{J} \\ \hline ACFGJ & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ ACDEHIJ & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & \mathbf{1} \\ BEDCFGJ & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ BEHIJ & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & \mathbf{1} \end{array}$$

"J" bileşenin bulunduğu sütun sıfır içermediği için birinci mertebeden temel kesitleme sadece "J" elamanıdır.

İkinci mertebenden temel yol - bileşen matrisi oluşturulurken "J" kümesini içermeyen ikişerli gruplar içerisinden temel kesitlemeler aranacaktır. Bu bilgi ışığında ikinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$\overline{M}_{BT} = \begin{array}{c|cccccccccccccccccc} & \multicolumn{18}{c}{Bileşen\,»} \\ Yol & AB & \dots & AE & \dots & BC & \dots & CE & \dots & CH & CI & \dots & EF & EG & \dots & FH & FI & .. & GH & GI \\ \hline ACFGJ & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 \\ ACDEHIJ & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 \\ BEDCFGJ & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 \\ BEHIJ & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 & & 1 & 1 \end{array}$$

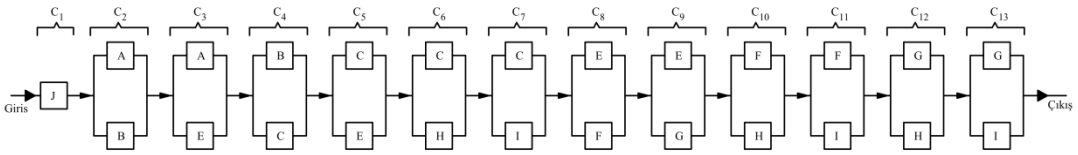
AB, AE, BC, CE, CH, CI, EF, EG, FH, FI, GH, GI bileşenlerinin bulunduğu sütunlar sıfır içermediği için ikinci mertebeden temel kesitlemeler AB, AE, BC, CE, CH, CI, EF, EG, FH, FI, GH, GI kümeleridir.

Bu durumda bölünmüş baralı sistem blok diyagramı için temel yollar ve temel kesitlemeler şu şekilde ortaya konulmuştur.

Temel yollar : ACFGJ, ACDEHIJ, BEDCFGJ, BEHIJ

Temel kesitlemeler : J, AB, AE, BC, CE, CH, CI, EF, EG, FH, FI, GH, GI

Temel yollar ve temel kesitlemeler belirlendikten sonra bölünmüş baralı sistemin eşdeğer blok diyagramı şekil 4.10' da yer almaktadır.



Şekil 4.10 : Bölünmüş baralı sistem eşdeğer blok diyagramı.

Eşdeğer blok diyagramı kullanılarak tüm sistem için güvenilmezlik fonksiyonun ifadesi ($Q_{SİSTEM}(t)$) yazılması gerekecektir. Bu ifade de denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki yazılır

$$Q_{SİSTEM} = Q\left[\bigcup_{i=1} C_i\right]$$

Bu durumda tüm sistemin güvenilmezlik fonksiyonunun ifadesi denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} = \sum Q(C_i) - \sum Q(C_i \cap C_J) + \sum Q(C_i \cap C_J \cap C_k) \mp \ldots$$

C_1 kümesine ait güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.7)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{C_1}(t) = 1 - R_J(t) = 1 - e^{-\lambda_J t} = 1 - e^{-0,1t}$$

C_2 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (A ve B) oluşmaktadır. Bu durumda C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_2}(t) = Q_A(t).Q_B(t) = \left(1 - R_A(t)\right).\left(1 - R_B(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_2}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_A t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_B t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_3 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (A ve E) oluşmaktadır. Bu durumda C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_3}(t) = Q_A(t).Q_E(t) = \left(1 - R_A(t)\right).\left(1 - R_E(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_3}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_A t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_E t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_4 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (B ve C) oluşmaktadır. Bu durumda C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_4}(t) = Q_B(t).Q_C(t) = \left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_C(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_4}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_B t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_C t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_5 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (C ve E) oluşmaktadır. Bu durumda C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_5}(t) = Q_C(t).Q_E(t) = \left(1 - R_C(t)\right).\left(1 - R_E(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_5}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_C t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_E t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_6 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (C ve H) oluşmaktadır. Bu durumda C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_6}(t) = Q_C(t).Q_H(t) = \left(1 - R_C(t)\right).\left(1 - R_H(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_6}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_C t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_H t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_7 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (C ve I) oluşmaktadır. Bu durumda C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_7}(t) = Q_C(t).Q_I(t) = \left(1 - R_C(t)\right).\left(1 - R_I(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_7}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_C t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_I t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_8 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (E ve F) oluşmaktadır. Bu durumda C_8 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_8}(t) = Q_E(t).Q_F(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_F(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_8 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_8}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_E t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_F t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_9 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (E ve G) oluşmaktadır. Bu durumda C_9 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_9}(t) = Q_E(t).Q_G(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_G(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_9 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_9}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_E t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_G t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_{10} kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (F ve H) oluşmaktadır. Bu durumda C_{10} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_{10}}(t) = Q_F(t).Q_H(t) = \left(1 - R_F(t)\right).\left(1 - R_H(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_{10} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_{10}}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_F t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_H t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_{11} kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (F ve I) oluşmaktadır. Bu durumda C_{11} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_{11}}(t) = Q_F(t).Q_I(t) = \left(1 - R_F(t)\right).\left(1 - R_I(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_{11} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_{11}}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_F t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_I t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_{12} kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (G ve H) oluşmaktadır. Bu durumda C_{12} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_{12}}(t) = Q_G(t).Q_H(t) = \left(1 - R_G(t)\right).\left(1 - R_H(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_{12} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_{12}}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_G t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_H t}\right) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_{13} kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (G ve I) oluşmaktadır. Bu durumda C_{13} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_{13}}(t) = Q_G(t).Q_I(t) = \left(1 - R_G(t)\right).\left(1 - R_I(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_{13} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_{13}}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_G t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_I t}\right) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Kesitleme kesişimlerinin arıza olasılıkları ise koşullu olasılık eşitlikleri kullanılarak elde edilecektir [3]. Bu bilgiye göre kesitleme kesişimleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$Q_{ABJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{ABJ}(t) = Q_A(t).Q_B(t).Q_J(t) = \left(1 - R_A(t)\right).\left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_J(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan $Q_{ABJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{ABJ}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{AEJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{AEJ}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{BCJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{BCJ}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{CEJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CEJ}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{CHJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CHJ}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{CIJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CIJ}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{EFJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EFJ}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{EGJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EGJ}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{FHJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{FHJ}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{FIJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{FIJ}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{GHJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{GHJ}(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{GIJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir

$$Q_{GIJ}(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

Diğer kesitleme kesişimleri ise ihmal edilerek analize devam edilmiştir.

Çizelge 4.9'da bölünmüş baralı sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (C_1-C_{13} kümeleri arası) yer almaktadır.

Çizelge 4.9 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_7 Arası).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
C_1	$Qc_1(t) = 1 - e^{-0,1t}$
C_2	$Qc_2(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t})$
C_3	$Qc_3(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t})$
C_4	$Qc_4(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t})$
C_5	$Qc_5(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t})$
C_6	$Qc_6(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,4t})$
C_7	$Qc_7(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
C_8	$Qc_8(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,4t})$
C_9	$Qc_9(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
C_{10}	$Qc_{10}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t})$
C_{11}	$Qc_{11}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t})$
C_{12}	$Qc_{12}(t) = (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,4t})$
C_{13}	$Qc_{13}(t) = (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t})$

Çizelge 4.10'da bölünmüş baralı sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen güvenilmezlik pozitif yönde etki edecek sonuçların ($\sum(+)$) yer almaktadır.

Çizelge 4.10 : Güvenilmezlik fonksiyonu pozitif($\sum(+)$).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
$\sum(+)$	$\Sigma(+) = 1 - e^{-0,1t} + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,4t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,4t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,4t}) + (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t})$

Çizelge 4.11' de bölünmüş baralı sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (kesitleme kesişimleri) yer almaktadır.

Çizelge 4.11 : Güvenilmezlik fonksiyonu (kesitleme kesişimleri).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
ABJ	$Q_{ABJ}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
AEJ	$Q_{AEJ}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t})$
BCJ	$Q_{BCJ}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t})$
CEJ	$Q_{CEJ}(t) = (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t})$
CHJ	$Q_{CHJ}(t) = (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
CIJ	$Q_{CIJ}(t) = (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})$
EFJ	$Q_{EFJ}(t) = (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
EGJ	$Q_{EGJ}(t) = (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})$
FHJ	$Q_{FHJ}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
FIJ	$Q_{FIJ}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})$
GHJ	$Q_{GHJ}(t) = (1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t})$
GIJ	$Q_{GIJ}(t) = (1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})$

Çizelge 4.12'de bölünmüş baralı sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen güvenilmezlik negatif yönde etki edecek olan kesişimler (∑ (-)) yer almaktadır.

Çizelge 4.12 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesişim(∑ (-)).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
∑ (-)	$\Sigma(-) \cong (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,15t}).(1-e^{-0,1t})$

Çizelge 4.10 ve çizelge 4.12'de yer alan veriler doğrultusunda denklem **(2.57)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} \cong \sum(+) - \sum(-)$$

Buna göre denklem **(2.58)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_{SİSTEM}(t) = 1 - Q_{SİSTEM}(t)$$

Bu durumda denklem **(2.30)**'dan yararlanılarak tüm sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF ≅ $m_{SİSTEM}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır[15].

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt$$

Denklem **(2.30)**'dan elde edilen sistem güvenilirlik fonksiyonu yerine konulduğunda arızaya kadar geçen ortalama süre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt = 6{,}71yıl$$

Burada hesaplanan değerler bölünmüş baralı bir sisteme ilişkin 5 yıllık çalışma koşulları altında sistemin çalışmaya devam etmesi durumunda sitemin güvenilirliğini ve ne kadar sıklıkla arızaya geçeceği hakkında bilgi vermektedir.

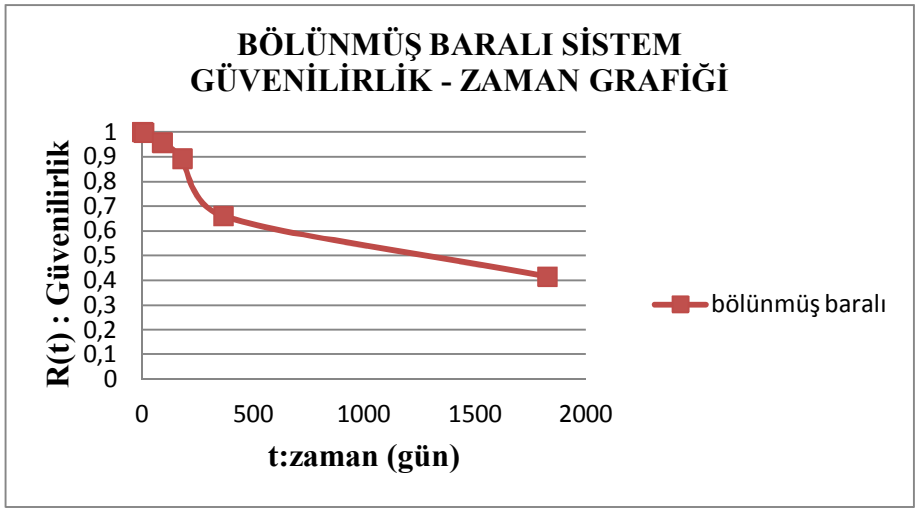
Bölünmüş baralı sisteme ilişkin elde edilen güvenilirlik fonksiyonu sayesinde sistemin farklı zamanlar için güvenilirlik davranışı da bulunabilir.

Çizelge 4.13' de çeşitli t zamanları (1 gün - 5 yıl) için bölünmüş baralı sisteme ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.13 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (bölünmüş bara).

	t=1 Gün	***t=7 Gün***	***t=3Ay***	***t=6 Ay***	***t=1 Yıl***	***t=5 Yıl***
$R_{SİSTEM}$	0,999905713	0,997015698	0,957254124	0,892312581	0,660102549	0,41512501

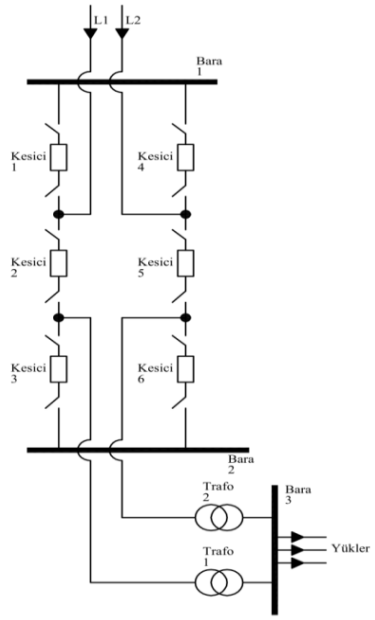
Çizelge 4.13’ de yer alan bilgiler şekil 4.11’ de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : Bölünmüş baralı sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği.

4.2.3 Bir buçuk kesici sistemi

Bu sistem daha çok bara güvenliği istendiğinde tercih edilmektedir. Bir buçuk kesici sisteminde çıkış başına yarım kesi daha fazla kullanılmaktadır. Yani sistemde her iki çıkış için üç kesici yer almaktadır. Bu düzenlemede bir çok manevra olanağı söz konusudur. Ancak sistemde yer alan tüm aygıtların iki çıkış fiderini de karşılayabilecek karakteristiğe sahip olmaları gereklidir [12]. Avrupa’ da pek fazla yaygın olmayan bu sistem daha çok kuzey amerika’da kullanılmaktadır [13].Bir buçuk kesici sisteme ait bir kesit şekil 4.12’ de yer almaktadır [11].



Şekil 4.12 : Bir buçuk kesici sistemine ait bir kesit [11].

Bir buçuk kesici sisteminin avantajları şu şekildedir[12].

- Çeşitli işletme şartlarına sahip olmaları
- Yüksek güvenilirlik seviyeleri
- Servis ve bakım durumlarında belirli kesicileri izole edebilme
- Servis ve bakım durumlarında iki barayı da izole edebilme
- Her bir transformatör ve/veya iletim hattı için iki besleme noktasına sahip olmaları
- Tüm anahtarlamaların kesiciler ile yapılabilir olması
- Yük çıkışlarının alındığı baraların dışında kalan baraların herhangi birinde arıza olması durumda sistem çalışması kesintiye uğramaz.

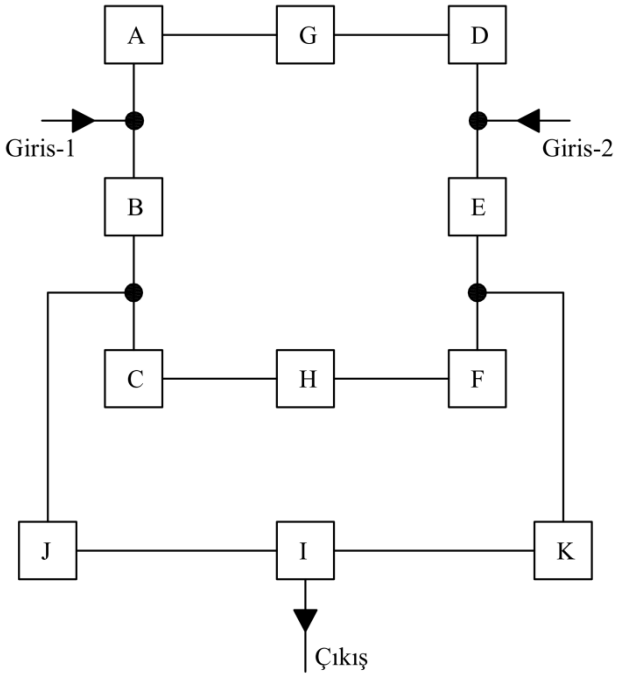
Bir buçuk kesici sisteminin avantajları gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- Her bir transformatör ve/veya iletim hattı başına bir buçuk kesici ihtiyacı
- Özellikle halka yapılı sistemlere göre daha maliyetlidir.
- Koruma röle düzenleri, iki ayrı devreye de cevap verebilecek niteliğe sahip olmaları gerektiğinden oldukça karmaşıktır
- Otomatik devre kesicilere ait senaryolar, trafo ve iletim hatlarının farklı karakteristiklere sahip olmalarına bağlı olarak her bir kesici için ayrı ayrı değerlendirilmelidir.
- Röle koruması her iletim hattından ayrı besleme gerektirir[12].

4.2.3.1 Bir buçuk kesici sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi

Örnek bir bir buçuk kesici sistemine ait güvenilirlik değerlendirmesi yapılırken bölüm 2' de yer alan güvenilirlik değerlendirmelerine ait bilgilerden yaralanılmıştır. Güvenilirlik dataları olarak çizelge 4.1' de yer alan datalardan yararlanılmıştır.

Şekil 4.13’ de örnek bir bir buçuk kesicili sisteme ait güvenilirlik analizi blok diyagramı yer almaktadır [11].



Şekil 4.13 : Bir buçuk kesici sistem blok diyagramı [11].

Şekil 4.13’ de yer alan güvenilirlik blok diyagramındaki her bir elaman, şekil 4.12’de yer alan bir ekipmanın güvenilirlik datalarını temsil etmektedir. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- A bloğu, kesici-1 güvenilirlik datalarına,
- B bloğu, kesici-2 güvenilirlik datalarına,
- C bloğu, kesici-3 güvenilirlik datalarına,
- D bloğu, kesici-4 güvenilirlik dataların,
- E bloğu, kesici-5 güvenilirlik datalarına,
- F bloğu, kesici-6 güvenilirlik datalarına,
- G bloğu, bara-1 güvenilirlik datalarına,
- H bloğu, bara-2 güvenilirlik datalarına
- I bloğu, bara-3 güvenilirlik datalarına
- J bloğu, trafo-1 güvenilirlik datalarına
- K bloğu, trafo-2 güvenilirlik datalarına karşılık gelmektedir.

Ekipmanlar arasındaki kablo ve kablo uçları güvenilirlik indisleri bağlı bulunduğu ekipmana dahil edilmiştir.

Sistem güvenilirliği hesaplamasında ilk önce şekil 4.13' den yararlanılarak bölüm 4.2.1.1 tek baralı sistem güvenilirlik değerlendirmelerine benzer şekilde temel yollar elde edilir. Bu tanımlamalara göre temel yollar aşağıdaki gibidir.

Temel yollar : BJI, BCHFKI, AGDEKI, AGDEFHCJI, EKI, EFHCJI, DGABJI, DGABCHFKI

Temel yolların tespit edilmesinden sonra sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü mertebeden temel kesitlemeler bulunmuştur. İlgili sistem için güvenilirlik değerlendirmelerinde etkilerinin çok daha az olduğu dördüncü ve daha fazla mertebeden temel kesitlemeler ihmal edilmiştir. Buna göre temel yol - bileşen bağlantı matrisleri oluşturulmuştur.

Birinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$M_{BT} = \begin{array}{c|cccccccccc} & \multicolumn{10}{c}{Bileşen \rightarrow} \\ Yol & A & B & C & D & E & F & G & H & \boldsymbol{I} & J & K \\ \hline BJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ BCHFKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ AGDEKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ AGDEFHCJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ EKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ EFHCJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ DGABJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ DGABCHFKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \end{array}$$

"I" bileşenin bulunduğu sütun sıfır içermediği için birinci mertebeden temel kesitleme sadece "I" elamanıdır.

İkinci mertebenden temel yol - bileşen matrisi oluşturulurken "I" kümesini içermeyen ikişerli gruplar içerisinden temel kesitlemeler aranmıştır.

Bu bilgi ışığında ikinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$\overline{M}_{BT} = \begin{array}{c|cccccccccc} & & & \multicolumn{7}{c}{Bileşen \rightarrow} \\ Yol & \ldots & \ldots & \boldsymbol{BE} & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & & \boldsymbol{JK} \\ \hline BJI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \\ BCHFKI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \\ AGDEKI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \\ AGDEFHCJI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \\ EKI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \\ EFHCJI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \\ DGABJI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \\ DGABCHFKI & & & \mathbf{1} & & & & & & \mathbf{1} \end{array}$$

BE ve JK bileşenlerinin bulunduğu sütunlar sıfır içermediği için ikinci mertebeden temel kesitlemeler BE ve JK kümeleridir.

