T.C. İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİNDE ALÇAK GERİLİM ARK PATLAMASI RİSKLERİNİN AZALTILMASI YÖNTEMLERİNİN MODELLENMESİ

Serdar PAKER

Danışman
Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ

DOKTORA TEZİ
İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI
İSTANBUL - 2022

KABUL VE ONAY SAYFASI

Serdar PAKER tarafından hazırlanan **"İş Sağlığı Ve Güvenliğinde Alçak Gerilim Ark Patlaması Risklerinin Azaltılması Yöntemlerinin Modellenmesi"** adlı tez çalışması 05/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde başarı ile savunularak, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	**Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ** İstanbul Ticaret Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	**Prof. Dr. Nedim TUTKUN** İstanbul Ticaret Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	**Doç. Dr. Berk AYVAZ** İstanbul Ticaret Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	**Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	**Prof. Dr. Bülent ORAL** Marmara Üniversitesi	.....

Onay Tarihi : 28.09.2022

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünün 28.09.2022 tarih ve 2022/359 numaralı Yönetim Kurulu Kararının 15. maddesi gereğince, ders yüklerini ve tez yükümlülüğünü yerine getirdiği belirlenen "Serdar PAKER" adlı öğrencinin mezun olmasına oy birliği ile karar verilmiştir.

Prof. Dr. Doğan KAYA
Enstitü Müdürü

AKADEMİK VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28.09.2022

Serdar PAKER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. ELEKTRİĞİN TARİHSEL GELİŞİMİ	7
4. ELEKTRİK KAYNAKLI İŞ KAZALARININ TEMEL ETKENLERİ	13
4.1. Elektrik Tesisatında Yüksek Sıcaklık Etkileri	13
4.2. Elektrik Tesisatında Meydana Gelebilen Ark Türleri	17
5. ELEKTRİK KAZALARI İSTATİSTİKLERİ	20
5.1. Elektrik sebepli kazalarda Türkiyede Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) verileri	20
5.2. Elektrik Sebepli Kazalarda Amerika Birleşik Devletlerinde Statisca-The Statistics Portal Verileri	21
5.3. Elektrik Sebepli Kazalarda İngilterede hse.gov.uk Verileri	21
5.4. Elektrik Sebepli Kazalarda Avrupa Birliği Ülkelerinde Eurostat Statistic Explained Verileri	21
6. ELEKTRİK ÇARPMASININ İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİ	24
6.1. Elektrik Çarpma Akımının İnsan Vücuduna Etkileri ve Koruma	24
6.2. Elektrik Çarpması ve Şok Üçgeni	25
6.3. Elektrik Çarpmasına Karşı Alınacak Koruma Önlemleri	27
6.3.1. Elektrik çarpmasına karşı temel koruma	27
6.3.2. Elektrik çarpmasına karşı hata koruması	27
6.3.2.1. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatası'nda elektrik çarpmasına karşı koruma	28
6.3.2.2. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatası'nda elektrik çarpmasına karşı koruma	30
6.3.2.3. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatası'nda elektrik çarpmasına karşı koruma	30
6.3.2.4. TT şebekede bir fazlı toprak hatası'nda elektrik çarpmasına karşı koruma	31
6.3.2.5. IT şebekede bir fazlı toprak hatası'nda elektrik çarpmasına karşı koruma	32
6.3.3. Elektrik çarpmasına karşı küçük gerilimle koruma	34
7. ALÇAK GERİLİM GÜÇ SİSTEMLERİNDE HATA (KISA DEVRE) ANALİZİ	35
7.1. Tek Fazlı Alternatif Akımda Genlik ve Efektif (Etkin) Değer	36
7.2. Üç Fazlı Alternatif Gerilimde Etkin Değer	38
7.3. Dengesiz Olaylar İçin Simetrili Bileşenler Yöntemi	39
7.4. Alçak Gerilim Kısa devre Büyüklükleri	46
7.4.1. Alçak gerilim generatörlerinde kısa devre	48
7.4.2. Alçak gerilimde dengeli üç fazlı kısa devre	49
7.4.3. Alçak gerilimde bir faz toprak (dengesiz) hatası	49

7.4.3.1. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatası 51
7.4.3.2. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatası 52
7.4.3.3. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatası 53
7.4.3.4. TT şebekede bir fazlı toprak hatası 54
8. ELEKTRİK ARK PATLAMASININ İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİ 57
8.1. Ark Patlamasının Isıl Etkileri 57
8.1.1. Temel ısıl maruziyet bilgisi 57
8.1.2. Ark patlaması ısıl etkilerinden korunma 60
8.1.2.1. Ark dayanımlı kıyafetlerde avrupa yaklaşimi –IEC 61482-1:2019 60
8.1.2.2. Ark dayanimli kiyafetlerde ABD yaklaşimi –NFPA 70E:2018- IEEE 1584:2018 62
8.2. Ark Patlamasının Basınç Etkileri 64
8.2.1. Temel basınç maruziyeti bilgisi 64
8.2.2. Ark patlaması basıncından korunma 66
8.3. Ark Patlamasının Ses Etkileri 68
8.3.1. Temel gürültü maruziyeti bilgisi 68
8.3.2. Kulağın ark patlaması sesinden korunması 70
8.4. Ark Patlamasının Işık Etkileri 71
8.4.1. Temel ışık maruziyeti bilgisi 71
8.4.2. Gözün ark parlamasından korunması 74
9. ARK PATLAMASI ANALİZİ 76
9.1. DGUV Maruziyet Özenerjisi Hesaplama Yöntemi 77
9.2. Ralph Lee; Ark Gücü ve Ark Etki Mesafesi Hesaplama Yöntemi 78
9.2.1. Trafo geçit izolatöründe oluşan üç fazlı simetrik kısa devre akımı hesabı 78
9.2.2. Trafo geçit izolatöründe oluşan üç fazlı ark gücü hesabı 78
9.2.3. Ark etki mesafesi hesabı 79
9.3. Doughty Neal Makalesi; Maruziyet Özenerjisi (Incident Energy) Hesaplama Yöntemi 79
9.3.1. Açık havada maruziyet özenerjisi (incident energy) hesabı 80
9.3.2. Kübik panoda maruziyet özenerjisi (incident energy) hesabı 81
9.4. IEEE 1584:2018 Maruziyet Özenerjisi (Incident Energy) ve Ark Etki Sınırı Hesaplama Yöntemi 81
9.4.1. Ark modeli baz değerleri 82
9.4.2. Ark modeli uygulama adımları 83
9.4.2.1. Orta düzey ortalama ark akımı ≤ 600 V için 84
9.4.2.2. Ark akımı varyasyon düzeltme faktörü 84
9.4.2.3. Orta düzey ortalama maruziyet özenerjisi (inc. enr.) 85
9.4.2.4. Orta düzey ark etki sınırı 86
9.4.2.5. Pano (mahfaza) boyutu düzeltme faktörü CF 87
9.4.2.6. Son düzey ark akımı, maruziyet özenerjisi ve ark etki mesafesinin değerlendirilmesi 89
9.4.3. Saha uygulaması 89
10. ARK PATLAMA RİSKİNİN DEĞERLENDİRMESİ VE RİSK KONTROLÜ 95
10.1. Risk Kontrol Hiyerarşisi 95
10.2. Risk Analizi 97
10.3. Ark Patlaması Risk Değerlendirmesi 98
10.3.1. Şiddetin (maruziyet özenerjisinin) belirlenmesi 99

10.3.2. Olasılığın belirlenmesi 100
10.3.3. Ark patlaması etkileri için 5x5 risk matrisi 101
10.4. Ark Patlaması Olayı ve Devre Kesici Manevrası 102
11. ARK PATLAMASI VE ELEKTRİK ÇARPMASINA KARŞI ALINAN ÖNLEMLERİN KONTROLU VE ÖNEM SIRASININ BELİRLENMESİ 103
11.1 Ark Patlaması Etkilerine Karşı Alınan Önlemlerin Kontrolü ile Klasik Kontrol Listesinin Genişletilmesi 106
11.2. Ark Patlaması Etkilerinin Kontrolü ile Genişletilmiş Elektrik Tesisat Denetlemesinin Adımları 106
11.3. Elektrik Tesisatı Kontrol Adımlarının Ağırlığı ve Önem Sırasının Belirlenmesi İçin Yöntem Seçimi 108
11.3.1. Analitik hiyerarşi süreci (prosesi)-AHP 109
11.3.2. Ark patlaması etkileriyle genişletilmiş elektrik tesisatı kontrol listesi adımlarının ağırlığı ve önem sırasının AHP yöntemiyle belirlenmesi 110
11.3.3. Ark patlaması etkileriyle genişletilmiş elektrik tesisatı kontrol kriterlerinde hiyerarşi katmanlarının oluşturulması .. 111
11.3.4. Uzmanların ikili karşılaştırma değerlendirmeleri 119
11.3.5. Tutarlılık kontrolü 121
11.3.6. Super Decision programı ile sağlama 124
11.3.7. Üçgensel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci-TFAHP 125
11.3.8. Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci-SFAHP 128
11.3.9. Ağırlık tablolarının değerlendirilmesi birleştirilmesi ve önceliklendirme 132
11.3.9.1. Önceliklendirmedeki ilk bölüm (Kırmızı: Majör uygunsuzluklar) 139
11.3.9.2. Önceliklendirmedeki ikinci bölüm (Mavi: Minor uygunsuzluklar) 140
11.3.10. Elektrik tesisatı kontrolunun değerlendirmesi 140
12. ARK MARUZİYET ÖZENERJİSİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ 142
12.1. Ark Etkilerinin Azaltılmasında Proaktif Önlemler 142
12.2. Ark Etkilerinin Azaltılmasında Aktif Önlemler 142
12.2.1. Seçicilik (Selektivite) 142
12.2.2. Hızlı açma yöntemleri 144
12.3. Ark Etkilerinin Azaltılmasında Pasif Önlemler 144
13. SONUÇ VE ÖNERİLER 146
KAYNAKLAR 151
EKLER 160
EK A. Önceliklendirmede AHP Yöntemi Hesap Detayı 161
EK B. Önceliklendirmede Üçgensel Bulanık AHP Yöntemi Hesap Detayı. 171
EK C. Önceliklendirmede Küresel Bulanık AHP Yöntemi Hesap Detayı ... 182
ÖZGEÇMİŞ 191

ÖZET

Doktora Tezi

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİNDE ALÇAK GERİLİM ARK PATLAMASI RİSKLERİNİN AZALTILMASI YÖNTEMLERİNİN MODELLENMESİ

Serdar PAKER

İstanbul Ticaret Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ

2022, 191 sayfa

Bu çalışmada, önemli elektrik kaynaklı iş kazalarından biri olan ark patlaması sonucu oluşan maruziyet özenerjisi ve ark etki mesafesinin belirlenmesi ile insan vücuduna maruziyetleri konusu incelenmiştir. Elektrik tehlikeleri iş güvenliğinin önemli bir parçasıdır. Endüstriyel tesislerde iş güvenliği uzmanları tarafından oluşturulan kontrol listelerinde sadece elektrik çarpması tehlikesine odaklanılmaktadır. Oysa kısa devre arkının neden olduğu maruziyet özenerjisinden kaynaklanan yanma yaralanması riskilerine karşı önlemlerin kontrolü de önemlidir. Bu çalışmada, ark patlaması risk analizi ve kontrol listelerine ark patlaması tehlikelerine karşı alınan önlemler eklenmiştir. İş güvenliği profesyonelleri, buldukları uygunsuzlukları önem sırasına göre önceliklendirmeli düzeltici faaliyetlerin planlanması bu ağırlıklara göre oluşturulmalıdır. Önceliklendirmede 23 uzman muayene mühendisinin görüşleri alınarak Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Bulanık AHP yöntemleri ile genişletilmiş elektrik tesisatı muayenesindeki adımların ağırlıkları önceliklendirilmiştir. Böylece sahadaki elektrik tesisatının denetimi için nicel bir yöntem oluşturulmuştur. Elektrik tesisatı denetimi için kontrol listesindeki uygunsuzluklar major (büyük) ve minor (küçük) olarak sınıflandırılmış, ağırlıklarının toplamına göre nicel bir değerlendirme puanı oluşturulmuştur. Böylece genelleştirilmiş, karşılaştırılabilir bir elektrik tesisatı muayene kontrol listesi oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Analitik hiyerarşi süreci, ark patlaması, elektrik çarpması, elektrik tesisatı denetimi, önceliklendirme.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

MODELING OF METHODS FOR REDUCING LOW VOLTAGE ARC FLASH RISKS IN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY

Serdar PAKER

İstanbul Commerce University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Occupational Health And Safety

Supervisor: Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ

2022, 191 pages

In this study, exposure to the human body was investigated by determining the instant energy and arc effect distance resulting from arc flash, which is one of the important electrical work accidents. Electrical hazards are an important part of occupational safety. The checklists created by occupational safety experts in industrial facilities focus only on the hazard of electric shock. However, it is also important to control the precautions against the risk of burn injury caused by the instand energy caused by the short-circuit arc. In this study, precautions against arc explosion hazards have been added to arc explosion risk analysis and checklists. Occupational safety professionals should prioritize the nonconformities they find in order of importance, and corrective actions should be planned according to these weights. In prioritization, the weights of the steps in the extended electrical installation inspection were prioritized with the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy AHP methods by taking the opinions of 23 expert inspection engineers. Thus, a quantitative method has been established for the inspection of the electrical installation in the field. For the electrical installation inspection, the nonconformities in the checklist were classified as major and minor, and a quantitative evaluation score was created according to the sum of their weights. Thus, a generalized, comparable electrical installation inspection checklist was created.

Keywords: Analytical hierarchy process, arc flash, electrical installation inspection, electric shock, prioritization.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye teşekkür ederim. Literatür araştırmalarımda ve yöntem seçimlerinde yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Berk AYVAZ'a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan eşim Nefise PAKER'e sonsuz sevgilerimi sunarım.

Serdar PAKER
İSTANBUL, 2022

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 3.1. Otto von Guericke'nin statik elektrik makinası 7
Şekil 3.2. Havada ve cam kapta erken dönem karbon ark lambaları Davy ve Rive tarafından kullanılmıştır. 9
Şekil 4.1. İş kazalarının temel etkenleri 13
Şekil 4.2. Yangın üçgeni 14
Şekil 4.3. Ark hataları ve koruma şekilleri 15
Şekil 4.4. Kablolama tesisat ve ekipmanlarındaki gevşekliklerin tespiti 16
Şekil 4.5. Açık hava arkı 17
Şekil 4.6. Pano içinde ark 17
Şekil 4.7. Çıkan ark 18
Şekil 4.8. İzleyen ark 18
Şekil 4.9. Yürüyen ark 18
Şekil 5.1. Avrupa Birliği ülkeleri 100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası oranı istatistikleri 22
Şekil 5.2. Avrupa Birliği ülkeleri ölümlü ve ölümlü olmayan iş kazası sebeplerine göre tasnif. 23
Şekil 6.1. Alternatif akım (15 Hz ila 100 Hz) sol elden ayağa maruziyet yolu için akım-zaman grafiği 25
Şekil 6.2. Elektrik çarpması üçgeni. 26
Şekil 6.3. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatası 28
Şekil 6.4. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatası 30
Şekil 6.5. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatası 31
Şekil 6.6. TT şebekede bir fazlı toprak hatası 32
Şekil 6.7. IT şebekede bir fazlı toprak teması tek hata 33
Şekil 6.8. IT şebekede bir fazlı toprak hatası çift hata 33
Şekil 6.9. Çok düşük gerilim (ELV, extra low voltage) devreleri 34
Şekil 7.1. Tek fazlı alternatif gerilim 36
Şekil 7.2. Üç fazlı gerilim sinüzoidal ve fazör gösterim. 38
Şekil 7.3. Üç fazlı dengeli sistemin tek kutuplu modelinde hata akımı 39
Şekil 7.4. Üç fazlı simetrik alternatif akım RTS ve RST sıralama 40
Şekil 7.5. Üç fazlı dengeli (simetrik) fazör setinde simetrik bileşenler 41
Şekil 7.6. Dengesiz (asimetrik) RTS sıralı fazör seti örneği; fazörlerin hem büyüklükleri hem de açıları birbirinden farklıdır. 42
Şekil 7.7. Asimetrik fazör setinin simetrik bileşenlere ayrılması. 42
Şekil 7.8. Simetrik CCW dönüş yönünde RTS sıralı fazör setinde referansa göre açılar 43
Şekil 7.9. Simetrik CCW dönüş yönünde RST sıralı fazör setinde referansa göre açılar. 44
Şekil 7.10. Simetrili bileşenler ve devre modeli 46
Şekil 7.11. Generatöre uzak kısa devre 47
Şekil 7.12. χ'nın R/X veya R/L'ye göre değişimi 47
Şekil 7.13. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatası 51
Şekil 7.14. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatası 52
Şekil 7.15. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatası 53
Şekil 7.16. TT şebekede bir fazlı toprak hatası 54
Şekil 8.1. Stoll kriteri eğrisi 58

Şekil 8.2. Yanık dereceleri 58
Şekil 8.3. Elektrik ark kazasının vücut bölgelerine göre dağılımı 59
Şekil 8.5. NFPA 70E'ye göre tehlikeli bölge yaklaşma sınırları 63
Şekil 8.6. Kulak yapısı ve işitme sınırları 69
Şekil 8.7. Ses dB skalaları 70
Şekil 8.8. Ses basıncı etkileri 70
Şekil 8.9. Kulak koruyucu. 71
Şekil 8.10. Işık dalga ve foton özelliği 72
Şekil 8.11. Görülebilir spektrum 73
Şekil 8.12. Gözün yapısı ve spektral duyarlık 73
Şekil 8.13. Ark parlamasının değişik uzaklıktaki ölçüm sonuçları 74
Şekil 8.14. Ark parlaması korumalı face shield KKD'ler 75
Şekil 9.1. Bara düzenleri IEEE 1584:2018 83
Şekil 10.1. Risk yönetim hiyerarşisi 95
Şekil 11.1. Uluslararası standartlarda verilen IEE (Institution of Electrical Engineers) elektrik tesisatı kontrol formu 104
Şekil 11.2. Uluslararası standarta göre tercüme edilmiş elektrik tesisatı kontrol formu 105
Şekil 11.3. Elektrik tesisat denetlemesinin hiyerarşisi 112
Şekil 11.4. Ark patlaması yaklaşma sınırları. 118
Şekil 11.5. Ms excell programı örnek ekran görüntüsü 121
Şekil 11.6. Super Decision programı örnek ekran görüntüsü 128
Şekil 11.7. Super Decision programı ikili karşılaştırma örnek ekran görüntüsü 124

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 5.1. Avrupa Birliği ülkeleri ölümlü iş kazası sayısı istatistikleri 22
Çizelge 6.1. Değişik maruziyet yolları için kalp-akım faktörü F 26
Çizelge 8.1. İnsan derisine ait termal özellikler 60
Çizelge 8.2. Ark etkilerine dayanıklı kıyafet kategorileri 62
Çizelge 8.3. Yüksek basıncın binada meydana getirebileceği hasarlar 66
Çizelge 8.4. Patlamaların yaralanma/hasar olasılığı için probit parametreleri 67
Çizelge 8.5. Probit değişkenden % olasılığa geçiş tablosu 67
Çizelge 10.1. Risk analizi: Şiddet bileşenleri 100
Çizelge 10.2. Risk analizi: Olasılık bileşenleri 100
Çizelge 10.3. Risk analizi: Şiddet × Olasılık 101
Çizelge 11.1. Rassal endeks tablosu 110
Çizelge 11.2. Elektrik tesisatı denetleme listesi hiyerarşisi 113
Çizelge 11.3. Hiyerarşi katmanındaki uzman değerlendirme örnek tablosu 119
Çizelge 11.4. Örnek ikili karşılaştırma matrisi 120
Çizelge 11.5. 23 uzmanın oluşturduğu ETD değerlendirmelerinin geometrik ortalaması AHP yöntemi ile işlenmesi 123
Çizelge 11.6. 23 uzmanın oluşturduğu ETD değerlendirmelerinin geometrik ortalaması TFAHP yöntemi ile işlenmesi 127
Çizelge 11.7. 23 uzmanın oluşturduğu ETD değerlendirmelerinin geometrik ortalaması SFAHP yöntemi ile işlenmesi 131
Çizelge 11.8. Analitik Hiyerarşi Süreci-AHP, yöntemiyle bulunan sonuçlar. 132
Çizelge 11.9. Üçgensel Bulanık Analik Hiyerarşi Süreci-TFAHP, yöntemiyle bulunan sonuçlar 133
Çizelge 11.10. Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci, yöntemiyle bulunan sonuçlar 134
Çizelge 11.11. Analitik Hiyerarşi Süreci-AHP, Üçgensel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci-TFAHP ve Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci-SFAHP yöntemleriyle bulunan sonuçların ortalaması 137
Çizelge 11.12. Elektrik tesisat denetlemesi adımlarının 23 uzman değerlendirmesinin işlenmesiyle bulunan ağırlıklarının önceliklendirilmesi 138
Çizelge 11.13. Ark patlaması etkileriyle genişletilmiş elektrik tesisatı denetlemesi risk kontrolu 141

SİMGELER VE KISALTMALAR

AC Alternatif Akım (AA)
AHP Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)
AFB Ark Etki Sınırı (AES) (mm)
AFCI Arc Fault Circuit Interrupter-Ark Hatası Devre Kesici (AHDK)
AFDD Arc Fault Detection Device-Ark Hatası Algılama Cihazı (AHAD)
AG Alçak Gerilim
CB Circuit Breaker-Devre Kesici (DK)
CI Tutarlılık Endeksi (TE)
CR Tutarlılık Oranı (TO)
DC Doğru Akım (DA)
E Maruziyet Özenerjisi (cal/cm^2)
EİTY Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği
ELV Extra Low Voltage-Çok Düşük Gerilim (ÇDG)
EN European Norm- Avrupa Normu (AN)
FAHP Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHS)
G İletkenler arasındaki uzaklık (gap distance, mm)
HVAC High Voltage Alternating Current-Yüksek Gerilimli Alternatif Akım (YGAA)
HVDC High Voltage Direct Current-Yüksek Gerilimli Doğru Akım (YGDA)
I_{ark} Ark akımı
IR Infrared Radiation-Kızılötesi Işınım
$I_k^{"}$ Üç fazlı simetrik kısa devre akımı (kA)
IEC International Electrotechnical Commission-Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEE Institution of Electrical Engineers-İngiltere Elektrik Mühendisleri Enstitüsü
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers- Amerika Birleşik Devletleri Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ISO International Organization for Standardization-Uluslararası Standart Organizasyonu
İSG İş Sağlığı ve Güvenliği
kA kiloamper
mA miliamper
MCB Miniature Circuit Breaker-Minyatür Devre Kesici (MDK)
NEC National Electric Code- Amerika Birleşik Devletleri Elektrik Kodları
NFPA National Fire Protection Association-Amerika Birleşik Devletlerinin Ulusal Yangından Korunma Kurumu
PE Protection Earth-Koruma Topraklaması-(KT)
PEN Protection Earth + Nötr-Koruma Topraklaması ve Nötr (KTN)
PPE Personel Protective Equipment-Kişisel Koruyucu Donanım (KKD)
RCD Residual Current Device-Kaçak Akım Rölesi (KAR)
RI Rassal İndeks (Rİ)
UV Ultra Violet Radiation-Morötesi Işınım
YG Yüksek Gerilim

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı iş sağlığı ve güvenliği bağlamında elektrik sebepli iş kazaları içinde önemli bir yer tutan ark patlamasına bağlı yaralanma veya ölümlerin önlemesidir. Bu çalışmanın yapılmasındaki temel motivasyon ise ark patlaması şeklinde oluşan iş kazalarına maruz kalan çalışanların ve ekipmanların göreceği hasarın azaltılmasına yönelik olarak uygulacak yöntemlerin belirlenmesi, modellenmesi ve sahada rutin hale getirilerek yaygınlaştırılmasıyla, iş kazalarının azaltılması çalışmalarına katkı sağlamaktır.

Çalışmanın ilk beş bölümünü giriş, literatür özeti, elektriğin tarihsel gelişimi, elektrik kaynaklı iş kazalarının temel etkenleri ve elektrik kazaları istatistikleri oluşturmaktadır.

Altıncı bölümde; elektrik çarpmasının insan vücuduna etkileri incelenmiş, dolaylı dokunmaya karşı koruma yöntemleri incelenmiştir.

Yedinci bölümde; alçak gerilim güç sistemlerinde hata (kısa devre) analizindeki üç fazlı simetrik kısa devrenin yanısıra asimetrik kısa devreler de incelenmiştir. Ark patlaması çalışmalarının en büyük dayanağı kısa devre analizidir. Bu analiz en büyük kısa devre akımı hesabına dayanır. Kısa devre analizinde devrede yer alan tüm donanımların analizi de yapılmaktadır. Bunun için genellikle ETAP gibi bir yazılım kullanılmaktadır. Çünkü her bir donanımın kendine özel kısa devre anındaki davranışlarına özel eğrileri bulunmaktadır.

Sekizinci bölümde; elektrik ark patlamasının insan vücuduna ısıl, basınç, ses ve ışık maruziyetleri değerlendirimiştir. Elektrik arkı sebebiyle yanmadan koruma için arkın etki mesafesinin belirlenmesi ve bu mesafe içinde ark maruziyet özenerjisine dayanıklı iş kıyafetlerinin belirlenmesi süreci olan ark patlaması çalışması gereklidir.

Dokuzuncu bölümde; ark patlaması analizi ark etki mesafesi ve ark ısı yoğunluğu hesapları çeşitli yöntemlerle değerlendirilmiştir. Ark patlaması

(flash) analizi elektrikli panolarında yapılacak canlı çalışmalarda yaralanma ve ölümleri en aza indirmek için yapılan çalışmanın genel adıdır. Bu çalışmada ark hatası sınırı, hata anında çıkacak ortaya çıkan enerji miktarı, çalışma sınırı ve kullanılacak olan kişisel koruyucu donanım ve sınıfı hesaplanmaktadır.

Onuncu bölümde; ark patlama riskinin değerlendirmesi ve risk kontrolü iş sağlığı ve güvenliği metodolojisi içinde şiddet ve olasılık katmanları incelenmiştir.

Onbirinci bölümde; ark patlaması ve elektrik çarpmasına karşı alınan önlemlerin kontrolu ve önem sırası çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

Onikinci bölümde; ark maruziyet enerjisini azaltma yöntemleri ile hasarın büyümeden kontrolu ve hatanın kısa sürede temizlenmesi yöntemleri incelenmiştir. Ark patlaması çalışmaları, oluşabilecek ark enerjisinin düşürülmesi önlemlerini ve böylece daha ekonomik sistem tasarımını da kapsar.

Onüçüncü bölümde oluşturulan modellerin değerlendirme sonuçları belirtilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

İş sağlığı ve güvenliği bakımından elektrik sebepli iş kazaları içinde önemli bir yer tutan ark patlamalarına bağlı yaralanma ve ölümlerin önlemesi bağlamında temel motivasyon, ark patlaması şeklinde oluşan iş kazalarının oluşmasındaki temel etkenlerin belirlenmesi, koruma önlemlerinin belirlenmesi, kontrol listelerinde bu önlemlerin alınmış olduğunun kontrol edilmesi ve böylece ark etkisine maruz kalabilecek çalışanların yaralanmasının önlenmesine yönelik modellerin oluşturulmasıdır. Bu konuda yapılan çalışmaların bazıları aşağıdaki şekildedir.

Zhenyuan zhang tarafından Teksas Üniversitesi'nde hazırlanan doktora tezinde ark patlaması tehlike analizi incelenmiştir (Zhang, 2015). Ravel F. Ammerman tarafından Colorado School of Mines Üniversitesi'nde hazırlanan doktora tezinde alçak ve orta gerilim güç sistemlerindeki yüksek enerji arklı arızaların neden olduğu kaza termal enerji maruz kalmalarını tahmin etmek için geliştirilmiş modeller incelenmiştir (Ammerman, 2008). Tammy Lea Gammon tarafından Georgia Institute of Technology Üniversitesi'nde 1999'da hazırlanan doktora tezinde alçak gerilim güç sistemleri için geliştirilmiş ark-arıza akımı modelleri incelenmiştir. Aytuğ Font tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi'nde hazırlanan yüksek lisans tezinde alçak gerilim ark modelleri ve arkın ısıl analizi incelenmiştir (Font, 2012). Senih Erken tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi'nde hazırlanan yüksek lisans tezinde yüksek gerilim güç sistemlerinde ark patlamalarının modellenmesi ve analizi incelenmiştir (Erken, 2017).

Shiuan-hau Rau tarafından Teksas Arlington Üniversitesi'nde hazırlanan doktora tezinde AC ark parlaması ışık yoğunluğu tahmini ve MHD tabanlı DC ark modeli incelenmiştir (Rau, 2016). LC Kuan, Kutlwano Kabelo tarafından International Journal of Scientific and Research Publications dergisinde yayınlanan makalede alçak gerilim panosunda ark hatası basınç dedektörü incelenmiştir (Kabelo, 2013). Zhenyuan Zhang, Shiuan-Hau Rau, Wei-Jen Lee, Tammy Gammon, Ben C. Johnson tarafından IEEE Transactions on Industry

Applications dergisinde yayınlanan makalede ark patlama basıncı ölçüm sistemi tasarımı incelenmiştir (Zhang vd. 2016). Vytenis Babrauskas tarafından Fire Safety dergisinde yayınlanan makalesinde elektrik ark patlamaları incelenmiştir (Babrauskas, 2017). Ralph H. Lee tarafından IEEE Transactions on Industry Applications dergisinde yayınlanan makalesinde ark tarafından geliştirilen basınç incelenmiştir.

E. J. B. Garnham tarafından IEEE Xplore'da yayınlanan makalesinde elektrik tesisatlarının muayenesi ve testleri incelenmiştir (Garnham, 1998). Lovegrove, H. R. tarafından IEE Conference Publication'da yayınlanan makalesinde muayene, test ve doğrulama konuları incelenmiştir. J. S. Dudor tarafından IEEE dergisinde yayınlanan makalesinde fabrika ve sahadaki elektrikli ekipmanların denetiminde önerilen kontrol listeleri uygulanmıştır (Dudor, 2000). D. Ray Crow tarafından IEEE Xplore'da yayınlanan makalesinde kontrol listelerinin hayat kurtarmadaki önemi incelenmiştir (Crow, 2020). Rangel Estellito Queiroz, Alan Romulo Silva De Oliveira, Mauricio Figueiredo tarafından IEEE Transactions on Industry Applications dergisinde yayınlanan makalede tehlikeli yerlerdeki elektrik tesisat denetlemelerinin önemi incelenmiştir (Queiroz vd., 2016). Paul Bicheno tarafından IET Wiring Matters dergisinde yayınlanan makalesinde periyodik muayene ve elektrik tesisatı durum raporunun hazırlanması incelenmiştir (Bicheno, 2008).

Musa Uçan tarafından Kocaeli Üniversitesi'nde hazırlanan yüksek lisans tezinde enterkonnekte sisteme bağlı generatör ya da yüksek gerilim transformatörlerinin yıldız noktasının topraklaması incelenmiştir (Uçan, 2011). Rieffel Vivanco tarafından IEEE Cement Industry Conference'ında yapılan sunumda IEC kısa devre hesapları incelenmiştir (Vivanco vd., 1998b). Zsolt Conka, Karel Máslo, Branislav Bátora tarafından 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering konferansında sunulan bildiride kısa devre akımı hesapları incelenmiştir (Čonka vd., 2018). Van Waes, J. B.M. Provoost, F. Van Der Merwe, J., Cobben, J. F.G.,Van Deursen, A. P.J., Van Riet, M. J.M. Van Der Laan, P. C.T. tarafından IEEE Power Engineering Society konferansında yayınlanan bildiride orta gerilimde oluşan bir fazlı kısa devre

akımı sırasında alçak gerilim dağıtım sistemindeki akım incelenmiştir (Waes vd., 2000).

Youssef Mobarak, Abdullah Alshehri tarafından Engineering, Technology & Applied Science Research dergisinde yayınlanan makalede güvenli çalışma uygulamalarına yönelik olarak alçak gerilim sistemlerinde kişisel elektrik güvenliğinin iyileştirilmesi incelenmiştir (Mobarak vd., 2016). Seyithan Cıcık tarafından Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı'nda, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi olarak yayınlanan asansör montaj işlerinde İş sağlığı ve güvenliği risk faktörleri incelenmiştir (Cicik, 2016). Yunus Kısa tarafından Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı'nda, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi olarak yayınlanan döküm atölyelerindeki iş sağlığı ve güvenliği koşullarının çok ölçütlü karar verme yöntemleriyle değerlendirilmesi incelenmiştir (Kisa, 2014). Ahmetcan Alkoç, Fatih Yılmaz tarafından Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi'nde yayınlanan makalede İmalat tesislerinde yangın tesisatlarından kaynaklanan risklerin sıralama yöntemi ile analizi incelenmiştir (Alkoç vd., 2018). Nahit Yılmaz, Mehmet Burak Şenol tarafından Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi'nde yayınlanan makalede iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme süreci için bulanık çok kriterli bir model ve uygulaması incelenmiştir (Yılmaz vd., 2017).

Yusuf Ersoy tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi'nde hazırlanan doktora tezinde bulanık AHP/bulanık VZA yöntemleri kullanılarak tekstil sektöründe tedarikçi performansının ölçülmesi incelenmiştir (Ersoy, 2018). Evren Dursun tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi'nde hazırlanan yüksek lisans tezinde Bulanık AHP yöntemi ile tekstil sektöründe tedarikçi seçimi incelenmiştir (Evren, 2009). Ziya Gökalp Göktolga ve Burcu Gökalp tarafından Cumhuriyet Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi'de yayınlanan makalede iş seçimini etkileyen kriterlerin ve alternatiflerin AHP yöntemi ile belirlenmesi incelenmiştir (Göktolga, 2012). İbrahim Zeki Akyurt ve Nihan Kabadayı tarafından Yaşar Üniversitesi'nde yayınlanan makalede Bulanık AHP ve Bulanık gri ilişkisel analiz yöntemleri ile kargo uçak tipi seçimi incelenmiştir (Akyurt vd., 2020). Udaya Dayanandan ve Vivekanandan Kalimuthu tarafından

uluslararası Intelligent Engineering and System dergisinde yayınlanan makalede bulanık analitik hiyerarşi süreci (FAHP) tabanlı yazılım kalitesi değerlendirme modeli incelenmiştir (Dayanandan vd., 2018). M.T. Mastura, S.M. Sapuan and M.R. Mansor tarafından Mechanical Engineering and Sciences dergisinde yayınlanan makalede FAHP'nin AHP ile birleştirilmesi ile ürün tasarımında müşteri gereksinimlerinin önceliklendirmesi incelenmiştir (Mastura vd., 2015). Pınar Mızrak Özfırat tarafından Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisinde yayınlanan makalede bulanık önceliklendirme yöntemi ve hata türü ve etkileri analizini birleştiren yeni bir risk analizi yöntemi incelenmiştir (Mızrak vd., 2014).