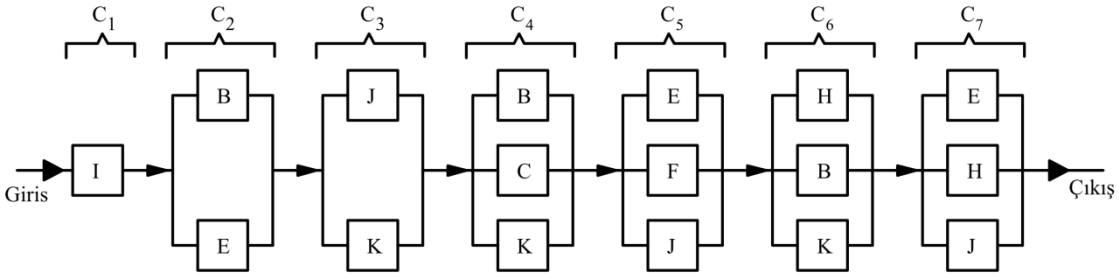
Benze işlemler yapılarak üçüncü mertebeden temel kesitlemelerin BCK, EFJ, HBK, EHJ belirlenir.

Bu durumda bir buçuk kesici sistemi blok diyagramı için temel yollar ve temel kesitlemeler şu şekilde ortaya konulmuştur.

Temel yollar : BJI, BCHFKI, AGDEKI, AGDEFHCJI, EKI, EFHCJI, DGABJI, DGABCHFKI

Temel kesitlemeler : I, BE, JK, BCK, EFJ, HBK, EHJ

Temel yollar ve temel kesitlemeler belirlendikten sonra bir buçuk kesici sistemin eşdeğer blok diyagramı şekil 4.14' de yer almaktadır.



Şekil 4.14 : Bir buçuk kesici sistem eşdeğer blok diyagramı.

Eşdeğer blok diyagramı kullanılarak tüm sistem için güvenilmezlik fonksiyonun ifadesi ($Q_{SİSTEM}(t)$) yazılması gerekecektir. Bu ifade de denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki yazılır

$$Q_{SİSTEM} = Q\left[\bigcup_{i=1} C_i\right] = Q(C_1\ U\ C_2\ U\ C_3\ U\ C_4\ U\ C_5 U\ C_6\ U\ C_7)$$

Bu durumda tüm sistemin güvenilmezlik fonksiyonunun ifadesi denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde de elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} = \sum Q(C_i) - \sum Q(C_i \cap C_J) + \sum Q(C_i \cap C_J \cap C_k) \mp \ldots$$

C_1 kümesine ait güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.7)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{C_1}(t) = 1 - R_I(t) = 1 - e^{-\lambda_I t} = 1 - e^{-0,1t}$$

C_2 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (B ve E) oluşmaktadır. Bu durumda C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_2}(t) = Q_B(t).Q_E(t) = \left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_E(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_2}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_B t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_E t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_3 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (J ve K) oluşmaktadır. Bu durumda C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_3}(t) = Q_J(t).Q_K(t) = \left(1 - R_J(t)\right).\left(1 - R_K(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_3}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_J t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_K t}\right) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_4 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (B,C ve K) oluşmaktadır. Bu durumda C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_4}(t) = Q_B(t).Q_C(t).Q_K(t) = \left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_C(t)\right).\left(1 - R_K(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_4}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_5 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (E,F ve J) oluşmaktadır. Bu durumda C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_5}(t) = Q_E(t).Q_F(t).Q_J(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_F(t)\right).\left(1 - R_J(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_5}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_6 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (H,B ve K) oluşmaktadır. Bu durumda C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_6}(t) = Q_H(t).Q_B(t).Q_K(t) = \left(1 - R_H(t)\right).\left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_K(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_6}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_7 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (E,H ve J) oluşmaktadır. Bu durumda C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_7}(t) = Q_E(t).Q_H(t).Q_J(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_H(t)\right).\left(1 - R_J(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_7}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Kesitleme kesişimleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$Q_{BEI}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{BEI}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{IJK}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{IJK}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{BCIK}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{BCIK}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{EFIJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EFIJ}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{BHIK}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{BHIK}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{EHIJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EHIJ}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Diğer kesitleme kesişimleri etkilerinin düşük olmasından dolayı ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.14' de bir buçuk kesicili sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (C_1-C_7 kümeleri arası) yer almaktadır.

Çizelge 4.14 : Güvenilimezlik fonksiyonu (C_1-C_7 Arası).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
C_1	$Qc_1(t) = 1 - e^{-0,1t}$
C_2	$Qc_2(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t})$
C_3	$Qc_3(t) = (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t})$
C_4	$Qc_4(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t})$
C_5	$Qc_5(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t})$
C_6	$Qc_6(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t})$
C_7	$Qc_7(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
∑ (+)	$\sum(+) = (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) + (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$

Çizelge 4.15'de bir buçuk kesicili sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen güvenilmezlik negatif yönde etki edecek olan kesişimler (∑ **(-)**) yer almaktadır.

Çizelge 4.15 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesişim kümeleri (∑ **(-)**).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
BEI	$Qc_{BEI}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t})$
IJK	$Qc_{IJK}(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t})$
BCIK	$Qc_{BCIK}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
EFIJ	$Qc_{EFIJ}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
BHIK	$Qc_{BHIK}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
EHIJ	$Qc_{EHIJ}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
∑ (-)	$\sum(-) \cong (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$

Çizelge 4.14 ve çizelge 4.15'de yer alan veriler doğrultusunda denklem **(2.57)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} \cong \sum(+) - \sum(-)$$

Buna göre denklem **(2.58)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_{SİSTEM}(t) = 1 - Q_{SİSTEM}(t)$$

Bu durumda denklem **(2.30)**'dan yararlanılarak tüm sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF ≅ $m_{SİSTEM}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt$$

Denklem **(2.30)**'dan elde edilen sistem güvenilirlik fonksiyonu yerine konulduğunda arızaya kadar geçen ortalama süre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt = 23{,}87yıl$$

Burada hesaplanan değerler bir buçuk kesicili sisteme ilişkin 5 yıllık çalışma koşulları altında sistemin çalışmaya devam etmesi durumunda sitemin güvenilirliğini ve ne kadar sıklıkla arızaya geçeceği hakkında bilgi vermektedir.

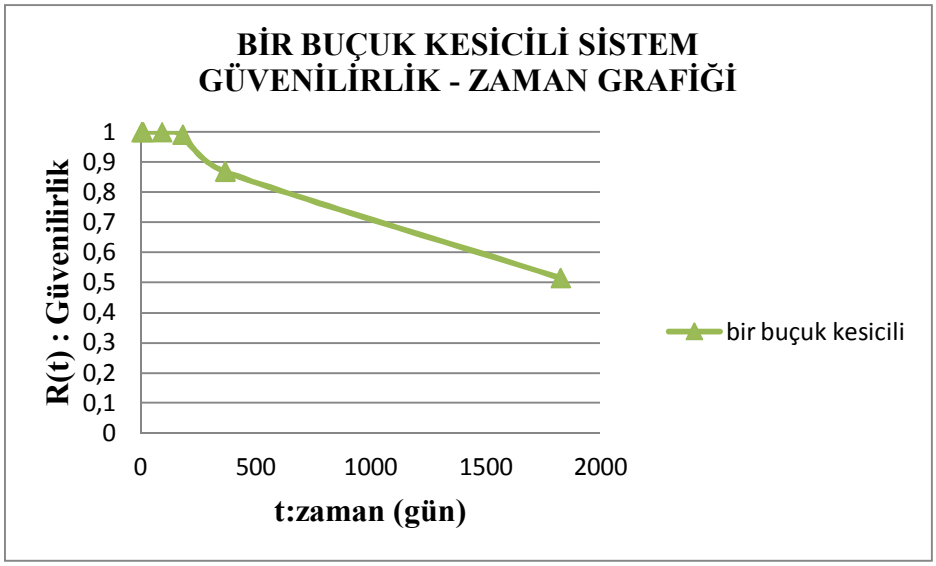
Bir buçuk kesicili sisteme ilişkin elde edilen güvenilirlik fonksiyonu sayesinde sistemin farklı zamanlar için güvenilirlik davranışı da bulunabilir.

Çizelge 4.16' da çeşitli t zamanları (1 gün - 5 yıl) için bir buçuk kesicili sisteme ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.16 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (bir buçuk kesici).

	t=1 Gün	***t=7 Gün***	***t=3Ay***	***t=6 Ay***	***t=1 Yıl***	***t=5 Yıl***
$R_{SİSTEM}$	0,999999945	0,99999165	0,999014591	0,99110892	0,86921545	0,5152184

Çizelge 4.16' da yer alan bilgiler şekil 4.15' de grafiksel olarak gösterilmiştir.

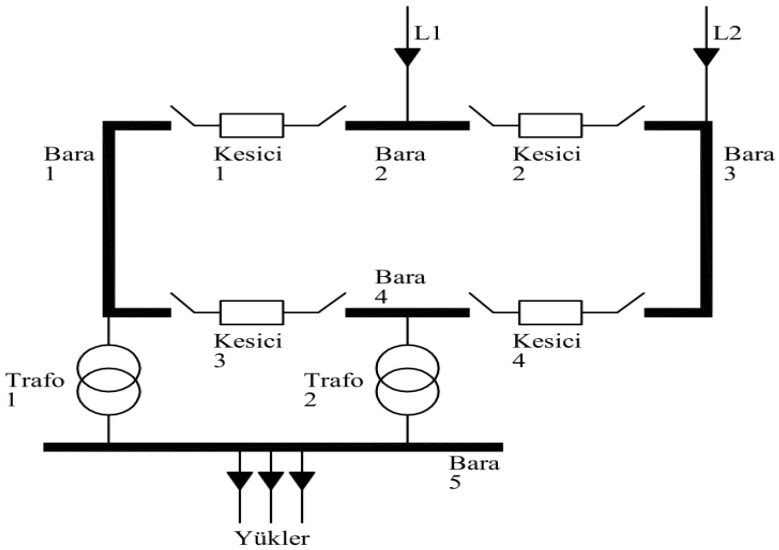


Şekil 4.15 : Bir buçuk kesicili sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği.

4.2.4 Halka (ring) bara sistemi

Bu düzenlemede kesiciler, fider çıkışı yerine bara üzerine yerleştirilmiştir. Bir fideri devreden çıkarmak için iki kesicinin açılması gerekir. Kesicilerden birinin devre dışı olması halkanın açılmasına yol açar. Arızalı fiderin devre çıkışındaki ayırıcısı açılıp kesiciler kapatılarak halka kapalı duruma getirilebilir.

Halka bara sistemine ait bir kesit şekil 4.16' da yer almaktadır [10].



Şekil 4.16 : Halka bara sistemine ait bir kesit [10].

Halka bara sisteminin avantajları şu şekildedir [10].

- Esnek çalışma şartları,
- Yüksek güvenilirlik,
- Her bir trafo ve/veya iletim hattı için çift besleme imkanı,
- Ana bara şeklinde bir kavram olmaması,
- Bir buçuk kesicili sisteme genişletilebilme imkanı,
- Kesici ve bara ekipmanlarının bakımı sırasında sistemin çalışmaya devam edebilmesi [10].

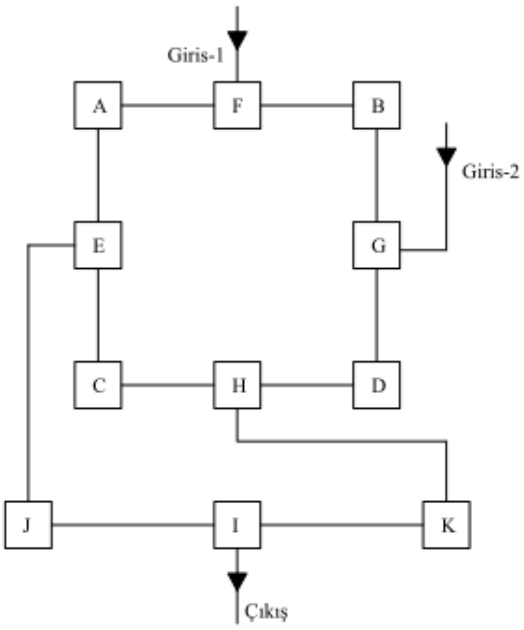
Halka bara sisteminin avantajları gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- Arızalı kısmın sitemden çıkartılması işleminde devre kısa süreliğine istenmeyen durum içine girebilir,
- Röle koruması her iletim hattından ayrı besleme gerektirir,
- Bu bağlantı tipi uygulamada daha büyük sistemler olmasına rağmen sınırlı yapıdadır sistem dört kesici pozisyonu ile sınırlıdır. Altı kesici pozisyonu ring baralar için en limit sınırdır,
- Koruma ve kontroller iki hattında aynı anda idare edebilecek yapıda olmaları gerektiğinden oldukça karmaşıktırlar,
- Sistem yapıları karmaşık olduğundan otomatik tekrar kapama düzenleri de karmaşıktır [12].

4.2.4.1 Halka bara sistem için güvenilirlik değerlendirmesi

Örnek bir halka bara sistemine ait güvenilirlik değerlendirmesi yapılırken bölüm 2' de yer alan güvenilirlik değerlendirmelerine ait bilgilerden yaralanılmıştır. Güvenilirlik dataları olarak çizelge 4.1' de yer alan datalardan yararlanılmıştır.

Şekil 4.17’ de örnek bir halka bara sistemine ait güvenilirlik analizi blok diyagramı yer almaktadır [11].



Şekil 4.17 : Halka bara sistemi blok diyagramı [11].

Şekil 4.17’ de yer alan güvenilirlik blok diyagramındaki her bir elaman, şekil 4.16’da yer alan bir ekipmanın güvenilirlik datalarını temsil etmektedir. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- A bloğu, kesici-1 güvenilirlik datalarına,
- B bloğu, kesici-2 güvenilirlik datalarına,
- C bloğu, kesici-3 güvenilirlik datalarına,
- D bloğu, kesici-4 güvenilirlik dataların,
- E bloğu bara-1güvenilirlik datalarına,
- F bloğu bara-2 güvenilirlik datalarına,
- G bloğu, bara-3 güvenilirlik datalarına,
- H bloğu, bara-4 güvenilirlik datalarına
- I bloğu, bara-5 güvenilirlik datalarına
- J bloğu, trafo-1 güvenilirlik datalarına
- K bloğu, trafo-2 güvenilirlik datalarına karşılık gelmektedir.

Ekipmanlar arasındaki kablo ve kablo uçları güvenilirlik indisleri bağlı bulunduğu ekipmana dahil edilmiştir.

Sistem güvenilirliği hesaplamasında ilk önce şekil 4.17' den yararlanılarak bölüm 4.2.1.1 tek baralı sistem güvenilirlik değerlendirmelerine benzer şekilde temel yollar elde edilir. Bu tanımlamalara göre temel yollar aşağıdaki gibidir.

Temel yollar : FAEJI, FAECHDGKI, FBGDHCEJI, FBGKI, BGKI, BDGHCEJI, BFAECHDGKI, BFAEJI

Temel yolların tespit edilmesinden sonra sırasıyla birinci ve ikinci mertebeden temel kesitlemeler bulunacaktır. İlgili sistem için güvenilirlik değerlendirmelerinde etkilerinin çok daha az olduğu üçüncü, dördüncü, beşinci ve altıncı mertebeden temel kesitlemeler ihmal edilecektir. Buna göre temel yol - bileşen bağlantı matrisleri oluşturulmuştur.

Birinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$M_{BT} = \begin{array}{c|cccccccccc} & \multicolumn{10}{c}{Bileşen\ »} \\ Yol & A & B & C & D & E & F & G & H & \boldsymbol{I} & J & K \\ \hline FAEJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ FAECHDGKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ FBGDHCEJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ FBGKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ BGKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ BDGHCEJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ BFAECHDGKI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \\ BFAEJI & & & & & & & & & \mathbf{1} & & \end{array}$$

"I" bileşenin bulunduğu sütun sıfır içermediği için birinci mertebeden temel kesitleme sadece "I" elamanıdır.

İkinci mertebenden temel yol - bileşen matrisi oluşturulurken "I" kümesini içermeyen ikişerli gruplar içerisinden temel kesitlemeler aranmıştır.

Bu bilgi ışığında ikinci mertebeden temel yol - bileşen bağlantı matrisi şu şekildedir.

$$\overline{M}_{BT} = \begin{array}{c|ccccccccccccc} & \multicolumn{13}{c}{Bileşen\ »} \\ Yol & \boldsymbol{AB} & \dots & \boldsymbol{AG} & \dots & \boldsymbol{BE} & \boldsymbol{BF} & \dots & \boldsymbol{EG} & \dots & \boldsymbol{EK} & \dots & \boldsymbol{FG} & \boldsymbol{GJ} & \boldsymbol{JK} \\ \hline FAEJI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ FAECHDGKI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ FBGDHCEJI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ FBGKI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ BGKI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ BDGHCEJI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ BFAECHDGKI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ BFAEJI & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{array}$$

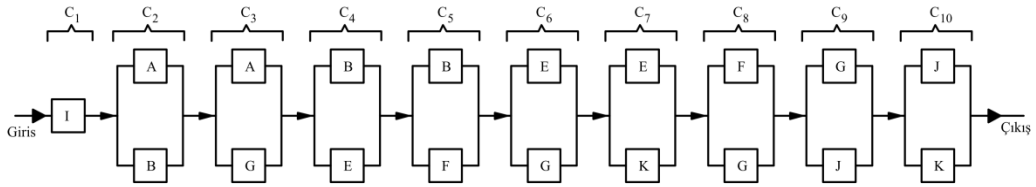
AB, AG, BE, BF, EG, EK, FG, GJ ve JK bileşenlerinin bulunduğu sütunlar sıfır içermediği için ikinci mertebeden temel kesitlemeler AB, AG, BE, BF, EG, EK, FG, GJ ve JK kümeleridir.

Bu durumda halka bara sistemi blok diyagramı için temel yollar ve temel kesitlemeler şu şekilde ortaya konulmuştur.

Temel Yollar : FAEJI, FAECHDGKI, FBGDHCEJI, FBGKI, BGKI, BDGHCEJI, BFAECHDGKI, BFAEJI

Temel kesitlemeler : I, AB, AG, BE, BF, EG, EK, FG, GJ, JK

Temel yollar ve temel kesitlemeler belirlendikten sonra halka bara sisteminin eşdeğer blok diyagramı şekil 4.18' de yer almaktadır.



Şekil 4.18 : Halka bara sistem eşdeğer blok diyagramı.

Eşdeğer blok diyagramı kullanılarak tüm sistem için güvenilmezlik fonksiyonun ifadesi ($Q_{SİSTEM}(t)$) yazılması gerekecektir. Bu ifade de denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki yazılır

$$Q_{SİSTEM} = Q\left[\bigcup_{i=1} C_i\right] = Q(C_1\ U\ C_2 \ldots\ldots U\ C_{10})$$

Bu durumda tüm sistemin güvenilmezlik fonksiyonunun ifadesi denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} = \sum Q(C_i) - \sum Q(C_i \cap C_J) + \sum Q(C_i \cap C_J \cap C_k) \mp \ldots$$

C_1 kümesine ait güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.7)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{C_1}(t) = 1 - R_I(t) = 1 - e^{-\lambda_I t} = 1 - e^{-0,1t}$$

C_2 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (A ve B) oluşmaktadır. Bu durumda C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_2}(t) = Q_A(t).Q_B(t) = \left(1 - R_A(t)\right).\left(1 - R_B(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_2}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_A t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_B t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$$

C_3 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (A ve G) oluşmaktadır. Bu durumda C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_3}(t) = Q_A(t).Q_G(t) = \left(1 - R_A(t)\right).\left(1 - R_G(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_3}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_A t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_G t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_4 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (B ve E) oluşmaktadır. Bu durumda C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_4}(t) = Q_B(t).Q_E(t) = \left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_E(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_4}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_B t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_E t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_5 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (B ve F) oluşmaktadır. Bu durumda C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_5}(t) = Q_B(t).Q_F(t) = \left(1 - R_B(t)\right).\left(1 - R_F(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_5}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_B t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_F t}\right) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_6 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (E ve G) oluşmaktadır. Bu durumda C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_6}(t) = Q_E(t).Q_G(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_G(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_6}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_E t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_G t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_7 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (E ve K) oluşmaktadır. Bu durumda C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_7}(t) = Q_E(t).Q_K(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_K(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_7}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_E t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_K t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_8 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (F ve G) oluşmaktadır. Bu durumda C_8 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_8}(t) = Q_F(t).Q_G(t) = \left(1 - R_F(t)\right).\left(1 - R_G(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_8 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_8}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_F t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_G t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_9 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (G ve J) oluşmaktadır. Bu durumda C_9 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_9}(t) = Q_G(t).Q_J(t) = \left(1 - R_G(t)\right).\left(1 - R_J(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_9 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_9}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_G t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_J t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_{10} kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (J ve K) oluşmaktadır. Bu durumda C_{10} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_{10}}(t) = Q_J(t).Q_K(t) = \left(1 - R_J(t)\right).\left(1 - R_K(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_{10} kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_{10}}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_J t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_K t}\right) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Kesitleme kesişimleri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$Q_{ABI}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{ABI}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{AGI}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{AGI}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{BEI}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{BEI}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{BFI}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{BFI}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{EGI}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EGI}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{EIK}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EIK}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{FGI}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{FGI}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{GIJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{GIJ}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{IJK}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{IJK}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Diğer kesitleme kesişimleri etkilerinin düşük olmasından dolayı ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.17' de halka bara sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (C_1-C_{10} kümeleri arası) yer almaktadır.