Mahmoodreza Arefi tarafından, Massachusetts Northeastern Üniversitesi'nde hazırlanan yüksek lisans tezinde alçak gerilim sistemlerinde ark patlamasını azaltmak için optimizasyon yöntemlerinin uygulanması incelenmiştir (Arefi, 2014). Christopher Inshaw, Robert A. Wilson tarafından Western Protective Relay konferansında sunulan bildiride ark patlaması tehlike analizi ve enerji azaltma yöntemleri incelenmiştir (Inshaw vd., 2012). Imran bin Hussin, Au Mau Teng tarafından Malezya The 3rd National Graduate konferansında yayınlanan bildiride dağıtım şebekesinde ark patlaması algılama sisteminin değerlendirilmesi incelenmiştir (Hussin, 2015). Rahul Rajvanshi, Tom Hawkins tarafından IEEE Transactions on Industry Applications dergisinde yayınlanan makalede alçak gerilim sistemlerinde yalıtılmış baraların ark hatası süresinin azaltılmasına etkisi incelenmiştir (Rajvanshi vd., 2016). Michael D. Divinnie tarafından IEEE Transactions on Industry Applications dergisinde yayınlanan makalesinde aktif yüksek hızlı anahtar kullanılarak ark patlaması enerjisinin azaltılması incelenmiştir (Divinnie, 2015). Jay Prigmore tarafından IEEE Transactions on Power Delivery dergisinde yayınlanan makalesinde tetiklemeli akım sınırlayıcılarının ark patlaması etkisini azaltma ve hasar sınırlandırma yetenekleri incelenmiştir (Prigmore, 2017).

3. ELEKTRİĞİN TARİHSEL GELİŞİMİ

İnsanlığın elektrikle ile ilgili ilk deneyimleri, doğal mıknatıs parçalarının birbirlerini itme ve çekme kuvvetleri ile bir tür taşlaşmış doğal reçine olan kehribarın kedi kürküne sürtülmesiyle oluşan statik elektrik kuvvetidir (Mikerov, 2012). Ancak insanlığın; mıknatısın manyetik çekme kuvvetinin, statik elektriğin çekme kuvvetinden farklı kuvvet olduğunun ayrıdına varması çok uzun sürmüştür. İngiliz bilim adamı William Gilbert 1600'de yazdığı De Magnete adlı kitabında ilk defa elektrik sözcüğünü kullanmış ve mıknatıs kuvvetinin sürtünmeyle oluşan statik elektrikten farklı bir kuvvet olduğunu yazmıştır (Historians vd., 1956). Elektrik ile ilgili gelişmelerin hızlanması 17. Yüzyılın sonlarını bulmuştur. Elektrik kıvılcımları (sparkları) üreten ilk statik elektrik makinesini, ilk vakum makinasını da geliştiren Alman bilim adamı Otto von Guericke 1672'de geliştirdi.



Şekil 3.1. Otto von Guericke'nin statik elektrik makinası (Mikerov, 2012)

Kükürtten yapılmış bir kollu küreyi hayvan kürküne sürterek çevirdiğinde statik elektrik kıvılcımları oluşuyordu (Mikerov, 2012). Statik elektrik kıvılcımlarıyla yıldırım arasında bir benzerlik olduğunu ilk düşünen 1708'de İngiliz bilim adamı William Wall olmuştur (Waterway, 2005).

İngiliz astronom Stephen Gray elektrik yükünün iletilebilir olduğunu göstermek için 1729'da ipek, reçine (kehribar), cam gibi yük biriktirebilen yalıtkan nesneleri 255 m boyunca dizerek ilk uzun mesafe elektrik yükü iletimini gerçekleştirdi (Society, 1997).

Elektrik yükü biriktirebilen ilk mekanizma olan kondansatör ise Leyden şişesi adıyla Hollandalı bilim adamı Pieter van Musschenbroek ile Alman din ve bilim adamı Ewald Jürgen Georg von Kleist tarafından Hollanda'daki Leyden Üniversitesi'nde 1745'te geliştirildi (Ho vd., 2010). Cam elektriği ve reçine elektriği tanımları yerine – yük, + yük tanımlarını ortaya koyan Amerikalı siyasetçi ve bilim adamı Benjamin Franklin, yıldırımın statik elektrik yükü deşarjı olduğunu ve Leyden şişesinde biriktirilebileceğini ispat etmek için ünlü uçurtma deneyini 1750'de planladı. Franklin'nin de kendisiyle aynı deneyi planladığından habersiz olan Fransız bilim adamı Thomas François D'alibard 1752'de deneyi gerçekleştirdi (Rakov, 2012).

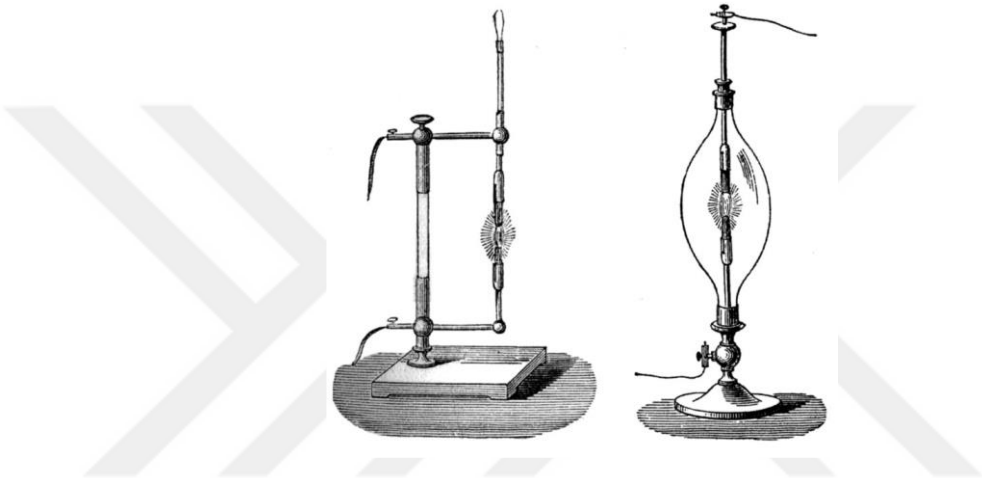
Newton'un kütle çekim yasasının elektrik yüklerine uyarlanmış versiyonunun ilk olarak 1770'lerin başında Henry Cavendish tarafından ortaya konduğu; yüzyıl kadar sonra Cavendish'in not defterinin Maxwell tarafından yayınlanmasıyla ortaya çıkmıştır. Ancak Charles Augustin de Coulomb kendi adıyla anılan kanunu 1785'de bundan habersiz olarak yayınlamıştı (Sarkar vd., 2009).

Elektrik yükünü biriktirebilen ilk mekanizma olan Leyden şişesinden sonra önemli bir kilometretaşı olan kimyasal enerjiden sürekli elektrik enerjisi üretebilen ilk düzen olan pilin Alessandro Volta tarafından 1800'de bulunması, Luigi Galvani ile girdiği ve tüm bilim dünyasını etkileyen galvanizm (hayvan elektriği) tartışmalarının sonuna denk gelmektedir. Örneğin dönemin ünlü bilim adamlarından Humbold Galvani'ci, Coulomb ise Volta'cıydı. Galvanizm, İngiliz romancı Mary Shelley'in 1818'de yayınladığı Frankenstein romanına da ilham kaynağı olmuştu (Sha, 2012).

Ark plazmasıyla ilgili ilk deneyler pilin (akümlatör) bulunmasıyla başladı, karbon ark plazmasından ilk lamba Rus bilim adamı Vasiliy Petrov tarafından 1802'de yapılmıştı. Elektrokimya alanında birçok başarılı deneyler yapan Humphry Davy kömür uçlu ark lambasındaki sürekli elektrik arkı deşarjını 1807'de Petrov'dan habersiz olarak gösterdi (Anders, 2003). Yaklaşık 1836'dan

sonra, bu lambalar Rive'nin elektrikli yumurtaları olarak da biliniyordu (Anders, 2003).

İletken içinden geçen akımın, iletken etrafında manyetik alan oluşturduğunu Danimarkalı bilim adamı Hans Christian Oersted 1819'da tespit etti. Aynı yıl Fransız bilim adamı André Marie Ampére, Örsted'in tespitini geliştirerek manyetik alan ile bu alanı oluşturan akım arasındaki denklemi ile amper-sarım ilkesini ortaya koyarak elektrodinamiğin temelini atmıştı (Dibner, 1800).



Şekil 3.2. Havada ve cam kapta erken dönem karbon ark lambaları Davy ve Rive tarafından kullanılmıştır (Anders, 2003).

Elektriğin gelişiminde üçüncü önemli kilometretaşı 1831'de İngiliz bilim adamı Michael Faraday'ın genel indüksiyon formülünü ortaya koymasıydı (Gamo 1966). Bu yüzden Faraday'ın elektrodinamiğin gelişimindeki önemi çok büyüktür. 1845'te Alman fizikçi Gustav Robert Kirchhoff devre analizi kanunlarını, 1864'te İskoçyalı matematikçi ve fizikçi James Clerk Maxwell ise elektomanyetik alanların matematiksel modeli olan Maxwell denklemlerini yayınladı (Selvan, 2007).

Alman mühendis Werner Ernst von Siemens 1867'de Almanya'da, Belçikalı mühendis Zénobe Théophile Gramme ise 1869'da Fransa'da geliştirdikleri ilk dinamoları (DC generatörleri) üretmeye başladı.

İlk uzun mesafeli 2 kV DC iletim hattı Bavyera Alplerindeki Miesbach ile Münih arasındaki 57 km'lik hat olup %50 verimle çalıştırılabilmişti (Guarnieri, 2013a). İlk elektrik şebekesi Edison'un İngiltere'deki şirketi tarafından Londra'da Holbron Viyadüğü'nde 2000 lambayla 1882 yılı başında devreye alınmıştı. Aynı yılın sonunda Edison'un Amerika'daki şirketi ilk şebekeyi Newyork'taki Pearl Caddesi'nde 900 hp gücünde 6 adet Jumbo dinamo ile 110V DC olarak kurdu. Edison'un İtalya'daki, Almanya'daki hatta Japonya'daki iştirakleri Pearl Caddesi deneyimini ithal etmişti.

Akkor telli lambaların ilk tasarımları 1870'li yılların sonunda olmuştur. Petrov'un ark lambasından sonra İngiliz kimyager Joseph Swan düşük dirençli karbon flamanlı vakum lambayı 1879'da geliştirdi. Aynı yıl Amerikalı bilim adamı Thomas Alva Edison, uzun süre (13,5 saat) yanabilen yüksek dirençli karbon flamanlı akkor vakum lamba'yı geliştirerek ticari olarak kullanışlı hale getirdi (Furfari, 2001). Yıllar içinde karbon flaman yerine tungsten kullanılarak, tüp içinde vakum yerine asal gaz kullanılarak lamba verimliliği ve lamba ömürü arttırılmıştır (Furfari, 2006).

Fransız mühendis Lucien Gaulard ve İngiliz mühendis John Dixon Gibbs 1882'de açık manyetik devreli ilk güç transformatörünü geliştirdi (Guarnieri, 2013a). Generatör çıkışındaki gerilimi ihtiyaca uygun farklı gerilimlere dönüştüren ikincil bir kaynak olarak gördüklerinden bu transformatöre "sekonder generatör" adını verdiler.

Ark lambalarından oluşan şebekelerin beslemesinde kullanılan ilk alternatif akımlı enerji nakil hattı İtalya'nın Turin kentindeki fuar alanı ile 34 km uzaklıktaki Lenzo tren istasyonu arasında 1884'te kurulmuştu (Guarnieri, 2013a). Şebeke; buhar makinası tahrikli 2 kV-130 Hz Siemens Halske AC generatörün beslediği birkaç 1/1 transformatörden oluşuyordu. Şebeke; primer tarafları birbirlerine seri bağlı transformatörleri besleyen generatör ve bu transformatörlerin beslediği ark lambası devrelerinden oluşuyordu.

İtalyan mühendis Galileo Ferraris akımla gerilim arasındaki faz farkı üzerine yaptığı sistematik çalışmalar sonucu iki fazlı döner alanı geliştirdi. 1885 yılında Macar mühendisler Károly Zipernowsky ve Miska Déri generatörü, Ottó Titusz Bláthy de transformatörü mükemmelleştirerek AC şebekesinde ZBD şemasını kurdular. 1885'de İtalya Roma'da 30 hp Siemens Halske generatörle beslenen, 2 kV 120 Hz lamba şebekesi kuruldu. 1889'da İngiltere'de De Ferranti'nin şirketi önceki 2,4 kV dağıtımların yerine 1 MW generatörle 10 kV ve 85 Hz ile 45 km hatla Londra'daki lambaları besledi (Guarnieri, 2013b). Generatörde iki fazlı sistemden daha verimli olan üç fazlı sistemi ilk düşünen 1882'de İngiliz mühendis John Hopkinson olmuştu. İlk üç fazlı senkron generatörü 1882'de Alman mühendis Friedrich August Haselwander yaptı.

İletim sisteminde yüksek gerilim kullanılması akımı ve dolayısıyla kablo kesitini düşürdüğünden ekonomik enerji nakli gerçekleşmektedir. Yüksek gerilimi; alternatif akımda transformatör kullanarak alçak gerilimden dönüştürmek kolay olsa da yüksek doğru gerilim de hala enerji naklinde önemli bir seçenektir. İsviçreli mühendis René Thury'nin şirketi 1889'da İtalya Genoa'da 120 km 14 kV hatla 630 kW, Fransa Lyon-Moûtiers arasında 230 km 125 kV hatla 20 MW'ı DC olarak taşımıştı (Guarnieri, 2013b).

Avrupa'daki yüksek gerilimli DC ve AC dağıtımındaki bilimsel ve teknolojik gelişmeler olurken ABD'deki enerji dağıtımında Edison'un teliflerini elinde tuttuğu alçak gerilimli DC'yi kullanılıyor ve Edison bu konuda muhafazakar davranıyordu. Uzak mesafelere ekonomik enerji nakli için gerekli olan küçük akımı ya transformatörle gerilimini yükselterek alternatif akımla ya da Avrupa'da uygulanan yüksek doğru gerilimde HVDC dağıtım teknolojisiyle elde etmek gerekiyordu. Demiryolu sanayicisi George Westinghouse'un 1885'de Avrupa'daki alternatif akımlı ZBD şeması teliflerini alarak elektrik dağıtım alanına Siemens Halske AC generatör ve transformatör sistemiyle ABD pazarına girerek Edison'un DC tekeline son verdi. Böylece Edison'la Westinghouse arasında DC'mi AC'mi şeklinde lanse edilen "akım savaşları" elektrik dağıtımda ticari rekabet bazlı olarak başlamış oldu. Westinghouse 1888'de Amerika'daki ilk uzun mesafe hattını 22 km'lik Willamette şelalesi ile Portland arasında

4kv/0,1 kV 125 Hz olarak kurdu. 1890'da Edison'nun 1500 adet DC elektrik santralına karşılık, Westinghouse'un elinde eski bir Edison mühendisi olan Sırp bilim adamı Nikola Tesla'dan alınan teliflerle de geliştirilen 300 adet AC elektrik santralı vardı. Alçak gerilimde DC her ne kadar elektrik çarpması bakımından alternatif akıma göre daha güvenli olsa da bir DC santralı, kurulduğu yeri merkez alan sadece bir kilometre yarıçaplı alandaki tüketicilere ekonomik olarak enerji sağlayabiliyordu. Uzak mesafelere enerjiyi daha küçük kesitli kablolarla ve daha düşük kayıplarla yani daha ekonomik olarak iletmek için yüksek gerilim teknolojisi şarttır (Vujic vd., 2001).

Edison, DC yüksek gerilim teknolojisine yatırım yapmak yerine propogandasını AC'nin daha tehlikeli olduğu üzerine kurmuştu ki sadece bu konuda haklıydı, günümüzde tehlikeli gerilim sınırı DC'de 120 V iken AC'de 50 V olarak kabul edilmektedir (Cowdrey, 2006). Bu propogandanın da etkisiyle 1890'da Newyork'daki Auburn hapisanesindeki idam yöntemi mevcut durumda kullanılan "dar ağacında asma"dan daha teknolojik ve modern görülen "elektrikli sandalye"ye dönüştürülmüş ve ilk olarak eşini öldüren William Kemmlar'ın idamında kullanılmıştı. Kemmlar'a 17 saniye boyunca uygulanan 1,7 kV AC gerilim ölümüne yetmemiş, gerilim 2 kV'a çıkarılmış, olay işkenceye dönüşmüştü (Reynolds vd., 1989). Buna rağmen çeşitli değişikliklerle ABD'de uzun süre tek idam yöntemi olarak kullanıldı.

Elektrik dağıtımında yüksek gerilimin üstünlüğü Westinghouse'un 1895'de yaptığı Tesla tasarımı 3,5 MW 2,2 kV 25 Hz Niagara şelalesi hidroelektrik santralı ve YG AC (yüksek gerilimli alternatif akım) enerji nakil hatlarıyla ile tescillenmiş oldu. Daha sonra yapılan geliştirmelerle santral ve nakil hatları ile 1902'de ABD'de tüketilen elektriğin %20'sini sağlamaya başladı. YG AC tüm dağıtım sistemlerinde kullanılmaya başlasa da 1940'larda geliştirilen cıvalı ark doğrultucuları ile YG DC (yüksek gerilimli doğru akım) tekrar gelişmeye başlamış günümüzde hem frekansları farklı bölgeler arasındaki bağlantılarda hem de daha da ekonomik enerji nakli için kullanılmaya başlamıştır (Guarnieri, 2013b).

4. ELEKTRİK KAYNAKLI İŞ KAZALARININ TEMEL ETKENLERİ

İş kazalarının temel etkenleri güvensiz durumlar ve güvensiz hareketlerdir. Elektrik çarpması veya yangın şeklindeki oluşan elektrik kaynaklı iş kazaları daha çok güvensiz durumlar sonucu oluşan kazalardır.



Şekil 4.1. İş kazalarının temel etkenleri

Keza elektrik tesisatı standartlara uygun olarak yapılmalı, gerekli koruma önlemleri kişinin insiyatifine bırakılmadan otomatik çalışmalıdır. Elektrik arkı sebebiyle yaralanma ve yanma şeklinde oluşan iş kazalarında da güvensiz durumların önlenmesi yani güvenli tasarımların oluşturulmasının yanısıra manevrayı ya da müdaheleyi yapan elektrikçinin güvenlik kurallarına uyması yani güvensiz hareketlerin önlenmesi de gerekebilir. Endüstriyel tesislerde yapılacak ark patlaması çalışmaları ile daha güvenli elektrik tesisleri, bu konuda daha düşük iş kazası sayıları elde edilebilir.

4.1. Elektrik Tesisatında Yüksek Sıcaklık Etkileri

Elektrik tesisatında, özellikle kontak noktalarında, yüksek sıcaklık veya elektrik arkı olması olasılığı yüksek olduğundan kolayca yanabilen malzemelerin bulundurulması tehlikelidir. Bilindiği gibi yangın oluşabilmesinin şartı, yakıt-ısı enerjisi-hava şeklinde oluşan yangın üçgeninin tamamlanmasıdır.

Yangınlar, yangına sebep olan yakıt veya yanacak maddeye göre sınıflandırılmıştır; Binaların yangından korunması hakkında yönetmeliğe bağlı olarak odun, kağıt, plastik gibi katı yanıcılar A sınıfı yangınları, benzin gibi yanıcı sıvılar B sınıfı yangınları, LPG gibi yanıcı gazlar C sınıfı yangınları ve Lityum gibi yanıcı metaller de D sınıfı yangınları oluşturur. Pişirme yağlarının sebep olduğu yangınlar EN 2 standartında F (ABD'de K sınıfı) sınıfı olarak sınıflanmıştır.

Elektrik yangınlarıyla ilgili kimi yerlerde görülen E sınıfı şeklinde yangın sınıfı mevcut değildir.

Isı enerjisi veya yangın çıkarabilecek kıvılcım (spark); yanacak maddeyi tutuşturmak için yeterli maruziyet özenerjisi (cal/cm^2) gerekir. Bu maruziyet özenerjisi kısa devre akımının büyüklüğüne bağlıdır. Oksijen veya hava; yanacak maddeyi tutuşturmak ve yanmayı sürdürme için yeterli havadır.

Örneğin Lityum iyon piller kendi kendine yangın başlatabilir. Pilin içinde yangın başlatabilecek ısı enerjisi, elektrik enerjisi olarak mevcuttur. Yanıcı madde olarak lityum parçacıklarının bulunduğu, oldukça yanıcı bir sıvı olan solvent de mevcuttur. Pil içinde iyon geçişine izin veren seperatör hasar gördüğünde oluşan iç kısadevre ile pil aşırı ısınarak genleşmeye başlar ve patlar. Üçgenin hava kenarı da tamamlandığından yangın başlar. Eğer bir grup lityum iyon pilin birlikte bu yangın içinde kalması durumunda ise söndürmesi çok güç olan oldukça yüksek bir enerji meydana gelir. Lityum iyon pillerinin veya bunları taşıyan cihazların bulunduğu, depolandığı yerlerde meydan gelen yangınlarda su kullanılması çok tehlikeli olup ateş üzerine benzin dökülmüş gibi yangının çoşmasına sebep olur. Bu tip yangınların söndürülmesinde D sınıfı yangın söndürücü tozlar, sofra tuzu veya kum etkili olabilir.



Şekil 4.2. Yangın üçgeni (Paker, 2017)

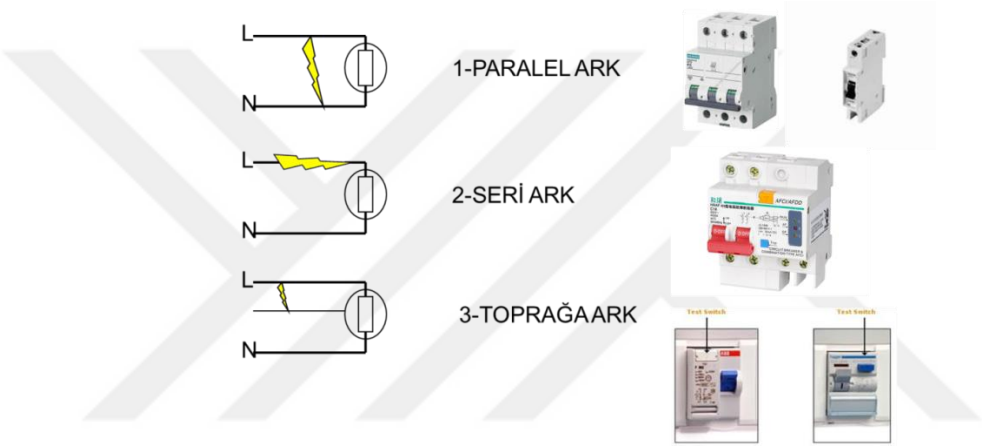
Elektrik tesisatından kaynaklanan arkın zararlı etkilerinden korunmak için

(i) Elektrik tesisatı veya panoların çevresinde bulunan malzemelerin alevlenme veya tutuşma yönünden değerlendirilmesi,

(ii) Yanma tehlikesinin değerlendirilmesi,

(iii) Alınan güvenlik önlemlerinin iptal olması veya zayıflamasının değerlendirilmesi gerekir.

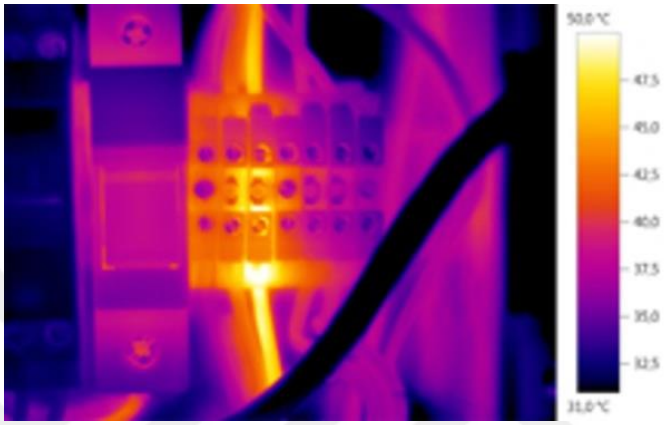
Elektrik kontağı yangınlarının çoğu gövde kısa devresine dönüşmeyen kontak gevşeklikleri gibi seri arklar ile paralel ark'lar sebebiyle oluşur. Gövde kısa devresine dönüşmeyen arklarda RCD'ler etkisizdir(Paker 2014). Termik manyetik devre kesicilerin koruma sahası dışında kalan seri veya paralel arkların sebep olabileceği yangınlardan korunmak için kestirimci bakım yöntemleri ile "AFDD" ark hatası devre kesici cihazları kullanılabilir.



Şekil 4.3. Ark hataları ve koruma şekilleri (Paker, 2017)

Tesisat üzerinde bulunan ek noktalarında, klemenslerde meydana gelen arklar genellikle yangın tehlikesine sebep olur. Modern PVC yalıtımlı kablolardan doğru seçilmiş ve düzgün yüklü olması halinde yangın tehlikesi beklenmemelidir. Keza PVC yalıtım malzemesi yanıcı olmayıp yüksek sıcaklıklarda zehirli halojen gazlar salar (Abu-gurain 2003). Bu yüzden halojensiz (halogen free) tipte yandığında zehirli gaz çıkarmayan yalıtımlı kablolar kullanılmalıdır. Standart PVC yalıtımlı kablonun servis sıcaklığı -55^{o}C (celcius derece) ile 105^{o}C arasındadır (Shea 2007). PVC malzemesi 140^{o}C'de bozulmaya 160^{o}C'de eriyip damlamaya başlar. Bu kızgın damla yanıcı malzemeleri tutuşturabilir. Kabloların aşırı akıma ve kısa devreye karşı korumasında sigorta veya aşırı akım devre kesicileri kullanılır. Ancak bu devre kesici veya minyatür devre kesiciler (CB veya MCB'ler) bağlantı noktalarındaki gevşekliklere karşı etkisizdir. Herhangi bir toprak teması olmadıkça gevşeyen

eklerin veya Şekil 3.3 gibi kontakların ısınması durumunda RCD'ler de aktive olmaz. Gevşekliklerin oluşturacağı seri arkları tespit etmek için termal kamera kullanılabilir. Ayrıca seri arklara karşı etkin bir koruma yapan AFDD (arc fault detection device) koruma cihazları kullanılmalıdır. Bu cihazlarının bazı modelleri MCB'lere ve bazı moddelleri de RCD'lere akuple olarak imal edilmektedir (Beama, 2010).



Şekil 4.4. Kablolama tesisat ve ekipmanlarındaki gevşekliklerin tespiti (Paker, 2017)

AFDD cihazları IEC 60364-4-42 :2010 ve VDE 0100-420:2016-02 ile birlikte Almanya'da 18.12.2017 tarihinden itibaren zorunlu hale gelmiştir. NFPA (NEC) standartlarını 2017'de güncelleyerek evlerde AFDD'leri (Amerikada AFCI) mutfaklar, banyolar, çamaşırhaneler, yatak odaları, yemek odaları, oturma odaları, kütüphaneler veya benzer odalara kurmayı zorunlu hale getirmiştir. Aynı standart gereği RCD'ler ise sadece mutfaklara ve çamaşırhanelere zorunludur.

Türkiye'de yürülükte olan Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yayınladığı Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği'nde yangın tehlikesi olan yerler madde 3- f7'de tanımlanmıştır. Yangın tehlikesi olan yerlerdeki elektriksel koruma kuralları 64. Maddede verilmiştir. Buna göre aşırı akım devre kesicilerin yanı sıra 500 mA'e kadar ve 1000 mA'e kadar RCD'lerin kullanılması gerekmektedir. TSE'nin yayınladığı TS HD 60364-4-42:2011 standartında da yangın tehlikesi olan yerlerle ilgili elektriksel koruma kurallarına göre 500 mA'e kadar RCD'lerin kullanılması zorunla hale getirilmiştir.

4.2. Elektrik Tesisatında Meydana Gelebilen Ark Türleri

Ark türleri aşağıdaki şekilde sınıflanabilir.

a- Açık hava arkı (Open Air Arc): Açık havada meydana gelen arktır. Enerji her yöne yayılır.



Şekil 4.5. Açık hava arkı (Keçeci vd., 2021)

b- Pano içinde ark (Arc in a Box): Pano içinde meydana gelen arktır. Panonun açık (ön) kısımdan enerji dışarı doğru yayılır.



Şekil 4.6. Pano içinde ark (Keçeci vd., 2021)

c- Çıkan ark (Ejected Arc): Tek yönlü yayılan arktır. Yatay baralarda görülür.



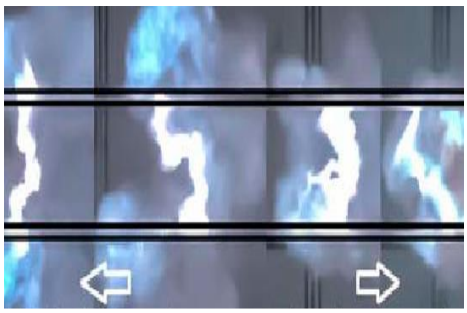
Şekil 4.7. Çıkan ark (Keçeci vd., 2021)

d- İzleyen ark (Tracking Arc): Yalıtım (izolasyon) testinde yalıtkanın delinmesiyle meydana gelen arktır (insana maruziyet durumunda derinin delinmesi).



Şekil 4.8. İzleyen ark (Keçeci vd., 2021)

e- Yürüyen ark (Running / Traveling Arc): Yüksek gerilimli enerji nakil hatlarında oluşan arktır. Hat üzerinde tek iki yönlü olarak ilerler.



Şekil 4.9. Yürüyen ark (Keçeci vd., 2021)

Elektrik tesislerinde çalışan personelin güvenliği bağlamında, elektrik çarpması tehlikesinin yanı sıra ark ısısının çalışan personeli yakma ve diğer yaralanma tehlikelerine karşı alınan önlemlerin değerlendirilmesi gerekir. Elektrik

çarpmasına karşı alınmış olan önlemlerin kontrolü IEC 60364-6 (TS HD 60364-6) ve Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği'ni 46. maddesinde verilen test ve denetlemeleri kapsamaktadır. Ark patlaması sonucu oluşan özenerji (incident energy) sonucu yaralanma tehlikesine karşı alınmış olan önlemler NFPA 70E standartına ve IEEE 1584:2018 'a göre oluşturulur, denetleme sırasında alınan önlemler kontrol edilir.

5. ELEKTRİK KAZALARI İSTATİSTİKLERİ

5.1. Elektrik Sebepli Kazalarda Türkiye'de Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) Verileri

SGK istatistiklerine göre 2020 yılında Türkiye'de çalışan sayısı 23.344.547 kişi olup 384.262 çalışan iş kazası geçirmiştir. Bu kazalarda 1231 kişi kayıp verilmiştir (100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası 5,27).

312 kazada 1 ölümlü kaza.

SGK istatistiklerine göre 2019 yılında Türkiye'de çalışan sayısı 22.000.964 kişi olup 422.463 çalışan iş kazası geçirmiştir. Bu kazalarda 1147 kişi kayıp verilmiştir (100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası 5,21).

368 kazada 1 ölümlü kaza.

SGK-Tablo 3.1.16 - 5510 Sayılı Kanunun 4-1/a ve b Maddesi Kapsamındaki Sigortalılardan İş Kazası Geçirenler ile İş Kazası Sonucu Ölenlerin Yaranın Türüne ve Cinsiyete Göre Dağılımı, 2020

110- Şok- Toplam iş görmezlik günü 774 gün-Ölen 4 kişi

090-Ses, titreşim ve basınç etkileri-

Toplam iş görmezlik günü 742 gün- Ölen 0 kişi

091-Aşırı ısı, ışık ve radyasyon etkileri-Toplam iş görmezlik günü 382 gün- Ölen 0 kişi.

SGK-Tablo 3.1.18 - 5510 Sayılı Kanunun 4-1/a ve b Maddesi Kapsamındaki Sigortalılardan İş Kazası Geçirenler ile İş Kazası Sonucu Ölenlerin Yaralanmaya Sebep Olan Olaya ve Cinsiyete Göre Dağılımı, 2020

Elektrik akımı, ısı, tehlikeli maddelerle temas- Toplam iş görmezlik günü 7478 gün- Ölen 50 kişi. Tüm ölümlü iş kazaları içinde elektrik çarpması sebepli olanların oranı %4,06 olmuştur.

5.2. Elektrik Sebepli Kazalarda Amerika Birleşik Devletleri'nde Statisca-The Statistics Portal Verileri

Statisca-The statistics portal istatistiklerine göre ABD'de 2019 yılında çalışan sayısı 130.600.000 kişi olup aynı yıl 3.656.800 kazadan 5250 ölümlü iş kazası oluşmuştur (100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası 4,01).
696 kazada 1 ölümlü kaza (www.statista.com, 2020)(www.statista.com, 2021).

Electrical Safety Foundation International istatistiklerine göre 2018'de 160 kişi elektrik çarpması veya arka maruz kalarak kayıp verilmiştir. ABD'de elektrik sebepli ölümlü iş kazalarının, tüm ölümlü iş kazaları içindeki oranı % 3,3 olmuştur.

5.3. Elektrik Sebepli Kazalarda İngilterede hse.gov.uk Verileri

İngiliz devlet istatistiklerine göre 2019/20 yılında tahmini çalışan sayısı 25.681.818 kişi olup aynı yıl 113 ölümlü iş kazası oluşmuştur (100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası 0,44) (www.hse.gov.uk, 2022).
Statisca-The statistics portal istatistiklerine göre elektriğe temas veya elektrik deşarjı sebebiyle 2019/20 yılında 1 kişi kayıp verilmiştir. İngiltere'de elektrik sebepli ölümlü iş kazalarının, tüm ölümlü iş kazaları içindeki oranı % 0,88 olmuştur.

5.4. Elektrik Sebepli Kazalarda Avrupa Birliği Ülkelerinde Eurostat Statistic Explained Verileri

28 avrupa birliği üyesi ülkesinde 2019 yılında toplam 200.470.588 çalışan olup aynı yıl toplam 3408 ölümlü iş kazası olmuştur. 100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası 1,7'dir. Yaklaşık 921 iş kazası başına bir ölümlü iş kazası olmuştur. Şok, elektrik çarpması, yanık sebepli iş kazalarında ölümlü ve ölümlü olmayan toplam oranı tüm kaza sebepleri içinde % 5 civarındadır.

Çizelge 5.1. Avrupa Birliği ülkeleri ölümlü iş kazası sayısı istatistikleri (2019)

Number of non-fatal and fatal accidents at work, 2019
(persons)

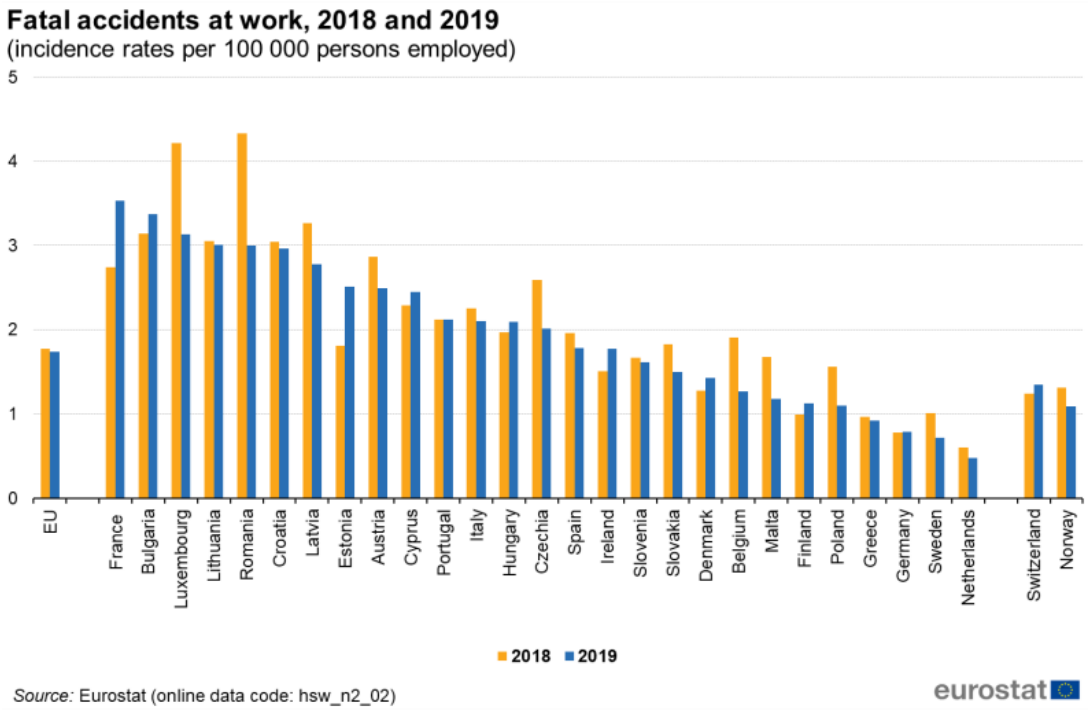
	Non-fatal accidents at work involving at least four calendar days of absence from work			Fatal accidents at work
	Total	Men	Women	Total
EU	3 140 950	2 143 816	996 325	3 408
Belgium	68 741	47 504	21 232	52
Bulgaria	2 162	1 427	735	85
Czechia	42 321	28 479	13 842	95
Denmark	50 179	30 307	19 681	39
Germany	867 533	639 740	227 386	416
Estonia	6 180	4 764	1 416	15
Ireland	13 252	8 199	4 933	41
Greece	5 127	3 668	1 459	35
Spain	489 643	350 265	139 378	347
France	778 820	468 797	310 023	803
Croatia	10 373	6 439	3 930	43
Italy	289 283	211 093	78 190	491
Cyprus	2 158	1 537	621	10
Latvia	2 245	1 473	772	29
Lithuania	4 666	2 850	1 733	37
Luxembourg	7 270	5 593	1 677	12
Hungary	23 802	14 848	8 954	84
Malta	2 202	1 741	461	3
Netherlands	92 838	58 948	33 890	37
Austria	60 909	47 466	13 443	106
Poland	81 302	50 358	30 944	184
Portugal	131 717	89 538	42 179	104
Romania	4 709	3 287	1 422	227
Slovenia	13 065	9 683	3 382	15
Slovakia	9 666	6 297	3 369	33
Finland	40 103	26 578	13 525	29
Sweden	40 684	22 936	17 748	36
Norway	9 943	5 844	4 100	33
Switzerland	95 254	74 382	20 872	56

Note: non-fatal accidents reported in the framework of ESAW are accidents that imply at least four full calendar days of absence from work (serious accidents).
Source: Eurostat (online data codes: hsw_n2_01 and hsw_n2_02)

eurostat

100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası (2019).

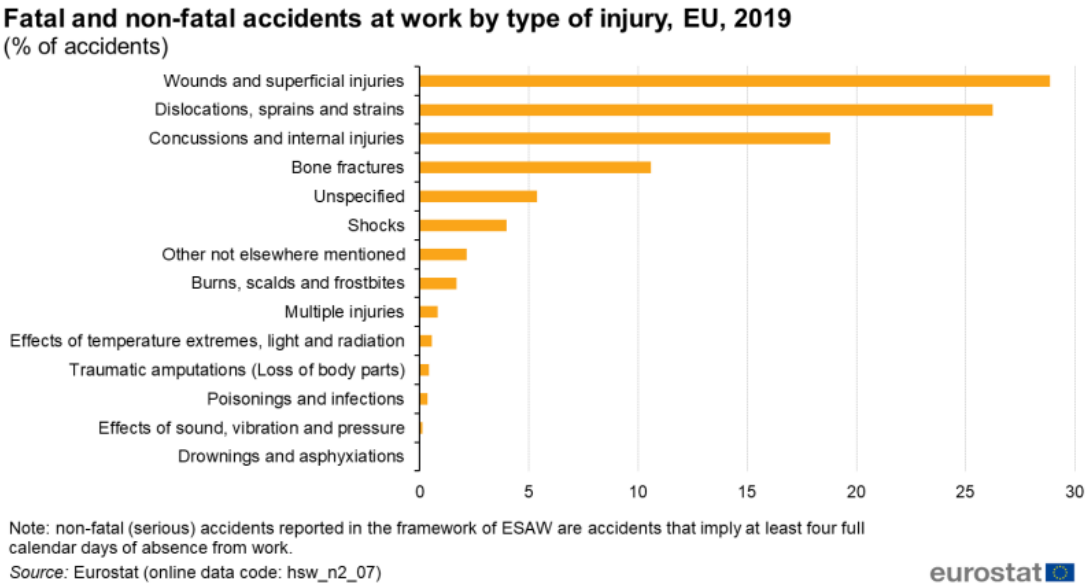
Türkiye'de 5,21, ABD'de 4,01, EU-28 1,70



Source: Eurostat (online data code: hsw_n2_02)

eurostat

Şekil 5.1. Avrupa Birliği ülkeleri 100.000 çalışan başına ölümlü iş kazası oranı istatistikleri (2016-2017).



Şekil 5.2. Avrupa Birliği ülkeleri ölümlü ve ölümlü olmayan iş kazası sebeplerine göre tasnif (2019).

Ölümlü iş kazası sebepleri ve oranı (2019).

Şoklar	%4,1
Basınç etkisi	%0,1

6. ELEKTRİK ÇARPMASININ İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİ

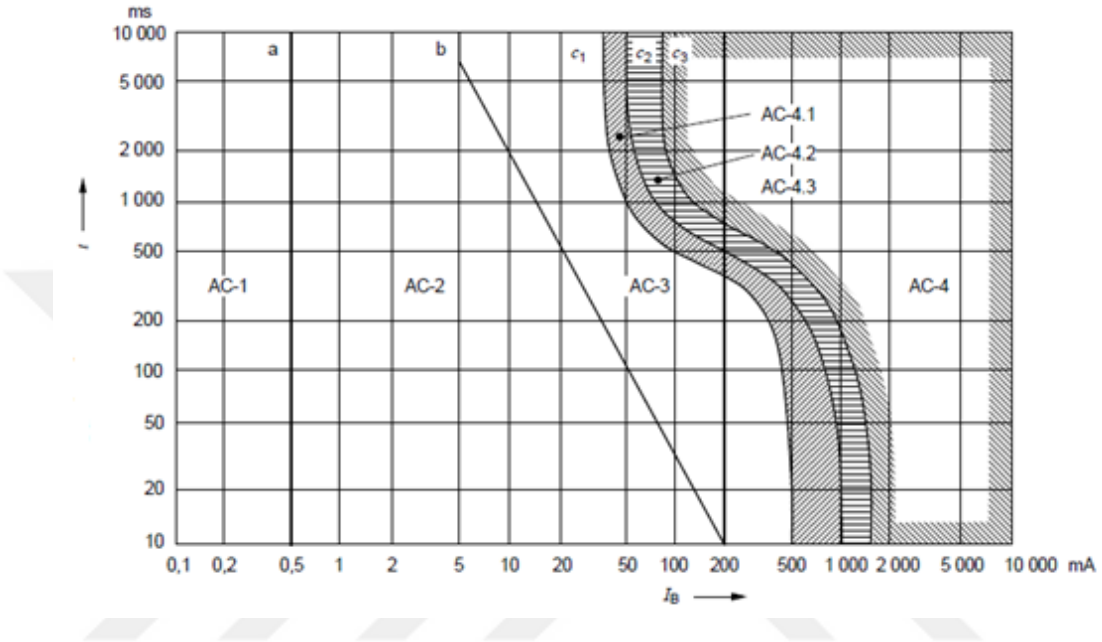
Elektrik sebepli iş kazaları iki bölümde sınıflanabilir. Bunlar elektrik çarpması (elektrik şoku) olayları ve elektrik ark patlamasına bağlı maruziyetler. Elektrik akımının insan vücuduna etkileri IEC 60479-1:2018 standartı incelemiştir. Elektrik ark patlamasının etkileri ise NFPA 70E, IEEE 1584 ve IEC 60482-1-2 standartlarında incelenmiştir.

6.1. Elektrik Çarpma Akımının İnsan Vücuduna Etkileri ve Koruma

Elektrik çarpması olayında vücuttan geçen akımın büyüklüğünün yani maruziyet şiddetinin yanısıra maruziyetin süresi ve akımın vücuttaki akışındaki maruziyet yolu (path) da önemlidir. Şekil 6.1'de verilen grafik alternatif akım için sol el ayaklar arasındaki maruziyet yolu için yapılmıştır. Grafikte AC-1 bölgesini 0,5 mA ile sınırlayan a doğrusu hissetme sınırı olup genellikle bir tepki beklenmez. AC-2 bölgesini sınırlayan b doğrusu ise güvenli bölgenin sınırını belirlemekte olup genellikle zararlı bir fizyolojik etki beklenmez. AC-3 bölgesini sınırlayan c_1 eğrisine kadar ise genellikle organik bir hasar beklenmez. Akım akış süresinin 2 s'den daha uzun olmasıyla kaslarda kramp kasılmaları ve nefes almada zorluklar görülür. Akımın büyüklüğü ve süresinin artmasıyla ventriküler fibrilasyon hariç, atriyel fibrilasyon ve geçici kalp kasılmaları gibi kalpte, kalp atışlarının iletiminde ve biçiminde bozulmalar görülür. AC-4 bölgesi c_2 ve c_3 eğrileriyle sınırlanan üç bölgeye ayrılmıştır. AC-4.1 bölgesini sınırlayan c_2 eğrisi yüksek gerilimli tesislerde çalışanlar için U_{TP} dokunma gerilimi hesaplarında kullanılmaktadır. Bu bölgede ventriküler fibrilasyon olasılığı yaklaşık %5'e kadar yükselir. AC-4.2 bölgesini sınırlayan c_3 eğrisine kadar ventriküler fibrilasyon olasılığı yaklaşık %50'ye kadar yükselir. AC-4.3 bölgesinde ventriküler fibrilasyon olasılığı %50'nin üzerine çıkmaktadır.

Şekil 6.1'de verilen grafik sol el ile ayaklar arasındaki maruziyet yolu için tanımlanmıştır. Örneğin güvenli bölge sınırını belirleyen b doğrusu üzerindeki her noktanın yatay ve düşey eksenlerinde sırasıyla maruziyet akımı ve maruziyet süresi yer almaktadır. Sol el ayaklar arasındaki 30 mA maruziyet

akımı en fazla 200 ms kalabilir. Maruziyet akımı arttıkça süre kısalır. 30 mA eşikli RCD sahada yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin 50 mA'lik bir RCD olsaydı 100 ms'den önce devreyi açıyorsa aynı derecede güvenlidir. RCD'ler eşik akımının 5 katında yani 40 ms'de devreyi açmalıdır. 40 ms maruziyet süreside yaklaşık 100 mA maruziyet akımı sol el ayaklar yolu için kabul edilmiştir.

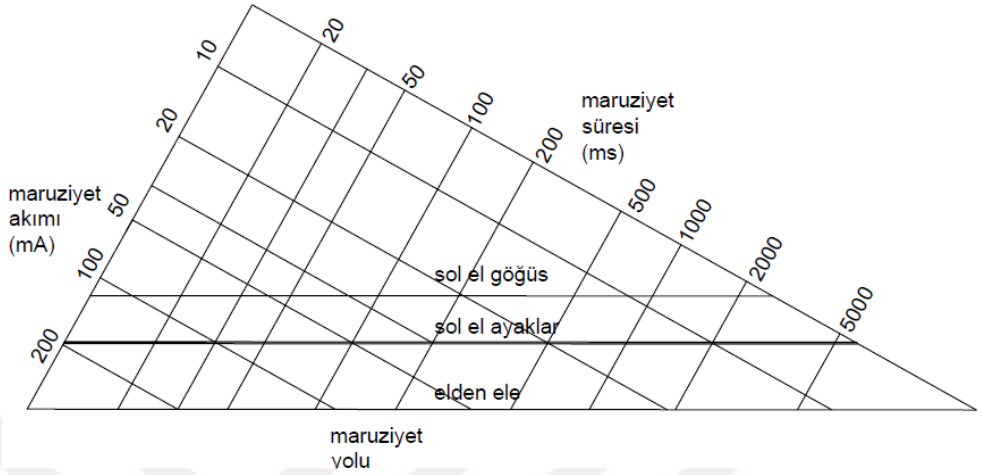


Şekil 6.1. Alternatif akım (15 Hz ila 100 Hz) sol elden ayağa maruziyet yolu için akım-zaman grafiği (IEC 60479-1:2018 Figure 20).

6.2. Elektrik Çarpması ve Şok Üçgeni

Elektrik çarpmasında, yangın üçgenine benzeyen bir elektrik çarpması üçgeni kullanılabilir. Böyle bir elektrik şok üçgenini ilk defa Ravel F. Ammerman kendi Doktora tezinde göstermiştir (Ravel F. Ammerman 2008). Burada verilen sade üçgen üzerinde herhangi bir sayısal ölçeklendirme mevcut olmayıp üçgenin kenarları akım, zaman ve yol şeklindedir (Figure 1.3 current, time, path). Bu çalışmadaki üçgen ise IEC 60479-1:2018 standartına ölçeklendirilerek diğerine göre oldukça geliştirilmiştir. Üçgenin kenarları maruziyet akımı, maruziyet süresi ve maruziyet yoludur. Maruziyet akımı ve maruziyet süresi, Şekil 6.1'de verilen grafikteki güvenli bölgenin sınırını belirleyen b doğrusunun eksenleridir. Şekil 6.1'deki grafik sol el ayaklar maruziyet yolu için verilmiştir. Başka yollar için b doğrusuna paralel, kalp-akım faktörü F'ye bağlı doğrular

çizilmiştir. Şekil 6.2'deki grafikten görüleceği gibi örneğin 100 mA'lik bir akım sağ el sol el yolundan 110 ms'den fazla süre geçmemelidir. Sol el ayaklar arasında 30 mA'lik bir akımın maruziyet süresi 200 ms'dir.



Şekil 6.2. Elektrik çarpması üçgeni

Çizelge 6.1- Değişik maruziyet yolları için kalp-akım faktörü F (IEC 60479:2018 Table 12).

Maruziyet yolu	Kalp-akım faktörü F
Sol elden sol ayağa, sağ ayağa veya ayaklara	1,0
Her iki elden her iki ayağa	1,0
Sol elden sağ ele (elden ele)	0,4
Sağ elden sol ayağa, sağ ayağa veya ayaklara	0,8
Sırttan sağ ele	0,3
Sırttan sol ele	0,7
Göğüsten sağ ele	1,3
Göğüsten sol ele	1,5
Kalçadan sol ele, sağ ele veya her iki ele	0,7
Sol ayaktan sağ ayağa	0,04

Not: Elden ele 225 mA akımın ventriküler fibrilasyona yol açma olasılığı, sol el ayaklar arasında 90 mA akım ile aynıdır, 225 mA × 0,4 = 90 mA × 1,0.

6.3. Elektrik Çarpmasına Karşı Alınacak Koruma Önlemleri

6.3.1. Elektrik çarpmasına karşı temel koruma

Temel koruma ya da daha yaygın kullanımla doğrudan dokunmaya karşı koruma; canlı iletkenlere temasın engellenmesiyle çarpılmayı önlemek amaçlıdır. Burada alınacak önlemler, canlı iletkenlerin yalıtımı, canlı iletkenlerin kilitli pano gibi bir mahfaza içine alınması, canlı iletkenlerin önüne pleksiglas gibi bir engel konması ve canlı iletkenlerin el ulaşma mesafesinin (1,25 m) dışına yerleştirilmesi şeklinde uygulanan pasif önlemlerdir. Bu bakımdan canlı iletkenlere teması engelleyecek olan iletkenin üzerine veya önüne monte edilen yalıtım şeklinde, canlı iletkenlerin kilitli mahfaza içine alınması veya çeşitli engellerle canlı iletkenlerin el ulaşma mesafesinin dışına yerleştirilmesi şeklinde uygulanan pasif önlemler alınır. Bu önlemlerin panoların bulunduğu yerlerde uygulanması zorunludur. Pasif önlemler alınmadan, sadece 30 mA RCD'ye güvenerek koruma yapılamaz. 50 V'un üzerindeki şebeke gerilimlerinde hem TT sistemlerde hem de TN sistemlerde IEC 60364-4-41 411.3.3 standartına göre 20 A sigortayla (devre kesiciyle) korunan genel kullanıma dair priz linyelerinde ve 32 A'e kadar sigortayla (devre kesiciyle) korunan sabit olmayan cihaz prizlerinde 30 mA kaçak akım rölelerinin (RCD) kullanımı zorunludur.

6.3.2. Elektrik çarpmasına karşı hata koruması

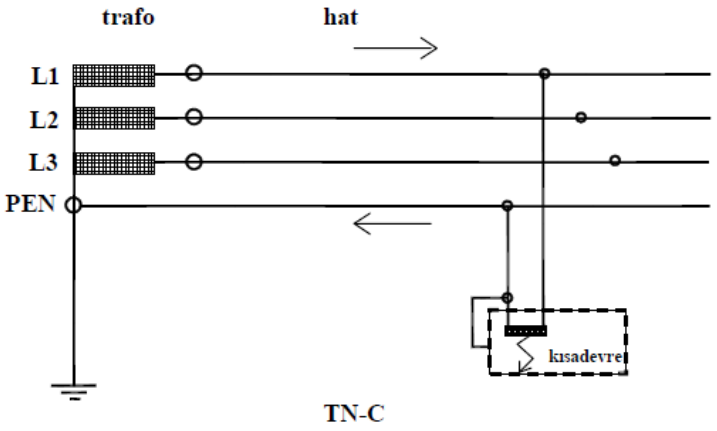
Hata koruması ya da daha yaygın kullanımla dolaylı dokunmaya karşı koruma, bir hata akımı durumunda hata akımının insan vücudundan geçmesini engelleyecek veya zarar vermeyecek kadar küçültmek için alınan önlemlerdir. Dolaylı temasa karşı korumada ana hedef, insanların normal koşullarda temas ettiği metal gövdeli elektrikli cihazlarda bir hata meydana geldiğinde, beslemenin otomatik olarak kesilmesini sağlayan TT veya TN sistemi kullanan aktif önlemler, tamamen yalıtkan kaplı sınıf II cihazlar kullanılması yöntemi, yalıtkan paspas gibi iletken olmayan mahaller oluşturulması yöntemi, topraklamasız tamamlayıcı yerel (mahalli) eşpotansiyel kuşaklama ile koruma yapılması yöntemi ve bireysel her bir cihaz için ayrı ayrı yalıtım trafosu

kullanılan koruyucu ayırma yöntemi veya şebeke olarak cihazlara toplu olarak kullanılan koruma hat sistemi yönteminin kullanıldığı IT sistem önlemlerdir. Dolaylı dokunmaya karşı koruma ile bağlantılı olarak, potansiyel dengeleme yönteminin uygulanması, pano önündeki zeminin yalıtılması güvenlik için önemli prensiplerdir. Beslemenin otomatik olarak kesilmesini sağlayacak önlemler ise aktif önlemleri tanımlar.

Alçak gerilim şebekeleri, TS HD 60364-4-41:2018 standartına göre hata sonucu oluşan toprak teması akımının trafonun yıldız noktasına ulaştırıp devrenin otomatik kesilmesi prensibine bağlı olarak geliştirilen TT ve TN şeklindeki topraklı sistemler ile toprak teması akımının trafonun yıldız noktasına ulaşmasının engellemesi prensibine bağlı olarak geliştirilen IT şeklinde yalıtılmış sistemler şeklinde işletilmektedir.

6.3.2.1. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatasında elektrik çarpmasına karşı koruma

TN-C sistemi artık kullanımı çok azalmış bir yöntemdir. TN-C sistemde devrenin otomatik kesilmesi için hata akımının çevrimine PEN (PE+N) empedansı girmiştir. PEN iletkeni hem nötr hem de koruma fonksiyonlarını üzerinde toplayan iki görevli bir iletlendir. Ayrı bir koruma hattı bulunmaması ekonomik avantaj gibi görülse de toprak teması akımlarının PEN iletkeni üzerinden taşınması, bu iletkene bağlı nötr kullanan diğer cihazlara zarar verir.



Şekil 6.3. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatası

TN-C sistemde hata akımı devresinde çevrim PEN iletkeni üzerinden tamamlanmaktadır. Toprak teması PEN üzerinden kısa devreye dönüşerek devreyi çevrim empedasına bağlı olarak otomatik olarak keser. Devrede sadece çok küçük dirençli kablolar ve iletkenler bulunduğundan bir yalıtım hatasında hata akımı çok büyümektedir.

$230\ V \geq Z_0.I_a$ olmalıdır. Tüm devrenin toplam çevrim empedansı Z_0 ile koruma cihazının açma akımı I_a 'nın çarpımı kaynak geriliminden küçük olmalıdır. Bu sistemde kaçak akım rölelerinin (RCD) kullanılması teknik olarak mümkün değildir.

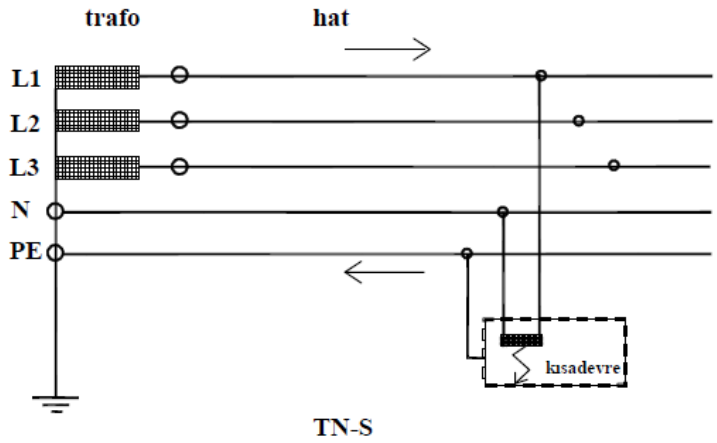
PEN iletkeninin özellikleri;

-PEN iletkeni hem PE özelliklerini hem de N özelliklerini tam olarak taşımalıdır. PEN şeklinde nötr ve koruma olarak iki farklı görevli tek iletken 10 mm^2'nin altındaki kesitlerde kullanılamaz (EİTY, Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği, Madde 36). 10 mm^2'nin üzerinde olmakla birlikte faz kesitine göre yarım kesitli nötr veya tamamen nötr özelliği de taşıyan PEN kullanan kablolarda ya PEN takviye edilerek faz kesiti ile tam kesite getirilir, ya da PEN hattının toprak teması durumundaki akım taşıma kapasitesi tahkik edilip sadece faz iletkenlerinin kesileceği şekilde önlem alınır. Bu önlemlerden bazıları, kabloyu koruyan şalterin PEN iletkeninin akım taşıma kapasitesine uygun olarak seçilmesi-ayarlanması ya da PEN'deki aşırı akım ölçülerek, akım taşıma kapasitesini zorladığında şalterin açtırılması sayılabilir (EİTY Madde 57).

-PEN iletkeni yangın tehlikesi olan yerlerden geçirilemez (EİTY Madde 64).

-PEN iletkeni ATEX tehlike bölgelerinden geçirilemez (IEC 60079-14:2014).

6.3.2.2. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatasında elektrik çarpmasına karşı koruma



Şekil 6.4. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatası

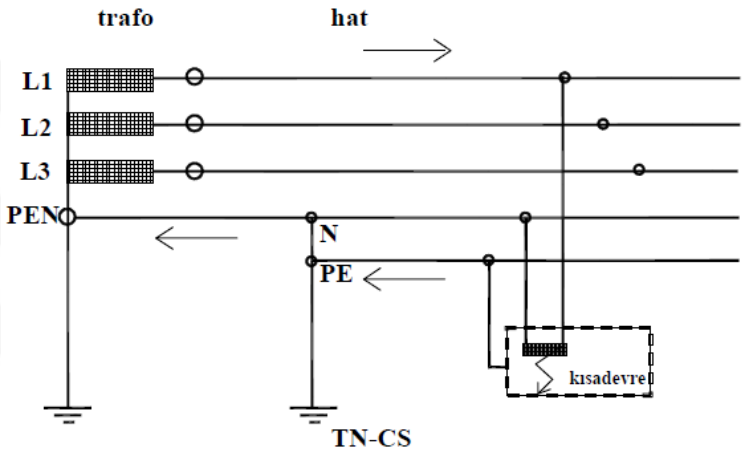
Bu sistemde devrenin otomatik kesilmesi için hata akımının çevrimine nötrden bağımsız olarak PE iletkeni üzerinden tamamlamaktadır. Hata akımının nötr'den bağımsız yolu bakımından diğer iki TN sisteme (TN-C ve TN-CS) göre daha güvenlidir. 230 V $\geq$ $Z_0.I_a$ olmalıdır. Tüm devrenin toplam çevrim empedansı Z_0 ile koruma cihazının açma akımı I_a'nın çarpımı kaynak geriliminden küçük olmalıdır. Bu sistemde kaçak akım rölelerinin (RCD) kullanılması teknik olarak mümkün olup gerekli durumlarda, örneğin çevrim empedansının CB veya MCB'lerle otomatik açmayı gerçekleştiremediği durumlarda kullanılmalıdır.

6.3.2.3. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatasında elektrik çarpmasına karşı koruma

TN-CS sistemde devrenin otomatik kesilmesi için hata akımının çevriminde bir bölümde PE ve bir bölümde de N empedansı girmiştir. Hata akımının yolu bakımından TN-C'ye göre daha emniyetlidir. Sistemin TN-C bölümünde faz kesitine göre yarım kesitli nötr kullanan kablolarda nötr (PEN) hattının toprak teması durumundaki akım taşıma kapasitesi tahkik edilip faz iletkenlerini kesecek önlemler alınmalıdır. Bu önlemlerden bazıları, kabloyu koruyan şalterin PEN iletkeninin akım taşıma kapasitesine uygun olarak seçilmesi-ayarlanması

yada PEN'deki aşırı akım ölçülerek, akım taşıma kapasitesini zorladığında şalterin açtırılması sayılabilir. 230 V $\geq$ $Z_0.I_a$ olmalıdır. Tüm devrenin toplam çevrim empedansı Z_0 ile koruma cihazının açma akımı I_a 'nın çarpımı kaynak geriliminden küçük olmalıdır.

Bu sistemde kaçak akım rölelerinin (RCD) kullanılması TN-C bölümünde teknik olarak mümkün olmayıp TN-S bölümünde gerekli durumlarda örneğin çevrim empedansının CB veya MCB'lerle otomatik açmayı gerçekleştiremediği durumlarda kullanılmalıdır.

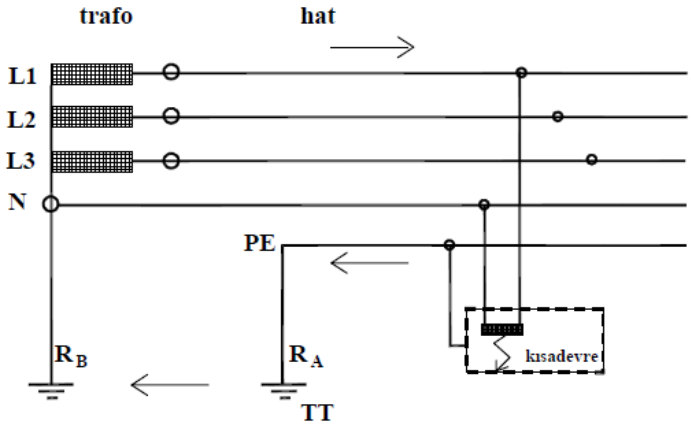


Şekil 6.5. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatası

6.3.2.4. TT şebekede bir fazlı toprak hatasında elektrik çarpmasına karşı koruma

TT sistemde hata akımının R_A koruma topraklama direnci üzerinden geçerken oluşturduğu gerilimin en fazla 50 V gerekir. Çünkü alternatif akımda güvenli gerilim sınırı 50 V'tur.

50 V > $R_A.I_a$ koşulu sağlanmazsa ($R_A.I_a$ > 50 V olursa) beslemenin otomatik kesilmesi sağlanacak, hata akımının oluştuğu anda cihaz-makineye tesadüfi olarak dokunan insan da korunmuş olacaktır.



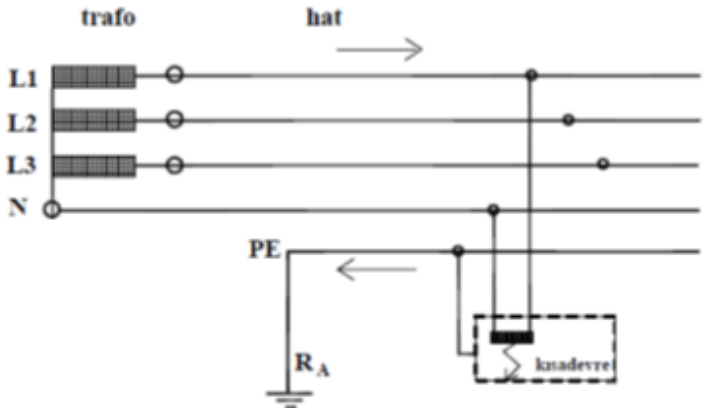
Şekil 6.6. TT şebekede bir fazlı toprak teması

Ülkemizde yaygın olarak kullanılan sistem TT sistemdir. Bu sistemde hata akımı, devresini toprak üzerinden tamamlamaktadır. Toprağı devrede doğrudan kullanan bu sistemin diğer sistemlere göre koruma zafiyeti bulunmaktadır. Keza toprağın mineral bileşim durumuna ve mevsime bağlı olarak değişkenlik gösterebilen özdirenci, ekonomik ve doğal kısıtlardan dolayı yeterince küçültülemeyen toprak geçiş direnci yeterli güvenirlikte koruma sağlayamamaktadır. TT sistemde toprak çevrimine R_A ve R_B direnci girdiğinden hata akımı küçülmekte olup MCB'lerin açması için yeterli akım oluşmamaktadır. Bu yüzden TT sistemde koruma için her durumda kaçak akım rölesi (RCD) kullanımı şarttır.