Çizelge 4.17 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_{10} Arası).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
C_1	$Qc_1(t) = 1 - e^{-0,1t}$
C_2	$Qc_2(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right)$
C_3	$Qc_3(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$
C_4	$Qc_4(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$
C_5	$Qc_5(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$
C_6	$Qc_6(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$
C_7	$Qc_7(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_8	$Qc_8(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$
C_9	$Qc_9(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_{10}	$Qc_{10}(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$

Çizelge 4.18'de halka bara sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen güvenilmezlik pozitif yönde etki edecek sonuçların (∑ (+)) yer almaktadır.

Çizelge 4.18 : Güvenilmezlik fonksiyonu pozitif(∑ (+)).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
∑ (+)	$\sum(+) = 1 - e^{-0,1t} + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t})$

Çizelge 4.19'da halka bara sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen güvenilmezlik negatif yönde etki edecek olan kesişimler (∑ (-)) yer almaktadır.

Çizelge 4.19 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesitleme kesişim(∑ (-)).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
ABI	$Qc_{ABI}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t})$
AGI	$Qc_{AGI}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t})$
BEI	$Qc_{BEI}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t})$
BFI	$Qc_{BFI}(t) = (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t})$
EGI	$Qc_{EGI}(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t})$
EIK	$Qc_{EIK}(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
FGI	$Qc_{FGI}(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t})$
GIJ	$Qc_{GIJ}(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t})$
IJK	$Qc_{IJK}(t) = (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t})$
∑ (-)	$\sum(-) \cong (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,4t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) + (1 - e^{-0,1t}) . (1 - e^{-0,15t}) . (1 - e^{-0,15t})$

Çizelge 4.18 ve çizelge 4.19'da yer alan veriler doğrultusunda denklem **(2.57)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} \cong \sum(+) - \sum(-)$$

Buna göre denklem **(2.58)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_{SİSTEM}(t) = 1 - Q_{SİSTEM}(t)$$

Bu durumda denklem **(2.30)**'dan yararlanılarak tüm sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF ≅ $m_{SİSTEM}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt$$

Denklem **(2.30)**'dan yararlanılarak elde edilen sistem güvenilirlik fonksiyonu yerine konulduğunda arızaya kadar geçen ortalama süre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt = 8{,}73yıl$$

Burada hesaplanan değerler ring bara sisteme ilişkin 5 yıllık çalışma koşulları altında sistemin çalışmaya devam etmesi durumunda sitemin güvenilirliğini ve ne kadar sıklıkla arızaya geçeceği hakkında bilgi vermektedir.

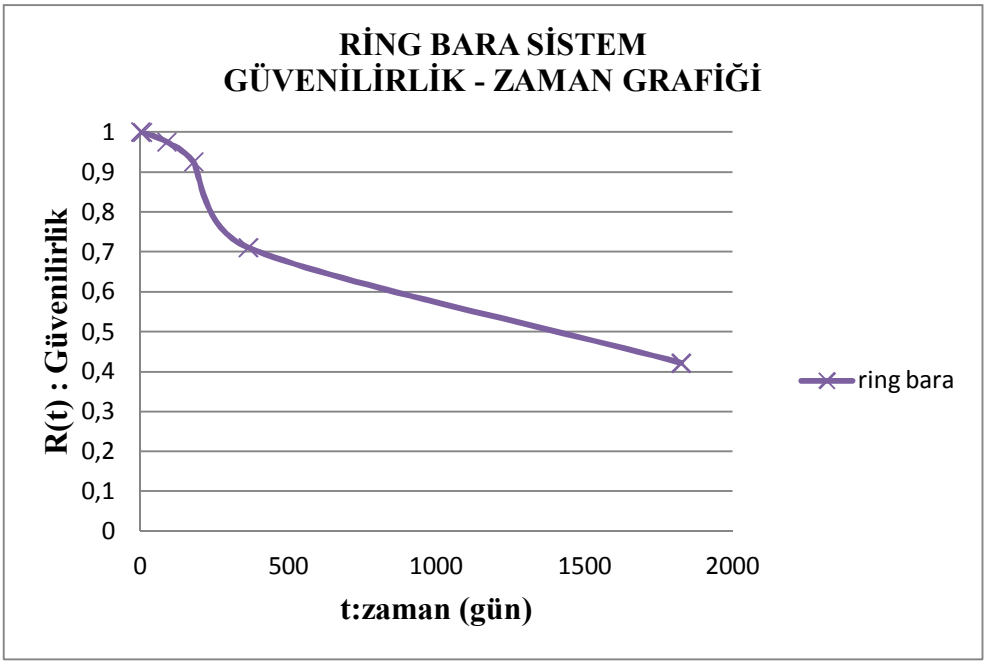
Ring bara sisteme ilişkin elde edilen güvenilirlik fonksiyonu sayesinde sistemin farklı zamanlar için güvenilirlik davranışı da bulunabilir.

Çizelge 4.20' de çeşitli t zamanları (1 gün - 5 yıl) için ring bara sisteme ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.20 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri (halka bara).

	t=1 Gün	***t=7 Gün***	***t=3Ay***	***t=6 Ay***	***t=1 Yıl***	***t=5 Yıl***
$R_{SİSTEM}$	0,9999984125	0,99945212	0,97521202	0,9252123164	0,71022157	0,42121544

Çizelge 4.20’ de yer alan bilgiler şekil 4.19’ de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.19 : Halka bara sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği.

4.2.5 Çift Bara Çift Kesicili Sistemi

Çift bara çift kesici sistemi, dünyada en yaygın olarak kullanılan bara sistemlerinden biridir. Normal işletme anında enerjilendirilmiş olan iki ana bara mevcuttur. Her bir devre başında da iki kesici yer almaktadır.

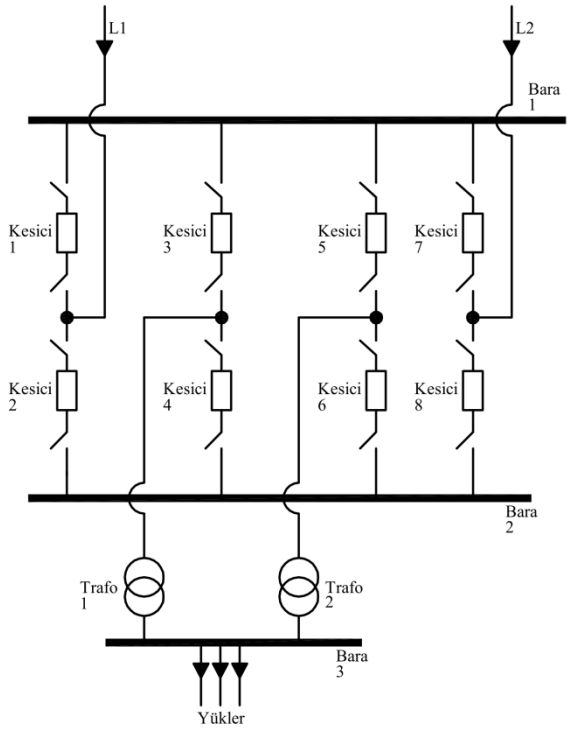
Kesici adedinin fazla olmasından dolayı bu tip sistemlerin maliyetleri fazladır[10].

Çift bara sistemine yeni bir bara daha eklenerek işletme kolaylıkları daha da artırılabilir. Bu tip sistemlerden bara arızaları tek baralı sistemlerde olduğu gibi arızalı bölüme bağlı tüm çıkışların devre dışı kalmasına yol açar.

Çift ana bara ve çift kesici sayesinde çıkışların arızasız baraya aktarılması sistemin sürekliliği sağlanır[13].

Bu tip çift bara çift kesicili sistemler özellikle çok büyük güçlü merkezlerde tercih edilmektedir [10].

Şekil 4.20’ de örnek çift bara çift kesicili sisteme ait bir kesit yer almaktadır [11].



Şekil 4.20 : Çift bara çift kesicili sisteme ait bir kesit [11].

Çift bara çift kesicili sisteminin avantajları şu şekildedir[12].

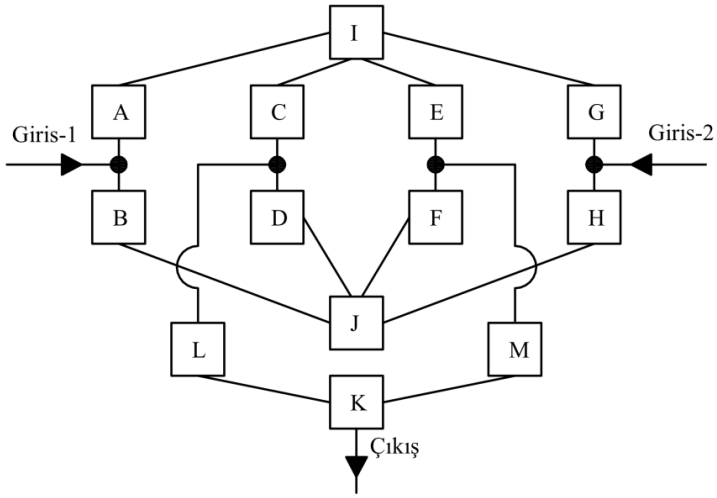
- Çeşitli işletme şartlarına sahip olmaları,
- Yüksek güvenilirlik seviyeleri,
- Her bir devrenin çift kesici ile beslenebilmesi,
- Yük çıkışlarının alındığı baraların dışında kalan baraların herhangi birinde arıza olması durumda sistem çalışması kesintiye uğramaz,
- Devre kesicilerin bakımı için sistem kesiciler ile izole edilebilir. Bu esnada işletmede bir kesintiye gerek duyulmaz,
- Sadece bir iletim hattı veya trafo kaybı kesici arıza durumu ile takip edilebilir
- Bir kesici arızasını yok etmek için seri olarak iki devre kesici yerleştirilmesine gerek yoktur,
- Her devre için benzer kontrol ve kumanda şemaları vardır,

Çift bara çift kesicili sisteminin avantajları gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır [12].

- Bu tip sistemler en pahalı sistemlerdir.
- Röle koruması her iletim hattından ayrı besleme gerektirir.
- Bir buçuk kesicili sisteme göre daha büyük tesis alanı gerektirir.

4.2.5.1 Çift bara çift kesicili sistem için güvenilirlik değerlendirmesi

Örnek bir çift bara çift kesicili sisteme ait güvenilirlik değerlendirmesi yapılırken bölüm 2' de yer alan güvenilirlik değerlendirmelerine ait bilgilerden yararlanılmıştır. Güvenilirlik dataları olarak çizelge 4.1' de yer alan datalardan yararlanılmıştır. Şekil 4.21' de örnek bir çift bara çift kesicili sisteme ait güvenilirlik analizi blok diyagramı yer almaktadır [11].



Şekil 4.21 : Çift bara çift kesicili sistem blok diyagramı [11].

Şekil 4.21' de yer alan güvenilirlik blok diyagramındaki her bir elaman, şekil 4.20'de yer alan bir ekipmanın güvenilirlik datalarını temsil etmektedir. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- A bloğu, kesici-1 güvenilirlik datalarına,
- B bloğu, kesici-2 güvenilirlik datalarına,
- C bloğu, kesici-3 güvenilirlik datalarına,
- D bloğu, kesici-4 güvenilirlik dataların,
- E bloğu, kesici-5 güvenilirlik datalarına,

- F bloğu, kesici-6 güvenilirlik datalarına,
- G bloğu, kesici-7 güvenilirlik datalarına,
- H bloğu, kesici-8 güvenilirlik datalarına,
- I bloğu, bara-1 güvenilirlik datalarına,
- J bloğu, bara-2 güvenilirlik datalarına
- K bloğu, bara-3 güvenilirlik datalarına
- L bloğu, trafo-1 güvenilirlik datalarına
- M bloğu, trafo-2 güvenilirlik datalarına karşılık gelmektedir.

Ekipmanlar arasındaki kablo ve kablo uçları güvenilirlik indisleri bağlı bulunduğu ekipmana dahil edilmiştir.

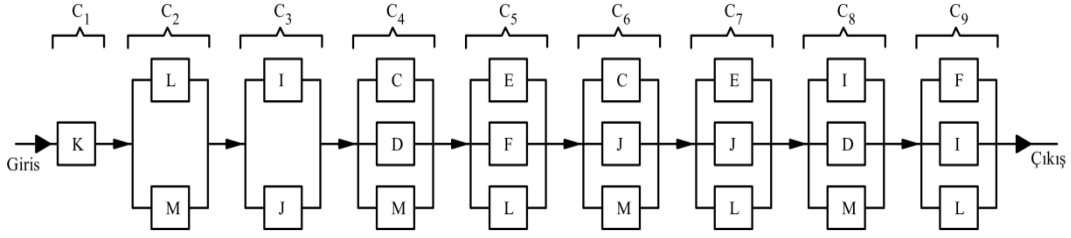
Sistem güvenilirliği hesaplamasında ilk önce şekil 4.21' den yararlanılarak bölüm 4.2.1.1 tek baralı sistem güvenilirlik değerlendirmelerine benzer şekilde temel yollar elde edilir.

Temel yolların tespit edilmesinden sonra sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü mertebeden temel kesitlemeler bulunmuştur. İlgili sistem için güvenilirlik değerlendirmelerinde etkilerinin çok daha az olduğu dördüncü ve daha fazla mertebeden temel kesitlemeler ihmal edilmiştir.

Yine daha önce belirtilen teknikler kullanılarak temel kesitlemeler şu şekilde elde edilmiştir.

Temel kesitlemeler : K, LM, IJ, CDM, EFL, CJM, EJL, IDM, FIL

Temel kesitlemelerin belirlenmesinin ardından çift bara çift kesicili sisteme ait eşdeğer blok diyagramı şekil 4.22' de yer almaktadır.



Şekil 4.22 : Çift bara çift kesicili sistem eşdeğer blok diyagramı.

Eşdeğer blok diyagramı kullanılarak tüm sistem için güvenilmezlik fonksiyonun ifadesi ($Q_{SİSTEM}(t)$) yazılması gerekecektir. Bu ifade de denklem **(2.57)**'den yararlanılarak aşağıdaki yazılır

$$Q_{SİSTEM} = Q\left[\bigcup_{i=1} C_i\right] = Q(C_1\ U\ C_2\ \ldots\ldots U\ C_9)$$

Bu durumda tüm sistemin güvenilmezlik fonksiyonunun ifadesi denklem **(2.57)**' den yararlanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} = \sum Q(C_i) - \sum Q(C_i \cap C_J) + \sum Q(C_i \cap C_J \cap C_k) \mp \ldots$$

C_1 kümesine ait güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.7)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{C_1}(t) = 1 - R_K(t) = 1 - e^{-\lambda_K t} = 1 - e^{-0,1t}$$

C_2 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (L ve M) oluşmaktadır. Bu durumda C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_2}(t) = Q_L(t).Q_M(t) = \left(1 - R_L(t)\right).\left(1 - R_M(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_2 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_2}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_L t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_M t}\right) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_3 kümesi birbirine paralel olan iki elamandan (I ve J) oluşmaktadır. Bu durumda C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_3}(t) = Q_I(t).Q_J(t) = \left(1 - R_I(t)\right).\left(1 - R_J(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_3 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_3}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_I t}\right).\left(1 - e^{-\lambda_J t}\right) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

C_4 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (C,D ve M) oluşmaktadır. Bu durumda C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_4}(t) = Q_C(t).Q_D(t).Q_M(t) = \left(1 - R_C(t)\right).\left(1 - R_D(t)\right).\left(1 - R_M(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_4 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_4}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_5 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (E,F ve L) oluşmaktadır. Bu durumda C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_5}(t) = Q_E(t).Q_F(t).Q_L(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_F(t)\right).\left(1 - R_L(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_5 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_5}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_6 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (C,J ve M) oluşmaktadır. Bu durumda C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_6}(t) = Q_C(t).Q_J(t).Q_M(t) = \left(1 - R_C(t)\right).\left(1 - R_J(t)\right).\left(1 - R_M(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_6 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_6}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_7 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (E,J ve L) oluşmaktadır. Bu durumda C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_7}(t) = Q_E(t).Q_J(t).Q_L(t) = \left(1 - R_E(t)\right).\left(1 - R_J(t)\right).\left(1 - R_L(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_7 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_7}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_8 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (I,D ve M) oluşmaktadır. Bu durumda C_8 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_8}(t) = Q_I(t).Q_D(t).Q_M(t) = \left(1 - R_I(t)\right).\left(1 - R_D(t)\right).\left(1 - R_M(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_8 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_8}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

C_9 kümesi birbirine paralel olan üç elamandan (F,I ve L) oluşmaktadır. Bu durumda C_9 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{C_9}(t) = Q_F(t).Q_I(t).Q_L(t) = \left(1 - R_F(t)\right).\left(1 - R_I(t)\right).\left(1 - R_L(t)\right)$$

Arıza verileri yerine konulduğunda, denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak bulunan C_9 kümesinin güvenilmezlik fonksiyonu ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{C_9}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Kesitleme kesişimleri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$Q_{KLM}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{KLM}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{KIJ}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{KIJ}(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$$

$Q_{CDKM}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CDKM}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{EFKL}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EFKL}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{CJKM}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak, yukarıda yapılan çözümlemelere benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{CJKM}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{EJKL}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{EJKL}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{DIKM}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{DIKM}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

$Q_{FIKL}(t)$ güvenilmezlik fonksiyonu denklem **(2.41)** ve denklem **(2.42)**' den yararlanılarak benzer şekilde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{FIKL}(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$$

Diğer kesitleme kesişimleri etkilerinin düşük olmasından dolayı ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.21' de çift bara çift kesicili sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (C_1-C_{10} kümeleri arası) yer almaktadır.

Çizelge 4.21 : Güvenilmezlik fonksiyonu (C_1-C_{10} Arası).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
C_1	$Qc_1(t) = 1 - e^{-0,1t}$
C_2	$Qc_2(t) = \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_3	$Qc_3(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right)$
C_4	$Qc_4(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_5	$Qc_5(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_6	$Qc_6(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_7	$Qc_7(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_8	$Qc_8(t) = \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
C_9	$Qc_9(t) = \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$
∑ (+)	$\sum(+) = \left(1 - e^{-0,1t}\right) + \left(1 - e^{-0,15t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right) + \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right) + \left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right) + \left(1 - e^{-0,4t}\right).\left(1 - e^{-0,1t}\right).\left(1 - e^{-0,15t}\right)$

Çizelge 4.22'de çift bara çift kesicili sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen sonuçlar (kesitleme kesişimleri) yer almaktadır.

Çizelge 4.22 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesitleme kesişimi.

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
KLM	$Qc_{KLM}(t) = (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$
KIJ	$Qc_{KIJ}(t) = (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t})$
CDKM	$Qc_{CDKM}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$
EFKL	$Qc_{EFKL}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$
CJKM	$Qc_{CJKM}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$
EJKL	$Qc_{EJKM}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$
DIKM	$Qc_{DIKM}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$
FIKL	$Qc_{FIKL}(t) = (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$

Çizelge 4.23'de çift bara çift kesicili sistem için kesitleme methodu yardımıyla elde edilen güvenilmezlik negatif yönde etki edecek olan kesişimler (∑ (-)) yer almaktadır.