6.3.2.5. IT şebekede bir fazlı toprak temasında elektrik çarpmasına karşı koruma

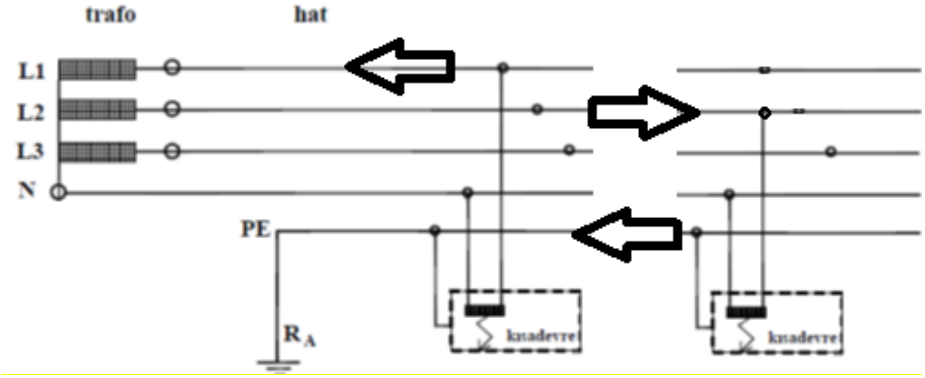
Toprak teması akımının trafonun yıldız noktasına ulaşmasının engellemesi prensibine bağlı olarak geliştirilen IT sistemde 1/1 (primer ve sekonderi aynı gerilimli) yalıtım trafosunun sekonderinde işletme topraklaması yapılmadığından toprak çevrimi oluşturulmamaktadır. Yalıtım trafosunun primer ve sekonder kısmını ayıran yalıtkanlar arasına bakır ekran konur. 50 V > $R_A.I_d$ koşulu sağlanırsa beslemenin otomatik kesilmesi gerekmeden devre emniyetli bir şekilde kesinti olmadan çalışmaktadır. I_d akımı birkaç mA seviyesinde kapasitif akımdır. Özellikle monofaze sistem (bir fazlı yalıtım

trafosu) hastanelerde, ameliyathanelerde, yoğun bakım ünitelerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 6.7. IT şebekede bir fazlı toprak teması tek hata

IT sistemin 1/1 (primer ve sekonderi aynı gerilimli) üç fazlı yalıtım trafosu kullanımında da ilk toprak teması için $50\ V > R_A \cdot I_d$ koşulu geçerlidir. Bu arıza sürerken başka bir fazda oluşan toprak teması faz arası gerilimle beslenen kısa devreye döner ve topraklı sistemlerde olduğu gibi çevrim oluşur. Beslemenin otomatik kesilmesi için $400\ V \geq 2 \cdot Z_0 \cdot I_a$ olmalıdır. Tüm devrenin toplam çevrim empedansı $2 \cdot Z_0$ ile koruma cihazının açma akımı I_a'nın çarpımı kaynak faz arası geriliminden küçük olmalıdır.



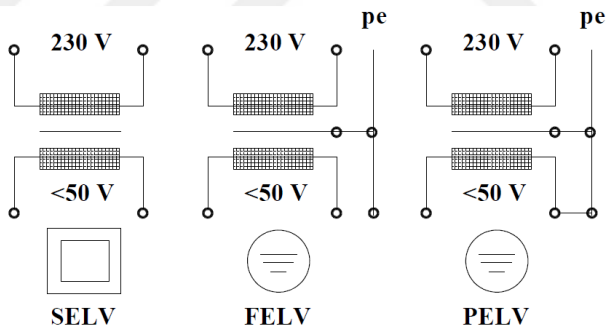
Şekil 6.8. IT şebekede bir fazlı toprak hatası çift hata

Şekil 6.8'de L2 fazından beslenen monfaze cihazda toprak teması devam ederken L1 fazına bağlı olan monofaze cihazda da diğer bir toprak teması

olursa, bu iki cihazın PE hattı üzerinden L1-L2 fazlarını köprüleyerek devrede kısa devre akımı oluşturur.

6.3.3. Elektrik çarpmasına karşı küçük gerilimle koruma

Kaynak geriliminin yalıtım trafosu ile 50 V'un altına düşürüldüğü çok düşük gerilimli (Extra Low Voltage, ELV) sistemlerdir. Yalıtım trafosunun primer ve sekonder kısmını ayıran yalıtkanlar arasına bakır ekran konur. Yalıtım trafosu hiçbir yerden topraklanmaz, tesisat sınıf II olarak kurulursa SELV (Safety veya Seperated ELV), yalıtım trafosunun ekranı topraklanır, sekonder nötr topraklanmaz ve tesisat sınıf I kurulursa FELV (Functional ELV), yalıtım trafosunun ekranı da, sekonder nötrü de topraklanırsa PELV adını alır (Protection by ELV). Küçük gerilimde ark enerjisi de küçük olduğundan özellikle yanıcı patlayıcı parlayıcı ATEX alanlarda yaygın olarak kullanılır. Genellikle maden ocaklarında PELV, iletişim cihazlarında FELV, yüzme havuzlarında SELV kullanılır.



Şekil 6.9. Çok düşük gerilim (extra low voltage, ELV) devreleri

7. ALÇAK GERİLİM GÜÇ SİSTEMLERİNDE HATA (KISA DEVRE) ANALİZİ

Ark patlaması hesaplarının yapılması için önce kısa devre hesabının yapılması gerekir. Kısa devre ifadesi canlı iletkenlerin birbirine, nötr iletkenine veya topraklı gövdeye temasını ifade eder. Faz toprak çevriminde kaynağın yıldız noktasının topraklı olmaması veya bir empedans üzerinden topraklaması durumunda çevrim tamamlanmadığından kısa devre değil, toprak değmesi veya toprak teması denebilir. Kısa devre akımının oluşması durumu temas noktasının tam veya aralıklı (arklı) olması durumları ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Amerikan literatüründe tam kısa devre hali cıvatalanmış kısa devre diye tercüme edilebilecek "bolted short circuit" olarak ifade edilir. Arklı kısa devre, cıvatalanmış gibi bir kısa devre değil, az temaslı veya aralıklı iletkenlerden ark ile devresini tamamlayan kısa devrelerdir. Çeşitli sebeplerle oluşan bu kısa devrelerin hızlı bir şekilde kesilmesi gerekir. Keza ortaya çıkan ve büyük hasarlara sebep olan enerji zamana bağlıdır. Zaman ne kadar kısa olursa, devre ne kadar hızlı kesilirse yayılan enerji o kadar düşük olur.

$$E = P \times t \quad [kWh] \tag{7.1}$$

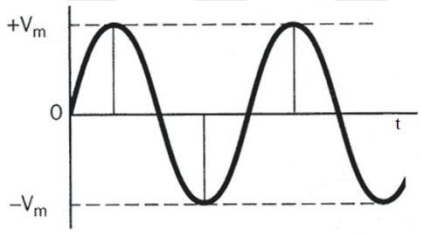
Arklı kısa devre, arızaları pano önünde çalışan teknisyenin yaralanmasına, kablo yalıtımlarının erimesine ve bozulmasına, iletkenlerin birbirine kaynamasına, makinaların arızalanmasına ve etrafta yanıcı nesneler varsa yangına sebep olabilir. Kısa devre ile oluşan elektrodinamik kuvvetler baraların sökülmesine ve kabloların dağılmasına sebep olabilir. Kısa devre şebekenin bir bölümünün devreden çıkmasına, paralel devrelerde gerilim düşümlerine, senkronizasyon ve izleme problemlerine sebep olabilir.

Üç fazlı sistemlerde kısa devre olayları meydana gelme olasılığı ve yaygınlığına göre beş şekilde meydana gelebilir.

(i) Tek faz toprak kısa devresi, (1LG); Asimetrik kısa devredir. Meydana gelme olasılığı: %70-80 (Mutrunu, 2006) (Metz-noblat, 2005)

(ii) Çift faz toprak kısa devresi, (1LL); Asimetrik kısa devredir. Meydana gelme olasılığı: %10-17 (Mutrunu, 2006) (Metz-noblat, 2005)
(iii) Çift faz kısa devresi, (2LG); Asimetrik kısa devredir. Meydana gelme olasılığı: %8-10 (Mutrunu, 2006)
(iv) Üç faz toprak kısa devresi, (3LG); Simetrik kısa devredir. Meydana gelme olasılığı: %2-3 (Mutrunu, 2006)
(v) Üç faz kısa devresi, (3L); Simetrik kısa devredir. Meydana gelme olasılığı: %1 (Oğuz, 2016)
Bu kısa devre tiplerinin son ikisi dengeli, simetrik durumu göstermekte, diğer üç kısa devre olayı ise dengesiz, asimetrik kısa devre olaylarıdır. Yukarıdaki durumlardan başka, olasılığı çok küçük olan durumlar da olabilir. Örneğin iki fazda çift faz kısa devre olurken, aynı anda diğer fazda tek faz toprak kısa devresi çok düşük olasılıkla da olsa meydana gelebilir (Alperöz, 1987).

7.1. Tek Fazlı Alternatif Akımda Genlik ve Efektif (Etkin) Değer



Şekil 7.1. Tek fazlı alternatif gerilim

Tek fazlı sinüzoidal gerilimde genlik (maksimum değer) bir periyodun ¼'ünde ve ¾'ünde oluşur. 0^o ile başlayan periyot 360^o'de (2π) tamamlandığında genlik 90^o ($\pi/2$) ve 270^o ($3\pi/2$)'de oluşur. Genlik değeri alternatif akımı tanımlayan bir anma değeri değildir. Keza ortalaması sıfır olmasına rağmen alternatif akım bir dirençten geçirildiğinde ısı enerjisi vererek etkin bir iş yapar. Bu ısı enerjisinin tam olarak aynısı sabit gerilimli DC bir kaynaktan almak istenirse, DC geriliminin AC gerilimin genliğine göre biraz daha (genliğin 0,707'si kadar) düşük olması gerekir. Bu değer AC gerilimin etkin değeridir.

Dirençten $i = I_m.sin\omega t$ şeklinde akım geçirilirse, direncin çektiği herhangi bir andaki ani güç $p = R.i^2$ olacağından direncin alternatif akımda belli bir periyotta çekeceği ortalama güç;

$$P_{ort(aa)} = \frac{1}{T}\int_{t=0}^{t=T} R.(I_m.sin\omega t)^2 dt$$

$$P_{ort(aa)} = \frac{1}{2}R.I_m^2 \quad \text{(Dalfes, 1993)} \qquad (7.2)$$

$P_{ort(aa)}$: Alternatif akımda ortalama güç

I_m: Sinüzoidal alternatif akımın tepe değeri

Aynı gücü doğru akım devresinden almak için;

$P = R.I^2$ (Dalfes, 1993)

P: Doğru akımda güç

I: Doğru akım devresindeki akım $= I_{eff}$: Efektif akım

İki devreden de aynı güçlerin alındığı durumdaki akımları karşılaştırmak için için güçler eşitlenir;

$$P_{ort(aa)} = P \rightarrow \frac{1}{2}R.I_m^2 = R.I_{eff}^2$$

$$I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

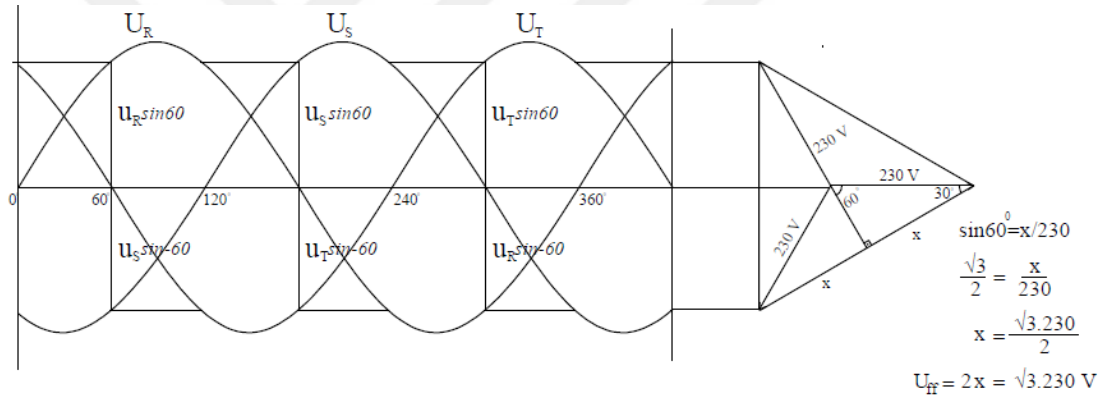
Aynı işlemler gerilim için tekrarlanırsa;

$$V_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \qquad (7.3)$$

Özel olarak etkin değeri 220 V AC olan (DC'de aynı ısıyı veren) gerilimin genliği (maksimum değeri); $220\,V = V_m/\sqrt{2} \quad V_m = 220\sqrt{2}\,V$

7.2. Üç Fazlı Alternatif Gerilimde Etkin Değer

Dağıtım sistemindeki gerilim seviyelerinin standardizasyonunu sağlamaya yönelik görevli kamu kurumu Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'dur. Alçak gerilimde (< 1000 V) kullanılan seviyenin faz-nötr 220 Volt'mu yoksa 230 Volt'mu kullanılacağı konusunda Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından henüz bir standart oluşturulmamıştır. Bu bağlamda Enerji piyasası düzenleme kurumunun 21 Aralık 2012 tarih ve 28504 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan "Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği"nin 22. maddesine göre; standardizasyonu sağlamaya yönelik düzenleme uygulamaya konuluncaya kadar alçak gerilim seviyesi fazlar arası 400 V; faz nötr arası 230 V olarak kabul edilmiştir.



Şekil 7.2. Üç fazlı gerilim sinüzoidal ve fazör gösterim.

120^o faz farklı üç faz gerilimi 50 Hz (20 ms'lik periyot) için bir birini 6,66 ms farkla takip eden tek fazlı alternatif gerilimler denebilir. Buradaki genlik, pozitif ve negatif alternanstaki iki fazın toplam olarak en yüksek değeri vereceği zaman ile tanımlanır. Tek fazlı gerilimde genlik bir yarı dalgada 90^o'de oluşmasına rağmen üç fazlı gerilimin birbirini takip eden iki fazın + ve – yarı dalgalarda 60^o ve 300^o (-60^o)'de ve katlarında olur. Fazların tek tek etkin değerinin 230 V olduğu durumda fazlar arası gerilimin etkin değeri;

U_{ff} = 1. faz pozitif yarı dalga için uygun açıdaki (60^o) gerilimin etkin değeri +

2. faz negatif yarı dalga için uygun açıdaki (-60^o) gerilimin etkin değeri = fazlar arası gerilimin etkin değeri.

$$U_{ff} = 230V sin60^o + [-230V\ sin\text{-}60^o]$$
$$= 230V(\sqrt{3}/2) + [-230V(-\sqrt{3}/2)]$$
$$= 2.230(\sqrt{3}/2)\ \text{V}$$
$$= \sqrt{3}\ 230\ V$$
$$U_{ff} = 400\ V$$

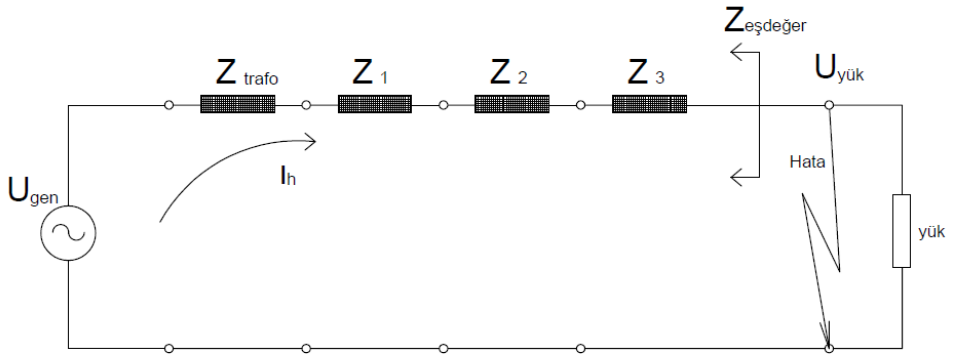
Sinüs şeklinde değişen alternatif akım veya gerilim gibi büyüklüklerinin genlik ve faz açısı ifadeleriyle gösterilmesine fazör denir. Yatık (italik) ve kalın (bold) gösterim fazörü ifade eder.

$$\boldsymbol{V} = V_m e^{j\varphi} \quad (7.4)$$
$$\boldsymbol{V} = V_m \angle \varphi \quad (7.5)$$

Örneğin; $\boldsymbol{V} = 220V \angle 120^0$

7.3. Dengesiz Olaylar İçin Simetrili Bileşenler Yöntemi

Normal şartlarda, dengeli (simetrik) bir çalışma söz konusu olduğunda üç fazlı şebekenin her fazı eşdeğer şekilde davranacağından, şebekenin tek kutuplu modeli üzerinden kısa devre hesabı yapılması işleri kolaylaştırır.



Şekil 7.3. Üç fazlı dengeli sistemin tek kutuplu modelinde hata akımı

$$I_h = \frac{U_{gen}}{Z_{eşdeğer}} \quad (7.6)$$

I_h: Dengeli üç fazlı hata akımı

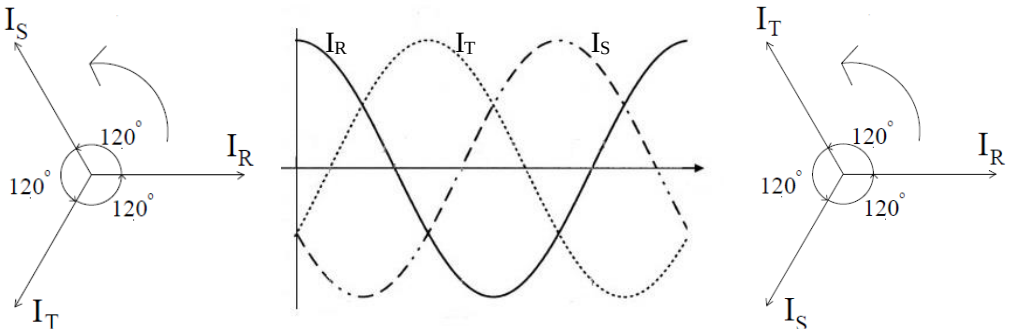
$U_{yük}$: Hata yerindeki gerilim

U_{gen}:Generatör gerilimi

$Z_{eşdeğer}$: Eşdeğer empedans (seri olduklarından toplam empedans)

Bulunan akıma göre yükün başındaki devre kesicinin kısa devre kesme kapasitesi belirlenir. Bu devre kesici dengeli durum dışındaki asimetrik akımlarda da aynı ayar değerleriyle açma yapmaya çalışacaktır. Halbuki dengesiz yükleme, tek fazlı toprak kısa devresi gibi asimetrik (simetrik olmayan) durumlarda tek kutuplu model artık kullanılamaz. Ayrı ayrı hesaplar yapmaksa zaman alıcı olacaktır. Bu durumda asimetrik durumda olan şebekenin her bir fazını simetrik bileşenlere ayırıp elde edilen her bir simetrik bileşenin tekrar toplanmasıyla oluşan tek kutuplu model üzerinden akım ve gerilimleri hesaplamak işleri kolaylaştıracaktır.

Dengesiz devrelerin analizinde en güçlü matematiksel aracı Dr. C.L. Fortescue 1918'de yayınladığı, "Çok fazlı şebekelerin çözümünde simetrik koordinatlar yönteminin uygulanması" (Fortescue 1918) makalesinde göstermiştir. Daha sonra bu yöntemin, sistem hatalarının hesaplanmasında ve sistem kararlılık problemleri gibi sorunlar için de uygulanması önerildi. 1937'de ise E. Clarke ise diyagonal (α, β, o) bileşenler yöntemi adını verdiği benzer bir yöntemi göstermiştir.



Şekil 7.4. Üç fazlı simetrik alternatif akım RTS ve RST sıralama

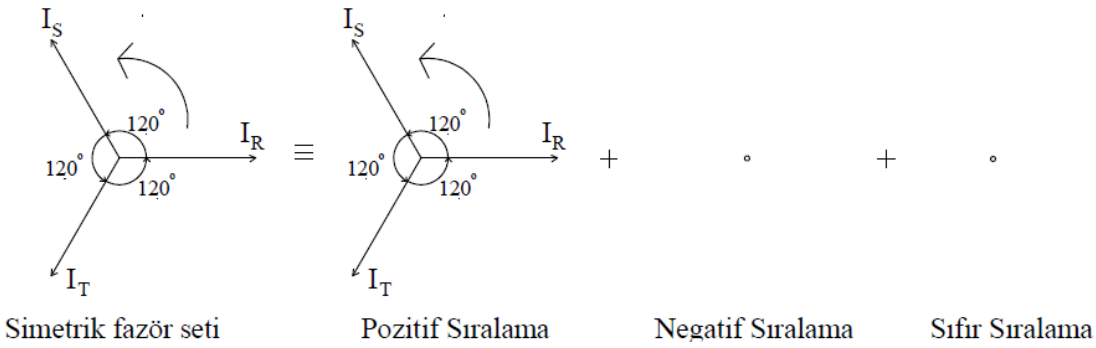
Üç fazlı akım fazörlerinde üç önemli kural; fazörün açısı, fazörün büyüklüğü (uzunluğu) ve fazörlerin sıralamasıdır (dönüş yönü). Bu prensiplere göre şekil 7.4'te görülen üç fazlı dengeli (simetrik) fazör seti değerlendirilirse;

Açılar: I_R ile I_S arasındaki açı 120^{o}dir. Aynı şekilde I_S ile I_T arasındaki ve I_T ile I_R arasındaki açılar da 120^{o}dir.

Büyüklükler: (genlikler) birbirine eşittir. $I_R = I_S = I_T$

Sıralama: Bazı kaynaklarda + dönüş yönü olarak sağa doğru dönen saat yönü ile aynı yön verilmekte (Alperöz, 1987), bazı kaynaklarda da + dönüş yönü olarak sola doğru dönen saat yönünün tersi kabul edilmektedir (Metz-noblat, 2005) (Ucan, 2011). Bu çalışmada kabul edilen + dönüş yönü, Orta Avrupa dışında daha yaygın olarak kullanılan saat yönünün tersi olan (CCW: Counter Clock Wise) sola doğru dönen (kutup yıldızından bakıldığında dünyanın dönüş yönü) yöndür.

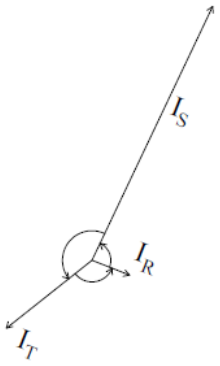
Bu dönüş yönü ile Şekil 7.4'deki ilk grafikte I_R akımı fazörünün bulunduğu pozisyona, yani 0^o pozisyonuna I_R akımı fazöründen sonra dönüş yönüne göre ilk gelecek olan akım fazörü I_T daha sonra gelecek olan akım fazörü ise I_S dir. Buna göre dönüş sıralaması, RTS şeklindedir. Eğer I_S ve I_T fazörlerinin yerleri değiştirilirse; gene aynı CCW dönüş yönünde Şekil 7.4.'deki son grafikte 0^o pozisyonuna I_R akımı fazöründen sonra ilk gelecek olan akım fazörü I_S daha sonra gelecek olan akım fazörü I_T dir. Bu durumda dönüş sıralaması RST şeklinde olacaktır. I_S ve I_T fazörlerinin yerlerinin değiştirilmesi yöntemi yerine dönüş yönü değiştirilerek de aynı sonuç elde edilebilir. Saat yönü ile aynı dönüş yönü (CW: Clock Wise)



Şekil 7.5. Üç fazlı dengeli (simetrik) fazör setinde simetrik bileşenler

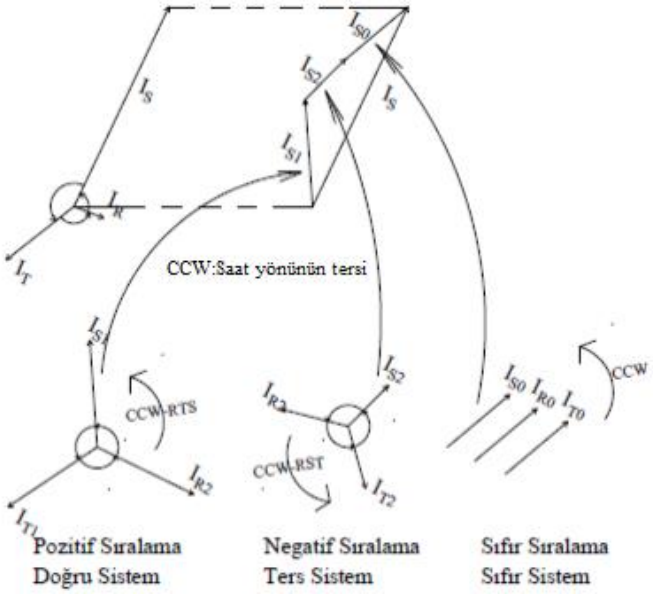
Üç fazlı dengeli fazör seti, simetrili bileşenlerine ayrılırsa; Birinci simetrili bileşen olan pozitif sıralama bileşeni, değerlendirmesi yapılan üç fazlı dengeli

fazör setine eşit olacaktır. Bununla birlikte simetriden dolayı negatif sıralama bileşeni ve sıfır sıralama bileşeni ortadan kalkacaktır. Dengesiz üç fazlı bir fazör setinde ise fazörlerin büyüklüğü ve açısı diğer fazörlerle eşit olmaz.



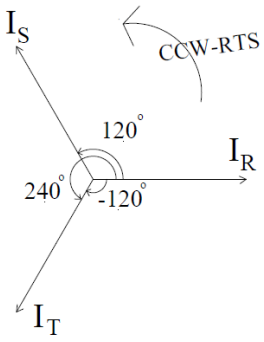
Şekil 7.6. Dengesiz (asimetrik) RTS sıralı fazör seti örneği; fazörlerin hem büyüklükleri hem de açıları birbirinden farklıdır.

Dengesiz üç fazlı bir fazör setinin her bir fazını dengeli simetrik bileşenlere dönüştürme işlemine simetrili bileşenler yöntemi adı verilir. Bu alt bileşenler pozitif sıralama (doğru sistem), negatif sıralama (ters sistem) ve sıfır sıralama (sıfır sistem) olarak adlandırılır (Alperöz 1987).



Şekil 7.7. Asimetrik fazör setinin simetrik bileşenlere ayrılması.

Asimetrik üç fazlı sistemde sadece I_S fazörü için $I_{S1} + I_{S2} + I_{S0}$ simetrili bileşenlerden aktarılan fazörler Şekil 7.7'de görülmektedir. Diğer I_R ve I_T fazörleri benzer şekilde simetrili bileşenlerden alınarak toplanır.



Şekil 7.8. Simetrik CCW:Saat yönünün tersi dönüş yönünde RTS sıralı fazör setinde referansa göre açılar.

Simetrik RTS fazör setinde I_R referans alındığına göre (0^o);

$$\boldsymbol{I_R} = |I| \angle 0^0 \quad (7.7)$$

$$\boldsymbol{I_S} = |I| \angle 120^0 \quad (7.8)$$

$$\boldsymbol{I_T} = |I| \angle 240^0 \quad (7.9)$$

Vektörleri CCW yönünde 120^o ve katları deplase eden işlemciye a işlemcisi denir;

$$a = 1 \angle 120^0 \quad (7.10)$$

$$a^2 = 1 \angle 240^0 = 1 \angle -120^0 \quad (7.11)$$

$$a^3 = 1 \angle 360^0 = 1 \angle 0^0 \quad (7.12)$$

Buradan a işlemcisi kullanılarak tüm fazörler I_R referans fazörü cinsinden yazılabilir.

$$\boldsymbol{I_R} = I_R \quad (7.13)$$

$$\boldsymbol{I_S} = a \,.\, I_R \quad (7.14)$$

$$\boldsymbol{I_T} = a^2 \,.\, I_R \quad (7.15)$$

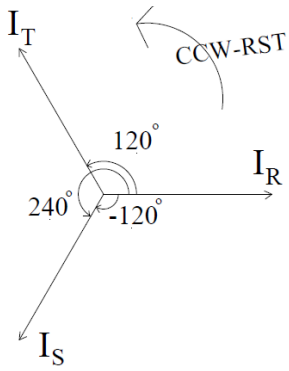
Tüm akımların büyüklüğü aynı $\boldsymbol{I_R = I}$ olduğunda denklemler

$$\boldsymbol{I_R} = I \quad (7.16)$$

$$\boldsymbol{I_S} = a \,.I \quad (7.17)$$

$\boldsymbol{I_T} = a^2 \, .I$ (7.18)

şeklini alır. Simetrik RST fazör setinde I_R referans alındığına göre (0^o);



Şekil 7.9. Simetrik CCW:Saat yönünün tersi dönüş yönünde RST sıralı fazör setinde referansa göre açılar.

$\boldsymbol{I_R} = I$ (7.19)

$\boldsymbol{I_S} = a^2 . I$ (7.20)

$\boldsymbol{I_T} = a \, . I$ (7.21)

şeklini alır.

Asimetrik üç fazlı sistemde CCW-RTS için simetrili bileşenlere aşağıdaki şekilde ayrılır (Şekil 7.8.).

$\boldsymbol{I_R} = I_{R1} + I_{R2} + I_{R0}$ (7.22)

$\boldsymbol{I_S} = I_{S1} + I_{S2} + I_{S0}$ (7.23)

$\boldsymbol{I_T} = I_{T1} + I_{T2} + I_{T0}$ (7.24)

I_R ve simetrik bileşenleri $I_{R1} + I_{R2} + I_{R0}$ referans alınırsa;

$\boldsymbol{I_R} = I_{R1} + I_{R2} + I_{R0}$ (7.25)

$\boldsymbol{I_S} = a^2 \, I_{R1} + a \, I_{R2} + I_{R0}$ (7.26)

$\boldsymbol{I_T} = a \, I_{R1} + a^2 \, I_{R2} + I_{R0}$ (7.27)

Böylece tüm denklemler $I_R \;\; I_S \;\; I_T$ dengesiz üç fazlı fazör seti; 9 simetrili bileşen yerine I_R referansına göre sadece üç simetrili bileşenle gösterilebilir. Burada I_R'nin simetrili bileşenleri $I_{R1} \;\; I_{R2} \;\; I_{R0}$ referans kabul edildiğinden ve diğer fazörlerin simetrili bileşenlerine dönüştürülebileceğinden artık sadece $I_1 \;\; I_2 \;\; I_0$ yazılabilir.

$\boldsymbol{I_R} = I_1 + I_2 + I_0$ (7.28)

$\boldsymbol{I_S} = a^2\ I_1 + a\ I_2 + I_0$ (7.29)

$\boldsymbol{I_T} = a\ I_1 + a^2\ I_2 + I_0$ (7.30)

Matris formunda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7.31)$$

$A = B . x$

Asimetrik bir fazör setinde; I_R I_S I_T verildiğinde I_0 I_1 I_2 simetrili bileşenler matris işlemleriyle çözülebilir.

$A = B.x$

$B.\ B^{-1} = 1$

$a.a^2 = 1$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & a/3 & a^2/3 \\ 1/3 & a^2/3 & a/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$X = A.B^{-1}$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I_0} \\ \boldsymbol{I_1} \\ \boldsymbol{I_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \boldsymbol{I_R} \\ \boldsymbol{I_S} \\ \boldsymbol{I_T} \end{bmatrix} \quad (7.32)$$

Buna göre

Akımlar;

$I_R = I_1 + I_2 + I_0$ $\qquad I_0 = 1/3\ (I_R + I_S + I_T)$ (7.33)

$I_S = a^2\ I_1 + a\ I_2 + I_0$ $\qquad I_1 = 1/3\ (I_R + a\ I_S + a^2 I_T)$ (7.34)

$I_T = a\ I_1 + a^2\ I_2 + I_0$ $\qquad I_2 = 1/3\ (I_R + a^2\ I_S + a\ I_T)$ (7.35)

Gerilimler;

$U_R = U_1 + U_2 + U_0$ $\qquad U_0 = 1/3\ (U_R + U_S + U_T)$ (7.36)

$U_S = a^2\ U_1 + a\ U_2 + U_0$ $\qquad U_1 = 1/3\ (U_R + a\ U_S + a^2 U_T)$ (7.37)

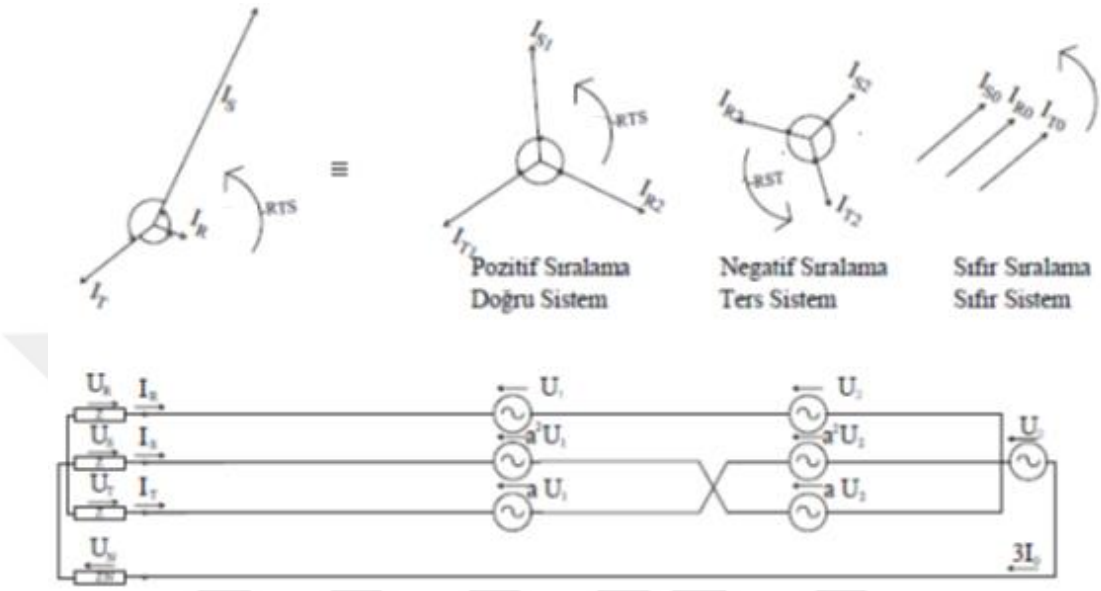
$U_T = a\ U_1 + a^2\ U_2 + U_0$ $\qquad U_2 = 1/3\ (U_R + a^2\ U_S + a\ U_T)$ (7.38)

Empedanslar;

$Z_R = Z_1 + Z_2 + Z_0$ $\qquad Z_0 = 1/3\ (Z_R + Z_S + Z_T)$ (7.39)

$Z_S = a^2\ Z_1 + a\ Z_2 + Z_0$ $\qquad Z_1 = 1/3\ (Z_R + a\ Z_S + a^2 Z_T)$ (7.40)

$Z_T = a\ Z_1 + a^2\ Z_2 + Z_0$ $\qquad Z_2 = 1/3\ (Z_R + a^2\ Z_S + a\ Z_T)$ (7.41)



Şekil 7.10. Simetrili bileşenler ve devre modeli.

Alçak gerilimde yaygın olarak kullanılan üç faz dört iletkenli bir şebekedeki dengesiz olaylar Şekil 7.10'daki model yardımıyla çözülebilir. Örneğin nötr iletkeni bulunmayan üç faz üç iletkenli sistemde sıfır bileşen ve model üzerindeki U_0 gerilim kaynağı bulunmaz.

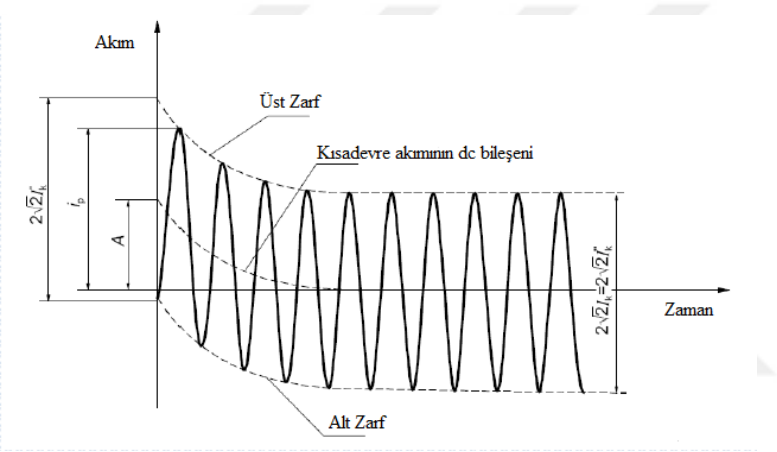
7.4. Alçak Gerilim Kısa Devre Büyüklükleri

Generatör empedansının, şebekenin empedansından daha küçük veya eşit olması durumu generatöre uzak kısa devre olarak adlandırılır. Alçak gerilim kısa devreleri generatöre uzak kısa devre olarak kabul edilirler. Generatöre uzak kısa devreler, azalan bir alternatif bileşene sahip olmayıp sabit genliklidir. Kısa devre akımın başlangıç değeri en önemli kısa devre büyüklüğü I_k" ile gösterilir ve başlangıç kısa devre akımı adı verilir. Kısa devre akımının kararlı hale geldiği büyüklük I_k ile gösterilir. Bir devre kesicinin hemen önünde hesaplanan kısa devre akımına kesme akımı (I_b: I break) adı verilir. Alçak

gerilimli şebekelerde kısa devre akımının başlangıç değeri, kararlı duruma geldiği hali ve kesme akımı birbirine eşittir (Alperöz 1987).

$$I_k'' = I_k = I_b \tag{7.42}$$

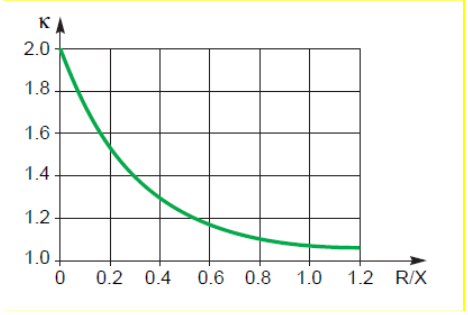
Darbe kısa devre akımı, kısa devre sırasında oluşan dinamik kuvvetlerin hesabında kullanılan önemli bir büyüklüktür. Bu kuvvetler tesisatı mekanik olarak zorladığından tüm teçhizatın bu kuvvetlere dayanması gerekir. Darbe kısa devre akımı, başlangıç kısa devre akımının genliği ile R/X oranına bağlı bir katsayı olan κ'nın çarpımından oluşur.



Şekil 7.11. Generatöre uzak kısa devre (Alperöz, 1987)

Alçak gerilimli tesislerde R < 0,3X olmadığından R ihmal edilmez ve uygun κ değeri R/X oranına göre Şekil 7.12'deki grafikten bulunur .

$$ip = \kappa \sqrt{2}.Ik'' \tag{7.43}$$



Şekil 7.12. χ'nın R/X veya R/L'ye göre değişimi (Alperöz, 1987).

İletkenlerin kısa devreye dayanma kapasiteleri ve koruma cihazlarıyla koordinasyonu; kısa devre akımının iki büyüklüğü ile değerlendirilmelidir. IEC 60909:2001 standartına göre alçak gerilim kısa devre hesaplarında "c" güvenlik katsayısı olmak üzere;
(1) Maksimum kısa devre akımı, c = 1,05
(2) Minimum kısa devre akımıdır c = 0,95.

Maksimum kısa devre akımı, genellikle alçak gerilimli devrenin başındaki ana şalterdeki üç faz simetrik kısa devresi olarak tanımlanır. Devre kesicinin kısa devre kesme kapasitesinin belirlenmesinde, kablo ve şalt tesisinin iletkenlerinin elektrodinamik dayanım kapasitesinin belirlenmesinde kullanılır. IEC 60909:2001 Standartı; bulunan en büyük kısa devre akımını %5 daha büyüterek daha güvenli tesisler kurulmasını hedeflemiştir.

Minimum kısa devre akımı ise genellikle son devrelerdeki faz toprak asimetrik kısa devresi olarak tanımlanır. Devre kesicilerin açma eğrilerinin belirlenmesinde, yüksek empedanslı enerji kaynaklarının ve uzun kabloların, devre kesicinin açma koşullarına etkileri ve dolaylı dokunmaya karşı korumadaki etkinlikleri değerlendirilir. IEC 60909:2001 Standartı; bulunan bu en küçük kısa devre akımını % 5 daha küçülterek dolaylı dokunmaya karşı daha emniyetli tarafta kalmayı hedeflemiştir (Sweeting, 2012).

7.4.1. Alçak gerilim generatörlerinde kısa devre

Generatörlerde kısa devre durumu üç evrede incelenir. Kısa devrenin başlangıcından itibaren;
1) 20 ms süren alt geçici evre (sub-transient phase), bu kısmın reaktası: x_d''
2) 0,5 s'ye kadar uzayabilen geçici evre (transient phase), bu kısmın reaktası: x_d'
3) devam eden kararlı evre (steady state phase): bu kısmın reaktası: x_d
Generatörlerin dirençleri, reaktansları yanında ihmal edilebileceğinden, empedansları ile reaktansları eşit kabul edilirler.
Bu durumda maksimum kısa devre akımı için x_d'' kullanılarak, generatörün hemen yanındaki ana şaltere ait kısa devre kesme kapasitesi bulunur;

$I_{k3}'' = 1{,}05.U_n / \sqrt{3}.\ x_d''$ (7.49)

500 ms'ye kadar sürebilen geçici evre için x_d' kullanılarak, bu şalterin termik ayarları yapılır.

$I_{k3}' = U_n / \sqrt{3}.\ x_d'$ (7.50)

Kararlı hal evresi için senkron reaktans x_d kullanılarak, bu şalterin kısa devre açma katsayısı tespit edilir.

$I_{k3} = U_n / \sqrt{3}.\ x_d$ (7.51)

7.4.2. Alçak gerilimde dengeli üç fazlı kısa devre

Alçak gerilimde dengeli üç fazlı maksimum kısa devre (7.6) denklemiyle verilmişti. Kaynak gerilimleri simetrik olduğundan ters ve sıfır bileşen ortadan kalktığından sadece doğru bileşen kalmaktadır. Buradaki eşdeğer empedans da, simetrili bileşen olarak doğru bileşene eşittir.

$I''_{k3} = 1{,}05.U_n / \sqrt{3}.Z_1$ (7.52)

I''_{k3} : Üç fazlı simetrik max. kısa devre akımı (A)

U_n : Anma gerilimi (V)

Z_1 : Doğru sistem (pozitif sıralama) empedansı (Ω)

7.4.3. Alçak gerilimde bir faz-toprak (dengesiz) teması

Alçak gerilimde en çok rastlanan hata tipi bir fazlı toprak temasıdır. Alçak gerilim şebekeleri, toprak teması durumunda akımın trafonun yıldız noktasına ulaştırma prensibine bağlı olarak geliştirilen TT ve TN şeklindeki topraklı sistemler ile toprak teması akımının trafonun yıldız noktasından yalıtılması prensibine bağlı olarak geliştirilen IT şeklinde yalıtılmış sistemler şeklinde işletilmektedir (Van Waes vd., 2000).

Topraklı alçak gerilim şebekelerinde dengesiz hatalardan bir faz toprak teması durumunda, örneğin R fazında toprak teması durumunda minimum hata akımı literatürde bir yenilik olarak simetrili bileşenlerle hesaplanabilir.

$I_R = I_{k1} = 0{,}95.\sqrt{3}.U_n /(Z_1 + Z_2 + Z_0)$

$Z_1 = Z_2$ olduğundan

$$I_R = I_{k1} = 0{,}95.\sqrt{3}.U_n /(2Z_1 + Z_0) \quad (7.53)$$

$I_R = I_{k1}$: Bir fazlı toprak teması akımı (A)

U_n : Anma gerilimi (400 V)

Z_1 : Doğru sistem (pozitif sıralama) empedansı (Ω)

Z_2 : Ters sistem (negatif sıralama) empedansı (Ω)

Z_0 : Sıfır sistem (sıfır sıralama) empedansı (Ω),

Trafo öncesindeki yüksek gerilimli şebeke ihmal edilebilir (Vivanco vd., 1998a). Trafo ve kabloların direnç ve reaktans sıfır bileşenleri (Bergen, 2000) (Alperöz, 1987) (Aydın, 2005) aşağıdaki şekilde türetilebilir;

Örneğin Dyn(5 veya 11) Trafolarda

$$R_{tr0} = R_{tr1} \qquad X_{tr0} = (0{,}85 \ldots 1)X_{tr1} \quad (7.54)$$

Kablolarda (4 iletkenli TN-C)

$$R_{h0} = R_{h1} + 3.R_{PEN} \qquad X_{h0} = 3.X_{h1} \quad (7.55)$$

Havai hatlarda (4 iletkenli TN-C)

$$R_{hh0} = R_{h1} + 3.R_{PEN} \qquad X_{hh0} = 4.X_{hh1} \quad (7.56)$$

Direnç hesabında Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği'ne göre kısa devre durumundaki 80 ^{0}C sıcaklığa göre adiyabatik düzeltme yapılmalıdır.

$$R_{t_1} = l/\chi.q \quad (7.57)$$

$$R_{80} = R_{t_1}\,(1 + \alpha(80 - t_1)) \quad (7.58)$$

$\alpha = 0{,}00393\ K^{-1}$ (bakır için sıcaklık katsayısı)

$t_1 = 20\ ^0$C için $R_{80} = 1{,}24\ R_{20}$

χ : İletken özdirenci (m/Ωmm^2)

q : İletken kesiti (mm^2)

l : İletken boyu (m)

R_{t_1} : Ortam sıcaklığındaki direnç (Ω)

R_{80} : 80 ^{0}C kısa devre sıcaklığındaki direnç (Ω)

R_{tr}, X_{tr} : Trafo sargı direnci, reaktansı (Ω)

7.4.3.1. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatası

TN-C sistemde toprak çevrimine PEN empedansı girmiştir.

$I_R = I_{k1} = 0{,}95.\sqrt{3}.U_n /(2Z_1 + Z_0)$

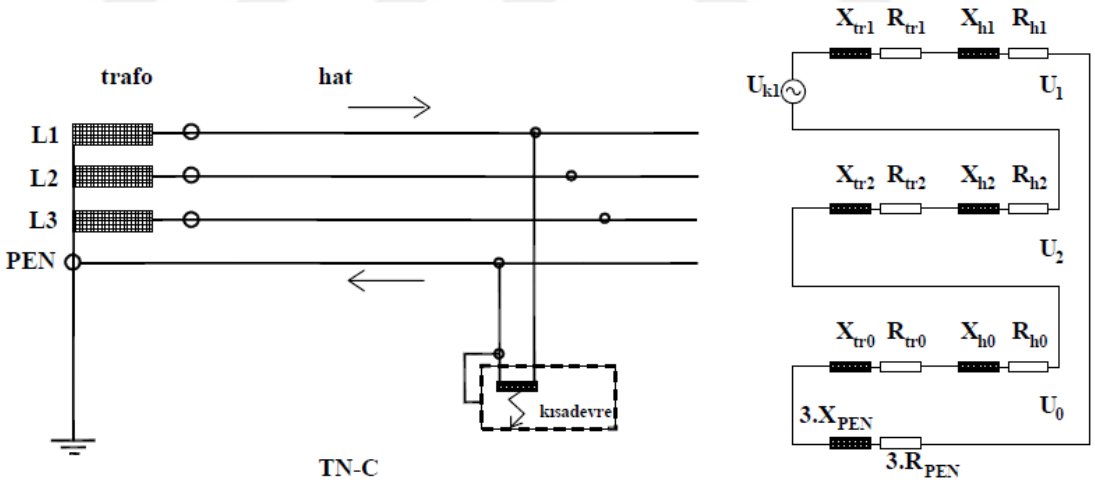
$Z_1 = (R_{tr1} + R_{h1}) + j(X_{tr1} + X_{h1})$

$Z_1 = \sqrt{(\sum R_1^2 + \sum X_1^2)}$

$Z_0 = (R_{tr0} + R_{h0}) + j(X_{tr0} + X_{h0})$

$Z_0 = (R_{tr1} + R_{h1} + 3.R_{PEN}) + j(X_{tr1} + 3.X_{h1})$

$Z_0 = \sqrt{(\sum R_0^2 + \sum X_0^2)}$



Şekil 7.13. TN-C şebekede bir fazlı toprak hatası

Örneğin, 34,5 kV/0,4 kV 400 kVA Dyn 11 trafodan TN-C 20 m, 4 × 16 mm^2 NYY kablo (3 faz + PEN) ile beslenen panodaki bir fazlı toprak hatası akımı için simetrili bileşenler yöntemi ile bulunabilir.

I_{k1} = 1,36 kA

TN sistemlerde uzun kablolarda empedans büyüyeceğinden toprak hatası akımı akımı küçülür, güvenliğin sağlanması için devre kesici açma tahkiki hesabı mutlaka yapılmalıdır. TN-C sisteminde RCD kullanılamayacağından 6.3.2.1.'de sözü edilen PEN iletkeni özelliklerine dikkat edilmedir.

7.4.3.2. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatası

TN-S sistemde toprak çevrimine PE empedansı girmiştir.

$I_R = I_{k1} = 0{,}95.\sqrt{3}.U_n /(2Z_1 + Z_0)$

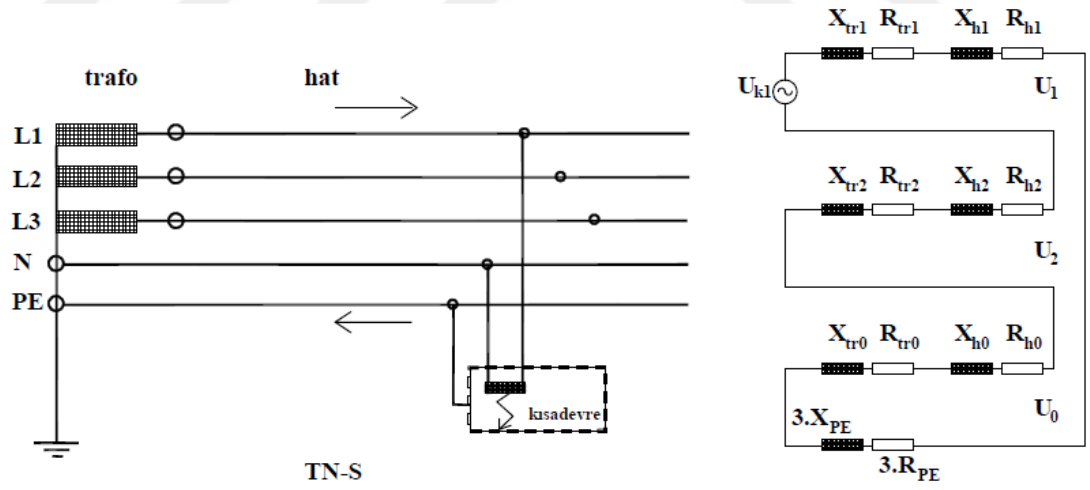
$Z_1 = (R_{tr1} + R_{h1}) + j(X_{tr1} + X_{h1})$

$Z_1 = \sqrt{(\sum R_1^2 + \sum X_1^2)}$

$Z_0 = (R_{tr0} + R_{h0}) + j(X_{tr0} + X_{h0})$

$Z_0 = (R_{tr1} + R_{h1} + 3.R_{PE}) + j(X_{tr1} + 3.X_{h1})$

$Z_0 = \sqrt{(\sum R_0^2 + \sum X_0^2)}$



Şekil 7.14. TN-S şebekede bir fazlı toprak hatası

Örneğin, 34,5 kV/0,4 kV 400 kVA Dyn 11 trafodan TN-S 20 m, 5 × 16 mm² NYY kablo (3 faz + N + PE) ile beslenen panodaki bir fazlı toprak hatası akımı PE iletkeni de 16 mm² olduğundan değişmez.

I_{k1} = 1,36 kA

TN sistemlerde 32 A'e kadar genel kullanım priz linyelerinde, 32 A'e kadar seyyar cihaz prizlerinde 30 mA RCD zorunludur. Bundan daha büyük linyelerdeki uzun kablolarda empedans büyüyeceğinden toprak hatası akımı akımı küçülür, güvenliğin sağlanması için devre kesici açma tahkiki hesabı mutlaka yapılmalıdır.

7.4.3.3. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatası

TN-CS sistemde toprak çevrimine PE ve N empedansı girmiştir.

$I_R = I_{k1} = 0{,}95.\sqrt{3}.U_n / (2Z_1 + Z_0)$

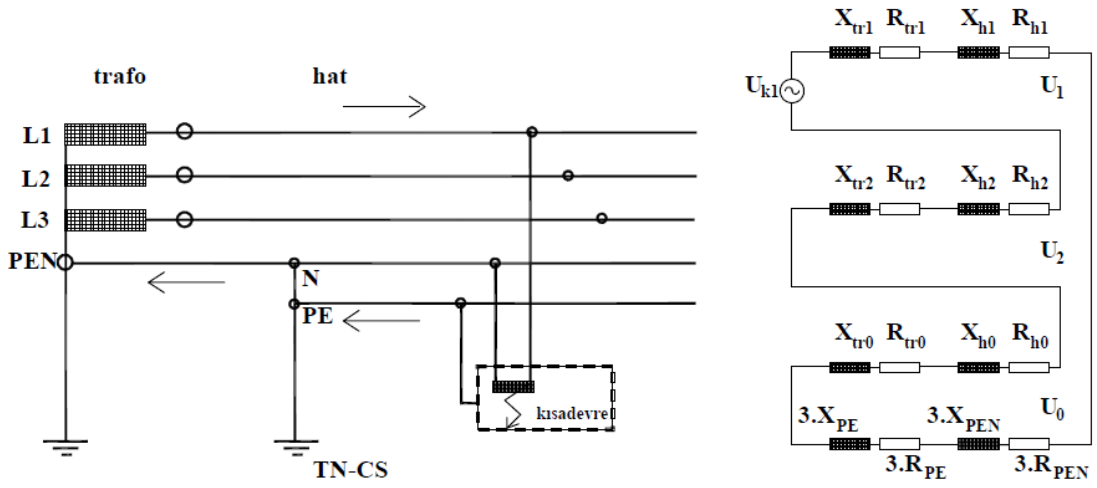
$Z_1 = (R_{tr1} + R_{h1}) + j(X_{tr1} + X_{h1})$

$Z_1 = \sqrt{(\sum R_1^2 + \sum X_1^2)}$

$Z_0 = (R_{tr0} + R_{h0}) + j(X_{tr0} + X_{h0})$

$Z_0 = (R_{tr1} + R_{h1} + 3.R_{PE} + 3.R_{PEN}) + j(X_{tr1} + 3.X_{h1})$

$Z_0 = \sqrt{(\sum R_0^2 + \sum X_0^2)}$



Şekil 7.15. TN-CS şebekede bir fazlı toprak hatası

Örneğin, 34,5 kV/0,4 kV 400 kVA Dyn 11 trafodan TN-CS'nin TN-C bölümünde 10 m, 4 × 16 mm² NYY (3 faz + PEN) ve TN-S bölümünde 10 m, 5 × 16 mm² NYY (3 faz + N + PE) ile beslenen panodaki bir fazlı toprak hatası akımı PE ve PEN iletkeni 16 mm² olduğundan değişmez.

I_{k1} = 1,36 kA

TN sistemlerde 32 A'e kadar genel kullanım priz linyelerinde, 32 A'e kadar seyyar cihaz prizlerinde 30 mA RCD zorunludur. Bundan daha büyük linyelerdeki uzun kablolarda empedans büyüyeceğinden toprak teması akımı akımı küçülür, güvenliğin sağlanması için devre kesici açma tahkiki hesabı mutlaka yapılmalıdır. Sistemin TN-C bölümünde RCD kullanılamayacağından 6.3.2.1.'de söz edilen PEN iletkeni özelliklerine dikkat edilmedir.

7.4.3.4. TT şebekede bir fazlı toprak hatası

TT sistemde toprak çevrimine R_A ve R_B direnci girmiştir.

$I_R = I_{k1} = 0{,}95.\sqrt{3}.U_n / (2Z_1 + Z_0)$

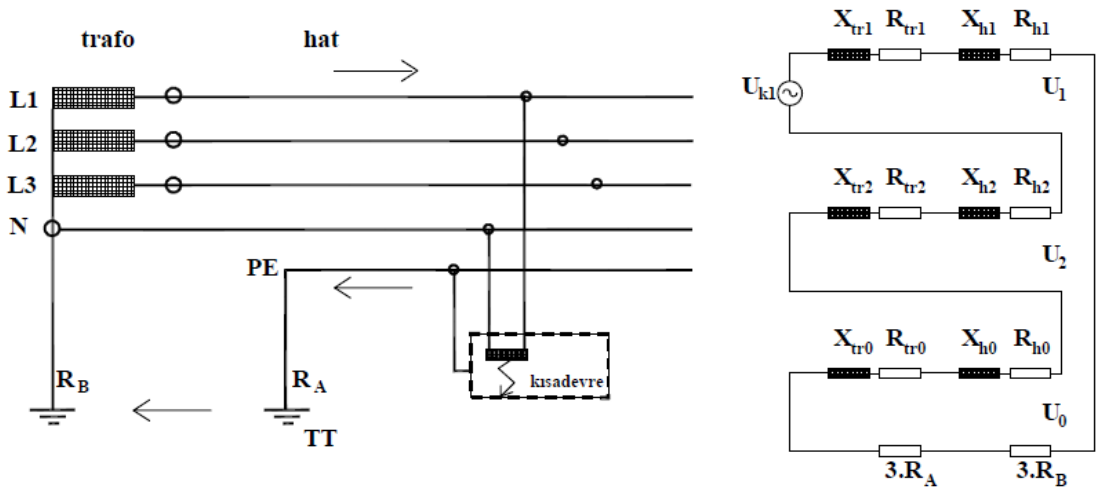
$Z_1 = (R_{tr1} + R_{h1}) + j(X_{tr1} + X_{h1})$

$Z_1 = \sqrt{(\sum R_1^2 + \sum X_1^2)}$

$Z_0 = (R_{tr0} + R_{h0}) + j(X_{tr0} + X_{h0})$

$Z_0 = (R_{tr1} + R_{h1} + 3.R_A + 3.R_B) + j(X_{tr1} + 3.X_{h1})$

$Z_0 = \sqrt{(\sum R_0^2 + \sum X_0^2)}$



Şekil 7.16. TT şebekede bir fazlı toprak hatası

R_B : İşletme topraklaması yayılma direnci (Ω)
R_A : Koruma topraklaması yayılma direnci (Ω)

Örneğin, 34,5 kV/0,4 kV 400 kVA Dyn 11 trafodan TT 20 m, 4 × 16 mm² NYY (3 faz + N) ile beslenen panodaki bir fazlı toprak hatası akımı işletme ve koruma topraklamaları R_B = 2 Ω , R_A = 3 Ω için

I_{k1} = 0,126 kA

TT şebekede bir fazlı toprak hatası akımının TN şebekeye göre oldukça düşük olduğu, dolayısıyla arklı bir kısadevredeki ark akımının da küçük olacağı görülmektedir. Bunu sebebi TT sistemlerde toprak hatası akımı dönüş yolunda R_A koruma topraklaması ve R_B işletme topraklaması dirençlerinin bulunmasıdır. Koruma ve işletme topraklaması dirençlerin çok küçük değerde olması beklenmekle birlikte, çoğu zaman ekonomik olmaz. Makul değerlerler olan R_B = 2 Ω, R_A = 3 Ω değerlerinde bile devreye 5 Ω'luk direnç girdiğinden toprak hatası akımı o kadar çok küçülmektedir ki, beslemenin otomatik kesilmesi, termik-manyetik devre kesicilerle gerçekleşememektedir. Bu durumda işletme araçlarının gövdelerinde oluşan sürekli tehlikeli gerilim, metal gövdeye dokunabilecek insanlarda elektrik çarpması maruziyeti meydana getirecektir. Ayrıca devre kesicinin açma eğrisine bağlı olarak saatlerce sürebilen bu hata akımı arklı bir kısadevreye dönüşürse, etrafta yanıcı maddelerin bulunması durumunda yangın çıkarabilecek bir enerji oluşturabilir. Bu güvensiz durumları ortadan kaldırmak için TT sistemleri, açma zamanı ve açma akımı termik-manyetik devre kesicilere göre çok daha küçük olan kaçak akım röleleriyle (RCD) desteklenmek zorundadır.

Bununla birlikte TN sistemlerde dönüş yolunda PE veya PEN iletkenlerinin çok küçük empedansları etkili olmaktadır. Çevrim emepedansı değerleri çoğunlukla 0,5 Ω civarında ölçülmektedir. Bu yüzden çevrimdeki hata akımı oldukça büyümekte böylece devre kesiciler devreyi yeterince hızlı açabilmekte, böylece oluşabilecek arklı akım da hızla kesilmiş olmaktadır.

TT sistemlerde de 32 A'e kadar genel kullanım priz linyelerinde, 32 A'e kadar seyyar cihaz prizlerinde 30 mA RCD zorunludur. Bu sistemde ayrıca bundan daha büyük linyelerde de RCD zorunludur. Seri bağlı RCD'lerde akım ve zaman bakımından selektiviteye dikkat edilmelidir.

8. ELEKTRİK ARK PATLAMASININ İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİ

Elektrik ark kazalarının oluşumuna metal tozlarının birikmesi, fare gibi kablo yalıtımını kemirmeyi seven canlılar veya enerji kesikken yapılan çalışma sırasında unutulmuş metalik aletler sebep olabilir. Bazı durumlarda klemensleri yeterince sıkılmamış sayaçlar dahi arka sebep olabilir. Ark olaylarının uygun tesisat denetlemesi yapılmayan elektrik tesislerinde oluşması daha yüksek ihtimaldir. Keza tesisteki zayıf noktaların tespit edilip bakım yapılması tesisat denetleme prosedürü ile gerçekleştirilir. Ark olayının insan vücuduna; sıcaklık (plazma) etkisi, basınç etkisi, şarapnel etkisi, ses etkisi, ultra viole UV ışını etkisi, toksin etkisi, Infrared Radiation IR etkisi olmakla beraber, çalışanlar için ciddi yaralanma ve ölüm tehlikeleri dört ana başlıkta tanımlanabilir. Bunlar;

1- Ark patlamasının ısıl etkileri,
2- Ark patlama basıncı etkileri,
3- Ark patlama sesi etkileri,
4- Ark patlama ışığının etkileri.

Yüksek enerjili ark patlaması şeklinde gelişen olayların çalışanlara vereceği zararların azaltılması bağlamında fizik ve mühendislik temelli modeller üzerinden çalışmak gereklidir.

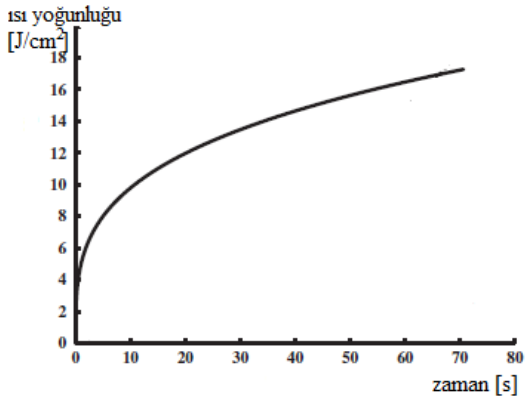
8.1. Ark Patlamasının Isıl Etkileri

8.1.1. Temel ısıl maruziyet bilgisi

Arkın ısıl etkilerinin hangi enerji seviyesinde insan dokusuna zarar verdiği ile ilgili çalışmalar 1960 başlarında Alice Stoll ve Maria Chianta tarafından incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda elde edilen “Stoll-Kriteri” eğrisi ile insan dokusundaki ısı maruziyeti derecelenmiş oldu. Buna göre ark ısı yoğunluğunun dış deri katmanı olan epidermis’i geçip alt deri katmanı olan dermisi etkilediği yanık, ikinci derece yanıktır (Tian vd., 2020).

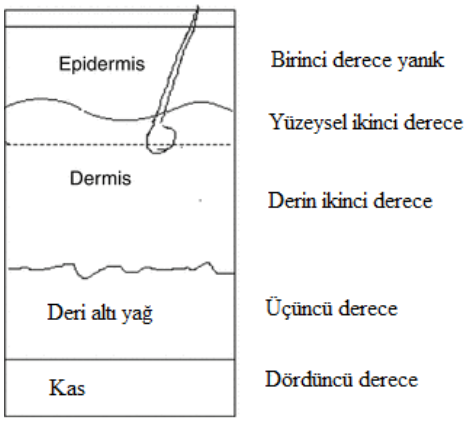
İnsan dokusunda ikinci derece yanıklara % 50 olasılıkla olarak 1,2 cal/cm^2 (5,0 J/cm^2) maruziyet özenerjisi veya ısı yoğunluğu seviyesi belirlenmiştir. Bir çalışanı ark kazasında oluşabilecek ısı yoğunluğundan yeterince korumak için kullandığı Kişisel Koruyucu Donanımın (KKD) çalışanı bu ısı yoğunluğudan koruyabilmesi gerekir.

Isı yoğunluğu hesaplamaları, mevcut maruziyet özenerjisi 1,2 cal/cm^2 (5,0 J/cm^2) olduğu ark koruma sınır mesafesini belirlemek için de kullanılır; bu sınırın dışında daha düşük bir ısı yoğunluğu izleniyorsa KKD gerekli değildir (Zhang, 2015).



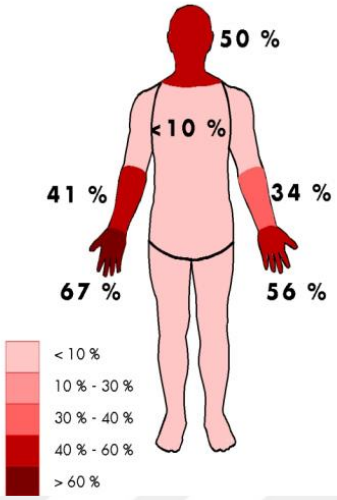
Şekil 8.1. Stoll kriteri eğrisi (Kothari ve Chakraborty 2015).

Ark kazası sebepli cilt yanıklarının dağılımı incelenirse (Issa) geniş cilt yanıklarını önlemek için ark dayanımlı kıyafetlerin giyilmesinin gerekli olduğu görülür.



Şekil 8.2. Yanık dereceleri (Paker, 2014).

Kaza sonucu oluşan yaralanmalar %67 sağ elde, %56 sol elde, %50 yüz ve boyun bölgesinde oluşmakta bunları takiple %41 sağ kol ve %34 sol kol şeklinde sıralanabilir. Buna göre sadece eldiven ve yüz koruyucu donanımın bile birçok kazada önleyici olabildiği görülür.



Şekil 8.3. Elektrik ark kazasının vücut bölgelerine göre dağılımı (Mehlem, 2016)

Maruziyet alanı olarak insan derisinin yüzey alanının belli bir oranının, örneğin ön taraf üst bölge olarak belirlenmesi gerekir. Ortalama boy ve kiloda yetişkin için vücut yüzey alanı 2 m^2 civarında olup aşağıdaki genel formülle hacme ve boya göre hesaplanabilir (Wang vd., 2004).

$$A = \sqrt{(9.\pi.V.L)} \quad (7.1)$$

$$d = m/V \quad (7.2)$$

$$A = \sqrt{(9.\pi.m.L/d)} \quad (7.3)$$

A: Vücut yüzey alanı (m^2)

MA: Ark maruziyeti için etkili alan (m^2)

V: Vücut hacmi (m^3)

L: Boy (m)

d: Yoğunluk (kg/m^3)

m: Kütle (kg)

Hacim yerine, kütle ve yoğunluğa bağlı bilinen karşılığı kullanılabilir.

İnsan vücudunun yoğunluğu 960 ila 1040 kg/m^3 arasında olup ortalama 1000 kg/m^3 alınabilir (Wang vd., 2004).

(7.1) formülünde V hacmi yerine (7.2)'den bulunan karşılığı konursa formül kilo, boy ve yoğunluğa bağlı (7.3) formülü olur;

Örneğin 80 kg ağırlığında 1,8 m boyunda bir kişinin toplam deri yüzey alanı

$A = \sqrt{[9.\pi.(80\ kg).(1{,}8\ m)/(1000\ kg/m^3)]}$

$A = 2{,}016\ m^2$

Ark maruziyeti için etkili alan ise ön taraf üst bölge olarak % 25 için

MA = % 25 . 2,016 $m^2 \cong 0{,}5\ m^2$

Çizelge 8.1. İnsan derisine ait termal özellikler (Tian vd., 2020).

Özellik	Epidermis (Dış katman)	Dermis (Alt katman)	Subcutaneous Tissue (Deri altı doku)
Yoğunluk kg/m^3	1200	1200	1000
Isıl katsayı J/[kg.K]	3598	3222	2760
Termal iletkenlik $W/[m.K]$	0,255	0,523	0,167

8.1.2. Ark patlaması ısıl etkilerinden korunma

Ark patlaması tehlikelerine karşı asıl koruma, pasif önlemlere dayanmaktadır. Ark tehlikesi küçük bir olasılık olmasına rağmen göz ardı edilemez. Kişilere mümkün olan en yüksek korumanın sağlanması arzulanır. Temel amaç bu gibi arklardan kaçınmak veya ark sürelerini ve sonuçlarını sınırlamak olmalıdır. Ark ve şarapnel etkisini elektriksel güvenlik tehlikeleri olarak kabul edererek bu ve diğer tüm güvenlik risklerinin bir risk analizi üzerinden dikkate alınması gerektiğini önerilmektedir.