Çizelge 4.23 : Güvenilmezlik fonksiyonu kesitleme kesişimi (∑ (-)).

Analiz Kümesi	Güvenilmezlik Fonksiyonu
∑ (-)	$\Sigma(-) \cong (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}) + (1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t}) + (1-e^{-0,4t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,1t}).(1-e^{-0,15t})$

Çizelge 4.21 ve çizelge 4.23'de yer alan veriler doğrultusunda denklem **(2.57)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilmezlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_{SİSTEM} \cong \sum(+) - \sum(-)$$

Buna göre denklem **(2.58)** dikkate alındığında sisteme ait güvenilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_{SİSTEM}(t) = 1 - Q_{SİSTEM}(t)$$

Bu durumda denklem **(2.30)**'dan yararlanılarak tüm sistemin arızaya kadar geçen ortalama süresi (MTTF ≅ $m_{SİSTEM}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt$$

Denklem **(2.30)**'dan yararlanılarak elde edilen sistem güvenilirlik fonksiyonu yerine konulduğunda arızaya kadar geçen ortalama süre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$MTTF \cong m_{sistem} = \int_0^{\infty} R_{SİSTEM}(t).dt = 15{,}61yıl$$

Burada hesaplanan değerler çift bara çift kesicili sisteme ilişkin 5 yıllık çalışma koşulları altında sistemin çalışmaya devam etmesi durumunda sitemin güvenilirliğini ve ne kadar sıklıkla arızaya geçeceği hakkında bilgi vermektedir.

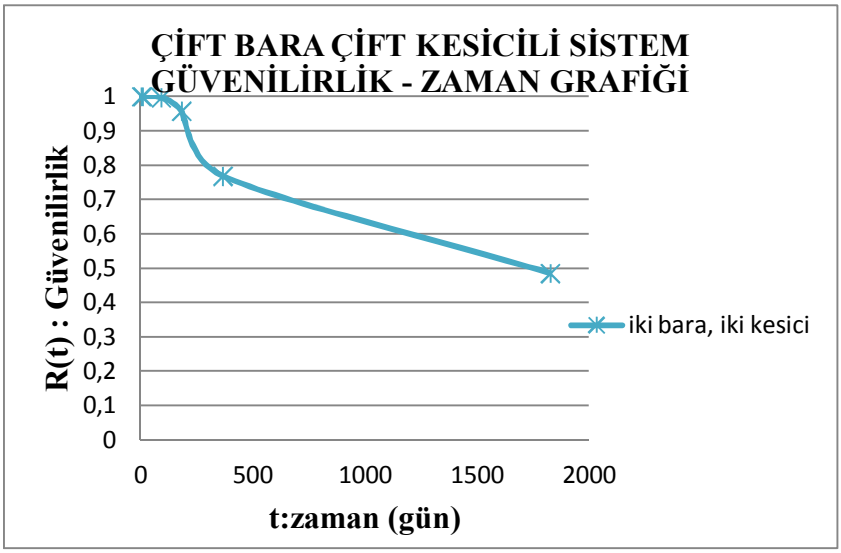
Çift bara çift kesicili sisteme ilişkin elde edilen güvenilirlik fonksiyonu sayesinde sistemin farklı zamanlar için güvenilirlik davranışı da bulunabilir.

Çizelge 4.24' de çeşitli t zamanları (1 gün - 5 yıl) için çift bara çift kesicili sisteme ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.24 : Farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri(çift bara, çift kesici).

	t=1 Gün	*t=7 Gün*	*t=3Ay*	*t=6 Ay*	*t=1 Yıl*	*t=5 Yıl*
$R_{SİSTEM}$	0,9999998211	0,999678956	0,99731254	0,958212131	0,76821247	0,48522157

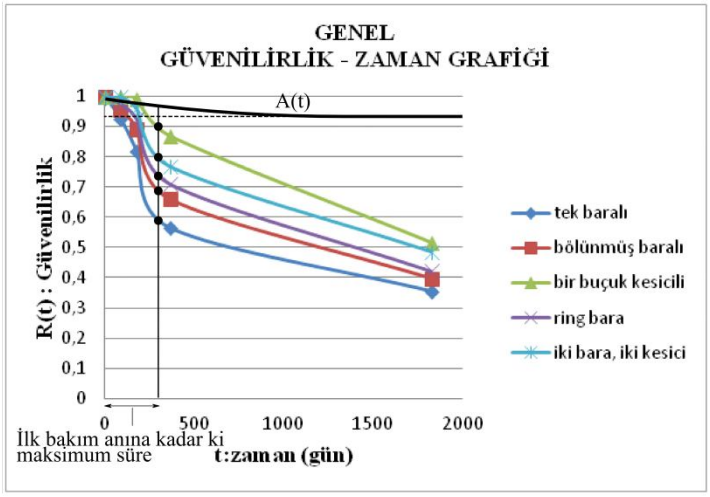
Çizelge 4.24' de yer alan bilgiler şekil 4.23' de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : Çift bara çift kesicili sisteme ilişkin güvenilirlik-zaman grafiği.

4.2.6 Sistemlerin güvenilirlik indislerinin karşılaştırılması

Bu bölümde incelenen beş ayrı indirici merkez bağlantı tipinin güvenilirlik fonksiyonları grafik halinde karşılaştırılmıştır. Şekil 4.24' de incelenen beş ayrı bağlantı tipine göre güvenilirlik fonksiyonu karşılaştırmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.24 : Farklı bağlantı tiplerine göre güvenilirlik-zaman grafiği.

Yapılan güvenilirlik değerlendirmeleri güvenilirlik fonksiyonlarının değerlerinin eksponansiyel olarak dağılım gösterdiği kabul edilmiştir [3]. Ayrıca sabit arıza hızı varsayımına göre yapılan değerlendirmelere sonucuna göre tüm sistemlerin güvenilirlik değerlerinin zamanla sıfıra yaklaştığı gözlemlenmiştir. Kullanılan datalar ışığında yapılan ve şekil 4.24'de grafiksel olarak gösterilen güvenilirlik analizine göre güvenilirliği en düşük olan sistem tek baralı sistem, en güvenilir olan sistem ise bir buçuk kesicili sistem olarak tespit edilmiştir. Ayrıca şekil 4.24'e göre kullanılabilirliğe bakım çalışmalarının etkisi incelendiğinde, incelenen bu beş sistem için yakın değerlerde kullanılabilirlik elde edilmek istediğinden ve bakıma girme süreleri açısından bir değerlendirme yapılırsa tek baralı sistem için en kısa süre, bir buçuk kesicili sistem için ise bakım anına kadarki en uzun süre ile karşılaşılmaktadır.

Çizelge 4.25' de ise analiz sonucu bulunan MTTF değerleri tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.25 : İndirici merkez farklı bağlantı tiplerine göre mttf değerleri.

İndirici Merkez Bağlantı Tipi	MTTF (yıl)
Tek Bara Sistemi	4,53
Bölünmüş Baralı Sistem	6,71
Bir Buçuk Kesicili Sistem	23,87
Ring Bara Sistemi	8,73
Çift Bara Çift Kesicili Sistem	15,61

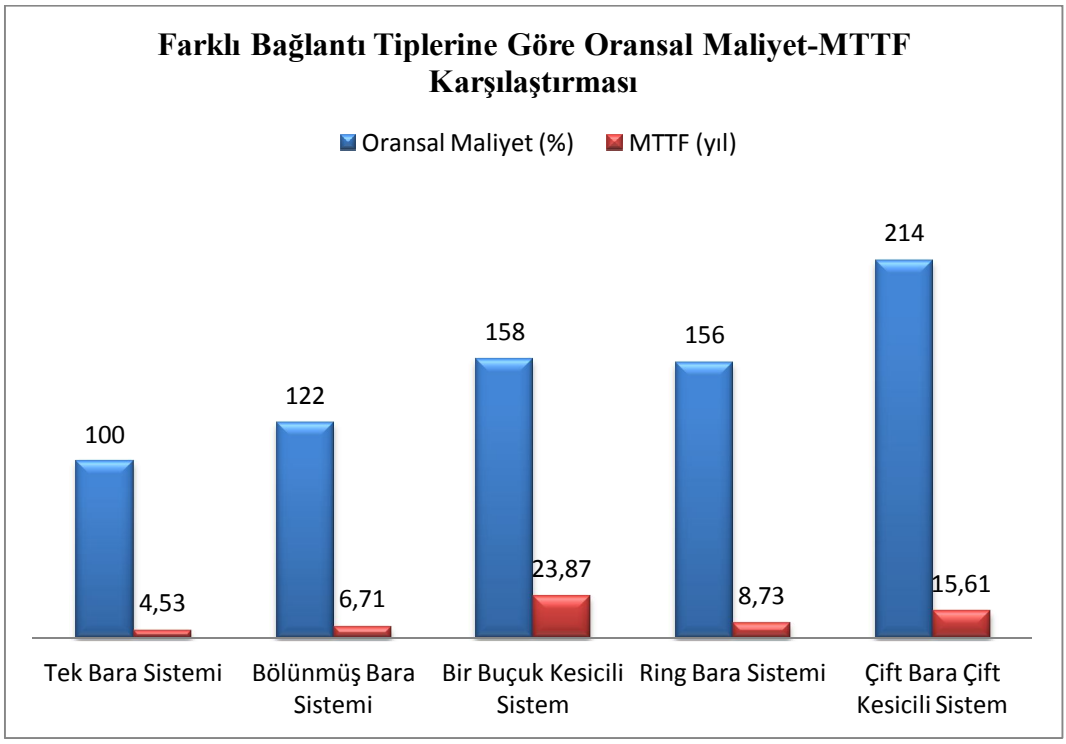
Sabit arıza hızı varsayımına göre elde edilen analiz sonuçları değerlendirildiğinde arızalanmadan en uzun işletmede kalacak olan sistem yine bir buçuk kesicili sistem olarak tespit edilmiştir. En sık arızaya neden olan sistem ise tek baralı sistem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 4.26' da ise farklı bağlantı tipine sahit indirici merkezlere ait oransal maliyet karşılaştırmaları yer almaktadır [12].

Çizelge 4.26 : İndirici merkezlere ait oransal maliyet değerleri [12].

İndirici Merkez Bağlantı Tipi	Oransal Maliyet
Tek Bara Sistemi	%100
Bölünmüş Baralı Sistem	%122
Bir Buçuk Kesicili Sistem	%158
Ring Bara Sistemi	%156
Çift Bara Çift Kesicili Sistem	%214

Maliyet araştırması hakkında yapılan çalışmalardan alınan çizelge 4.26'da yer alan bu değerler ile çizelge 4.25'de yer alan MTTF değerleri birlikte karşılaştırılmalı olarak şekil 4.25' da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.25 : Farklı bağlantı tiplerine göre MTTF ve maliyet karşılaştırılması.

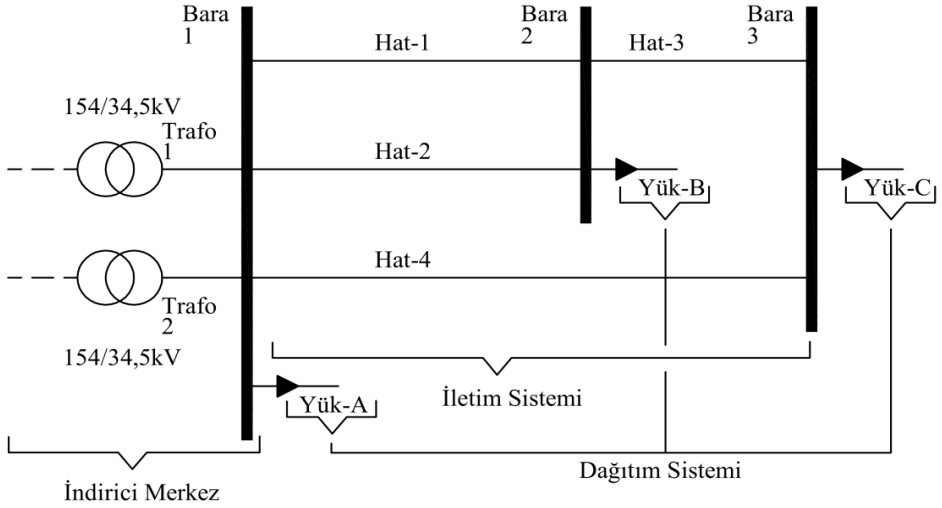
4.3 İletim Sistemlerinin Tanımı

Elektrik enerjisinin üretildiği santraller çoğunlukla tüketim merkezlerinden uzak noktalarda tesis edilirler. Gerekli yük ihtiyacını göre değerlendirilen üretim kapasitesi kadar üretilen enerjinin ana dağıtım merkezlerine, dolayısıyla tüketicilere ulaştırılması için uygun bir iletim sisteminin geliştirilmesi de oldukça önemlidir. Günlük hayat için vazgeçilmez olan elektrik enerjisinin iletiminin ekonomik olması enerjisi sistemleri açısından önemi oldukça büyüktür[16].

İletim sistemi, üretim sistemi ve yükü birbirine bağlayan bir sistem olduğundan hem üretilen enerjiyi taşıma kapasitesine sahip olmalı hem de talep edilen yükü karşılayabilecek yapıda olmalıdır. Enerjiyi dağıtım merkezlerine taşıyan ana iletim sistemi enerjiyi tüketicilere kesintisiz ve güvenilir olarak taşıyabilmesi için üretim sistemi ile uygun bir şekilde irtibatlandırılmalıdır. Ayrıca üretilen enerjinin dağıtım merkezlerine iletilmesi sırasındaki arızaları önlemek için, iletim sisteminin bakım çalışmalarında da talep edilen yüklerin karşılanabilecek bir yapıda olması gereklidir [16].

4.3.1 İletim sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi

Modern güç sistemlerinde elektrik enerjisinin sistemin güç ihtiyacının ekonomik ve enerji sürekliliğini güvenilir şekilde karşılanması hedeflenmektedir. Bu optimum seviyenin sağlanması olasılık teknikleri kullanımıyla birlikte güvenilirlik analizini ortaya çıkarmıştır [17]. Şekil 4.26' da incelenecek olan iletim hattına ilişkin devre modeli yer almaktadır[18].



Şekil 4.26 : İletim devresi modeli [18].

Şekil 4.26'de bir indirici merkez (154/34,5 kV) ile dağıtım merkezleri (Yük-A, yük-B ve yük-C) arasında enerji iletimini sağlayan dört adet iletim hattı gözükmektedir (Yük noktalarından yük-A direk olarak indirici merkez çıkış barasından enerjilendirilmektedir). B ve C yüklerinin enerjilendirilmesi için tesis edilen ve hat-1, hat-2, hat-3 ve hat-4 şeklinde tanımlanan dört adet iletim hattının güvenilirlik değerlendirmelerinde kullanılacak olan yıllık arıza oranları (λ-arıza/yıl) ve ortalama onarım süreleri (r-saat) pratikte yapılan uygulamalar ve tecrübelerden faydalanılarak çizelge 4.27'deki gibi kabul edilmiştir. Tüm ekipmanlar (bara, kesici, vb.) arızaları bu verilere dahil edilmiştir.

Çizelge 4.27 : İletim sistemi güvenilirlik değerlendirmesi için sistem dataları.

Hat No	λ - Arıza Oranı (arıza/yıl)	r – Ort. Onarım Süresi (saat)
1	0,7	8
2	0,7	8
3	0,3	8
4	0,5	8

Çizelge 4.27 ' de yer alan değerler tüm yıllık arıza oranları göz önüne alınarak bulunmuştur. Fırtınalı ve normal hava koşullarında oluşan eleman hata oranları eşit kabul edilmiştir. Ayrıca onarım süresinin normal hava şartlarında olacağı kabul edilmiştir[17]. Ayrıca iletim sistemi için gerçekleştirilecek hesaplamalarda ilk önce hat-4 şeklinde ifade edilen iletim hattının olmaması durumu için bir değerlendirme yapılacak olup ardından bu hattın devrede olması durumunda sistem güvenilirliği hesaplanacaktır. Yük-B' nin enerjilendirildiği bara-2'ye kadar olan güvenilirlik değerlendirmeleri ise şu şekilde olacaktır. Yukarıda da belirtildiği gibi ilk önce dört numaralı hattın olmama durumu göz önüne alınacaktır. Bu durumda bara-2' ye kadar olan arıza oranı $\lambda_{B2.1}$, hat-1 paralel hat-2 olduğundan dolayı denklem **(2.49)**' a göre aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

$$\lambda_{B2.1} = \lambda_1 . \lambda_2 (\mathrm{r}_1 + r_2)$$

Veriler yerine konulduğunda denklem **(2.49)**'a göre hesaplanan $\lambda_{B2.1}$ aşağıdaki değeri alacaktır.

$$\lambda_{B2.1} = 0{,}7 * 0{,}7 * \left(\frac{8+8}{8760}\right) = 0{,}0008949\ arıza/yıl$$

Yine bu baraya kadar olan ortalama onarım süresi $r_{B2.1}$ ise denklem **(2.48)**' e göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r_{B2.1} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{\mu_p} = \frac{r_1 . r_2}{r_1 + r_2} = \frac{8 * 8}{8 + 8} = 4\ saat$$

Dört numaralı hattın devrede olması durumunda ise 2 barasında olan yükün enerjilendirilmesi birbirine paralel olan hat-1 ve hat-2 ile bu iki hatta paralel olan seri hat-3 ve hata-4 'ün birleşiminden oluşmaktadır. Yani bu durum 1//2//(3+4) şeklinde ifade edilecektir.

Sistem adım adım çözümlenirse 1//2 için arıza oranı (λ_{12}) denklem **(2.49)** 'dan aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda_{12} = \lambda_1 . \lambda_2 (r_1 + r_2) = 0{,}7 * 0{,}7 * \left(\frac{8 + 8}{8760}\right) = 0{,}0008949\ arıza/yıl$$

1//2 İçin ortalama tamir süresi ise denklem **(2.48)**' e göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r_{12} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{\mu_p} = \frac{r_1 . r_2}{r_1 + r_2} = \frac{8 * 8}{8 + 8} = 4\ saat$$

3+4 Durumu için (hat-3 ve hat-4 birbirine seri) için arıza oranı (λ_{3+4}) denklem **(2.36)**'dan aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda_{3+4} = \lambda_3 + \lambda_4 = 0{,}3 + 0{,}5 = 0{,}8\ arıza/yıl$$

(3+4) İçin ortalama tamir süresi (r_{3+4}) ise denklem **(2.39)**' a göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r_{3+4} = \frac{\lambda_3 r_3 + \lambda_4 r_4}{\lambda_3 + \lambda_4} = \frac{0{,}3 * 8 + 0{,}5 * 8}{0{,}3 + 0{,}5} = 8\ saat$$

Yukarıda yer alan değerler dikkate alındığında (1//2)//(3+4) için yani bara-2' ye kadar olan arıza oranı ($\lambda_{B2.2}$) denklem **(2.49)**'a göre şu şekilde hesaplanır.

$$\lambda_{B2.2} = \lambda_{12} . \lambda_{3+4} (r_{12} + r_{3+4})$$

İlgili veriler yerine konduğunda denklem **(2.49)**'a göre hesaplanan bara-2 ye kadar olan arıza oranı şeklinde ifade edilen $\lambda_{B2.2}$ şu şekilde hesaplanır.

$$\lambda_{B2.2} = 0{,}0008949 * 0{,}8 * \left(\frac{4+8}{8760}\right) = 0{,}0000009807\ arıza/yıl$$

Yukarıda yer alan değerler dikkate alındığında (1//2)//(3+4) için yani bara-2' ye kadar olan ortalama tamir süresi ($r_{B2.2}$) denklem **(2.48)**'a göre şu şekilde hesaplanır.

$$r_{B2.2} = \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{3+4}} = \frac{1}{\mu_p} = \frac{r_{12}.r_{3+4}}{r_{12}+r_{3+4}} = \frac{4*8}{4+8} = 2{,}67\ saat$$

Yük-C' nin enerjilendirildiği bara-3'e kadar olan güvenilirlik değerlendirmeleri ise şu şekilde olacaktır. Yukarıda da belirtildiği gibi ilk önce dört numaralı hattın olmama durumu göz önüne alınacaktır. Bu durumda bara-3'e kadar olan arıza oranı $\lambda_{B3.1}$, ve ortalama tamir süresi olan $r_{B3.1}$ hesaplanacaktır.