8.1.2.1. Ark dayanımlı kıyafetlerde Avrupa yaklaşımı –IEC 61482-1:2019

a. Ark derecesi en yaygın olarak IEC/EN 61482-1-1/Yöntem A'ya göre belirlenen Ark Termal Performans Değeri (ATPV) ile ölçülür. ATPV, bir kumaşın, giyende ikinci derece yanıklar oluşmadan önce kumaşın dayanabileceği, yüzey

alanı başına düşen maksimum olay termal enerjisini birim cinsinden ifade eder (ör., kJ/m^2 ya da cal/cm^2).

Kumaşta yırtılarak açılmadan dolayı meydana gelen delikler ısı ya da alevin içeri girmesine sebep olur. Yırtılarak açılma eşiği enerjisi (ya da EBT) kumaş özelliğidir. Bu, giysinin yırtılarak açılmadığı, kumaşın maruz bırakıldığı en yüksek olay enerjisini temsil eder. Bir giysi kumaşının ark derecesi ATPV'sine ya da EBT'sine eşittir. Eğer giysi, onu oluşturan giysi kumaşının IEC/EN 61482-1-2/Yöntem B'ye göre ark derecesinden biraz daha yüksek bir olay enerjisine maruz bırakıldığında IEC 61482-2 görsel performans kriterlerini geçiyorsa, giysinin ark derecesi, giysiyi oluşturan kumaşın ark derecesine eşittir.

b. IEC/EN 61482-1-2'ye göre kutu testi, giysinin koruyucu performansını elektrik arkının termal etkilerine karşı ölçmek için başka bir yoldur. Bu testte kumaş, çok özel bir elektrot düzenlemesi ile çok özel olarak yönlendirilen ve ağır şekilde sınırlandırılan bir elektrik arkına maruz bırakılır.

İki sınıf bulunmaktadır: Sınıf 1 için test koşulları, arkın süresini sınırlı alanda 0,5 saniye ile sınırlayan cihazlarla korunan 4 kA'lık bir kısa devre akımı için tipik maruz kalma koşullarını simüle etmeye çalışır, bu değer Sınıf 2 için 7 kA'dır.
Bir kumaşın Sınıf 1 ya da Sınıf 2 kutu testini geçebilmesi için temel kriter, Sınıf 1 ya da Sınıf 2 testi sırasında kumaştan geçen ısının ikinci derece yanıklara sebep olmamasıdır.

Giysi testine tabi tutulduğunda giysinin IEC 61482-2'nın görsel performans testini geçmesi halinde, giysinin ark derecesi bileşen kumaşının sınıfına eşittir. Test, IEC/EN 61482-1-2'ye göre, bileşen giysi kumaşının sınıfının test koşulları altında uygulanmalıdır.

Elektrik ark koruyucu giysileri, IEC 61482-2 sertifikasyonuna aşağıdaki gerekliliklerden birini karşılamaları halinde sahip olabilirler:
Giysinin ark derecesinin en az 4 cal/cm^2 olması.
Giysinin en az Sınıf 1 ark kutu testini geçmesi gerekir.

8.1.2.2. Ark dayanımlı kıyafetlerde ABD yaklaşımı –NFPA 70E:2018- IEEE 1584:2018

NFPA standartında kıyafet kategorileri tanımları aşağıdaki şekilde yapılmıştır. Çalışma alanı, NFPA 70E'de, üzerinde çalışılacak ekipmanın etrafında geometrik olarak sabitlenen alan olarak tasarlanmıştır. Canlı olan parçalara olan yakınlık, pano derinliği gibi. Avrupa standardı, iş yerini "bir iş faaliyetinin gerçekleştirileceği, yapıldığı veya yapıldığı yer, alan veya saha" olarak tanımlar.

Çizelge 8.2. Ark etkilerine dayanıklı kıyafet kategorileri (Şimşekoğlu, 2021).

Tehlike Kategorisi	Kıyafet Tanımı	Maruziyet özenerjisi
Cat 1 Kategori 1	Uzun pantolon, uzun kollu gömlek, kulak koruyucusu ve yandan siperli güvenlik gözlüğü (Kıyafetler işlenmemiş pamuktan üretilmiş) Ark dayanımlı uzun kollu gömlek ve uzun pantolon, elektriksel yalıtkan baret, yandan siperli güvenlik gözlüğü, kulak koruyucusu, deri eldiven ve gerektiğinde deri ayakkabı	≤ 4 cal/cm^2
Cat 2 Kategori 2	Pamuklu iç çamaşırı ve kısa kollu gömlek, Ark dayanımlı uzun kollu gömlek, uzun pantolon ve tulum, yandan siperli ve elektriksel yalıtkan güvenlik gözlüğü, elektriksel yalıtkan baret, kulak koruyucusu, ark dereceli deri eldiven ve ayakkabı (ihtiyaç duyulursa)	≤ 8 cal/cm^2
Cat 3 Kategori 3	Pamuklu iç çamaşırı ve kısa kollu gömlek, Ark dayanımlı uzun kollu gömlek, uzun pantolon ve tulum, yandan siperli ve yalıtkan gözlük, elektriksel yalıtkan yüz kalkanı (siperlik), boyun koruyucu balaklava, yalıtkan ayakkabı, yalıtkan baret, kulak koruyucusu, ark dayanımlı eldiven	≤ 25 cal/cm^2
Cat 4 Kategori 4	Pamuklu iç çamaşırı ve kısa kollu gömlek, Ark dayanımlı uzun kollu gömlek, uzun pantolon, çok katmanlı tulum, yalıtkan gözlük, yalıtkan yüz kalkanı (siperlik) olan çok katmanlı başlık, yalıtkan yalıtkan ayakkabı, yalıtkan baret, kulak koruyucusu, ark dayanımlı eldiven	≤ 40 cal/cm^2

Yaklaşma mesafesi NFPA da 3 tip olarak tanımlanır, bunlar sınırlı yaklaşma, kısıtlı yaklaşma ve yasaklanmış yaklaşma (2015'den itibaren kaldırılmıştır). olarak adlandırılır.

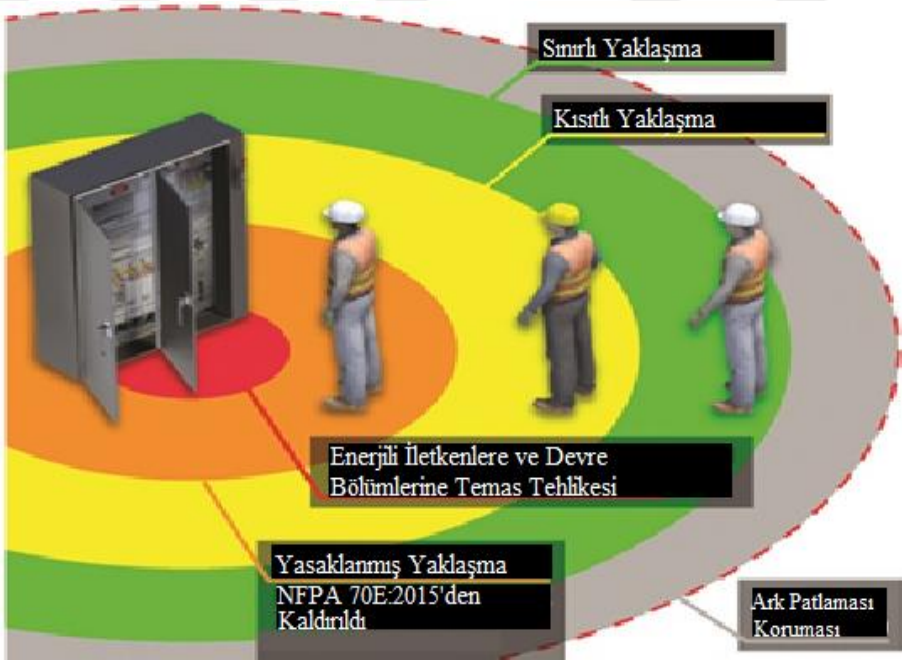
Ark patlaması koruma sınırı: Enerji kaynağından en uzakta kurulan sınırdır. Bu sınıra ulaşan ark, artık sadece 2. derece (iyileştirilebilir) yanığa sebep olabilir (1,2 cal/cm^2).

Sınırlı yaklaşma: Tesisatın gerilim altındaki bölümlerine dokunulması sonucu oluşabilecek çarpma tehlikesinin başladığı sınırdır.

Kısıtlı yaklaşma: Tesisatın gerilim altındaki bölümlerine dokunulması sonucu oluşabilecek çarpma riskinin arttığı sınırıdır.

Yasaklanmış yaklaşma: Tesisatın gerilim altındaki bölümlerine temas durumudur. 2015'den itibaren kaldırılmıştır.

NFPA standardına göre tanımlı bölgede olabilecek bir ark patlaması o bölgede olan kişiye zarar verir. NFPA bu bölgeyi maruziyet özenerjisi hesaplarını yaparak ark değerlerini vermektedir.



Şekil 8.5. NFPA 70E'ye göre tehlikeli bölge yaklaşma sınırları (www.electricalindia.in, 2018)

Un = 400 V

1 kWs = 1 kJ

1 kJ = 238,84 cal

1 m^2 = 10^4 cm^2

Kumaş performası kp = 10 cal/m^2

IEC Class 1 4 kA 0,5s……135 kJ/m^2 3,2 cal/cm^2 NFPA Cat 1

IEC Class 2 7 kA 0,5s……423 kJ/m^2 10,1 cal/cm^2 NFPA Cat 3

8.2. Ark Patlamasının Basınç Etkileri

8.2.1. Temel basınç maruziyeti bilgisi

Ark patlaması olayından kaynaklanan basınç dalgaları çalışanlar için önemli riskler oluşturabilir. Ark patlamasının oluşturacağı basınç etkisi; Ralph Lee tarafından ark akımına ve mesafeye bağlı olarak aşağıdaki şekilde formüle etmiştir (Kabelo, 2013).

$$\Delta p(\text{lb/ft}^2) = \frac{11{,}58 \times I_a}{D^{0,9}} \quad (7.4)$$

Δp: Ark patlaması basıncı: (lb/ft^2)

I_a: Ark akımı (kA)

D: Ark mesafesi (ft)

lb/ft^2 birimi SI birim sistemine uyarlanırsa;

1 lb-f = 4,4482 N

1 ft = 0,3048 m

1 lb/ft^2 = 4,4482 N/(0,3048 m)^2

1 lb/ft^2 = 47,88 N/m^2 = 0,04788 kPa

$$\Delta p(kPa) = \frac{11{,}58 \times 0{,}04788 \times I_a}{D^{0,9} \times 2{,}913}$$

$$\Delta p = \frac{0{,}1903 \times I_a}{D^{0,9}} \quad (7.5)$$

Δp: Ark patlaması basıncı: (kPa)

I_{ark}: Ark akımı (kA)

D: Ark mesafesi (m)

Bu konu ile ilgili araştırma yapan Drouet ve Nadeau deneysel sonuçlardan istatiksel olarak oluşturdukları ark patlamasının yaratacağı ark gücü ve buna bağlı basınç formüllerini geliştirdiler (Babrauskas, 2017).

$$P_{ark} = 2.\pi.f.Vrms.Irms \quad (7.6)$$

Yüksek güçlü arklar için

$$\Delta p = \frac{1{,}0\times10^{-6}}{r} P_{ark}{}^{0{,}9} \quad (7.7)$$

Düşük güçlü arklar için

$$\Delta p = \frac{1{,}3\times10^{-6}}{r} P_{ark} \quad (7.8)$$

Bu konuda araştırma yapan diğer araştırmacı Baker, Drouet ve Nadeau'nun deneysel sonuçlardan istatiksel olarak oluşturdukları düşük güçlü ve büyük güçlü ark formüllerini kapsayan tek teorik formülü geliştirmiştir (Babrauskas, 2017).

$$\Delta p = \frac{0{,}27\times10^{-6}}{r} P_{ark} \quad (7.9)$$

Δp: Ark patlamasının yaratacağı basınç (Pa)

P_{ark}: Ark gücü

f: Şebeke frekansı (50 Hz)

V_{rms}: Şebeke gerilimi (400 V)

I_{rms}: Ark akımı (A)

r: Mesafe (m)

Örneğin: 2000 kVA (34,5/0,4 kV) trafo alçak gerilim ana şalterinde hesaplanan kısa devre akımı 35,86 kA için

Ark akımı; IEEE 1584 veya NFPA 70E yöntemlerinden biri olan Annex C ile

I_{ark} = 18,35 kA

$D = r$ = 0,457 m mesafesindeki basınç için Baker (7.9) formülüne göre

Δp = 1,362 kPa

Çizelge 8.3. Yüksek basıncın binada meydana getirebileceği hasarlar (Layık 2016).

Basınç (kPa)	Etki
0,20571	Büyük ve çatlak pencereler kırılır
0,27428	Güçlü bir ses çıkar
1,02855	Cam kırılması için sınır
4,79990	Bina içinde küçük hasarlar
6,85700	Binalarda iç duvarlarında yıkılma
13,7140	Demirsiz beton bina çökebilir
15,7711	Ciddi yapısal hasarlar için alt sınır
20,5710	Çelik yapılı binalarda eğilme oluşabilir

8.2.2. Ark patlaması basıncından korunma

Elektriksel ark patlamalarının enerji bilançosunda, elektrik enerjisi dışında termokimyasal enerjinin de oluştuğu görülmektedir. Ayrışan azot N_2 ve oksijen O_2 atomlarından O_3 ve NO_x üretilerek ilave enerji oluşumuna sebep olabilmektedir. Aachen Üniversitesinde yapılan araştırmalarda ark enerji bilançosu aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir (Babrauskas, 2017);

$$P_{elektriksel} + P_{kimyasal} = Pp + Pr + Pm \quad (7.10)$$

$P_{elektriksel}$: Ark'ın elektriksel gücü,

$P_{kimyasal}$: Kimyasal veya iyonizasyon yoluyla üretilen güç,

Pp : Genleşen gaz hacminin oluşturduğu basınçla oluşan ısının gücü,

Pr : Işımayla oluşan güç,

Pm : Metal elektrodu ısıtmak / eritmek / buharlaştırmak için verilen güç.

Genelleştirilmiş patlama basıncının hesaplanmasında, mühimmat patlaması veya ATEX patlaması gibi çeşitli tipte patlayıcı maddelerin oluşturacağı basınç etkileri TNT patlaması eşdeğerlerine dönüştürülmektedir. Böylece patlayıcıdan bağımsız olarak sadece oluşacak basıncın etkilerine ilişkin patlama parametreleri deneysel sonuçlardan istatistiksel yöntemlerle formüller türetilmiştir (Bajić vd., 2009). Termokimyasal patlayıcıların TNT eşdeğerleri sayesinde tüm patlama olaylarına ilişkin genel değerlendirme yapılarak benzer basınç oluşturan patlamaların insan vücuduna etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiş, patlama basıncının şiddeti (Pa) ve patlama noktasına

uzaklığına (m) bağlı olarak insan vücudu maruziyet olasılıkları probit regresyon analizi ile formüle edilmiştir (Layık, 2016).

$$Y = K_1 + K_2.ln(\Delta p) \quad (7.11)$$

Y: Probit olasılık değişkeni

K_1, K_2: Probit parametreleri

Δp : Değişken, Ark patlaması tepe basıncı (Pa)

J: Etki (Ns/m^2 Pa.s-Paskal.saniye) Dinamik viskosite

Çizelge 8.4. Patlamaların yaralanma/hasar olasılığı için probit parametreleri (Crowl, 2011).

Patlama basıncından yaralanma şekli	**Neden olan değişken**	**Probit parametreleri**	
		K_1	**K_2**
Akciğer kanamasından ölüm	Δp	-77,1	6,91
Kulak zarı yırtılması	Δp	-15,6	1,93
Etkiden dolayı ölüm	J	-46,1	4,82
Etkiden dolayı yaralanma	J	-39,1	4,42
Uçan parçalardan yaralanma (şarapnel parçaları)	J	-27,1	4,26
Yapısal hasarlar	Δp	-23,8	2,92
Cam kırılması	Δp	-18,1	2,79

Örneğin; 45 kPa basıncın kulak zarını patlatma olasılığı için;

Δp = 45000 Pa basıncının probit olasılık değişkeni (7.11) formülünden

Y = -15,6 + 1,93.ln(45000) = 5,08

Çizelge 8.5. Probit değişkenden % olasılığa geçiş tablosu(Crowl, 2011).

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
%	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
99,00	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Çizelge 8.5 üzerinde 5,08 sayısı solda 50'yi üstte 3'ü işaret ettiğinden olduğundan bu basınçta kulak zarı patlama olasılığı %53'tür.

Örneğin, şarapnel parçaları yaralanmasının etki (J) hesabında ise basınca maruziyetin süresi de hesaba katılmaktadır.

Örneğin 19 kPa basınç 0,15 saniye sürdüğünde
J = 0,15 s × 19000 Pa = 2850 Pa.s

Şarapnel parçalarına maruz kalma probit olasılık değişkeni;
Y = -27,1 + 4,26.ln(2850) = 6,79

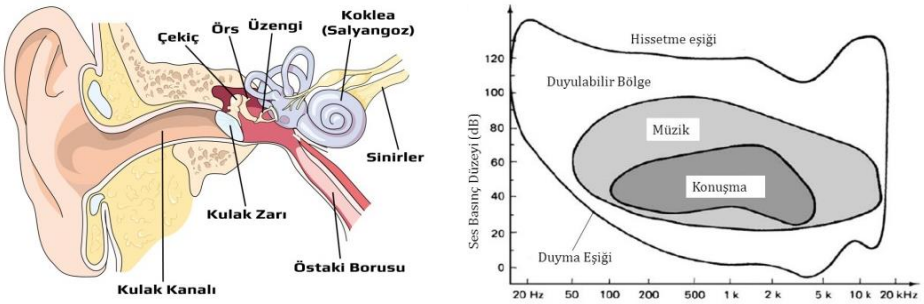
Çizelge 8.5 üzerinde 6,79 sayısı solda 90'ı üstte 6-7 arasını işaret ettiğinden bu basınçta ve sürede şarapnel parçalarına maruz kalma olasılığı %96,5 dir.

8.3. Ark Patlamasının Ses Etkileri

8.3.1. Temel gürültü maruziyeti bilgisi

Ses tanım olarak işitsel duyarlığa sebep olabilen basınç değişiklikleridir. Sesin iletilmesi için hava, sıvı veya katı bir fiziksel ortam gereklidir. Ses hızı katılarda yaklaşık olarak 5000 m/s, suda 1453 m/s, havada 340 m/s dir. Duyulabilir ses frekansları 20 Hz ila 2000 Hz arasındadır. 20 Hz'in altındaki frekanslara infrasonik, 2000 Hz'in üzerindeki frekanslara ultrasonik denir.

Sound power, ses gücü (W): Bir ses kaynağının ses üretme gücüdür. Etkilenen noktaların konumundan bağımsızdır.



Şekil 8.6. Kulak yapısı ve işitme sınırları (www.sound2020.org, 2020)

Sound intensity, ses yoğunluğu (W/m^2): Üretilen sesin birim alandaki yoğunluğudur.

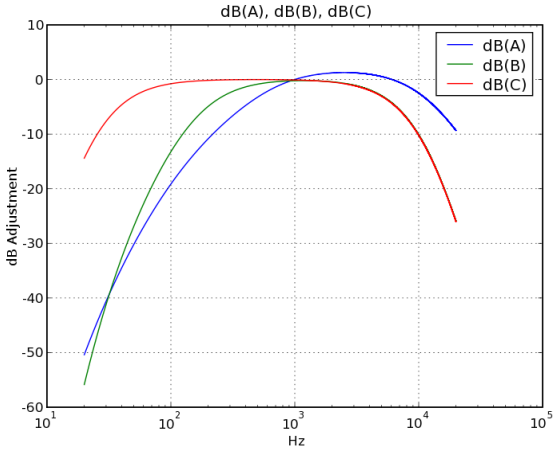
Sound pressure, ses basıncı (Pa): Bir ses kaynağının, belirli uzaklıktaki bir noktayı etkileme seviyesini gösterir ve skaler bir niceliktir. İnsan kulağı 20 µPa ila 200 Pa arasındaki sesleri duyabilir. 20 µPa insan kulağının işitme eşiği, 200 Pa ağrı eşiğidir.

Gürültü maruziyeti sınır değeri, referans ses basıncına veya referans ses gücüne oranlanıp logaritması alınarak desibel (dB) birimiyle verilmektedir. Keza 20 µPa ila 200 Pa arasındaki skalanın genişliğinden dolayı logaritmik ölçek kullanmak gerekmektedir.

Ses gücü için $dB = 10 \log(W/W_{ref})$, ses basıncı için $dB = 10 \log(Pa/Pa_{ref})$

Sahada 3 tip skala kullanılmaktadır.
A skalası insan kulağı işitme eğrisi,
B skalası telefon şirketleri tarafından kullanılan eğri,
C skalası ise tüm seslerde kullanan eğridir.
LCpeak - C skalası, 85 dB üzerindeki ses basıncı seviyelerini ölçmek için kullanılır.

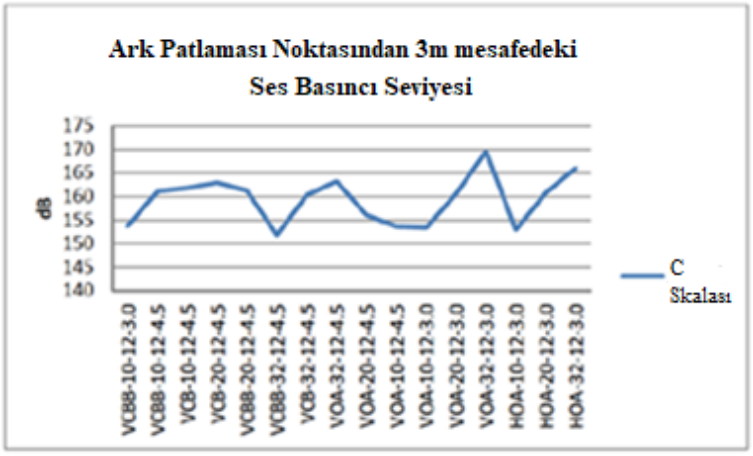
Çalışanların gürültü ile ilgili risklerden korunmalarına dair yönetmeliğe göre;
Üst sınırı ; LEX 8h; 87 dB(A) , P_{peak}: 200 Pa (140 dB(C) ref: 20 µPa)
En yüksek; LEX 8h; 85 dB(A) , P_{peak}: 140 Pa (137 dB(C) ref: 20 µPa)
En düşük ; LEX 8h; 80 dB(A) , P_{peak}: 112 Pa (135 dB(C) ref: 20 µPa)



Şekil 8.7. Ses dB skalaları (Tatic vd., 2011)

8.3.2. Kulağın ark patlaması sesinden korunması

Ark patlaması, normal seslere göre çok daha yüksek bir gürültü üretir. Lee; ark sesinin topçu ateşi sesine benzediğini söylemişti. Ark sırasında yapılan ölçümlerde 29 kA'e kadar ark akımlarında 163 dB'i aşan gürültü şiddetleri ölçülmüştür (Babrauskas, 2017). İnsan kulağıdaki hassas yapılar, uygun kulak koruyucu donanım kullanılmadan yüksek gürültü şiddetine maruz kalırsa zarar görebilir. Bu yüzden ark patlamasının gürültü korumasına ilişkin EN 352 serisi standartlara uygun KKD gereksinimlerinin belirlenmesi önemlidir.



Şekil 8.8. Ses basıncı etkileri (Lee, 2012)

Eksenlerdeki kodların açıklamaları;

VCBB-10-12-3.0 için ses basıncı seviyesi 3 m uzaklıkta:154 dB

VCBB: bara düzeni, (V: vertical, C: cubic, B: box, B: bar)

10: kısa devre akımını (kA),

12: test süresini (12 periyot-200 ms, 60-Hz)

3.0: bara aralığı (inç) belirtir (7,62 cm).



Şekil 8.9. Kulak koruyucu (www.ehs.cornell.edu, 2022)

8.4. Ark Patlamasının Işık Etkileri

8.4.1. Temel ışık maruziyeti bilgisi

Işık tanım olarak; Görsel duyarlığa sebep olabilen radyasyon enerjisidir. Işığı iletilmesi için hava, sıvı veya katı bir fiziksel ortam gerekli değildir, boşlukta ilerleyebilir.

Işık hızı c= 299.792.458 m/s dir. Işığın dalga boyu ile frekansı arasında aşağıdaki bağıntı vardır.

$$\lambda = c/f \qquad (7.12)$$

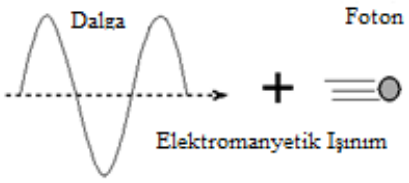
λ: dalga boyu

f: frekans

c: ışık hızı

Işık dalga özelliği gösteren fotonlardan oluşmuştur. Yani hem dalgadır hem de parçacık. Bu ikilik fikrinin temeli 17. Yüzyılda Christian Huygens ve Isaac Newton arasında ışık ve maddenin doğası hakkındaki; ışık dalgadan mı, parçacıktan mı oluşur, şeklindeki tartışmalarına dayanır.

Max Planck, Albert Einstein, Louis de Broglie, Arthur Compton, Neils Bohr ve diğer birçok bilim adamının çalışmaları sayesinde şu andaki bilimsel teori olan ışığın hem parçacık hem de dalga olduğu teorisi geçerlidir.



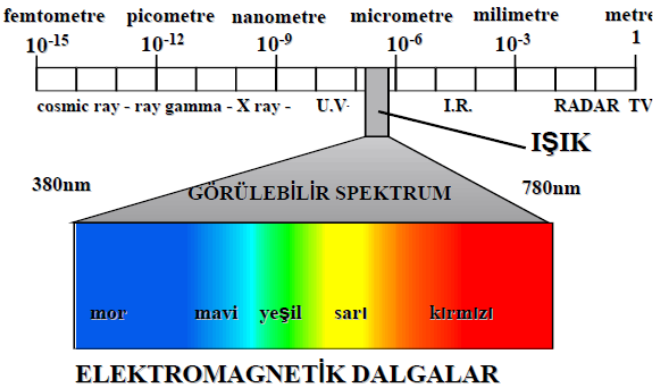
Şekil 8.10. Işık dalga ve foton özelliği

Görülebilir ışığın dalga boyları 380 nm ila 780 nm arasındadır. 380 nm'nin altındaki dalga boylarına ultraviolet, 780 nm'nin üzerindeki dalga boylarına infrared denir.

Luminous flux, Işık Akısı, Φ (lümen-lm) : Bir ışık kaynağının birim zamanda yaydığı toplam ışık miktarıdır. Gözün spektral duyarlık eğrisine göre değerlendirilir.

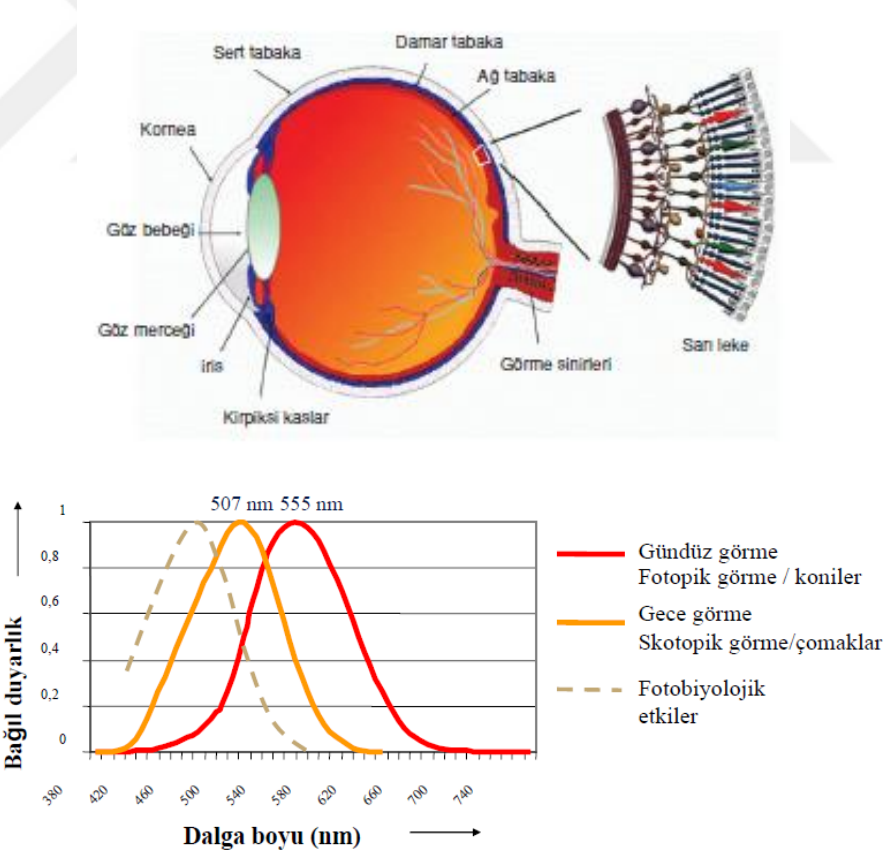
Luminous intensity, Işık Yoğunluğu I (kandela-cd = lm/str) : Belli bir doğrultuda birim solid uzaysal açı (str) içinden yayılan ışık yoğunluğudur.
Illuminance, Aydınlık Düzeyi, E (lüks-lx = lm/m^2): Bir yüzeyin birim alanına düşen ışık yoğunluğudur. Aydınlatılan alanda bulunan cisimlere bağlı değildir.

Reflectance, Parıltı L (cd/m^2): Aydınlatılan bir yüzeyin birim alanından göze doğru yansıyan ışık yoğunluğudur. Aydınlatılan alanda bulunan cisimlere bağlıdır. Cisimler parıltıları ile görülür.



Şekil 8.11. Görülebilir spektrum (www. revisionscience.com, 2022)

Göz yapısındaki fotoreseptör hücre; retinada bulunan ve ışığı elektrik sinyallerine dönüştürebilen özelleşmiş bir nöron tipidir. Hücrede bulunan fotoreseptör proteinler fotonları soğurarak hücrenin zar potansiyelinde bir değişiklik meydana getirirler. İki klasik fotoreseptör hücre tipi koni ve çomak hücreleridir.

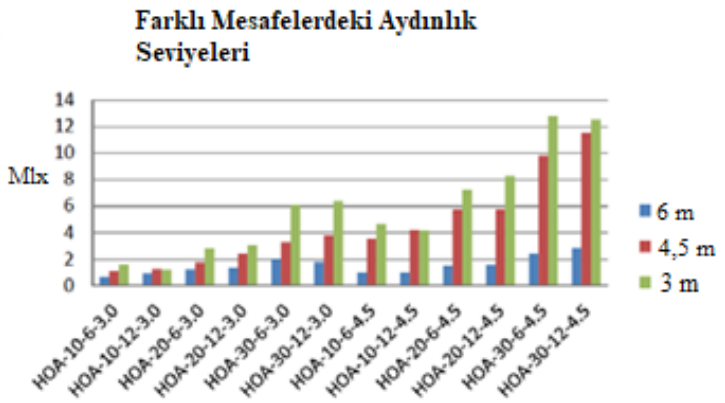


Şekil 8.12. Gözün yapısı ve spektral duyarlık (www.studyingdiagrams.com, 2022)

8.4.2. Gözün ark parlamasından korunması

Ark parlaması, normal aydınlatmaya göre çok daha parlak bir ışık üretir. Örneğin bir çalışma ofisinde 500 lx aydınlatma şiddeti ölçülürken, fotoğraf makinası flaşı 45 cm mesafede 234.000 lx, güneş ışığı ise her mesafede 100.000 lx'dür. Ark patlamasında 1.000.000 lx oluşabilir. İnsan gözündeki retina ve kornea gibi hassas yapılar, uygun göz koruyucu donanım kullanılmadan yüksek aydınlık şiddetine maruz kalırsa zarar görebilir. Örneğin retina hasarı için 100 ms'de 6,83 Megalux (Mlx) yeterlidir (Yanoff).

Göz koruması için kullanılan klasik UV emniyet gözlükleri ark patlaması sırasında yayılan yüksek şiddetli görünür ışıktan korumaz. Sadece UV radyasyonunu engelleyebilir. Bu yüzden ark parlamasının aydınlık şiddetinin doğru tahmini ve buna göre görünür ışık korumasına ilişkin KKD gereksinimlerinin belirlenmesi önemlidir.



Şekil 8.13. Ark parlamasının değişik uzaklıktaki ölçüm sonuçları(Lee, 2012)

Eksenlerdeki kodların açıklamaları;

HOA-10-12-3.0 için aydınlık seviyesi 3 m uzaklıkta: 1,75 Mlx
HOA: bara düzeni, (H: Hortizonal, O: Open, A: Air)
10: kısa devre akımını (kA),
12: test süresini (12 periyot-200 ms, 60-Hz)
3.0: bara aralığı (inç) belirtir. (7,62 cm)

Flaş körlüğü: retina fazla termal enerji aldığında geçici bir görme kaybıdır.

Görme keskinliğinde azalma: Retinanın çubukları ve konileri içindeki parlama, görüntü ve fotokimyasal maddelerin ağartılmasıdır.

Parlama: Görüşü engelleyen aşırı ışıktır; ışık kaynağı artık mevcut olmadığında bile, yoğun ışıktan gelen sktomatik parlama retinanın duyarlılığında bir azalmaya neden olur.