Dört numaralı hattın olmaması durumunda Bara-3' e kadar olan arıza oranı $\lambda_{B3.1}$, (hat1//hat-2)+(hat-3) şeklinde ifade edilebilir. Yani bu ifade birine paralel olan hat-1 ve hat-2 ile bu paralel düzene seri olan hat-3 şeklindedir. Bu durumda $\lambda_{B3.1}$, daha önce hesaplanan $\lambda_{B2.1}$ ve çizelge 4.27' de yer alan λ_3 cinsinden denklem **(2.36)**' ya göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\lambda_{B3.1} = \lambda_{(1//2)+3} = \lambda_{B2.1} + \lambda_3 = 0{,}0008949 + 0{,}3 = 0{,}3008949\ arıza/yıl$$

Yine bu baraya kadar olan ortalama onarım süresi $r_{B3.1}$ ise denklem **(2.39)**' a göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r_{B3.1} = \frac{\lambda_{B2.1}r_{2.1} + \lambda_3 r_3}{\lambda_{B2.1} + \lambda_3} = \frac{0{,}0008949 * 4 + 0{,}3 * 8}{0{,}0008949 + 0{,}3} \cong 8\ saat$$

Dört numaralı hattın devrede olması durumunda ise 3 barasında olan yükün enerjilendirilmesi birbirine paralel olan hat-1 ve hat-2 ile bu iki hatta seri olan hat-3 ile tüm bu 3 hatlık düzene paralel hat-4 'ün birleşiminden oluşmaktadır. Yani bu durum (1//2/+3)//4 şeklinde ifade edilecektir.

(1//2+3) sistemi için hesaplanan arıza oranı $\lambda_{B3.1}$ ile ortalama tamir süresi $r_{B3.1}$ 'den yararlanılarak dört numaralı hattın devrede olması durumunda 3 barasına kadar olan ortalama arıza oranı $\lambda_{B3.2}$, denklem **(2.49)**' dan yararlanılarak şu şekilde bulunur.

$$\lambda_{B3.2} = \lambda_{B3.1}.\lambda_4(r_{B3.1} + r_4)$$

Veriler yerine konulduğunda denklem **(2.49)**'a göre hesaplanan $\lambda_{B3.2}$ aşağıdaki değeri alacaktır.

$$\lambda_{B3.2} = 0{,}3008949 * 0{,}5 * (\frac{8+8}{8760}) = 0{,}000275\ arıza/yıl$$

Yukarıda yer alan değerler dikkate alındığında (1//2+3)//4 için yani bara-3' e kadar olan ortalama tamir süresi ($r_{B3.2}$) denklem **(2.48)**'e göre şu şekilde hesaplanır.

$$r_{B3.2} = \frac{1}{r_{B3.1}} + \frac{1}{r_4} = \frac{1}{\mu_p} = \frac{r_{B3.1}.r_4}{r_{B3.1} + r_2} = \frac{8*8}{8+8} = 4\ saat$$

Çizelge 4.28'de iletim hatlarında ilgili baralara kadar bulunan sonuçlar tablo halinde yer almaktadır.

Çizelge 4.28 : İletim sistemine ait hesaplanan güvenilirlik verileri

Bara (Yük Noktası)	**Bara' ya Kadar Olan (Bara Dahil)**		
	λ Arıza Oranı (arıza/yıl)	**r Ort. Onarım Süresi (saat)**	**Ortalama Toplam Devre Dışı Kalma Süresi (Saat)**
Bara -2 (Hat 1-2-3)	0,0008949	4	0,00358
Bara -2 (Hat 1-2-3-4)	0,0000009807	2,67	0,00000262
Bara -3 (Hat 1-2-3)	0,3008949	8	2,4
Bara -3 (Hat 1-2-3-4)	0,000275	4	0,0011

Çizelge 4.28' den de anlaşılacağı üzere 4 numaralı hattın sisteme paralel bir şekilde bağlanması durumunda sistemin güvenilirliğinin arttığı gözlemlenebilir. Ayrıca çizelge 4.28 ve denklem **(2.7)**' den yararlanılarak sistemlere ait güvenilirlik fonksiyonları ve dolayısıyla zamana bağlı güvenilirlik değerleri de elde edilebilir. Bara-2 için tüm hatların devrede olma durumuna göre güvenilirlik fonksiyonu ifadesi denklem **(2.7)**' ye göre aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_{B22}(t) = e^{-\lambda_{B22}t} = e^{-0{,}0000009807t}$$

Çizelge 4.29' da çeşitli t zamanları (1 Gün - 6 Ay) için bara-2' ye ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.29 : Bara-2' ye ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri.

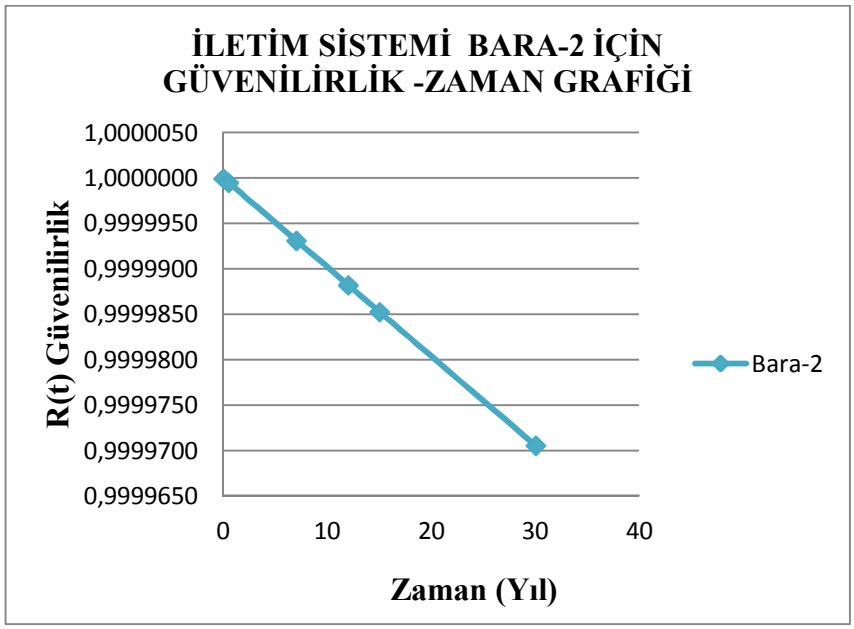
	t=1 Gün	*t=7 Gün*	*t=6Ay*
$R_{SİSTEM}$	0,999999997313151	0,999999981192055	0,99999950965012

Çizelge 4.30' da çeşitli t zamanları (1 – 7 Yıl) için bara-2' ye ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.30 : Bara-2' ye ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri.

	t=1 Yıl	*t=5 Yıl*	*t=7 Yıl*
$R_{SİSTEM}$	0,999999019300481	0,999995096512023	0,999993135123565

Çizelge 4.29 ve çizelge 4.30' da yer alan bilgiler şekil 4.27' de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : Bara-2 noktası için güvenilirlik – zaman grafiği.

Bara-3 için tüm hatların devrede olma durumuna göre güvenilirlik fonksiyonu ifadesi ise denklem **(2.7)**' ye göre aşağıdaki gibi elde edilir.

$$R_{B32}(t) = e^{-\lambda_{B32}t} = e^{-0,000275t}$$

Çizelge 4.31' de çeşitli t zamanları (1 Gün - 6 Ay) için bara-3' e ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.31 : Bara-3' e ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri.

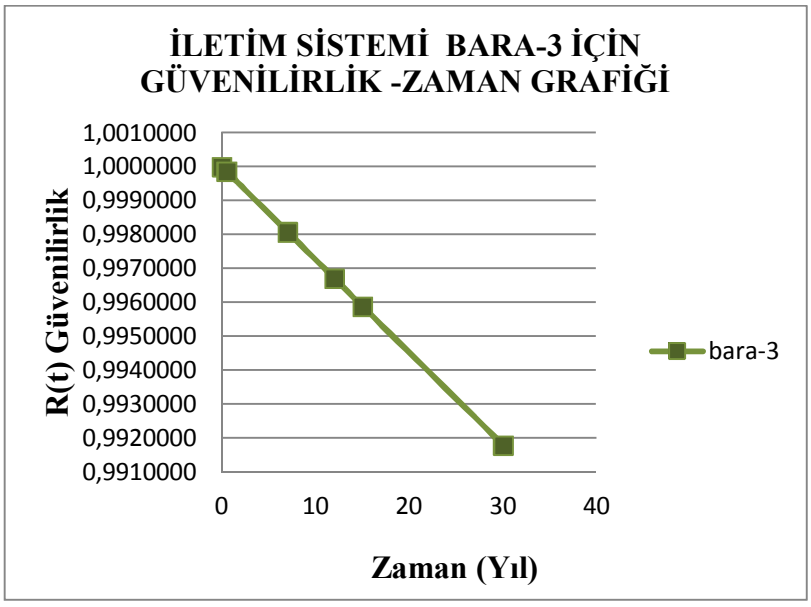
	t=1 Gün	*t=7 Gün*	*t=6Ay*
$R_{SİSTEM}$	0,999999246575626	0,999994726041305	0,999862509452715

Çizelge 4.32' de çeşitli t zamanları (1 – 7 Yıl) için bara-2' ye ait güvenilirlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.32 : Bara-3' e ait farklı t zamanları için güvenilirlik değerleri.

	t=1 Yıl	*t=5 Yıl*	*t=7 Yıl*
$R_{SİSTEM}$	0,999725037809081	0,998625944879612	0,998076851624508

Çizelge 4.31 ve çizelge 4.32' de yer alan bilgiler şekil 4.28' de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.28 : Bara-3 noktası için güvenilirlik – zaman grafiği.

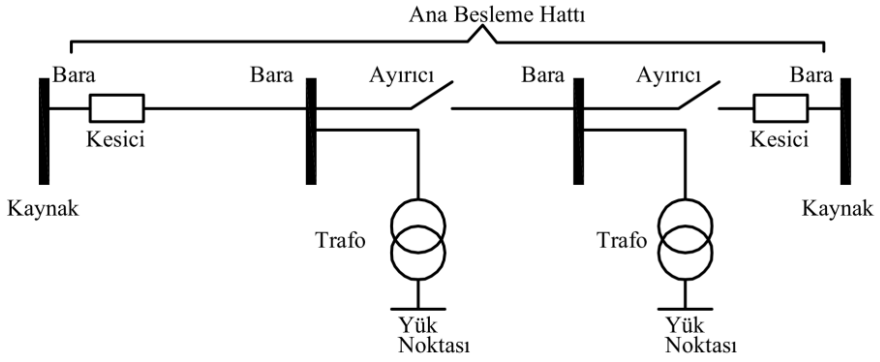
Böylece dağıtım sisteminde yer alan yük-B ve yük-C noktalarına kadar olan güvenilirlik dataları elde edilmiştir. Yük-A noktası daha önce de belirtildiği gibi direk olarak indirici merkez çıkış barasından enerjilendirildiğinden dolayı bu noktaya kadar olan güvenilirlik dataları için indirici merkez için hesaplanan datalardan yararlanılmıştır.

4.4 Dağıtım Sistemlerinin Tanımı

Dağıtım sistemleri elektrik güç sistemleri içerisinde, elektrik enerjisini tüketiciye ulaştıran son bölümdür. Dağıtım sistemi ana besleme hatları, baralar, dağıtım transformatörleri, kesiciler, ayrıcılar ve tüketici bağlantılarından oluşmaktadır. Dağıtım sistemleri içerisinde güvenilirlik değerlendirmesinin yapılması da sistemde yer alan tüm ekipmanların sistemin işleyişinde kendilerine atanan görevleri tam olarak yerine getirebilmeleri ile ilgilidir.

Dağıtım sistemleri yapısı incelendiğinde genellikle ana besleyici bir hat ve bu hatta bağlı dallardan oluştuğu görülmektedir. Ana besleme hatları tek, paralel ya da gözlü tip olabilirler. Bir dağıtım sistemini orta gerilim düzeyinde transformatörleri besleyen hat halka (ring) ya da radyal şebekedir. Halka şeklinde tesis edilen sistemlerde radyal olarak işletilebilmektedir. Radyal sistemler hem basit hem de kolay işletilebilir olduklarından dolayı tercih edilmektedirler.

Dağıtım sistemlerinde indirici trafo merkezi ile tüketiciye kadar olan kısım ya da başka bir indirici trafo merkezine kadar olan kısım yük noktası olarak ifade edilir. Her yük noktası beslenmiş olduğu kaynak ile arasındaki tüm elamanların arızalarından etkilenecektir. Yani bu yük noktasına gelen besleme hattındaki süreklilik hat üzerinde yer alan tüm elamanların (kablo, kablo eki, kesici, ayrıcı, transformatör, yedek besleme kaynakları, kesici, ayırıcı, akım transformatörü, röle) etkileriyle ilgilidir. Şekil 4.29 da basit dağıtım sistemi görülmektedir.



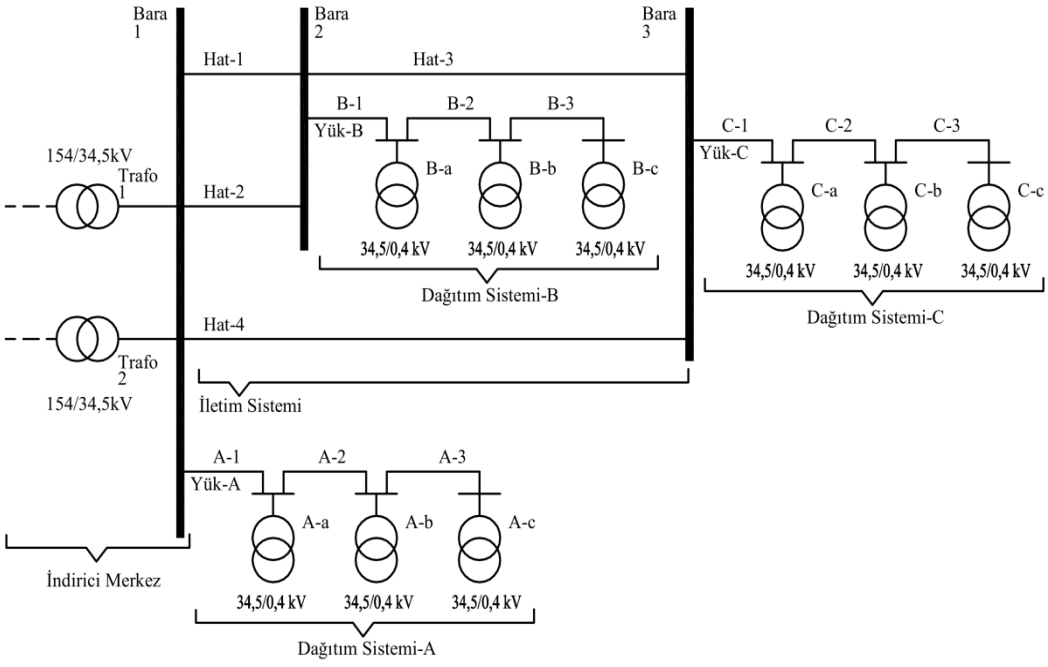
Şekil 4.29 : Basit bir dağıtım sistemi.

Bazı sistemlerde arıza sebebiyle yüklerin enerjisiz kalmasını önlemek için yedek bir besleme kaynağı sisteme dahil edilmektedir. Bu kaynak arıza kısım yalıtılmasıyla birlikte enerjisiz kalan kısma enerji temin etmektedir.

Uygulamada ve normal işletimde de radyal olarak işletilen şebeke ana hatları kaynağa kesici ile bağlanmaktadırlar. Bunun dışında her hattın sonunda da arızayı yalıtmak için kullanılan ayırıcılar bulunmaktadır. Kollarda ise trafo bağlantılarından önce kesicilerde tesis edilmektedir. Trafo bağlantılarından önce tesis edilen kesici sistemdeki arıza anında devreyi açmaz ise ana besleme hattında yer alan ana kesici devreyi açacaktır. Böylece tüm sistem enerjisiz kalmış olacaktır. Bu durumda arıza noktası en kısa sürede bulunup sistemden izole edilmesi ve arıza olmayan diğer yük noktalarının enerjilendirilmesi hedeflenmektedir[19].

4.4.1 Dağıtım sistemleri için güvenilirlik değerlendirmesi

Güvenilirlik analizi yapılacak olan dağıtım sistemlerine ilişkin yük noktaları şekil 4.25' de gösterildiği gibi yük-A, yük-B ve yük-C olmak üzere üç ana hattan oluşmaktadır. Bu üç farklı dağıtım noktası için ana besleme hattı ve yük noktalarına ait detaylar şekil 4.30' da yer almaktadır.



Şekil 4.30 : Güvenilirlik analizi yapılacak olan dağıtım şebekeleri (A-B-C).

Dağıtım sistemlerinin güvenilirlik analizi yapılaması için yani yük noktalarına ait indislerin hesaplanabilmesi için sistemde bulunan elemanlara ait arıza hızlarına (λ), ortalama tamir sürelerine (r) ihtiyaç duyulmaktadır.

Güvenilirlik analizi dağıtım sistemi-A, dağıtım sistemi-B ve dağıtım sistemi-C üzerinde yapılmıştır. Analizi gerçekleştirilen olan bölgelere ait veriler şu şekildedir.

İlgili veriler pratikte yapılan uygulamalar ve tecrübelerden faydalanılarak oluşturulmuştur.

Çizelge 4.33' de dağıtım sistemi-A (yük-A) şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesine ait ana besleme hattı arıza verileri (kablo, ayrıcı, kablo eki vb. arızalar) yer almaktadır.

Çizelge 4.33 : Dağıtım sistemi-A ana besleme hattı arıza verileri.

Ana Besleme Hattı	5 yıllık arıza adeti	Arıza Oranı λ (arıza/yıl)	Ortalama Tamir Süresi r (saat)
A-1	3	0,6	1
A-2	1	0,2	0,75
A-3	2	0,4	1,2

Çizelge 4.34' de dağıtım sistemi-A şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesinin yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.34 : Dağıtım sistemi-A yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri.

Yük Noktası (Dal)	5 yıllık arıza adeti	Arıza Oranı λ (arıza/yıl)	Ortalama Tamir Süresi r (saat)
A-a	2	0,4	5
A-b	2	0,4	5
A-c	3	0,6	5

Çizelge 4.35' de dağıtım sistemi-A şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesinin yük noktalarına ait güç ve tüketici bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 4.35 : Dağıtım sistemi-A yük noktalarına ait güç ve kullanıcı bilgileri.

Yük Noktası (Dal)	Tüketici Tipi	Tüketici Sayısı	Kurulu Güç (kVA)	Puant Güç (kW)
A-a	Konut	425	1250	1050
A-b	Konut	372	1250	930
A-c	Endüstri	1	1000	800

Çizelge 4.36' da dağıtım sistemi-B (yük-B) şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesine ait ana besleme hattı (kablo, ayrıcı, kablo eki vb. arızalar) arıza verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.36 : Dağıtım sistemi-B ana besleme hattı arıza verileri.

Ana Besleme Hattı	5 yıllık arıza adeti	Arıza Oranı λ (arıza/yıl)	Ortalama Tamir Süresi r (saat)
B-1	4	0,8	0,8
B-2	2	0,4	0,9
B-3	1	0,2	1

Çizelge 4.37' de dağıtım sistemi-B şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesinin yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.37 : Dağıtım sistemi-B yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri.

Yük Noktası (Dal)	5 yıllık arıza adeti	Arıza Oranı λ (arıza/yıl)	Ortalama Tamir Süresi r (saat)
B-a	4	0,8	5
B-b	1	0,2	5
B-c	3	0,6	5

Çizelge 4.38' de dağıtım sistemi-B şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesinin yük noktalarına ait güç ve tüketici bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 4.38 : Dağıtım sistemi-B yük noktalarına ait güç ve kullanıcı bilgileri.

Yük Noktası (Dal)	Tüketici Tipi	Tüketici Sayısı	Kurulu Güç (kVA)	Puant Güç (kW)
B-a	Konut	590	1600	1300
B-b	Konut	535	1600	1200
B-c	Konut	285	1000	700

Çizelge 4.39' da dağıtım sistemi-C (yük-C) şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesine ait ana besleme hattı (kablo, ayrıcı, kablo eki vb. arızalar) arıza verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.39 : Dağıtım sistemi-C ana besleme hattı arıza verileri.

Ana Besleme Hattı	5 yıllık arıza adeti	Arıza Oranı λ (arıza/yıl)	Ortalama Tamir Süresi r (saat)
C-1	4	0,8	0,8
C-2	2	0,4	0,9
C-3	5	1	1

Çizelge 4.40' da dağıtım sistemi-C şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesinin yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.40 : Dağıtım sistemi-C yük noktalarına (dallara) ait arıza verileri.

Yük Noktası (Dal)	5 yıllık arıza adeti	Arıza Oranı λ (arıza/yıl)	Ortalama Tamir Süresi r (saat)
C-a	3	0,6	5
C-b	2	0,4	5
C-c	2	0,4	5

Çizelge 4.41' de dağıtım sistemi-C şeklinde ifade edilen dağıtım şebekesinin yük noktalarına ait güç ve tüketici bilgileri verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.41 : Dağıtım sistemi-C yük noktalarına ait güç ve kullanıcı bilgileri.

Yük Noktası (Dal)	Tüketici Tipi	Tüketici Sayısı	Kurulu Güç (kVA)	Puant Güç (kW)
C-a	Endüstri	1	2000	1500
C-b	Endüstri	1	2000	1450
C-c	Endüstri	1	2000	1600

Yukarıda yer alan dağıtım şebekelerine ait arıza verileri doğrultusunda yapılmış olan güvenilirlik analizinde indirici merkez ve iletim sistemleri için daha önceki bölümlerde hesaplanan arıza verilerinden yararlanılmıştır.

İndirici merkez bağlantı tipi olarak tek baralı sistem seçilmiş olup, sistemde yer alan ve her biri S gücünde olan 2 trafonun sisteme en az S kadar güç aktarma durumları

göz önüne alınarak değerlendirme yapılmıştır. Bu nedenle indirici merkez arıza veriler olarak 4.2.1.1 Tek bara sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi bölümünde hesaplanan verilerden yararlanılmıştır.

İletim sistemi için ise 4.3.1 İletim sistemi için güvenilirlik değerlendirmesi bölümünde hesaplanan verilerden yararlanılmıştır.

Analizlerde her yük noktasına ait arıza oranları (λ), ortalama tamir sürelerine (r) ve yıllık kesinti süreleri (U) temel alınmaktadır. Bu indisler kullanılarak yük noktaları için IEEE, EEI, EPRI, ve CEA gibi farklı gruplar tarafından tanımlanmış ve bölüm 3' de de anlatılan performans indisleri bulunmuştur.

4.4.1.1 Dağıtım sistemi-A için güvenilirlik değerlendirmesi

İndirici merkez için sistem başarısı en az S gücü kadar kabul edilirse (Toplam 2 trafonun yer aldığı indirici merkezde bulunan her bir trafonun gücü S olduğu varsayılmıştır) ve daha önceki bölümlerde hesaplanan veriler yerine koyulursa dağıtım sistemi-A 'da yer alan birinci yük noktası A-a için arıza oranı olan $\lambda_{A1\text{-}a}$ denklem **(2.38)**'den yararlanılarak şu şekilde hesaplanır[16].

$$\lambda_{A1-a} = \lambda_{İndirici\ Merkez-S} + \lambda_{İletim\ Sist.} + \lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-A} + \lambda_{A-a}$$

Burada dağıtım sistemi-A direk olarak indirici merkez çıkışından enerjilendirildiği için iletim hattından kaynaklı bir arıza verisi olmayacaktır.

$\lambda_{\text{Dağıtım Ana Besleme Hattı-A}}$ ise denklem **(2.38)**'den yararlanılarak şu şekilde hesaplanacaktır.

$$\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-A} = \lambda_{A-1} + \lambda_{A-2} + \lambda_{A-3}$$

İlgili değerler yerine konulduğunda $\lambda_{\text{Dağıtım Ana Besleme Hattı-A}}$ denklem **(2.38)**'den yararlanılarak şu değeri alır.

$$\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-A} = 0{,}6 + 0{,}2 + 0{,}4 = 1{,}2\ arıza/yıl$$

Veriler yerine konulduğunda $\lambda_{A1\text{-}a}$ denklem **(2.38)**'den yararlanılarak şu değeri alır.

$\lambda_{A1-a} = 0{,}220750552 + 0 + 1{,}2 + 0{,}4 = 1{,}820750552$ arıza /yıl

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{A1\text{-}b}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{A1-b} = 0{,}220750552 + 0 + 1{,}2 + 0{,}4 = 1{,}820750552 \text{ arıza/yıl}$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{A1\text{-}c}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{A1-c} = 0{,}220750552 + 0 + 1{,}2 + 0{,}6 = 2{,}020750552 \text{ arıza/yıl}$$

Benzer şartlar altında dağıtım sistemi-A' da yer alan yük noktalarından birincisi olan A-a yük noktası için analiz sonucu elde edilen ortalama tamir oranı $r_{A1\text{-}a}$ denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak şu şekilde hesaplanır[16].

$$r_{A1-a} = \frac{\sum(\lambda * r)}{\lambda_{A1-a}}$$

İlgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'den yararlanılarak $r_{A1\text{-}a}$ aşağıdaki değeri alır.

$$r_{A1-a} = \frac{4 + 0 + 1{,}23 + 0{,}4 * 5}{1{,}820750552} = 3{,}97\ saat$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'den yararlanılarak $r_{A1\text{-}b}$ aşağıdaki değeri alır

$$r_{A1-b} = \frac{4 + 0 + 1{,}23 + 0{,}4 * 5}{1{,}820750552} = 3{,}97\ saat$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'den yararlanılarak $r_{A1\text{-}c}$ aşağıdaki değeri alır

$$r_{A1-c} = \frac{4 + 0 + 1{,}23 + 0{,}6 * 5}{2{,}020750552} = 4{,}07 saat$$

Yukarıda hesaplanan analiz değerlerine göre çizelge 4.42' de yer alan analiz sonuçları elde edilir.

Çizelge 4.42 : Dağıtım sistemi-A için analiz sonuçları.

YÜK	HESAPLANAN λ (arıza/yıl)	HESAPLANAN r (saat)	HESAPLANAN KESİNTİ SÜRESİ U=λ*r (saat)	HESAPLANAN λ*N	HESAPLANAN U*N	HESAPLANAN P*U
A1-a	1,820750552	3,97	7,23	773,82	3073,4	7593,12
A1-b	1,820750552	3,97	7,23	677,32	2690,13	6725,33
A1-c	2,020750552	3,97	8,23	2,02	8,23	6585,23
			∑=	1453,16	5771,77	20903,68

Yukarıda bahsedilen şartlar altında ve çizelge 4.42' de hesaplanan analiz sonuçlarına göre sistem performans indisleri ise şu şekilde hesaplanır.

İlk performans indisi SAIFI (Sistemin ortalama kesinti sıklığı indisi - System avarage interruption frequency index) denklem **(3.4)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i . N_i}{\sum N_i} = \frac{1453,16}{798} = 1,82 \text{ kesinti/yıl}$$

Diğer bir performans indisi olan SAIDI (Sistemin ortalama kesinti süresi indisi - System average interruption duration index) denklem **(3.6)**' dan yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SAIDI = \frac{\sum U_i . N_i}{\sum N_i} = \frac{5771,77}{798} = 7,23\ saat$$

Başka bir performans indisi olan CAIDI (Tüketici ortalama kesinti süresi indisi - customer average interruption duration index) denklem **(3.10)**' dan yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{\sum U_i . N_i}{\sum \lambda_i . N_i} = \frac{5771,77}{1453,16} = 3,97\ (saat/kesinti/yıl)$$

Diğer bir performans indisi olan ASAI (Ortalama servis kullanılabilirliği indisi - average service availability index) denklem **(3.12)**' ye göre aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$ASAI = \frac{(\sum \mathrm{N_i\ x\ 8760}) - (\sum \mathrm{N_i\ x\ U_i})}{\sum \mathrm{Ni\ x\ 8760}} = \frac{(798 * 8760) - 5771{,}77}{798 * 8760} = 0{,}999174$$

Başka bir performans indisi olan ENS (yıllık sağlanamayan enerji miktarı – energy not supplied) denklem **3.(10)** ve **(3.12)**'den aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$ENS = \sum(P_i * U_i) = 20903{,}68\ kWh/yıl$$

Diğer bir performans indisi olan AENS (yıllık tüketici başına düşen sağlanamayan enerji - avarage energy not supplied) denklem (**3.10)** ve **(3.12)**'den aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$AENS = \frac{ENS}{Ni} = \frac{\sum(P_i * U_i)}{Ni} = \frac{20903{,}68}{798} = 26{,}2\ kWh/yıl/tüketici$$

Yukarıda hesaplanan performans indisleri çizelge 4.43' de tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.43 : Dağıtım sistemi-A için performans indisleri sonuçları.

Sistem Performans İndisleri	
SAIFI =	1,82
SAIDI =	7,23
CAIDI =	3,97
ASAI =	0,9991743
ENS =	20903,68
AENS =	26,20

4.4.1.2 Dağıtım sistemi-B için güvenilirlik değerlendirmesi

İndirici merkez için sistem başarısı en az S gücü kadar kabul edilirse (Toplam 2 trafonun yer aldığı indirici merkezde bulunan her bir trafonun gücü S olduğu varsayılmıştır) ve daha önceki bölümlerde hesaplanan veriler yerine koyulursa dağıtım sistemi-B 'da yer alan birinci yük noktası B-a için arıza oranı olan $\lambda_{B1\text{-}a}$ denklem **(2.38)**'den yararlanılarak şu şekilde hesaplanır[16].

$$\lambda_{B1-a} = \lambda_{İndirici\ Merkez-S} + \lambda_{İletim\ Sist.} + \lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-B} + \lambda_{B-a}$$

$\lambda_{\text{Dağıtım Ana Besleme Hattı-B}}$ denklem **(2.38)**'den yararlanılarak şu şekilde hesaplanacaktır.

$$\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-B} = \lambda_{B-1} + \lambda_{B-2} + \lambda_{B-3}$$

İlgili değerler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{\text{Dağıtım Ana Besleme Hattı-B}}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-B} = 0{,}8 + 0{,}4 + 0{,}2 = 1{,}4\ arıza/yıl$$

İlgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{\text{B1-a}}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{B1-a} = 0{,}220750552 + 0{,}00000098 + 1{,}4 + 0{,}8 = 2{,}42 \text{ arıza /yıl}$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{\text{B1-b}}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\Lambda_{B1-b} = 0{,}220750552 + 0{,}00000098 + 1{,}4 + 0{,}2 = 1{,}82 \text{ arıza/yıl}$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{\text{B1-c}}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{B1-c} = 0{,}220750552 + 0{,}00000098 + 1{,}4 + 0{,}6 = 2{,}02 \text{ arıza/yıl}$$

Benzer şartlar altında dağıtım sistemi-B' de yer alan yük noktalarından birincisi olan B-a yük noktası için analiz sonucu elde edilen ortalama tamir oranı $r_{\text{B1-a}}$ denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak şu şekilde hesaplanır[16].

$$r_{B1-a} = \frac{\sum(\lambda * r)}{\lambda_{B1-a}}$$

İlgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak bulunan $r_{\text{B1-a}}$ aşağıdaki değeri alır.

$$r_{B1-a} = \frac{4 + 0{,}000000218 + 1{,}2 + 0{,}8 * 5}{2{,}42} = 3{,}8\ saat$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak bulunan $r_{B1\text{-}b}$ aşağıdaki değeri alır

$$r_{B1-b} = \frac{4 + 0{,}000000218 + 1{,}2 + 0{,}2 * 5}{1{,}82} = 3{,}41\ saat$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak bulunan $r_{A1\text{-}c}$ aşağıdaki değeri alır

$$r_{B1-c} = \frac{4 + 0{,}000000218 + 1{,}2 + 0{,}6 * 5}{2{,}22} = 3{,}69 saat$$

Yukarıda hesaplanan analiz değerlerine göre çizelge 4.44' de yer alan analiz sonuçları elde edilir.

Çizelge 4.44 : Dağıtım sistemi-B için analiz sonuçları.

YÜK	HESAPLANAN λ (arıza/yıl)	HESAPLANAN r (saat)	HESAPLANAN KESİNTİ SÜRESİ U=λ*r (saat)	HESAPLANAN λ*N	HESAPLANAN U*N	HESAPLANAN P*U
B1-a	2,4207515326	3,8	9,2	1428,24	5428,91	11962,01
B1-b	1,8207515326	3,41	6,2	974,1	3317,83	7441,85
B1-c	2,2207515236	3,69	8,2	632,91	2337,44	5741,08
			∑=	3035,26	11084,18	25144,94

Yukarıda bahsedilen şartlar altında ve çizelge 4.49' de hesaplanan analiz sonuçlarına göre sistem performans indisleri ise şu şekilde hesaplanır.

İlk performans indisi SAIFI (Sistemin ortalama kesinti sıklığı indisi - System avarage interruption frequency index) denklem **(3.4)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i . N_i}{\sum N_i} = \frac{3035{,}26}{1410} = 2{,}15 \text{ kesinti/yıl}$$

Diğer bir performans indisi olan SAIDI (Sistemin ortalama kesinti süresi indisi - System average interruption duration index) denklem **(3.6)**' dan yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SAIDI = \frac{\sum U_i . N_i}{\sum N_i} = \frac{11084{,}18}{1410} = 7{,}86\ saat$$

Başka bir performans indisi olan CAIDI (Tüketici ortalama kesinti süresi indisi - customer average interruption duration index) denklem **(3.10)**' dan yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{\sum \mathrm{U_i} \,.\, \mathrm{N_i}}{\sum \lambda \mathrm{i} \,.\, \mathrm{Ni}} = \frac{11084{,}18}{3035{,}26} = 3{,}65\ (saat/kesinti/yıl)$$

Diğer bir performans indisi olan ASAI (Ortalama servis kullanılabilirliği indisi - average service availability index) denklem **(3.12)**' ye göre aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$ASAI = \frac{(\sum \mathrm{N_i\ x\ 8760}) - (\sum \mathrm{N_i\ x\ U_i})}{\sum \mathrm{Ni\ x\ 8760}} = \frac{(1410 * 8760) - 11084{,}01}{1410 * 8760} = 0{,}9991026$$

Başka bir performans indisi olan ENS (yıllık sağlanamayan enerji miktarı – energy not supplied) denklem **(3.10)** ve **(3.12)**'den aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$ENS = \sum (P_i * U_i) = 25144{,}94\ kWh/yıl$$

Diğer bir performans indisi olan AENS (yıllık tüketici başına düşen sağlanamayan enerji - avarage energy not supplied) denklem **(3.10)** ve **(3.12)**'den aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$AENS = \frac{ENS}{Ni} = \frac{\sum (P_i * U_i)}{Ni} = \frac{25144{,}94}{1410} = 17{,}8\ kWh/yıl/tüketici$$

Yukarıda hesaplanan performans indisleri çizelge 4.45' de tablo halinde verilmiştir

Çizelge 4.45 : Dağıtım sistemi-B için performans indisleri sonuçları.

Sistem Performans İndisleri	
SAIFI =	2,15
SAIDI =	7,86
CAIDI =	3,65
ASAI =	0,9991026
ENS =	25144,94
AENS =	17,83

4.4.1.3 Dağıtım sistemi-C için güvenilirlik değerlendirmesi

İndirici merkez için sistem başarısı en az S gücü kadar kabul edilirse (Toplam 2 trafonun yer aldığı indirici merkezde bulunan her bir trafonun gücü S olduğu

varsayılmıştır) ve daha önceki bölümlerde hesaplanan veriler yerine koyulursa dağıtım sistemi-C 'de yer alan birinci yük noktası C-a için arıza oranı olan $\lambda_{C1\text{-}a}$ denklem **(2.38)**'den yararlanılarak şu şekilde hesaplanır[16].

$$\lambda_{C1-a} = \lambda_{İndirici\ Merkez-S} + \lambda_{İletim\ Sist.} + \lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-C} + \lambda_{C-a}$$

$\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besleme\ Hattı\text{-}C}$ denklem **(2.38)**'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

$$\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-C} = \lambda_{C-1} + \lambda_{C-2} + \lambda_{C-3}$$

İlgili değerler yerine konulduğunda denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besleme\ Hattı\text{-}B}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{Dağıtım\ Ana\ Besl.Hattı-C} = 0{,}8 + 0{,}4 + 1 = 2{,}2\ arıza/yıl$$

Veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{C1\text{-}a}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{C1-a} = 0{,}220750552 + 0{,}000275 + 2{,}2 + 0{,}6 = 3{,}02 \text{ arıza /yıl}$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{C1\text{-}b}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{C1-b} = 0{,}220750552 + 0{,}000275 + 2{,}2 + 0{,}4 = 2{,}82 \text{ arıza /yıl}$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.38)**'den yararlanılarak bulunan $\lambda_{C1\text{-}c}$ aşağıdaki değeri alır.

$$\lambda_{C1-c} = 0{,}220750552 + 0{,}000275 + 2{,}2 + 0{,}4 = 2{,}82 \text{ arıza/yıl}$$

Benzer şartlar altında dağıtım sistemi-C' de yer alan yük noktalarından birincisi olan C-a yük noktası için analiz sonucu elde edilen ortalama tamir oranı $r_{C1\text{-}a}$ denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak şu şekilde hesaplanır[16].

$$r_{C1-a} = \frac{\sum(\lambda * r)}{\lambda_{C1-a}}$$

İlgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak bulunan $r_{C1\text{-}a}$ aşağıdaki değeri alır.

$$r_{C1-a} = \frac{4 + 0{,}0011 + 2 + 0{,}6 * 5}{3{,}02} = 2{,}98\ saat$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak bulunan $r_{C1\text{-}b}$ aşağıdaki değeri alır

$$r_{C1-b} = \frac{4 + 0{,}0011 + 2 + 0{,}4 * 5}{2{,}82} = 2{,}83\ saat$$

Benzer şartlar altında ilgili veriler yerine konulduğunda, denklem **(2.39)**'dan yararlanılarak bulunan $r_{C1\text{-}c}$ aşağıdaki değeri alır

$$r_{C1-c} = \frac{4 + 0{,}0011 + 2 + 0{,}4 * 5}{2{,}82} = 2{,}83\ saat$$

Yukarıda hesaplanan analiz değerlerine göre çizelge 4.46' da yer alan analiz sonuçları elde edilir.

Çizelge 4.46 : Dağıtım sistemi-C için analiz sonuçları.

YÜK	HESAPLANAN λ (arıza/yıl)	HESAPLANAN r (saat)	HESAPLANAN KESİNTİ SÜRESİ U=λ*r (saat)	HESAPLANAN λ*N	HESAPLANAN U*N	HESAPLANAN P*U
C1-a	3,021025552	2,98	9	3,02	9	13503,96
C1-b	2,82102552	2,84	8	2,82	8	11603,83
C1-c	2,82102552	2,84	8	2,82	8	12804,23
			∑=	8,66	25,01	37912,02

Yukarıda bahsedilen şartlar altında ve çizelge 4.46' da hesaplanan analiz sonuçlarına göre sistem performans indisleri ise şu şekilde hesaplanır.