Şekil 8.14. Ark parlaması korumalı face shield KKD'ler (www.ampqes.com, 2022)

9. ARK PATLAMASI ANALİZİ

Ark patlaması analizi elektrikli ekipmanlar üzerinde yapılacak canlı çalışmalarda yaralanma ve ölümleri en aza indirmek için yapılan çalışmanın genel adıdır. Elektrikli sistemlerde güvenli çalışma sağlamanın kurallarını düzenleyen bir çok standart mevcuttur. Örneğin Avrupa standardı EN 50110-1'de "Elektrik Tesislerinin İşletilmesi" standartı elektrik tesisatlarında güvenli çalışma ve çalışma aktivitelerine ilişkin gereklilikleri ortaya koymaktadır. Ark tehlikesi konusu EN 50110-1:2013 ek B6 maddesinde ilk olarak tanımlanmıştır. Zamana bağlı olarak değişen fiziksel durumlar çeşitli matematiksel modellerle ifade edilebilmektedir. Keza mühendislik problemleri de fiziksel durumların analizinde ortaya çıkmaktadır. Genel olarak mühendislik problemlerin çözümünde fiziksel durumların matematiksel modelleri oluşturulur. Bu matematiksel modellerin yapısı, fiziksel durumu tanımlayan kısmi türevli (diferansiyel) denklemlerdir. Özellikle başlangıç ve sınır değerlerinin belirlendiği diferansiyel denklemler birçok mühendislik probleminin çözümünde etkili olur. Fiziksel durumu tam olarak açıklayan diferansiyel denklemlerin tam (analitik) çözümü oldukça karmaşık olduğundan yeterli hassasiyette sayısal yöntemlerin kullanılması tolerans sınırları içinde yeterli yaklaşıklıkla işleri kolaylaştırmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ark maruziyet özenerjisi ve etki sınırı hesaplarının yanı sıra, basınç dağlımı, ses dağılımı, ışık dağılımı gibi birçok fiziksel parametrenin tek tek veya bir arada incelendiği yayınlar mevcuttur (Intwari vd., 2017), (Lindmayer vd., 1995), (Rondot vd., 2014), (Li vd., 2014), (Shin vd., 2000), (Chévrier vd., 1996), (Barrachina, 2007) ancak mevcut durumda uluslararası standartalar amprik formülere yer vermektedir.

Ark patlaması (Arc Flash) analizinin amacı ve kapsamı, belirtilen arıza enerjisinin tesis içindeki panolar ve elektrik sistemi için hesaplanması, risklerin belirlenerek manevra ve bakım personelinin, olayın yakınından geçecek insanların ve tesisin güvenliği açısından alınması gereken önlemlerin bulunmasıdır. Analizde tesisin elektriksel açıdan olası en yüksek arıza değerleri bulunarak, bu arıza değerlerine şalter ve rölelerin nasıl cevap vereceğine bağlı

olarak, ark maruziyet özenerjisi (incident energy) ve ark etki mesafeleri tahmin edilmektedir. Ark etki sınırı, bir anlamda canlı iletkenlere yaklaşma mesafesi Avrupa standartlarlarında D_V çarpılma mesafesi olarak tanımlanmakta, D_L için ise canlı bölüme hiçbir şekilde yaklaşılmaması gereken mesafeyi ifade etmektedir. İtalyan CEI 11-27 standartı bu mesafeye D_{A9} adı vermiştir. Ark analizini inceleyen, Avrupada Alman hukuki kaza sigortası kurumu DGUV standartlarında, ABD'de ise NFPA ve IEEE standartlarında ark analizinin amprik formüllerini, çeşitli konfigurasyonlarda defalarca yapılan ark deneylerinin sonucunda vermektedir.

9.1. DGUV Ark Akımı Ve Maruziyet Özenerjisi Hesaplama Yöntemi

Ark maruziyet özenerjisi hesap yöntemi Alman hukuki kaza sigortası kurumu (DGUV) tarafından yayılanan DGUV-I 203-077:2020 (Gesetzliche vd., 2020) dokümanındaki Dr. Holger Schau ve ark. tarafından geliştirilen formüller olup uluslararası sosyal sigortalar birliği (ISSA) tarafından da onaylanmıştır.

DGUV yönteminde alçak gerilimdeki ark akımı, kendini oluşturan kısa devre akımının yarısı kadardır yani arkın kısa devre akımını sınırlama oranı 0,5'dir.

$$I_{kLB} = 0{,}5.\, I''_{k-min} \tag{9.1}$$

$$W_{LB} = k_p.\, S''_k.\, t_k \tag{9.2}$$

$$S''_k = \sqrt{3}.\, U_{Nn}.\, I''_{k-max} \tag{9.3}$$

$$k_{pmax}: \frac{0{,}29}{(\frac{R}{X})^{0{,}17}} \tag{9.4}$$

U_{Nn}: Nominal gerilim

S''_k: Kısa devre gücü

t_k: Ark yanma süresi

k_p: Empedansa ve iletkenler arası mesafeye bağlı katsayı

W_{LB}: Ark enerjisi, $k_{pmax}\ için\ W_{LBP}$

I_{kLB}: Ark akımı

I''_{k-min}: Üç fazlı simetrik min. kısa devre akımı (kA)

I''_{k-max} : Üç fazlı simetrik max. kısa devre akımı (kA)

Çalışma mesafesi olarak personelin üst gövdesine olan mesafe a = 300 mm kabul edilebilir. Ayrıca pano geometrisine göre k_T katsayısı ve çalışma mesafesi a ≥ 300 mm için eşdeğer bir ark enerjisi $W_{LB_{PS}}$ belirlenebilir.

$$W_{LBPS}: k_T . \left(\frac{a}{300mm}\right)^2 . W_{LBP} \quad (9.5)$$

W_{LBPS}: a > 300 mm çalışma mesafeleri için ark enerjisi.

k_T : Pano geometrisi katsayısı, küçük hacimli, 1,6 l panolar için 1 (önü açık, diğer kenarlar kapalı), daha büyük hacimli panolar için 1,5…1,9 (sadece arka taraf kapalı), tamamen açık 2,4.

9.2. Ralph Lee; Ark Gücü ve Ark Etki Mesafesi Hesaplama Yöntemi

Burada kullanılan formüller NFPA 70E:2018'de de yayınlanan, IEEE Trans'taki Ralph Lee'nin "The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Flash Burns" makalesinden alınmıştır (NFPA 2018). Endüstriyel Uygulamalar. Hesaplamalar, en kötü durum ark empedansına dayanmaktadır. Hesap yöntemindeki formüllerin özü aynı kalmak üzere birimler ve semboller SI uluslararası birim sistemine göre yeniden düzenlenmiştir.

9.2.1. Trafo geçit izolatöründe oluşan üç fazlı simetrik kısa devre akımı hesabı

$$I_{sc} = I_k^{"} = \frac{S_n}{\sqrt{3}.U_n.u_k} \quad (9.6)$$

$I_k^{"}$ *:* Üç fazlı simetrik kısa devre akımı (kA)

S_n, U_n, u_k : Trafonun (gücü MVA, gerilimi kV, bağıl kısa devre gerilimi) anma değerleridir.

9.2.2. Trafo geçit izolatöründe oluşan üç fazlı ark gücü hesabı

$$P = \sqrt{3}.U_n.I_k^{"}.(0{,}707)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2}.U_n.I_k^{"} \quad (9.7)$$

P: Ark gücü (MW)

9.2.3. Ark etki mesafesi hesabı

$$D_c = 0{,}3048\sqrt{(2{,}65.S_k^{"}.t)} \quad \text{(m)} \tag{9.8}$$

$$D_c = 0{,}3048\sqrt{(53.S_n.t)} \quad \text{(m)} \tag{9.9}$$

D_c: Ark etki mesafesi; 80 °C cilt sıcaklığı oluşturan tedavi edilebilir yanık oluşturabilen mesafe (m)

$S_k^{"}$: Kısa devre gücü (MVA)

S_n: Anma gücü (MVA)

t: Ark maruziyet süresi (s)

1 ft = 0.3048 m

Eriyen telli sigortanın temizleme süresi, ark hatası akımı sigortanın akım sınırlama aralığındaysa yaklaşık 1/4 çevrim (50 Hz) veya 5 ms'dir.

5 kV ve 15 kV devre kesicinin temizleme süresi, ani açma fonksiyonu kuruluysa yaklaşık 120 ms veya 6 periyottur (50 Hz).

6 periyot = [yaklaşık 2 periyot gerçek kesici açma süresi] + [yaklaşık 1,74 periyotluk röle çalışma süresi] + [2 periyot güvenlik marjı]

Bir zaman geciktirme fonksiyonu kuruluysa ve çalışıyorsa ek süre eklenmelidir.

Örneğin; 1000 kVA 34,5 kV/0,4 kV u_k :%5,5 olan trafoda AG ana dağıtım panosundaki üç fazlı simetrik kısa devre akımı;

$I_k^{"}$ =17 kA

Hatanın temizlenme süresi;

t = 6 periyot (50 Hz), 120 ms.

Ark patlaması etki mesafesi tipik sınır

D_c = 1,2 m'dir.

9.3. Doughty Neal Makalesi; Maruziyet Özenerjisi (Incident Energy) Hesaplama Yöntemi

Burada kullanılan formüller, IEEE'de yayınlanan R.L. Doughty, T.E. Neal ve H.L. Floyd'un "Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems." makalesinden alınmıştır. Hesap

yöntemindeki formüllerin özü aynı kalmak üzere birimler ve semboller SI uluslararası birim sistemine göre yeniden düzenlenmiştir.

Bu yöntem alçak gerimde (< 600 V seviyesinde) üç fazlı kısa devre sonucu oluşan arkın maruziyet özenerjisini tahmin etmek için kullanılabilir. Bu denklemlerin sonuçları her durumda en kötü durumu temsil etmeyebilir.

- Şalter kısa devre kesme kapasitesi akımı Icu ve arkın kendi kendine devam edeceği minimum arıza akımı kullanılmalıdır. Arkın kendi kendine devam edeceği minimum arıza akımının mevcut kısa devre akımın % 38'i olarak kabul edilebileceği 480 V kullanan endüstriyel tesislerde belirlenmiştir. En yüksek maruziyet özenerjisi, aşırı akım cihazının açılmasının saniyeler veya dakikalar alabileceği bu düşük akımlarda meydana gelebilir.

- Maksimum kısa devre akımındaki ve arkın kendini sürdüreceği minimum arıza akımındaki şalter açma zamanı (arıza temizleme süresi) kullanılmalıdır.

- Olası arkın çalışana olan uzaklığı kullanılmalıdır.

Ark maruziyet özenerjisi hesaplamaları için kullanılan tipik çalışma mesafeleri:
(1) < 600 V MCC ve panolar; 45,5 cm
(2) < 600 V ana dağıtım şalteri; 61,0 cm
(3) > 600 V ana dağıtım şalteri; 91,0 cm

9.3.1. Açık havada ark maruziyet özenerjisi (incident energy) hesabı;

$$E_{MA}=32740{,}4{D_A}^{-1{,}9593}t_A\begin{bmatrix}0{,}0016I_k^2\\-0{,}0076I_k\\+0{,}8938\end{bmatrix} \quad (9.10)$$

E_{MA}: Maksimum açık hava ark maruziyet özenerjisi (cal/cm^2)
D_A: Personel çalışma mesafesi (cm) > 45,72 cm'den büyük çalışma mesafeleri için
t_A: Ark süresi (s)
$I_k^{"}$: Kısa devre akımı (kA), 16 kA'den 50 kA'e kadar
1 in = 2,54 cm

Örneğin; D_A = 45,72 cm, t_A = 0,2 s, $I_k^{"}$ = 20 kA için

E_{MA} = 32740,4 × $(45,72)^{-1,9593}$× (0,2) × [0,0016×$(20)^2$ -0,0076×(20)+0,8938]

E_{MA} = 3,66 × [1,381] = 5,05 cal/cm^2

E_{MA} = 21,07 J/cm^2

9.3.2. Kübik panoda ark maruziyet özenerjisi (incident energy) hesabı

Bir tarafı açık (50,8 cm) kübik sac panoda oluşan bir ark için maruziyet özenerjisi tahmini aşağıdaki denklemde verilmiştir. Bu denklem, şalter, motor kontrol merkezleri veya diğer elektrikli ekipman mahfazalarından çıkan ark patlamalarına uygulanabilir.

$$E_{MA} = 4103{,}3 D_A^{-1,4738} t_A \begin{bmatrix} 0{,}0093 I_k^2 \\ -0{,}3453 I_k \\ +5{,}9675 \end{bmatrix} \quad (9.11)$$

E_{MA}: Maksimum 50,8 cm kübik sac panoda ark maruziyet özenerjisi (cal/cm^2)

D_A: Personel çalışma mesafesi (cm) > 45,72 cm'den büyük çalışma mesafeleri için

t_A: Ark süresi (s)

$I_k^{"}$: Kısa devre akımı (kA), 16 kA'den 50 kA'e kadar

1 in = 2,54 cm

Örneğin; D_A = 45,72 cm, t_A = 0,2 s, $I_k^{"}$ = 20 kA için

E_{MA} = 4103,3 × $(45,72)^{-1,4738}$× (0,2) × [0,0093×$(20)^2$ -0,3453 × (20)+5,9675]

E_{MA} = 2,93 × [2,78] = 8,14 cal/cm^2

E_{MA} = 33,95 J/cm^2

9.4. IEEE 1584:2018 Maruziyet Özenerjisi (Incident Energy) ve Ark Etki Sınırı Hesaplama Yöntemi

Buradaki hesap yöntemleri IEEE 1584:2018 "Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations" kılavuzundan alınmıştır. IEEE 1584:2018 kılavuzu; IEEE 1584:2002 üzerinde yapılan IEEE 1584a:2004 ve IEEE 1584b:2011 değişiklikler üzerinden yapılan revizyonla oluşturulmuştur. Hesap yöntemindeki formüllerin

özü aynı kalmak üzere birimler ve semboller SI uluslararası birim sistemine göre yeniden düzenlenmiştir. Kılavuzdaki 15 kV'a varan uygulamaların, < 600 V olan üç fazlı alçak gerilimli kısımları burada değerlendirilmiştir. Monofaze ve DC sistemler ile KKD seçimi bu kapsamda değildir.

9.4.1. Ark modeli baz değerleri

- 208 V ila 15000 V aralığında gerilimler, üç fazlı (hattan hatta)

Testler, seçilen açık devre gerilimleri (V_{oc}) kullanılarak laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Modelde V_{oc} kullanılırken, bu modelin uygulanması için sistem anma gerilimi kullanılabilir.

- Üç faz kısa devre akımı (rms simetrik)
- 208 V - 600 V: 0,5 kA – 106 kA
- İletkenler arasındaki uzaklıklar
- 208 V - 600 V için 6,35 mm - 76,2 mm
- Personel çalışma mesafesi 30,5 cm'ye eşit veya daha büyük
- Arıza temizleme süresi: Sınır yok
- 50,8 cm × 50,8 cm × 50,8 cm ön tarafı açık test panosu (mahfaza)
    - Test panosu (mahfaza) boyut sınırları;
    - Maksimum yükseklik veya genişlik: 124,46 cm
    - Açıldığında maksimum toplam alan: 154,90 m^2
    - Minimum genişlik: Test panosunun genişliği, iletkenler arası uzaklığın dört katından daha büyük olmalıdır.
- Bara (elektrot, iletken) düzenleri;

V (Vertical): Düşey

H (Hortizonal): Yatay

C (Conductor): Bara, iletken, elektrot

B (Box): Pano

B (Barrier): Bariyer, formlama bölmesi

OA (Open Air):Açık Hava

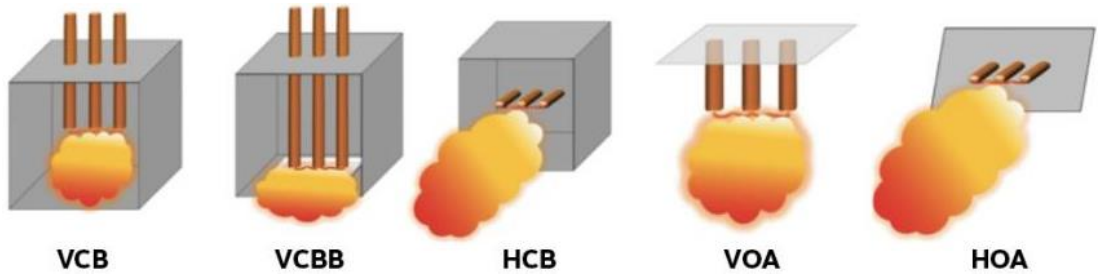
-VCB: Pano içinde düşey baralar.

-VCBB: Pano içindeki bariyerli (formlama bölmesi) sonlandırılmış düşey baralar.

-HCB: Pano içinde yatay baralar.

-VOA: Açık havada düşey baralar.

-HOA: Açık havada yatay baralar.



Şekil 9.1. Bara düzenleri IEEE 1584:2018 (Keçeci vd., 2021)

Türkiye'de alçak gerilim panolarında yaygın olarak kullanılan bara düzeni VCB tipidir. Formüllerdeki seçenekler VCB üzerinden değerlendirilecektir. Formlama uygulamış panolara ve yatay bara düzenine çok nadir tesislerde rastlanır. Açık hava tesisleri ise yüksek gerilimde uygulanmaktadır. Bu düzenler için standartta verilen uygun katsayılar seçilmelidir.

Model, son değerleri belirlemek için ortalama ark akımı, ark maruziyet özenerjisi ve ark etki mesafesi sınırının ara değerlerinin enterpolasyonu ile bulunan iki aşamalı bir süreç kullanır. Mahfaza (pano) boyutu ve ark akımı değişimi için düzeltme faktörleri uygulanır.

9.4.2. Ark modeli uygulama adımları

Modeli uygulamak için gereken adımlar aşağıdaki gibidir:

a) Ark akımını belirlemek için

1) Elektrot düzeninin belirlenmesi: VCB

2) Sistem gerilimi 0,208 kV ≤ V_{oc} ≤ 0,6 kV arasındaki 0,4 kV ara değerini bulmak için ark akımı formülü kullanılır.

b) Belirlenen ark akımını kullanarak ark süresi veya arıza temizleme süresini belirlenir.

c) Ark maruziyet özenerjisi'ni (incident energy) belirlemek için

1) Pano (mahfaza) boyutu düzeltme faktörü belirlenir.

2) Sistem gerilimi 0,208 kV ≤ V_{oc} ≤ 0,6 kV için ark maruziyet özenerjisi belirlenir.

d) Ark patlaması etki sınırını belirlemek için

1) Pano (mahfaza) boyutu düzeltme faktörü belirlenir.

2) Ark patlaması etki sınırını belirlenir.

e) Ark akımı varyasyonu düzeltme faktörü hesaba katılır.

Azaltılmış ark akımını kullanarak b), c), ve d) adımı tekrarlanır. Azaltılmış ark akımı kullanılarak elde edilen gelen maruziyet özenerjisi ve ark etki sınırı sonuçlarının farklı olması mümkündür. Nihai ark maruziyet özenerjisi veya ark etki sınırı, hesaplanan iki değerden yüksek olanıdır.

9.4.2.1. Orta düzey ortalama ark akımı ≤ 600 V için

Ark akımı bulunurken önce orta düzey akım hesaplanır, daha sonra düzeltmeler işlenerek son düzey ark akımı hesaplanır.

$$I_{ark-600} = 10^{A} B \qquad (9.12)$$

$$A = -0{,}04287 + 1{,}035\ log I_k^{"} - 0{,}083\ log G$$

$$B = -4{,}783.10^{-9} I_k^{"4} + 1{,}962.10^{-6} I_k^{"3} + 0{,}000229 I_k^{"2} + 0{,}003141 I_k^{"} + 1{,}092$$

$I_k^{"}$: Simetrik üç faz kısa devre akımı

$I_{ark-600}$: Ark akımı (600 V'a kadar AG sistemlerinde etkin değer)

G: İletkenler arasındaki açıklık (gap distance)

log G: $log_{10} G$

9.4.2.2. Ark akımı varyasyon düzeltme faktörü

Ark akımı varyasyon şalter açma zamanı ve dolayısıyla ark maruziyet özenerjisi üzerinde bir etkisi olup olmadığını belirlemek için azaltılmış ark akımı I_{arc_min}'i kullanarak ikinci bir ark süresi seti hesaplanır. Ark akımı varyasyonu, modelin geçerli aralığı (0,208 kV ila 15 kV) dahilindeki tüm sistem açık devre gerilimleri için geçerlidir, ancak en fazla etki 0,208 kV ile 0,6 kV arasında olması beklenir. Aşağıdaki formüller ve hesaplar VCB elektrot düzeni için verilmiştir.

$$I_{ark-min} = I_{ark-Voc}(1 - 0{,}5VarC_f) \quad (9.13)$$

$$VarC_f = -0{,}0000014269V_{oc}^5 + 0{,}000083137V_{oc}^4 - 0{,}0019382V_{oc}^3 + 0{,}022366V_{oc}^2 - 0{,}12645V_{oc}^1 + 0{,}30226$$

$VarC_f$: Ark akımı varyasyon düzeltme faktörü

$I_{ark-min}$: Varyasyon düzeltme faktörüne bağlı olarak azaltılmış ikinci ark akımı (kA)

9.4.2.3. Orta düzey ortalama ark maruziyet özenerjisi (incident energy)

Ark maruziyet özenerjisi bulunurken önce orta düzey maruziyet özenerjisi hesaplanır, daha sonra düzeltmeler işlenerek son düzey ark maruziyet özenerjisi hesaplanır.

IEEE 1584:2018'deki orijinal formül;

$$E_{\leq 600} = \frac{12{,}552}{50} T.10^A \quad (9.14)$$

$$A = k1 + k2logG + \frac{k3I_{ark-600}}{k6I_k^{"5} + k7I_k^{"4} + k8I_k^{"3} + k9I_k^{"2} + k10I_k^{"}} + k12logD + k13logI_{ark} + log\frac{1}{CF}$$

şeklinde verilmekle birlikte üstel kısmın 3. terimi k3 katsayısından sonraki kısım logaritma içinde olmalıdır. Ayrıca aynı terim k3 katsayısının yanı sıra sp katsayısı ile de çarpılmalıdır.

Düzeltilmiş formül:

$$E_{\leq 600} = \frac{12{,}552}{50} T.10^A \quad (9.15)$$

$$A = k1 + k2logG + k3.sp.log\frac{I_{ark-600}}{k6I_k^{"5} + k7I_k^{"4} + k8I_k^{"3} + k9I_k^{"2} + k10I_k^{"}} + k12logD + k13logI_{ark} + log\frac{1}{CF}$$

Aşağıdaki düzeltilmiş formüller ve hesaplar ≤ 0,6 kV gerilim ve VCB elektrot düzeni için verilmiştir.

k1 = 0,753364

k2 = 0,566

k3 = 1,752636

$k6 = -4{,}78.10^{-9}$

k7 = 0,000001962

k8 = −0,000229

k9 = 0,003141

k10 = 1,092

k12 = −1,598

k13 = 0,957

sp = 1,59116

$$E_{\leq 600}=\frac{12,552}{50}T.10^{A} \quad (9.16)$$

$$A = 0,753364 + 0,566logG + (1,752636 \times 1,59116) \times log\frac{I_{ark-600}}{-4,78.10^{-9}I_k^{"5} + 0,000001962I_k^{"4} - 0,000229I_k^{"3} + 0,003141I_k^{"2} + 1,092I_k^{"}} - 1,598logD + 0,957logI_{ark} + log\frac{1}{CF}$$

$E_{\leq 600}$: Ark maruziyet özenerjisi V_{oc} = 0,6 kV'dan küçük (incident energy J/cm^2)

T: Ark süresi (devre kesici açma süresi s)

G: İletkenler arasındaki boşluk (Gap distance mm)

$I_{ark-600}$: Ark akımı (600 V'a kadar AG sistemlerinde etkin değer kA)

$I_{ark-min}$: Ark akımı (400 V AG sistemlerinde etkin değer kA)

D: Ark etki mesafesi (mm) kalorimetreye olan mesafe

CF: Pano boyut düzeltme faktörü

log G: $log_{10}G$

9.4.2.4. Orta düzey ark etki sınırı

Ark etki sınırı bulunurken önce orta düzey etki sınırı hesaplanır, daha sonra orijinal formüldeki logaritmik düzeltmeler işlenerek son düzey ark etki sınırı hesaplanır. Aynı düzeltme uygulandığında aşağıdaki düzeltilmiş formüller ve hesaplar ≤ 0,6 kV VCB elektrot düzeni için verilmiştir.

$$AFB_{\leq 600}=10^{A} \quad (9.17)$$

$$A= (k1 + k2logG + k3.sp.log\frac{I_{ark-600}}{k6I_k^{"5}+k7I_k^{"4}+k8I_k^{"3}+k9I_k^{"2}+k10I_k^{"}} + k13.logI_{ark} + log\frac{1}{CF} - log\frac{20}{T})/1,598$$

k1 = 0,753364

k2 = 0,566

k3 = 1,752636

k6 = $-4{,}78.10^{-9}$

k7 = 0,000001962

k8 = −0,000229

k9 = 0,003141

k10 = 1,092

k12 = −1,598

k13 = 0,957

sp = 1,59116

$AFB_{\leq 600}$=10^{A} (9.18)

$$A = (0{,}753364 + 0{,}566logG + 1{,}752636 \times 1{,}59116 \times log\frac{I_{ark-600}}{-4{,}78.10^{-9}I_k^{"5} + 0{,}000001962I_k^{"4} - 0{,}000229I_k^{"3} + 0{,}003141I_k^{"2} + 1{,}092I_k^{"} + 0{,}957logI_{ark-600} + log\frac{1}{CF} - log\frac{20}{T}})/1{,}598$$

$AFB_{\leq 600}$: Ark etki sınırı V_{oc} = 0,6 kV'dan küçük (mm)

G: İletkenler arasındaki boşluk (gap mesafesi mm)

$I_{ark-600}$:Ark akımı (600 V'a kadar AG sistemlerinde etkin değer kA)

$I_{ark-min}$:Ark akımı (400 V AG sistemlerinde etkin değer kA)

$I_k^{"}$: Simetrik üç faz kısa devre akımı

CF: Pano boyut düzeltme faktörü

T: Ark süresi (devre kesici açma süresi s)

log G: $log_{10}G$

9.4.2.5. Pano (mahfaza) boyutu düzeltme faktörü CF

VCB, VCBB ve HCB denklemlerindeki pano boyutları 508 mm × 508 mm × 508 mm kübik şekilde olduğundan, uygulamada kullanılacak panonun gerçek boyutları için bir CF düzeltme faktörü kullanılmalıdır.

-Sistem gerilimine, elektrot düzenine, pano yüksekliğine ve genişliğine dayalı olarak bir dizi eşdeğer yükseklik ve genişlik değeri belirlenir. Derinlik sadece hem genişlik hem de yüksekliğin 508 mm'den küçük olması ayrıca gerilimin de 600 V'dan küçük olması durumunda dikkate alınır. Bu şartlar altında, pano

derinliği 203,2 mm'den büyükse "Tipik" küçük veya eşit ise "Sığ" olarak sınıflandırılır.

- Düzeltme faktörü (CF) uygulanacak panolar en fazla 1244,6 mm × 1244,6 mm'ye kadar olmakla birlikte bundan daha büyük panolar için de bu düzeltme faktörü kullanılır.

- Pano tipi sınıflandırıldıktan sonra, üç elektrot düzeninin her biri için değerleri belirli aralıklarla karşılaştırılarak eşdeğer yükseklik ve genişlik belirlenmelidir. Buradaki uygulama VCB elektrot düzeninde 0,4 kV panolar için yapılmıştır.

$$W_1 = (660{,}4 + (W - 660{,}4)(0{,}22))/\ 25{,}4 \quad (9.19)$$

$$H_1 = (660{,}4 + (H - 660{,}4)(0{,}22))/\ 25{,}4 \quad (9.20)$$

$$EES = \frac{H_1 + W_1}{2} \quad (9.21)$$

Tipik pano

$$CF = -0{,}000302 \times EES^2 + 0{,}03441 \times EES + 0{,}4325 \quad (9.22)$$

Sığ pano

$$CF = 1/\ (-0{,}000302 \times EES^2 + 0{,}03441 \times EES + 0{,}4325) \quad (9.23)$$

W: Gerçek pano genişliği (mm)

W_1: Eşdeğer pano genişliği (mm)

H: Gerçek pano yüksekliği (mm)

H_1: Eşdeğer pano yüksekliği (mm)

EES: Eşdeğer pano boyutu

CF: Pano boyut düzeltme faktörü

9.4.2.6. Son düzey ark akımı, ark maruziyet özenerjisi ve ark etki mesafesi değerlendirilmesi

Son düzey ark akımı

$$I_{ark}=1/\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{0c}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{ark-600}{}^2}-\left(\frac{0,6^2-V_{0c}{}^2}{0,6^2\times I_k^{"2}}\right)\right]} \quad (9.24)$$

V_{oc} = 0,4 kV

$I_k^{"}$: Kısa devre akımı (kA),

I_{ark}: Son ark akımı

$I_{ark-600}$:Ark akımı (600 V'a kadar AG sistemlerinde etkin değer)

Son düzey ark maruziyet özenerjisi (incident energy)

$E = E_{\leq 600}$

$E_{\leq 600}$: Ark maruziyet özenerjisi V_{oc}= 0,6 kV'dan küçük (incident energy J/cm^2)

E: Ark maruziyet özenerjisi V_{oc}= 0,4 kV (incident energy J/cm^2)

Son düzey ark etki sınırı

$AFB = AFB_{<600}$

$AFB_{\leq 600}$: Ark etki sınırı V_{oc} = 0,6 kV'dan küçük (mm)

AFB: Ark etki sınırı V_{oc} = 0,4 kV (mm)

9.4.3. Saha uygulaması

Elektrot düzeni: VCB

Üç fazlı simetrik kısa devre akımı, $I_k^{"}$ = 45 kA

İletkenler arası uzaklık, G = 32 mm

Çalışma mesafesi (personel çalışma) D = 609,6 mm

Pano boyutları:

Genişlik W = 610 mm

Yükseklik H = 610 mm

Derinlik De = 254 mm

Adım 1: Orta düzey ortalama ark akımı ≤ 600 V için (9.7) formülü

$I_{ark-600} = 10^{B} A$

$B = -0{,}04287 + 1{,}035\ log I_k^{"} - 0{,}083\ log G$

$A = -4{,}783.10^{-9} I_k^{"4} + 1{,}962.10^{-6} I_k^{"3} + 0{,}000229 I_k^{"2} + 0{,}003141 I_k^{"} + 1{,}092$

$B = -0{,}04287 + 1{,}035 \log(45) - 0{,}083 \log(32)$

$B = 1{,}543277$

$A = -4{,}783.10^{-9}(45)^4 + 1{,}962.10^{-6}(45)^3 - 0{,}000229(45)^2 + 0{,}003141(45) + 1{,}092$

$A = 0{,}92928$

$I_{ark-600} = 10^{1{,}543277} 0{,}92928$

$I_{ark-600} = 32{,}45$ kA

Adım 2: Son düzey ark akımı 400 V için (9.19) formülü

$$I_{ark} = 1/\sqrt{\left[\frac{0{,}6}{V_{0c}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{{I_{ark-600}}^2} - \left(\frac{0{,}6^2 - {V_{0c}}^2}{0{,}6^2 \times {I_k^{"}}^2}\right)\right]}$$

$$I_{ark} = 1/\sqrt{\left[\frac{0{,}6}{0{,}4}\right]^2 \times \left[\frac{1}{32{,}45^2} - \left(\frac{0{,}6^2 - 0{,}4^2}{0{,}6^2 \times 45^2}\right)\right]}$$

$$I_{ark} = 1/\sqrt{\left[\frac{0{,}6}{0{,}4}\right]^2 \times \left[\frac{1}{32{,}45^2} - \left(\frac{0{,}6^2 - 0{,}4^2}{0{,}6^2 \times 45^2}\right)\right]}$$

$$I_{ark} = 1/\sqrt{2{,}25 \times \left[9{,}49 \times 10^{-4} - 2{,}74 \times 10^{-4}\right]}$$

I_{ark} = 25,66 kA

Bu akım için devre kesici açma süresi T = 70 ms

Adım 3: Pano (mahfaza) boyutu düzeltme faktörü CF

Pano boyutları ve tipi:

Genişlik W = 610 mm

Yükseklik H = 610 mm

Derinlik De = 254 mm

Λ: VE sembolü

V: VEYA sembolü

W < 508 mm Λ H < 508 mm Λ De ≤ 203,2 mm Λ V_{oc} ≤ 600 V ise sığ pano,

W > 508 mm V H > 508 mm V De > 203,2 mm ise tipik pano.