İlk performans indisi SAIFI (Sistemin ortalama kesinti sıklığı indisi - System avarage interruption frequency index) denklem **(3.4)**' den yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i . N_i}{\sum N_i} = \frac{8{,}66}{3} = 2{,}89 \text{ kesinti/yıl}$$

Diğer bir performans indisi olan SAIDI (Sistemin ortalama kesinti süresi indisi - System average interruption duration index) denklem **(3.6)**' dan yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \,.\, N_i}{\sum N_i} = \frac{25{,}01}{3} = 8{,}34\ saat$$

Başka bir performans indisi olan CAIDI (Tüketici ortalama kesinti süresi indisi - customer average interruption duration index) denklem **(3.10)**' dan yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{\sum U_i \,.\, N_i}{\sum \lambda i \,.\, N_i} = \frac{25{,}01}{8{,}66} = 2{,}89\ (saat/kesinti/yıl)$$

Diğer bir performans indisi olan ASAI (Ortalama servis kullanılabilirliği indisi - average service availability index) denklem **(3.12)**' ye göre aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$ASAI = \frac{(\sum N_i \text{ x } 8760) - (\sum N_i \text{ x } U_i)}{\sum N_i \text{ x } 8760} = \frac{(3 * 8760) - 25{,}01}{3 * 8760} = 0{,}9990484$$

Başka bir performans indisi olan ENS (yıllık sağlanamayan enerji miktarı – energy not supplied) denklem **(3.10)** ve **(3.12)**'den aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$ENS = \sum(P_i * U_i) = 37912{,}02\ kWh/yıl$$

Diğer bir performans indisi olan AENS (yıllık tüketici başına düşen sağlanamayan enerji - avarage energy not supplied) denklem **(3.10)** ve **(3.12)**'den aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$AENS = \frac{ENS}{Ni} = \frac{\sum(P_i * U_i)}{Ni} = \frac{37912{,}02}{3} = 12637{,}3\ kWh/yıl/tüketici$$

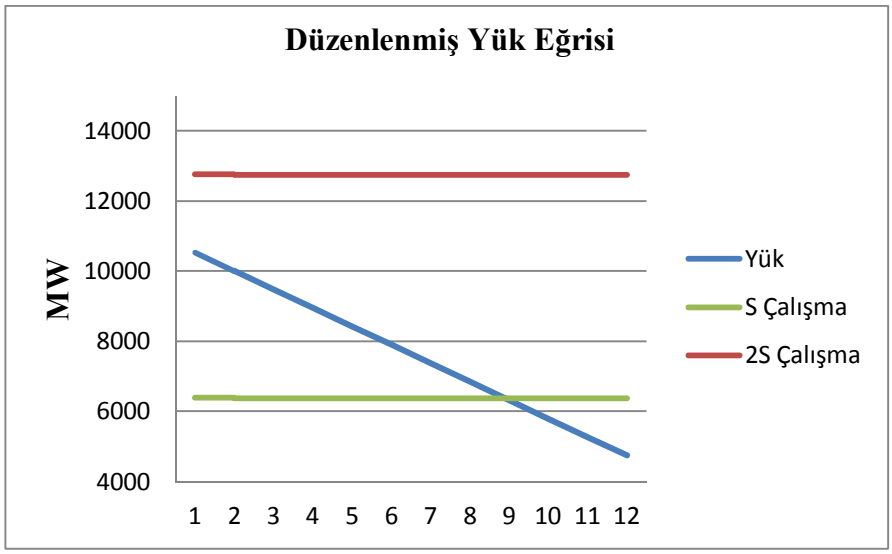
Yukarıda hesaplanan performans indisleri çizelge 4.47' de tablo halinde verilmiştir

Çizelge 4.47 : Dağıtım sistemi-C için performans indisleri sonuçları.

Sistem Performans İndisleri	
SAIFI =	2,89
SAIDI =	8,34
CAIDI =	2,89
ASAI =	0,9990484
ENS =	37912,02
AENS =	12637,34

4.5 LOLE ve LOLP Hesabı

Bu bölümde indirici merkez çıkış barası bölümü için ait LOLP (Loss of load probability – yük kaybı olasılığı) ve LOLE (loss of load expectation – umulan yük kaybı) indisleri hesaplanmıştır. Diğer baralara ait aynı indisler hesaplanmak istediğinde yine aynı yol izlenecek olup, bu durumda tek fark, iletim hatlarının devrede olma olasılıklarının da ilgili hesaba dahil edilmesi gerekecektir. Bu indislerden LOLP denklem **(3.1)**' e göre, LOLE ise denklem **(3.2)**' ye göre hesaplanmıştır. Şekil 4.31' de ilgili indislerin hesaplamalarında gerekli olan düzenlenmiş yük eğrisi yer almaktadır.



Şekil 4.31 : Düzenlenmiş yük eğrisi.

Şekil 4.31' de yer alan düzenlenmiş yük eğrisinde yükün yılın farklı zamanlarında yaklaşık olarak %60 kadar azalacağı öngörülmüştür.

Çizelge 4.48' de yük ve yük olasılıkların yıl boyunca 1/12' lik zamanlar içerisinde değişimleri tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.48 : Sisteme ait yükler ve yük olasılıkları.

Tk_i	Tk_i/T	Toplam Yük (MW)	P(L)	Birikmeli yük olasılığı $P(L \leq x)$
1	1/12	10530	0,083	0,083
1	1/12	10004	0,083	0,167
1	1/12	9477	0,083	0,25
1	1/12	8951	0,083	0,333
1	1/12	8424	0,083	0,417
1	1/12	7998	0,083	0,5
1	1/12	7371	0,083	0,583
1	1/12	6845	0,083	0,667
1	1/12	6318	0,083	0,75
1	1/12	5792	0,083	0,833
1	1/12	5265	0,083	0,917
1	1/12	4739	0,083	1

Yukarıdaki tabloda yer alan Tk_i ifadesi T=12 birimlik bir periyottaki birer birime karşılık gelmektedir.

LOLP ve LOLE indislerinin hesaplanması için indirici merkez çalışma durum olasılıklarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar daha önceki hesaplamalar neticesinde çizelge 4.13' de yer almaktadır. İlgili çalışma olasılıkları her bir trafo gücünün S=7,5 MVA (~6,375 MW) kabul edilecek şekilde çizelge 4.49' da verilmiştir.

Çizelge 4.49 : İndirici merkez çalışma durumları ve olasıkları.

Çalışır	Devre Dışı (C_K)	Devre dışı kalan kapasite [MW]	Durum olasılıkları
2S	0	0	0,999075836
S	S	6,375	0,000695817
0	2S	12,75	0,000228347

Çizelge 4.50 ise çizelge 4.48'de yer alan yük olasılıklarından elde edilen yük fonksiyonları yer almaktadır.

Çizelge 4.50 : Yük fonksiyonları.

Durum k	(Devre Dışı) C_k	Yük Fonk.	$F_D(IC-C_k)$
1	0	F_D(12,75-0)	0
2	S	F_D(12,75-6,375)	0,667
3	2S	F_D(12,75-12,75)	1

Yukarıda yer alan datalara ve denklem **(3.1)**' e göre LOLP indisi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

LOLP =0*0,999075836)+(0,667*0,000695817)+(1*0,000228347) = 0,000924 yıl

Buna göre LOLE ifadesi denklem **(3.2)** dikkate alındığına aşağıdaki değeri alır

$$LOLE = LOLP * 8760 = 6{,}06\ saat$$

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güvenilirlik, sistemin görevini tam olarak yerine getirebilmesi için sistemin imkan ve yetenekleri sonucu ortaya çıkan becerisine odaklanmaktadır. Elektrik güç sistemleri açısından güvenilirlik ise enerjinin her tüketim noktasına sürekli ve kaliteli bir şekilde ulaştırılma yeteneğidir.

Enerji güç sistemlerinde güvenilirlik değerlendirmesi üç ana başlıkta yapılmaktadır. Bunlardan ilki üretim, ikincisi üretim ve dağıtım arasındaki bağlantıyı sağlayan iletim, üçüncü ve son başlık ise dağıtım sistemleri güvenilirliğidir [4]. Yeterli üretim kapasitesinin tespiti yük tahmini yöntemi ile ortaya konmaktadır. Daha sonra puant yük değerlendirmelerinin ardından sistem için gerekli düzeyde rezerv güçlerinde tesis edilmesi gerekecektir. Üretim kapasitesi talep edilen yükle orantılıdır. Bu nedenle üretim sistemleri için güvenilirlik değerlendirmeleri yapılırken yük noktasındaki tepe yükler dikkate alınmalı, sistemin talep edilen yüke cevap verme yeteneği araştırılmalı ve olası bir fazla yüklenmede üretim sisteminde çökme yaşanmaması sağlanmalıdır[9].

İletim sistemi değerlendirmesi ise üretim sistemi değerlendirmelerinden sonra ele alınmaktadır. İletim sistemleri için planlanan yapı, sistemde bulunan ekipmanların hem talep edilen yükü karşılayabilecek hem de üretim kapasitesini karşılayabilecek olmasıdır. İletim sistemi güvenilirlik değerlendirmelerinde, sistemde kullanılan ekipmanlar, yük noktası talebi, üretim kapasitesi, şebeke yapısı, yük noktasının üretim noktasına olan uzaklığı (iletim hatlarının uzunlukları) gibi birçok datadan faydalanılmaktadır. Örneğin üretim sistemlerindeki ani yük değişimleri ve olası arıza ve bakım çalışmaları içi rezerv bir oran gibi paralel hatlarda sistem güvenliğini artırıcı olarak karşımıza çıkmaktadır[9].

Dağıtım sistemleri enerji üretim ve iletim sistemleri ile tüketiciler arasındaki son bağlantı noktası olduğundan dolayı elektrik güç sistemleri içerisinde önemi çok fazladır. Uzun süreli kesintiler ile karşılaşılmaması için tasarım ve işletme

aşamalarında birçok değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bu değerlendirmelere bakıldığında güvenilirlik değerlendirmeleri maliyet ve güvenlik için optimum düzeyin yakalanmasında en önemli noktadır. Özellikle uzun süreli kesintilerde hastane, okul, fabrikalar gibi önemli kurum ve kuruluşların kayıpları oldukça büyük olması sistem üzerindeki araştırmaların önemini açıkça ortaya koymaktadır.

5.1 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler

Önceki bölümlerde sırasıyla indirici trafo merkezi, iletim hattı ve dağıtım sistemleri için güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmıştır. Güvenilirlik analiz yapılan ilk bölüm indirici trafo merkezlerinin farklı tip ve yapıdaki sistemleri için gerçekleştirilmiştir. Sistem modeli olarak beş farklı tip tercih edilmiştir. Bunlar sırasıyla tek bara sistemi, bölünmüş baralı sistem, bir buçuk kesici sistemi, halka bara sistemi ve çift bara çift kesicili sistemdir.

Analizi gerçekleştirilen ilk indirici merkez sistemi tek bara sistemidir. Bu bara sistemi için güvenilirlik fonksiyonu ilk önce minimal kesitleme methodu yardımıyla bulunmuştur. Ardından aynı güvenilirlik fonksiyonunun hata ağacı yöntemi yardımıyla da bulunabileceği gösterilmiştir. Güvenilirlik fonksiyonun ardından sabit arıza hızı varsayımı göz önüne alınarak sisteme ait ortalama arızaya kadar geçen süre hesaplanmıştır. Burada ele alınan arıza verileri doğrultusunda bu süre 4,53 yıl olarak hesaplanmıştır. Tek baralı sistemler güvenilirlik düzeyi en düşük sistem olmasına rağmen bu süre yine de fazladır. Ancak üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinden oluşan bir elektrik güç sisteminde dağıtım sistemlerinin güvenilirliğe etkisi yaklaşık %85‘ dir. Bu duruma göre indirici trafo merkezi için çıkan bu sonuç makul bir düzeydedir.

İkinci olarak değerlendirilen indirici trafo merkezi bağlantı tipi ise bölünmüş baralı sistemdir. Tek baralı sistemde olduğu gibi minimal kesitleme methodu yardımıyla güvenilirlik fonksiyonu elde edildikten sonra sabit arıza hız varsayımı ile sisteme ait ortalama arıya kadar geçen süre 6,71 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sürede yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı ilk bakışta yüksek bir değer olarak görülsede makul bir değerdir. Ayrıca bölünmüş baralı sistemde ana enerji giriş hatlarının bağlandığı giriş barasının bölünmesi ile beklendiği gibi tek baralı sisteme göre daha güvenilir bir sistem olduğu belirlenmiştir.

Üçüncü olarak değerlendirilen indirici merkez bağlantı tipi ise bir buçuk kesicili sistemdir. Bu sistem içinde gerçekleştirilen analiz sonucuna göre ortalama arızaya kadar geçen süre 23,87 yıl olarak hesaplanmıştır. Özellikle bara güvenliğinin ön planda olduğu bu sistemde birçok manevra olanağının olması nedeniyle bu şekilde bir değerle karşılaşılması beklenen bir durumdur. Diğer bağlantı tipleri de incelendiğinde bu sistem en güvenilir olmasına rağmen özellikle avrupa ülkelerinde tercih edilen bir sistem değildir. Daha çok Kuzey Amerika' da tercih edilmektedir. Bu sistemin tercih edilmeme nedeni olarak maliyetleri yüksek olmasının yanı sıra mevcut sistemlerin bu yapıya uygun olmaması gösterilmektedir.

Dördüncü olarak incelenen indirici merkez tipi ise halka bara sistemidir. Daha önceki bağlantı tipleriyle benzer bir yöntem kullanılarak elde edilen arızaya kadar geçen ortalama süre 8,73 yıl olarak hesaplanmıştır. Sistem maliyetleri bakımından bir değerlendirme yapılacak olursa tek bara ve bölünmüş baralı sistemlere göre bu sürenin daha fazla çıkması beklenen bir sonuçtur.

İndirici merkez tipleri içerisinde beşinci ve son olarak ele alınan sistem çift bara ve çift kesicili sistemlerdir. Önceki sistemlerin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerle birlikte bu sisteme ait ortalama arızaya kadar geçen süre 15,61 yıl olarak hesaplanmıştır. Özellikle yüksek kapasiteli sistemlerde tercih edilen bu yapılar çok yüksek maliyet ve yüksek boyutlu tesis alanı gereksinimi nedeniyle olarak sınırlı düzeyde tercih edilmektedirler.

Farklı tipteki indirici merkezlere ait güvenilirlik fonksiyonlarının bulunmasının ardından indirici trafo merkezleri ile dağıtım sistemleri arasındaki bağlantıyı sağlayan iletim sistemleri için bir güvenilirlik değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan arıza verileri ve ele alınan iletim sistemi modeline göre bara-2 şeklinde ifade edilen bölüme ait güvenilirlik değerlendirmesi iki farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Bu durumlar, hat-4 şeklinde ifade edilen iletim hattının sitemde olması ve olmaması durumlarıdır. Hat-4 şeklide ifade edilen iletim hattının sistemde olmaması durumunda arıza hızı 0,0008949 arıza/yıl iken, hat-4' ün sisteme dahil olmasının ardından arıza hızı 0,0000009807 arıza/yıl olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum sisteme paralel bir hattın dahil edilmesinin sistem güvenilirliğine pozitif yönde etki yaptığının bir kanıtıdır. Bara-2' ye benzer şekilde, bara-3 içinde yapılan güvenilirlik değerlendirmelerinde hat-4' ün olmaması durumunda arıza oranı 0,3008949 arıza/yıl iken hat 4' ün sisteme dahil olmasının ardından arıza oranının

0,000275 arıza/yıl' a düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum bara-2' de olduğu gibi bara-3 içinde sisteme paralel bir hattın ilavesinin güvenilirliğe pozitif bir etki yaptığının bir kanıtıdır.

Model alınan iletim sistemi için yapılan güvenilirlik değerlendirmelerinin ardından elektrik enerjisinin tüketicilere ulaştığı son bölüm olan dağıtım sistemleri için bir model oluşturulmuştur. Pratikte yapılan uygulamalar ve tecrübelerden yararlanılarak oluşturulan arıza verileri neticesinde güvenilirlik değerlendirmeleri yapılmıştır.

İlk olarak değerlendirilen dağıtım şebekesi, dağıtım sistemi A' dır. Dağıtım sistemi A içerisinden 3 adet dağıtım trafo yer almaktadır. Bu dağıtım trafolarından ikisi konut, biri ise endüstriyel yüklere hizmet vermektedir.

İkinci olarak değerlendirilen dağıtım şebekesi, dağıtım sistemi B' dir. Dağıtım sistemi B içerisinden 3 adet dağıtım trafo yer almaktadır. Bu dağıtım trafolarından tamamı konut yüklerine hizmet vermektedir.

Üçüncü olarak değerlendirilen dağıtım şebekesi, dağıtım sistemi C'dir. Dağıtım sistemi C içerisinden 3 adet dağıtım trafo yer almaktadır. Bu dağıtım trafolarından tamamı endüstriyel yüklerine hizmet vermektedir. Her bir dağıtım şebekesi için (A, B, C) değerlendirmeler yapılmıştır. Dağıtım sistemleri için yapılan değerlendirmelerde indirici trafo merkezleri ve iletim hatları için daha önce hesaplanan güvenilirlik indislerinde faydalanılmıştır.

Dağıtım sistemi-A için yapılan değerlendirmeler sonucu ortaya çıkan analiz sonuçları çizelge 4.47' de belirtilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar sayesinde çizelge 4.48'de yer alan performans indisleri hesaplanmıştır. Bu performans indisleri sistemin geçmiş performansları hakkında bilgi vermektedir. Performans indislerinin karşılaştırması için çizelge 5.1' de yer alan ortalama değerlerden yararlanılmıştır[21].

Çizelge 5.1 : Performans indisleri ortalama değerleri [21].

SAIFI (kesinti/yıl)	SAIDI (saat)	CAIDI (saat/kesinti/yıl)	ASAI (%)
1,18	1,6	1,28	0,999375

Çizelge 5.1'de yer alan değerler Amerika Birleşik Devletleri' nde elektrik kurumlarının sıklıkla kullandıkları indislere ait ortalama değerleri içermektedir[24].

Önceki bölümlerde ele alınan üç dağıtım sisteminin performans indislerinin karşılaştırmaları çizelge 5.2' de yer almaktadır.

Çizelge 5.2 : Performans indisleri karşılaştırması.

	SAIFI (kesinti/yıl)	SAIDI (saat)	CAIDI (saat/kesinti/yıl)	ASAI (%)
Ortalama	1,18	1,6	1,28	0,999375
Dağıtım Sist.-A	1,82	7,23	3,97	0,999174
Dağıtım Sist.-B	2,15	7,86	3,65	0,999102
Dağıtım Sist.-C	2,89	8,34	2,89	0,999048

Çizelge 5.2' de yer alan bilgiler doğrultusunda değerlendirmeler ortalama kesinti sıklığı (frekansı) indisi olan SAIFI değerine göre yapılacak olursa her üç dağıtım şebekesinin de güvenilirliklerinin düşük olduğu gözlemlenmektedir. Her üç dağıtım şebekesi için SAIFI performans indisi bakımından kendi içlerinde bir değerlendirme yapılırsa en güvenilir şebeke dağıtım sistemi-A olacaktır.

Çizelge 5.2' de yer alan bilgiler doğrultusunda değerlendirmeler ortalama kesinti süresi indisi olan SAIDI değerine göre yapılacak olursa her üç dağıtım şebekesinin de güvenilirliklerinin düşük olduğu gözlemlenmektedir. Her üç dağıtım şebekesi için SAIDI performans indisi bakımından kendi içlerinde bir değerlendirme yapılırsa en güvenilir şebeke dağıtım sistemi-A olacaktır.

Çizelge 5.2' de yer alan bilgiler doğrultusunda değerlendirmeler tüketici ortalama kesinti süresi indisi olan CAIDI değerine göre yapılacak olursa her üç dağıtım şebekesinin de güvenilirliklerinin düşük olduğu gözlemlenmektedir. Her üç dağıtım şebekesi için CAIDI performans indisi bakımından kendi içlerinde bir değerlendirme yapılırsa en güvenilir şebeke dağıtım sistemi-A olacaktır.

Son olarak indirici merkez çıkış barası için hesaplanan LOLP ve LOLE indislerine göre belirtilen bara için yıllık 6,06 saat gibi bir bölümde yük kaybı beklentisi olacağı belirlenmiştir. Yani bu bara için yapılan hesaplamalarda baradan sisteme verilen enerjinin yılda ortalama 6,06 saat gibi bir süre ile yük karşılayamayacağı ortaya konulmaktadır.

Ancak yukarıda da açıklandığı gibi çizelge 5.1' de yer alan performans indislerinin ortalama değerleri Amerika Birleşik Devletleri'ndeki elektrik kurumlarının kullandığı performans indislerine ait ortalama değerlerdir. Ülkemizde bu tür çalışmalar olmadığından dolayı bu konuda henüz bir standart geliştirilmemiştir. Bu

sebeple ülkemizde bu tip değerlendirmelerin yapılabilmesi için öncelikli olarak elektrik kurumlarının uygun performans indisleri belirlemeleri ve bu performans indisleri için sınır değerler belirlemeleri gerekmektedir.

Yapılan güvenilirlik değerlendirmelerinde ortaya konulan sonuçlar birçok faktöre bağlı olarak ortaya konmaktadır. Özellikle tezde model alınan dağıtım sistemlerinin radyal yapıda olmaları ve tek taraftan enerji beslemesi yapıldığı için sistemlere ait kesinti süreleri fazla çıkmaktadır. Her bir dağıtım sistemi için sistemde yer alan bir noktada arıza meydana geldiğinde tüm sistem enerjisiz kalmaktadır.

Bu konuda halka şeklinde tesis edilen dağıtım sistemleri maliyetleri arttırmasına rağmen kesinti sürelerinin azalmasına neden olacaktır. Dağıtım sisteminin şekli kesinti süreleri üzerinde büyük bir etkisi söz konusudur. Fakat sistem şeklinin arıza oranları üzerinde direkt bir etkisi yoktur. Sistemde yer alan bir noktada oluşan arıza hat başında yer alan kesiciyi açtıracağından dolayı tüm yük noktaları bu durumdan etkilenecektir[19].

Hesaplanan performans indislerinin iyileştirilmesi için kesinti sürelerindeki azaltma çalışmalarında en önemli etki, hızlı müdahale yani arıza noktasının hızlı bir şekilde belirlenmesi gerekliliğidir. Bunun yanında müdahaleyi gerçekleştirecek ekipte önemli bir yer tutmaktadır. Ekibin hızlı bir şekilde arıza noktasına ulaşması ve arıza doğru bir şekilde müdahale performans indislerinde iyileşmeye neden olacaktır.

Bakım ve işletmenin önemli bir yer tuttuğu bu tür sistemlerde plan ve programlı bir şekilde çalışan ekipler zamanında yapılacak bakım ve arızaya karşı hızlı müdahale ile beraber işletmede alınacak tedbirler sistem güvenilirliğini önemli bir şekilde arttıracaktır.

Ülkemizde gerçekleştirilecek olan iyileştirme çalışmaları için en önemli unsur yapılacak araştırmaların daha da arttırılması gerekliliğidir. Özellikle araştırmalarda yaşanan veri sıkıntısının önüne geçilebilmesi için ülkemizde bulunan elektrik kurumlarının arıza, tamir ve bakım verileri eksiksiz bir şekilde tutmaları gerekmektedir. Bu konu ile alakalı olarak başka bir noktada bazı standartlarının henüz tanımlanmamış olmamasıdır. Yine bu konu içinde gerekli çalışmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **North America Electric Reliability Council.** (1976). Reliability engineering and cost-benefit for use in power system planning and design, electricity council research Memorandum, ECR

[2] **Osborn J. Ve Kawann C.** (2001). Reliability of U.S. electricity system.

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

[4] **Billinton, R.** (1973). Power system reliability calc.mit. Press, Cambiridge, Mass.

[5] **Billinton, R. Ve Allan, R.N.** (1998). Reliability assessment of large electric Power systems, Kluwer Academic, Boston

[6] **Faulin, J, Juan, A.A., Martorell Alsina, S.S., Ramirez MArquez, J.E.** (2010). Simulation methods for reliability and availability of complex systems, Spain

[7] **Phoon, H. Y.** (2006). Generation system reliability evaluations with intermittent renewables, Strathclude University Energy Systems and Environment.

[8] **Url-1**<http://tr.wikipedia.org/wiki/%C5%9Ealt_sahas%C4%B1, alındığı tarih: 08.01.2012.

[9] **Brown, R. E.** (2009). Electrical power distribution reliability,USA .

[10] **Nack, D.** (2005). Reliability of substation configurations, Iowa State University, USA .

[11] **Nosrati, K.** (2011). Substation reliability analysis, KTH Royal Institute of Technology Master's Degree Project, Sweden.

[12] **NEPOOL Rel. Commite** (2006). Transmission owners and ISO-NE substation bus arrangement guideline working group report, England.

[13] **TMMOB Yayınları** (1975). Yüksek gerilim şalt tesisleri tasarımı, cilt 19, sayı 223, istanbul.

[14] **Ringdahl, L.** (2001). Safety analysis principles and practise in occurpational safety, second edition, new york.

[15] **Aydın, T.** (2012). Hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi, yüksek lisans tezi İTÜ

[16] **Billinton R. Ve Allan, R.N.** (1996). Reliability evaluation of power systems, second edition, Boston.

[17] **Erkoç A.** (1984). İletim sistemleri güvenilebilirlik değerlendirmesi, yüksek lisans tezi İTÜ.

[18] **Billinton R. Ve Acharya J.** (2006). Distribution system reliability assessment incorporating weather effects, UPEC' 06.

[19] **Dündar, N.** (2002). Elektrik güç sistemlerinde güvenilirlik analizi, yüksek lisans tezi, İTÜ.

[20] **Türkiye Elek. İletim AŞ.** (2011).Türkiye elektrik enerjisi on yıllık üretim kapasite projeksiyonu (2011-2020).

[21] **Burke, J. J.** (1994).Power distribution engineering fundamentals and applications, New York.

[22] **Özdemir, A., Mekiç, F., Çağlar R.** (1999).New structural approach for distribution system reliability assessment

[23] **Çağlar R.** (1999). Elektrik enerji sistemlerinde güvenilirlik değerlendirmesi için kısıtlılık seçimi , doktora tezi tezi, İTÜ.

[24] **Türkan, H.** (2007). Güvenilirlik analizinde kullanılan istatiksel dağılım modelleri, yüksek lisans tezi, ÇÜ.

EKLER

EK A: Tek baralı sistem olay ağacı - 256 durum

EK A

Olay ağacını oluşturan 1-36. durumlar çizelge A.1'de yer almaktadır.

Çizelge A.1 : Olay ağacı (1-36.durumlar).

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
1	+	+	+	+	+	+	+	+	2S	0,99871101
2	+	+	+	+	+	+	+	-	0	
3	+	+	+	+	+	+	-	+	S	0,000256518
4	+	+	+	+	+	+	-	-	0	
5	+	+	+	+	+	-	+	+	S	0,000182413
6	+	+	+	+	+	-	+	-	0	
7	+	+	+	+	+	-	-	+	S	4,68526E-08
8	+	+	+	+	+	-	-	-	0	
9	+	+	+	+	-	+	+	+	S	0,000256518
10	+	+	+	+	-	+	+	-	0	
11	+	+	+	+	-	+	-	+	0	
12	+	+	+	+	-	+	-	-	0	
13	+	+	+	+	-	-	+	+	0	
14	+	+	+	+	-	-	+	-	0	
15	+	+	+	+	-	-	-	+	0	
16	+	+	+	+	-	-	-	-	0	
17	+	+	+	-	+	+	+	+	S	0,000182413
18	+	+	+	-	+	+	+	-	0	
19	+	+	+	-	+	+	-	+	0	
20	+	+	+	-	+	+	-	-	0	
21	+	+	+	-	+	-	+	+	0	
22	+	+	+	-	+	-	+	-	0	
23	+	+	+	-	+	-	-	+	0	
24	+	+	+	-	+	-	-	-	0	
25	+	+	+	-	-	+	+	+	S	4,68526E-08
26	+	+	+	-	-	+	+	-	0	
27	+	+	+	-	-	+	-	+	0	
28	+	+	+	-	-	+	-	-	0	
29	+	+	+	-	-	-	+	+	0	
30	+	+	+	-	-	-	+	-	0	
31	+	+	+	-	-	-	-	+	0	
32	+	+	+	-	-	-	-	-	0	
33	+	+	-	+	+	+	+	+	0	
34	+	+	-	+	+	+	+	-	0	
35	+	+	-	+	+	+	-	+	0	
36	+	+	-	+	+	+	-	-	0	

Olay ağacını oluşturan 37-77. durumlar çizelge A.2'de yer almaktadır.

Çizelge A.2 : Olay ağacı (37-77.durumlar).

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
37	+	+	-	+	+	-	+	+	0	
38	+	+	-	+	+	-	+	-	0	
39	+	+	-	+	+	-	-	+	0	
40	+	+	-	+	+	-	-	-	0	
41	+	+	-	+	-	+	+	+	0	
42	+	+	-	+	-	+	+	-	0	
43	+	+	-	+	-	+	-	+	0	
44	+	+	-	+	-	+	-	-	0	
45	+	+	-	+	-	-	+	+	0	
46	+	+	-	+	-	-	+	-	0	
47	+	+	-	+	-	-	-	+	0	
48	+	+	-	+	-	-	-	-	0	
49	+	+	-	-	+	+	+	+	0	
50	+	+	-	-	+	+	+	-	0	
51	+	+	-	-	+	+	-	+	0	
52	+	+	-	-	+	+	-	-	0	
53	+	+	-	-	+	-	+	+	0	
54	+	+	-	-	+	-	+	-	0	
55	+	+	-	-	+	-	-	+	0	
56	+	+	-	-	+	-	-	-	0	
57	+	+	-	-	-	+	+	+	0	
58	+	+	-	-	-	+	+	-	0	
59	+	+	-	-	-	+	-	+	0	
60	+	+	-	-	-	+	-	-	0	
61	+	+	-	-	-	-	+	+	0	
62	+	+	-	-	-	-	+	-	0	
63	+	+	-	-	-	-	-	+	0	
64	+	+	-	-	-	-	-	-	0	
65	+	-	+	+	+	+	+	+	2S	0,000182413
66	+	-	+	+	+	+	+	-	0	
67	+	-	+	+	+	+	-	+	S	4,68526E-08
68	+	-	+	+	+	+	-	-	0	
69	+	-	+	+	+	-	+	+	S	3,33174E-08
70	+	-	+	+	+	-	+	-	0	
71	+	-	+	+	+	-	-	+	S	8,55756E-12
72	+	-	+	+	+	-	-	-	0	
73	+	-	+	+	-	+	+	+	S	4,68526E-08
74	+	-	+	+	-	+	+	-	0	
75	+	-	+	+	-	+	-	+	0	
76	+	-	+	+	-	+	-	-	0	
77	+	-	+	+	-	-	+	+	0	

Olay ağacını oluşturan 78-118. durumlar çizelge A.3'de yer almaktadır.

Çizelge A.3 : Olay ağacı (78-118.durumlar).

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
78	+	-	+	+	-	-	+	-	0	
79	+	-	+	+	-	-	-	+	0	
80	+	-	+	+	-	-	-	-	0	
81	+	-	+	-	+	+	+	+	S	3,33174E-08
82	+	-	+	-	+	+	+	-	0	
83	+	-	+	-	+	+	-	+	0	
84	+	-	+	-	+	+	-	-	0	
85	+	-	+	-	+	-	+	+	0	
86	+	-	+	-	+	-	+	-	0	
87	+	-	+	-	+	-	-	+	0	
88	+	-	+	-	+	-	-	-	0	
89	+	-	+	-	-	+	+	+	S	8,55756E-12
90	+	-	+	-	-	+	+	-	0	
91	+	-	+	-	-	+	-	+	0	
92	+	-	+	-	-	+	-	-	0	
93	+	-	+	-	-	-	+	+	0	
94	+	-	+	-	-	-	+	-	0	
95	+	-	+	-	-	-	-	+	0	
96	+	-	+	-	-	-	-	-	0	
97	+	-	-	+	+	+	+	+	0	
98	+	-	-	+	+	+	+	-	0	
99	+	-	-	+	+	+	-	+	0	
100	+	-	-	+	+	+	-	-	0	
101	+	-	-	+	+	-	+	+	0	
102	+	-	-	+	+	-	+	-	0	
103	+	-	-	+	+	-	-	+	0	
104	+	-	-	+	+	-	-	-	0	
105	+	-	-	+	-	+	+	+	0	
106	+	-	-	+	-	+	+	-	0	
107	+	-	-	+	-	+	-	+	0	
108	+	-	-	+	-	+	-	-	0	
109	+	-	-	+	-	-	+	+	0	
110	+	-	-	+	-	-	+	-	0	
111	+	-	-	+	-	-	-	+	0	
112	+	-	-	+	-	-	-	-	0	
113	+	-	-	-	+	+	+	+	0	
114	+	-	-	-	+	+	+	-	0	
115	+	-	-	-	+	+	-	+	0	
116	+	-	-	-	+	+	-	-	0	
117	+	-	-	-	+	-	+	+	0	
118	+	-	-	-	+	-	+	-	0	

Olay ağacını oluşturan 119-159. durumlar çizelge A.4'de yer almaktadır.

Çizelge A.4 : Olay ağacı (119-159.durumlar).

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
119	+	-	-	-	+	-	-	+	0	
120	+	-	-	-	+	-	-	-	0	
121	+	-	-	-	-	+	+	+	0	
122	+	-	-	-	-	+	+	-	0	
123	+	-	-	-	-	+	-	+	0	
124	+	-	-	-	-	+	-	-	0	
125	+	-	-	-	-	-	+	+	0	
126	+	-	-	-	-	-	+	-	0	
127	+	-	-	-	-	-	-	+	0	
128	+	-	-	-	-	-	-	-	0	
129	-	+	+	+	+	+	+	+	2S	0,000182413
130	-	+	+	+	+	+	+	-	0	
131	-	+	+	+	+	+	-	+	S	4,68526E-08
132	-	+	+	+	+	+	-	-	0	
133	-	+	+	+	+	-	+	+	S	3,33174E-08
134	-	+	+	+	+	-	+	-	0	
135	-	+	+	+	+	-	-	+	S	8,55756E-12
136	-	+	+	+	+	-	-	-	0	
137	-	+	+	+	-	+	+	+	S	4,68526E-08
138	-	+	+	+	-	+	+	-	0	
139	-	+	+	+	-	+	-	+	0	
140	-	+	+	+	-	+	-	-	0	
141	-	+	+	+	-	-	+	+	0	
142	-	+	+	+	-	-	+	-	0	
143	-	+	+	+	-	-	-	+	0	
144	-	+	+	+	-	-	-	-	0	
145	-	+	+	-	+	+	+	+	S	3,33174E-08
146	-	+	+	-	+	+	+	-	0	
147	-	+	+	-	+	+	-	+	0	
148	-	+	+	-	+	+	-	-	0	
149	-	+	+	-	+	-	+	+	0	
150	-	+	+	-	+	-	+	-	0	
151	-	+	+	-	+	-	-	+	0	
152	-	+	+	-	+	-	-	-	0	
153	-	+	+	-	-	+	+	+	S	8,55756E-12
154	-	+	+	-	-	+	+	-	0	
155	-	+	+	-	-	+	-	+	0	
156	-	+	+	-	-	+	-	-	0	
157	-	+	+	-	-	-	+	+	0	
158	-	+	+	-	-	-	+	-	0	
159	-	+	+	-	-	-	-	+	0	

Olay ağacını oluşturan 160-200. durumlar çizelge A.5'de yer almaktadır.

Çizelge A.5 : Olay ağacı (160-200.durumlar).

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
160	-	+	+	-	-	-	-	-	0	
161	-	+	-	+	+	+	+	+	0	
162	-	+	-	+	+	+	+	-	0	
163	-	+	-	+	+	+	-	+	0	
164	-	+	-	+	+	+	-	-	0	
165	-	+	-	+	+	-	+	+	0	
166	-	+	-	+	+	-	+	-	0	
167	-	+	-	+	+	-	-	+	0	
168	-	+	-	+	+	-	-	-	0	
169	-	+	-	+	-	+	+	+	0	
170	-	+	-	+	-	+	+	-	0	
171	-	+	-	+	-	+	-	+	0	
172	-	+	-	+	-	+	-	-	0	
173	-	+	-	+	-	-	+	+	0	
174	-	+	-	+	-	-	+	-	0	
175	-	+	-	+	-	-	-	+	0	
176	-	+	-	+	-	-	-	-	0	
177	-	+	-	-	+	+	+	+	0	
178	-	+	-	-	+	+	+	-	0	
179	-	+	-	-	+	+	-	+	0	
180	-	+	-	-	+	+	-	-	0	
181	-	+	-	-	+	-	+	+	0	
182	-	+	-	-	+	-	+	-	0	
183	-	+	-	-	+	-	-	+	0	
184	-	+	-	-	+	-	-	-	0	
185	-	+	-	-	-	+	+	+	0	
186	-	+	-	-	-	+	+	-	0	
187	-	+	-	-	-	+	-	+	0	
188	-	+	-	-	-	+	-	-	0	
189	-	+	-	-	-	-	+	+	0	
190	-	+	-	-	-	-	+	-	0	
191	-	+	-	-	-	-	-	+	0	
192	-	+	-	-	-	-	-	-	0	
193	-	-	+	+	+	+	+	+	0	
194	-	-	+	+	+	+	+	-	0	
195	-	-	+	+	+	+	-	+	0	
196	-	-	+	+	+	+	-	-	0	
197	-	-	+	+	+	-	+	+	0	
198	-	-	+	+	+	-	+	-	0	
199	-	-	+	+	+	-	-	+	0	
200	-	-	+	+	+	-	-	-	0	

Olay ağacını oluşturan 201-241. durumlar çizelge A.6'da yer almaktadır.

Çizelge A.6 : Olay ağacı (201-241.durumlar).

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
160	-	+	+	-	-	-	-	-	0	
201	-	-	+	+	-	+	+	+	0	
202	-	-	+	+	-	+	+	-	0	
203	-	-	+	+	-	+	-	+	0	
204	-	-	+	+	-	+	-	-	0	
205	-	-	+	+	-	-	+	+	0	
206	-	-	+	+	-	-	+	-	0	
207	-	-	+	+	-	-	-	+	0	
208	-	-	+	+	-	-	-	-	0	
209	-	-	+	-	+	+	+	+	0	
210	-	-	+	-	+	+	+	-	0	
211	-	-	+	-	+	+	-	+	0	
212	-	-	+	-	+	+	-	-	0	
213	-	-	+	-	+	-	+	+	0	
214	-	-	+	-	+	-	+	-	0	
215	-	-	+	-	+	-	-	+	0	
216	-	-	+	-	+	-	-	-	0	
217	-	-	+	-	-	+	+	+	0	
218	-	-	+	-	-	+	+	-	0	
219	-	-	+	-	-	+	-	+	0	
220	-	-	+	-	-	+	-	-	0	
221	-	-	+	-	-	-	+	+	0	
222	-	-	+	-	-	-	+	-	0	
223	-	-	+	-	-	-	-	+	0	
224	-	-	+	-	-	-	-	-	0	
225	-	-	-	+	+	+	+	+	0	
226	-	-	-	+	+	+	+	-	0	
227	-	-	-	+	+	+	-	+	0	
228	-	-	-	+	+	+	-	-	0	
229	-	-	-	+	+	-	+	+	0	
230	-	-	-	+	+	-	+	-	0	
231	-	-	-	+	+	-	-	+	0	
232	-	-	-	+	+	-	-	-	0	
233	-	-	-	+	-	+	+	+	0	
234	-	-	-	+	-	+	+	-	0	
235	-	-	-	+	-	+	-	+	0	
236	-	-	-	+	-	+	-	-	0	
237	-	-	-	+	-	-	+	+	0	
238	-	-	-	+	-	-	+	-	0	
239	-	-	-	+	-	-	-	+	0	
240	-	-	-	+	-	-	-	-	0	
241	-	-	-	-	+	+	+	+	0	

Olay ağacını oluşturan 242-256. durumlar çizelge A.7'de yer almaktadır.

Çizelge A.7 : Olay ağacı (242-256.durumlar).

Durum No	A	B	C	D	E	F	G	H	GÜÇ DURUMU	P(OLASILIK)
242	-	-	-	-	+	+	+	-	0	
243	-	-	-	-	+	+	-	+	0	
244	-	-	-	-	+	+	-	-	0	
245	-	-	-	-	+	-	+	+	0	
246	-	-	-	-	+	-	+	-	0	
247	-	-	-	-	+	-	-	+	0	
248	-	-	-	-	+	-	-	-	0	
249	-	-	-	-	-	+	+	+	0	
250	-	-	-	-	-	+	+	-	0	
251	-	-	-	-	-	+	-	+	0	
252	-	-	-	-	-	+	-	-	0	
253	-	-	-	-	-	-	+	+	0	
254	-	-	-	-	-	-	+	-	0	
255	-	-	-	-	-	-	-	+	0	
256	-	-	-	-	-	-	-	-	0	

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Hüsnü ERSALICI

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 20.08.1984

Adres: Gölcük / KOCAELİ

E-Posta: husnuersalici@gmail.com

Lisans: Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği (2007)

Mesleki Deneyim: Elektrik proje, uygulama ve kontrollük. 5 Yıllık deneyim