Pano tipi: Tipik pano

(9.14) ve (9.15) formüllerinden

W_1 = (660,4 + $(W - 660{,}4)(0{,}22)$)/ 25,4

W_1 = (660,4 + $(610 - 660{,}4)(0{,}22)$)/ 25,4

W_1 = 25,56

H_1 = (660,4 + $(H - 660{,}4)(0{,}22)$)/ 25,4

H_1 = 25,56

(9.16) formülünden

$$EES = \frac{H_1 + W_1}{2}$$

$$EES = 25{,}56$$

Tipik pano için (9.17) formülü

$$CF = -0{,}000302 \times EES^2 + 0{,}03441 \times EES + 0{,}4325$$

$$CF = -0{,}000302 \times 25{,}56^2 + 0{,}03441 \times 25{,}56 + 0{,}4325$$

$$CF = 1{,}11$$

Adım 4: Orta düzey ortalama ark maruziyet özenerjisi (incident energy ≤ 600 V)

(9.11) formülü

$$E_{\leq 600} = \frac{12{,}552}{50} T.10^A$$

$$A = 0{,}753364 + 0{,}566 logG + 1{,}752636 \times 1{,}59116 \times$$

$$log \frac{I_{ark-600}}{-4{,}78.10^{-9} I_k^{"5} + 0{,}000001962 I_k^{"4} - 0{,}000229 I_k^{"3} + 0{,}003141 I_k^{"2} + 1{,}092 I_k^{"}}$$

$$- 1{,}598 logD + 0{,}957 log I_{ark} + log \frac{1}{CF}$$

$$A = 0{,}753364 + 0{,}566 \log 32 + 1{,}752636 \times 1{,}59116 \times \log \frac{(32{,}45)}{0{,}92928} -$$

$$1{,}598.\log 609{,}6 + 0{,}957.\log 25{,}66 + log \frac{1}{(1{,}11)}$$

$$A = 0{,}753364 + 0{,}851915 + 4{,}303191 - 4{,}4505 + 1{,}34865 - 0{,}04532$$

$$A = 2{,}7613$$

$$E_{\leq 600} = \frac{12{,}552}{50} 0{,}07.10^{2{,}7613}$$

$E_{\leq 600}$= 10,14 J/cm^2 = 2,43 cal/cm^2

Adım 5: Son düzey ark maruziyet özenerjisi (incident energy)

$E = E_{\leq 600}$= 10,14 J/cm^2 = 2,43 cal/cm^2

Adım 6: Orta düzey ortalama ark etki sınırı (≤ 600 V) (9.13) formülü

$AFB_{\leq 600} = 10^A$

$A= (k1 + k2logG + k3.sp.log\frac{I_{ark-600}}{k6I_k^{"5}+k7I_k^{"4}+k8I_k^{"3}+k9I_k^{"2}+k10I_k^{"}} + k13.logI_{ark} +$

$log\frac{1}{CF} - log\frac{20}{T})/1{,}598$

$A= (0{,}753364 + 0{,}566.log32 + 4{,}303191 + 0{,}957.log25{,}66 + log\frac{1}{1{,}11} -$

$log\frac{20}{0{,}07})/1{,}598$

$A = (0{,}753364 + 0{,}851915 + 4{,}303191 + 1{,}34865 - 0{,}04532 - 2{,}4559)/1{,}598$

$A = 2{,}9761$

$AFB_{\leq 600}$= $10^{2{,}9761}$

$AFB_{\leq 600}$= 946,58 mm

Adım 7: Son düzey ark etki sınırı

$AFB = AFB_{\leq 600}$= 946,58 mm

Adım 8: Ark akımı varyasyonu düzeltme faktörü (9.8) formülü

$I_{ark-min} = I_{ark-Voc}(1 - 0{,}5VarC_f)$

$VarC_f = -0{,}0000014269V_{oc}^5 + 0{,}000083137V_{oc}^4 - 0{,}0019382V_{oc}^3 + 0{,}022366V_{oc}^2$
$- 0{,}12645V_{oc}^1 + 0{,}30226$

$VarC_f$: Ark akımı varyasyon düzeltme faktörü

$I_{ark-min}$: Varyasyon düzeltme faktörüne bağlı olarak azaltılmış ikinci ark akımı (kA)

V_{oc}= 0,4 kV için

$VarC_f = 0{,}255136629$

Adım 9: Düzeltme faktörünü kullanarak ark akımının son değerlerinin bulunması

$$I_{ark}= \left(1/\sqrt{\left[\frac{0{,}6}{V_{0c}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{ark-600}{}^2} - \left(\frac{0{,}6^2 - V_{0c}{}^2}{0{,}6^2 \times I_k^{"2}}\right)\right]} \right). (1 - 0{,}5 VarC_f)$$

$$I_{ark}= \left(1/\sqrt{\left[\frac{0{,}6}{0{,}4}\right]^2 \times \left[\frac{1}{32{,}45^2} - \left(\frac{0{,}6^2 - 0{,}4^2}{0{,}6^2 \times 45^2}\right)\right]} \right). (1 - 0{,}5 \times 0{,}255136629)$$

$$I_{ark}= \left(1/\sqrt{2{,}25 \times [9{,}49 \times 10^{-4} - 2{,}74 \times 10^{-4}]} \right). 0{,}87$$

$I_{ark}= 25{,}66 \,.\, 0{,}87$

$I_{ark}= 22{,}32$ kA

Bu akım için devre kesici açma süresi T = 300 ms

Adım 10: Düzeltme faktörleriyle düşürülmüş ark akımı ve yükseltilmiş zamana göre Adım 4'ten itibaren işlemlerin tekrarlanması

Orta düzey ortalama ark maruziyet özenerjisi (incident energy ≤ 600 V) (9.11) formülü

$$E_{\leq 600} = \frac{12{,}552}{50} 0{,}3.10^A$$

$$A = 0{,}753364 + 0{,}566 \log 32 + 1{,}752636 \times 1{,}59116 \times \log \frac{(32{,}45)}{0{,}92928} - 1{,}598.\log 609{,}6 + 0{,}957.\log 22{,}32 + log \frac{1}{(1{,}11)}$$

$$A = 0{,}753364 + 0{,}851915 + 4{,}303191 - 4{,}4505 + 1{,}2907 - 0{,}04532$$

$A = 2{,}70335$

$E_{\leq 600}= \frac{12{,}552}{50} 0{,}3.10^{2{,}70335}$

$E_{\leq 600}= 38{,}03$ J/cm^2

Adım 11: Düşürülmüş ark akımı ve yükseltilmiş zamana göre Adım 5'in tekrarlanması

Son düzey ark maruziyet özenerjisi (incident energy)

$E = E_{\leq 600}$= 38,03 J/cm^2

Adım 12: Düşürülmüş ark akımı ve yükseltilmiş zamana göre Adım 6'nın tekrarlanması

Orta düzey ortalama ark etki sınırı (≤ 600 V) (9.13) formülü

$AFB_{\leq 600}$ = 10^A

$A = (0{,}753364 + 0{,}566.log32 + 4{,}303191 + 0{,}957.log22{,}32 +$

$log\frac{1}{1{,}11} - log\frac{20}{0{,}3})/1{,}598$

$A = (0{,}753364 + 0{,}851915 + 4{,}303191 + 1{,}2907 - 0{,}04532 - 1{,}8239)/1{,}598$

$A = 3{,}3353$

$AFB_{\leq 600}$ = $10^{3{,}3353}$

$AFB_{\leq 600}$ = 2164,6 mm

Adım 13: Son düzey ark etki sınırı

$AFB = AFB_{\leq 600}$ = 2164,6 mm

10. ARK PATLAMA RİSKİNİN DEĞERLENDİRMESİ VE RİSK KONTROLÜ

Risk kontrolünde riski kabul edilebilir bir düzeye indirmek amaçlanır ve yüksekten düşüğe doğru bir kontrol hiyerarşisi oluşturulur. İşlem yöntemi; kabul edilebilir bir risk seviyesine ulaşılana kadar tekrarlayan bir risk azaltma sürecinden ibarettir. Elektriksel güvenlik konularının değerlendirilmesi için önceliklendirme yapılması gerekir. Elektrikle ilgili tehlikeler; elektrik çarpması, elektrik sebepli yangınlar, ark patlaması ve belirli bir görevle ilişkili sıcak elektrikli ekipmanlara dokunma şeklinde oluşabilecek tehlikelerdir. Bu tehlikelerle ilgili olarak ilişkili risklerin belirlenmesi, elektrik güvenliği yönetim sistemi eksikliklerinin belirlenmesi, görev için uygun KKD'nin seçilmesi gereklidir (Coache vd., 2018).

10.1. Risk Kontrol Hiyerarşisi

Tehlikeler hiçbir zaman tamamen ortadan kaldırılamasa da, risk kontrolleri hiyerarşisinin uygulanmasıyla risk önemli ölçüde azaltılabilir. Risk kabul edilemez olduğunda, riski kabul edilebilir bir düzeye indirmek için ilave güvenlik önlemleri alınmalıdır. Hiyerarşi, en etkili olandan en az etkili olana doğru sıralanır ve her bir risk değerlendirmesi sırayla uygulanmalıdır.



Şekil 10.1. Risk kontrol hiyerarşisi (Coache vd., 2018)

- Eleme: Tehlikenin elimine edilmesi. En tehlikesiz yöntemin ve çözümün tercih edilmesidir. İşlemenin üretim ve çalışma sürekliliğini bozmadan riskler elimine edilmeye çalışılır. Eleme aşaması insan hatasına veya inisiyatifine bağlı olmayan koruyucu önlemlerin alınmasıdır. Bir hata durumunda beslemenin otomatik kesilmesi bu bağlamda değerlendirilir. Eleme seçeneği işletmenin tasarım aşamasına alınacak önlemlerdendir. Mühendisler elektrik sebepli iş kazalarına karşı önlemleri başlangıçta alt yapı çalışması şeklinde tasarlamalıdır. Eleme yönteminin sonradan uygulaması durumunda maliyetleri dolayısıyla zorluklar yaşanabilir.

-İkame etme: Tehlikeyi tamamen yok etmek mümkün olmazsa veya eleme yöntemi işletmenin üretim ve çalışma sürekliliğini etkileyecek şekilde hatalı açma gibi başka sorunlara yol açıyorsa, zorlanan eleme yöntemi yerine geçecek daha az tehlikeli ve kabul edilebilir yöntem uygulanabilir. Örneğin robotik üretim alanında hem enerji kesilmesi olmasın hem de elektrik çarpması riski olmaması için IT sistem önerilebilir. Kontrol devrelerinin 24 V DC yapılması
< 50 V olan ekstra alçak gerilim sistemlerinin (SELV veya PELV) kullanılması veyahut IT sistem kullanılması tehlikeleri azaltır.

-Mühendislik kontrolu: Tehlikeye erişimin fiziksel engellerle önlenmesidir; Doğrudan dokunmaya karşı korumada dağıtım panolarındaki canlı iletken bölümlere dokunmanın engellenmesi için plexiglass gibi yalıtım önlemlerinin alınması gerekir. Ark patlaması risklerinin azaltılması için baralar için ayrı bir saç bölme, devre kesiciler için ayrı bir sac bölme yapılabilir (Panolarda Formlama işlemi).

-Farkındalık: Olası tehlikelerin bulunduğunu gösteren etiketler ve tehlike işaretlerinin konması gerekir. Örneğin panodaki ark patlaması enerji seviyesi, tehlikeli ark paklaması sınır mesafesi, gerekli kişisel koruyucu donanım kategorisi etiket üzerinde bildirilmelidir.

-Yönetimsel kontrol: İşin yapılma şeklinin idari kurallarla daha risksiz hale getirilmesidir; Çalışanların gerekli talimatları, iş izinlerini almadan veya

görevleri dışında arızaya müdahale etmeleri önlenmelidir. Yönetimsel kontrol bağlamında yönetimin elektrik güvenliği konusunda eğitimler düzenlemesi, sürekli uyarılar yapması bilincin yükselmesi bakımından önemlidir. Elektrik tesisatının cins ve hacmine göre yetkili ehliyete sahip olmayan kişilerce yapılması, bakım ve onarımının sağlanması iş kazalarında önemli bir etkendir.

-Personel koruyucu ekipmanların kullanımı (KKD): Elektrik çarpması ve ark patlaması riskine karşı uygun kategoride kişisel koruyucu donanımların kullanılması gerekir.

Elektrikle ilgili kişisel koruyucu donanımlarla ilgili örnekler; yalıtkan eldiven, ark dayanımlı yüz siperi, gömlek, ceket, pantolon veya tulum.

Elemeden sonraki aşamalarda, güvenli bir çalışma ortamı oluşturulabilir, ancak bu yöntemlerin yapısı içinde potansiyel insan hatası mevcuttur. İlk 5 aşamadaki tüm risk kontrolleri tükendikten sonra KKD seçilme aşamasına gelinmelidir. KKD çalışanların korunması için en az etkili yöntem olup kullanılan ilk veya yegane koruyucu önlem olmamalıdır (Coache vd., 2018).

10.2. Risk Analizi

Belirlenmiş bir tehlikeye ilişkin risk, olası yaralanmanın şiddetinden ve bu yaralanmanın meydana gelme olasılığından oluşur. Yaralanma olasılığını, yaralanmanın şiddetini ve tehlikeyle ilişkili risk düzeyini tahmin etmek için kantitatif yerine kalitatif bir yaklaşım gerekebilir. Genellikle, üç faktör bağımsız olarak tahmin edilir ve zararın ortaya çıkma olasılığını belirlemek için kullanılır. Bu bağımsız faktörler aşağıdaki gibidir:

1. Maruz kalma sıklığı ve süresi
2. Tehlikeli olayın farkedilme olasılığı
3. Yaralanmadan kaçınma veya tehlikeli olayın sınırlanma olasılığı

Tehlikeli bir olayın meydana gelmesi, orada yaralanma meydana gelme olasılığını etkiler.

Tehlikeli olayın meydana gelme olasılığı, olayın elektrik sisteminin normal kullanımı ve yanlış kullanımı veya her ikisinin gerçekleşme olasılığını ele almalıdır. Tehlikeli olayın meydana gelme olasılığında insan davranışının etkisi de değerlendirilmelidir. Örneğin, zaman kısıtlamaları, iş görevi, algılanan hasar sınırlaması nedeniyle oluşan stres, tehlikeli olaya sebep olabilir. Çalışanın tehlikeyle ilgili bilgi farkındalığının olmaması önemli bir etkendir. İnsan davranışı, eğitimi, deneyimi ve sürecin karmaşıklığı gibi faktörlerden etkilenecektir. Kişisel özellikler risk değerlendirmesinin sonucu üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Kişiye özel bilgilerin kullanımı makul ölçüde mümkün olduğu kadar en aza indirilmelidir. Tehlikeli bir olayın meydana gelme olasılığını belirlerken, aşağıdaki soru türlerini sormak yardımcı olabilir. Bu sorular örnek olarak hazırlanmış, sorulması gereken gerçek soruları engellemek veya yürütülen soruşturmanın yeterli veya doğru soru seti olarak algılanması amaçlanmamıştır.

Yaralanmadan kaçınma olasılığını tahmin edebilmek için elektrik sistemi tasarımındaki tehlikeli durumlara karşı alınan önlemler dikkate alınmalıdır. Örneğin:

1. Tehlikeli olayın aniden veya kademeli olarak ortaya çıkması,
2. Tehlikeden kaçabilmek için yeterli mekanın bulunması olasılığı,
3. Doğal olarak enerjili parçalarla temas olasılığını azaltan sistem ya da komponent örneğin dokunmaya duyarlı bileşenlerin kullanımı,
4. Bir tehlikenin kabul edilme olasılığı

Yaralanmaların şiddetinin derecelendirmesi, iyileşebilir olması, kalıcı hasar ve ölüm şeklinde yapılabilir (Coache vd., 2018).

10.3. Ark Patlaması Risk Değerlendirmesi

Risk değerlendirmesi, tehlikenin belirlenmesi, riskin tahmin edilmesi ve uygun değişikliğin yapılarak riskin düşürülmesinin metodik bir şekilde yapılmasıdır. Elektrik kaynaklı iş kazaları olan elektrik çarpması, ark patlaması gibi tehlikeli olayların risklerinin tahmin edilmesi ve belirli bir kontrol hiyerarşisine göre risklerin düşürülmesi ve kabul edilebilir seviyeye getirilmesi gerekir. Risk

değerlendirmesinin bir amacı da tehlikeleri önceliklerine göre sıralamaktır. Tehlike bazlı risk değerlendirmesi, belirli bir proses döngüsünde kullanıldığında çok etkili sonuç alınır. Görev bazlı risk değerlendirmesi için işin yapılması aşamaları ayrı ayrı görevlere ayrılır. Tehlikeler her görev için ayrı ayrı tanımlanır (genellikle görev-tehlike çiftleri olarak adlandırılır). Her bir tehlikeyle ilişkili risk analiz edilir ve değerlendirilir. Görev bazlı risk değerlendirmesi, en çok saha düzeyinde risk değerlendirmesi yapılırken kullanılır.

Elektrik kaynaklı tehlikelerin belirlenmesi risk değerlendirmesinin ilk adımıdır. Elektrikle ilgili tehlikeler insanı veya çevreyi tehdit eden kontrol dışı enerji aktarımına bağlı etkilerdir. Bunlar elektrik çarpması, ark patlamasına bağlı olarak arkın ısıl etkileri, arkın basınç etkileri, arkın ses etkileri ve arkın ışık etkileridir. Bunların tamamının ortak noktası tehlikeli enerji aktarımıdır. İkinci aşamada riski oluşturan tehlikeli enerji aktarımının şiddetinin ve olasılığının kantitatif veya kalitatif olarak belirlenmesi gerekir (Coache vd., 2018).

Risk Skoru = Şiddet × Olasılık

10.3.1. Şiddetin (maruziyet özenerjisi) belirlenmesi

Tehlikeli enerji aktarımının şiddetiyle ilgili kısım, çalışanın vücudunun etkilenmesi, üretim kaybının iş görmezlik günü olarak etkilenmesi, maddi hasarın mali bedelinin kademelenmesi, çevreye verilebilecek zararın telafi süresinin kademelendirilmesi şeklinde çeşitli açılardan yapılandırılabilir.

Ark patlaması analizi sonucunda ulaşılan pano önünde çalışma mesafesi içindeki ark ısı yoğunluğu etkisinin değerlendirmesi aşağıdaki şekilde yapılır (Coache vd., 2018).

Çizelge 10.1. Risk analizi: Şiddet bileşenleri

Şiddet	Ark Isı Yoğunluğu Etkisi	
≤ 40 cal/cm²	Cat IV Travma, ölüm	5
≤ 25 cal/cm²	Cat III İskelet hasarı, körlük, işitme kaybı, üçüncü derece yanıklar	4
≤ 8 cal/cm²	Cat II Hafif etki, işitme hasarı, ikinci derece yanıklar	3
≤ 4 cal/cm²	Cat I Küçük kesikler, morluklar	2
≤ 1,2 cal/cm²	Cat I İyileşebilir yanık	1

10.3.2. Olasılığın Belirlenmesi

Olasılığın en önemli bileşeni tehlikeli enerji aktarımına sebep olan etkinin meydana gelme sıklığıdır. Olasılığın ikinci önemli bileşeni, tehlikeli enerji aktarımının gerçekleşmesindeki ihtimallerin değerlendirilmesidir. Bunlar tehlikeli enerji aktarımının normal kullanımda meydana gelmesi, yanlış kullanımda meydana gelmesi, kullanıcının hatasıyla meydana gelmesi gibi alt guruplara ayrılabilir. Olasılığın üçüncü bileşeni ise tehlikeli enerji aktarımı meydana gelmesi durumunda çalışanın yaralanmaktan kaçınma olasılığıdır. Yaralanmaktan kaçınma için tehlikenin farkında olmak gerekir. Bu farkındalığın çeşitli yöntemlerle sağlanması gerekir. ANSI/AIHA Z10 standartında tanımlı bir çok matris yöntemi mevcuttur.

Çizelge 10.2. Risk analizi: Olasılık bileşenleri (OB)

Ark patlamasına sebep olacak olayın sıklığı (OB1)	
Saatte 1 kez veya daha sık	5
Günde 1 kez veya daha sık	4
Haftada 1 kez veya daha sık	3
Ayda 1 kez veya daha sık	2
Yılda 1 kez veya daha sık	1

Ark patlamasına sebep olacak olayın farkedilmesi (OB2)	
Tehlike işareti yok	5
Tehlike işareti algılanmıyor	4
Tehlike işaretinde fazla bilgi var	3
Tehlike işaretinde yeterli bilgi yok	2
Tehlike işareti uygun	1

Ark patlaması olayının etkilerinin yayılmasının engellenmesi (OB3)	
Pano kapak kilidi yok, tehlike sınırı yok (engelleme imkansız)	5
Pano kapağı kilitli, tehlike sınırı yok (engelleme sıklıkla imkansız)	4

Pano kapağı kilitli, tehlike sınırı var (kritik)	3
Pano kapağı kilitli, yaklaşma bariyeri var (engelleme sıklıkla mümkün)	2
Ark dayanımlı pano, yaklaşma bariyeri var (engelleme mümkün)	1

Olasılık Toplamı, OT = OB1 + OB2 + OB3

$0 \leq OT < 3 = 1$

$3 \leq OT < 6 = 2$

$6 \leq OT < 9 = 3$

$9 \leq OT < 12 = 4$

$12 \leq OT < 15 = 5$

10.3.3. Ark patlaması etkileri için 5 × 5 risk matrisi

Risk değerlendirme matrisleri, risklerin sıralaması amacıyla oluşturur. Risk değerlendirme matrisi, riski şiddete ve olasılığa göre gruplandıran basit bir tablodur. Belirli bir görev için KKD kullanımı gibi iyileştirici eylem ihtiyacını değerlendirmek ve güvenlik konularına öncelik vermek için kullanılabilir. Sütunlara ve satırlara düşük ve yüksek gibi değerler atanmalıdır. Çok fazla sütun ve satır kullanılırsa bir matris hantal hale gelir ve çok az kullanılırsa gerekli bilgileri veremez.

Çizelge 10.3. Risk analizi: Şiddet × Olasılık

	Şiddet: Maruziyet Özenerjisi				
Olasılık Toplamı, OT	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

$15 \leq$ Risk ≤ 25: Çok yüksek risk; $10 \leq$ Risk ≤ 12: Yüksek risk
$4 \leq$ Risk ≤ 8: Orta risk; $1 \leq$ Risk ≤ 3: Düşük risk

Pratik olarak, yararlı bir matris için maksimum kategori sayısı 5 olmalıdır. Riski kantitatif olarak tahmin etmek için risk değerlendirme matrisleri, risk sıralaması veya risk puanlama sistemleri gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. Risk

değerlendirme matrisi, riski şiddete ve olasılığa göre gruplandıran basit bir tablodur. Belirli bir görev için KKD kullanımı gibi iyileştirici eylem ihtiyacını değerlendirmek ve güvenlik konularına öncelik vermek için kullanılabilir (Coache vd., 2018).

10.4. Ark Patlaması Olayı ve Devre Kesici Manevrası

Ark patlaması olayının, daha çok devre kesici (şalter) manevralarında yani şalter açma veya kapama işlemlerinde meydana geldiğini geçmiş deneyimler göstermektedir. Bir devre kesiciyi açtırmadaki ark patlaması olasılığı, kapama işleminden daha yüksektir. Montajı düzgün şekilde yapılmış ve uygun bir mahfazaya yerleştirilmiş bir devre kesicinin ark patlaması olasılığı daha düşük olur. Ayrıca uygun bir şekilde korunan bir şalterin gerçek maruziyet özenerjisi seviyesinin yaklaşık olarak hesaplanan seviye olması daha olasıdır. Mevcut olan enerji seviyesinin zararın şiddetini etkiler. Olayın enerji seviyesi ne kadar büyük olursa, o kadar çok zarar beklenebilir.

Manevra sırasında yaralanma riski büyük ölçüde devre kesicinin kullanabileceği enerji miktarına, kaç yaşında olduğuna, ne kadar iyi korunacağına ve gerçekleştirilecek göreve diğer faktörlere bağlıdır. Örneğin, bir konuttaki (230 V) 16 A'lik bir linye devre kesicisinin (MCB) manevrası, 40 A'lik kolon sigortasının manevrasına göre daha düşük risklidir (Coache vd., 2018).

11. ARK PATLAMASI VE ELEKTRİK ÇARPMASINA KARŞI ALINAN ÖNLEMLERİN KONTROLU VE ÖNEM SIRASININ BELİRLENMESİ

Alçak gerilimli elektrik tesisatının kontrol ve denetlemelerinin nasıl yapılacağı hem yürürlükteki elektrik iç tesisleri yönetmeliği'nde hem de uluslararası TS HD 60364-6 standartı'nda belirlenmiştir. Bu standart ve yönetmeliğin ana fikri elektrik çarpmasına karşı koruma için alınan önlemlerin kontrolü uygunluk değerlendirmesidir. Elektrik çarpmasına karşı kullanılan yöntemler; temel koruma önlemleri, hata koruması önlemleri ve küçük gerilim yani 50 V (a.c.) altındaki gerilimlerin kullanılması önlemleridir.

Elektrik çarpmasına karşı temel koruma önlemleri; canlı iletkenlere doğrudan doğruya dokunmaya engel olacak yalıtım önlemlerini kapsayan pasif önlemlerdir. Risk kontrol hiyerarşisinde mühendislik önlemleri yani tehlikeyle araya bir engel koyulması şeklinde oluşturulan önlemlerin kontrolü bağlamında, canlı iletkenler üzerine kaplanan yalıtım, canlı iletkenleri kilitli mahfaza (pano) içine alınması, canlı iletkenlerin önüne pleksiglas veya sac engel yerleştirilmesi önlemlerinin kontrolünü kapsar. Hata koruması yani diğer adıyla dolaylı dokunmaya karşı koruma önlemlerinin kontrolü kapsamında ise çalışma sahasında metal gövdeli elektrikli donanımlarda meydana gelebilecek bir yalıtım hatası durumuna metal gövde gerilim altında kalırsa, çalışan personeli elektrik çarpması tehlikesinden korumak için alınan önlemlerin etkinliği değerlendirilmektedir.

Elektrik iç tesisleri yönetmeliğinde ve TS HD 60364-4-41:2018 standartı'nda tanımlı yöntemlerle beslemenin otomatik kesilmesinin kontrolü, yalıtılmış (izoleli) sınıf II cihazlar kullanılmasının kontrolü, metal panonun önündeki zeminde yalıtım paspası kullanılması veya zeminin yalıtılması, yalıtkan paspas genişliğinin el ulaşma mesafesi içinde kaldığının kontrolü ve yalıtım trafosu kullanarak elektrik iç tesisleri yönetmeliğinde tanımlı elektriksel ayırma ve koruma hattı sistemi adı verilen koruma yöntemlerinin kullanıldığı (IT sistem) önlemlerinin etkinliği değerlendirilmektedir.

Form 3 Form No /3

SCHEDULE OF INSPECTIONS

Methods of protection against electric shock

(a) Protection against both direct and indirect contact:

- ☐ (i) SELV (note 1)
- ☐ (ii) Limitation of discharge of energy

(b) Protection against direct contact: (note 2)

- ☐ (i) Insulation of live parts
- ☐ (ii) Barriers or enclosures
- ☐ (iii) Obstacles (note 3)
- ☐ (iv) Placing out of reach (note 4)
- ☐ (v) PELV
- ☐ (vi) Presence of RCD for supplementary protection

(c) Protection against indirect contact:

- (i) EEBADS including:
  - ☐ Presence of earthing conductor
  - ☐ Presence of circuit protective conductors
  - ☐ Presence of main equipotential bonding conductors
  - ☐ Presence of supplementary equipotential bonding conductors
  - ☐ Presence of earthing arrangements for combined protective and functional purposes
  - ☐ Presence of adequate arrangements for alternative source(s), where applicable
  - ☐ Presence of residual current device(s)
- ☐ (ii) Use of Class II equipment or equivalent insulation (note 5)
- ☐ (iii) Non-conducting location: (note 6) Absence of protective conductors
- ☐ (iv) Earth-free equipotential bonding: (note 7) Presence of earth-free equipotential bonding conductors
- ☐ (v) Electrical separation (note 8)

Prevention of mutual detrimental influence

- ☐ (a) Proximity of non-electrical services and other influences
- ☐ (b) Segregation of band I and band II circuits or band II insulation used
- ☐ (c) Segregation of safety circuits

Identification

- ☐ (a) Presence of diagrams, instructions, circuit charts and similar information
- ☐ (b) Presence of danger notices and other warning notices
- ☐ (c) Labelling of protective devices, switches and terminals
- ☐ (d) Identification of conductors

Cables and conductors

- ☐ (a) Routing of cables in prescribed zones or within mechanical protection
- ☐ (b) Connection of conductors
- ☐ (c) Erection methods
- ☐ (d) Selection of conductors for current-carrying capacity and voltage drop
- ☐ (e) Presence of fire barriers, suitable seals and protection against thermal effects

General

- ☐ (a) Presence and correct location of appropriate devices for isolation and switching
- ☐ (b) Adequacy of access to switchgear and other equipment
- ☐ (c) Particular protective measures for special installations and locations
- ☐ (d) Connection of single-pole devices for protection or switching in phase conductors only
- ☐ (e) Correct connection of accessories and equipment
- ☐ (f) Presence of undervoltage protective devices
- ☐ (g) Choice and setting of protective and monitoring devices for protection against indirect contact and/or overcurrent
- ☐ (h) Selection of equipment and protective measures appropriate to external influences
- ☐ (i) Selection of appropriate functional switching devices

Inspected by ..... Date .....

Notes:

✓ to indicate an inspection has been carried out and the result is satisfactory
✗ to indicate an inspection has been carried out and the result was unsatisfactory
N/A to indicate the inspection is not applicable
LIM to indicate that, exceptionally, a limitation agreed with the person ordering the work prevented the inspection or test being carried out

1. SELV An extra-low voltage system which is electrically separated from Earth and from other systems. The particular requirements of the Regulations must be checked (see Regulations 411-02 and 471-02)
2. Method of protection against direct contact - will include measurement of distances where appropriate
3. Obstacles - only adopted in special circumstances (see Regulations 412-04 and 471-06)
4. Placing out of reach - only adopted in special circumstances (see Regulations 412-05 and 471-07)
5. Use of Class II equipment - infrequently adopted and only when the installation is to be supervised (see Regulations 413-03 and 471-09)
6. Non-conducting locations - not applicable in domestic premises and requiring special precautions (see Regulations 413-04 and 471-10)
7. Earth-free local equipotential bonding - not applicable in domestic premises, only used in special circumstances (see Regulations 413-05 and 471-11)
8. Electrical separation (see Regulations 413-06 and 471-12)

Şekil 11.1. Uluslararası standartlarda verilen IEE (Institution of Electrical Engineers, Appendix 6 of BS 7671:2001) elektrik tesisatı kontrol formu

DENETLEME LİSTESİ

Elektrik Çarpmasına Karşı Koruma Yöntemleri

(a) Doğrudan ve dolaylı dokunmaya karşı birlikte koruma:

☐ (i) SELV (not 1)
☐ (ii) Enerji boşalmasının sınırlandırılması

(b) Doğrudan dokunmaya karşı koruma: (not 2)

☐ (i) Gerilim altındaki bölümlerin yalıtılması
☐ (ii) Korkuluk veya mahfazalar ile koruma
☐ (iii) Engeller ile koruma (not 3)
☐ (iv) Erişme uzaklığı dışına yerleştirme (not 4)
☐ (v) PELV
☐ (vi) Artık akım cihazları ile yapılan ilave koruma

(c) Dolaylı dokunmaya karşı koruma

(i) Topraklanmış potansiyel dengeleme ve beslemenin otomatik kesilmesi kapsamında:

☐ Topraklama iletkeninin kontrolü
☐ Koruma iletkeni devresinin kontrolü
☐ Ana potansiyel dengeleme iletkeninin kontrolü
☐ Ek potansiyel dengeleme iletkeninin kontrolü
☐ Birleşik koruma ve işlevsel maksatlı topraklama düzenlemesinin kontrolü
☐ Diğer besleme kaynakları için uygulanabilir düzenlemelerin yeterliliği
☐ Artık akım cihazlarının kontrolü

☐ (ii) Sınıf II donanım veya eşdeğer yalıtkan kullanımı ile koruma (not 5)

☐ (iii) İletken olmayan bölgeler ile koruma: (not 6)
Koruma iletkeninin bulunmamasının kontrolü

☐ (iv) Toprak bağlantısı olmayan potansiyel dengeleme ile koruma: (not 7)
Toprak bağlantısı olmayan potansiyel dengeleme iletkeninin kontrolü

☐ (v) Elektriksel ayırma ile koruma (not 8)

Karşılıklı Zararlı Etkilerin Önlenmesi

☐ (a) Elektriksel olmayan tesisatlara yaklaşma ve diğer etkilerin kontrolü
☐ (b) Bant I ve bant II devrelerinin ayrılması veya bant II yalıtımı kullanılması
☐ (c) Güvenlik devrelerinin ayrılması

Tanımlama

☐ (a) Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler
☐ (b) Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri
☐ (c) Koruma cihazlarının, anahtarlarının ve terminallerinin etiketlenmesi

Kablo ve iletkenler

☐ (a) Kablo yollarının uygunluğu ve mekanik koruma
☐ (b) İletkenlerin bağlanması
☐ (c) Tesisat yöntemleri
☐ (d) İletkenlerin, akım taşıma kapasitesi ve gerilim düşümüne göre seçimi
☐ (e) Yangın korkuluğu, uygun kilitleme ve sıcaklık etkisine karşı koruma

Genel

☐ (a) Ayırma ve anahtarlama için kullanılan cihazların doğru yerleştirilmesinin kontrolü
☐ (b) Pano ve diğer donanımlara girişin uygunluğu
☐ (c) Özel tesisatların ve yerleştirmelerin belirli güvenlik mesafesinin kontrolü
☐ (d) Tek kutuplu koruma ve anahtarlama cihazlarının yalnızca faz iletkenine bağlanmasının kontrolü
☐ (e) Aksesuar ve donanımların doğru bağlanması
☐ (f) Düşük gerilim koruma cihazları kontrolü
☐ (g) Dolaylı dokunmaya karşı koruma ve/veya aşırı akım koruma ve izleme cihazlarının seçimi ve ayarının kontrolü
☐ (h) Dış etkilere uygun donanımın ve güvenlik mesafesinin seçilmesi
☐ (ı) Uygun işlevsel anahtarlama cihazlarının seçilmesi

Denetimi Yapan:.....

Tarih:.....

Notlar:
√ : Denetleme uygulanmıştır ve sonuç tatmin edicidir.
X : Denetleme uygulanmıştır ve sonuç tatmin edici değildir.

1- SELV bir çok düşük gerilim sistemi olup topraklamadan ve diğer sistemlerden ayrılmıştır. Özel yönetmelik ve düzenlemeler kontrol edilmelidir. (Madde 42-b)
2- Doğrudan dokunmaya karşı koruma yöntemi uygulanıyorsa uygun mesafelerin ölçülmesi gereklidir.
3- Engeller ile koruma özel durumlarda kabul edilir.(Madde 43-d)
4- Erişme uzaklığı dışına yerleştirme ile koruma özel durumlarda kabul edilir. (Madde 43-e)
5- Sınıf II donanım kullanımı yalnızca tesisatın etkin bir denetim altında olduğu kanıtlandığında nadiren kabul edilir. (Madde 44-c)
6- İletken olmayan bölgeler ile koruma konut binaları için uygun olmayıp özel önlemler gerektirir. (Madde 44-d)
7- Toprak bağlantısı olmayan potansiyel dengeleme ile koruma konut binalarında uygun olmayıp yalnızca özel durumlarda kullanılır. (Madde 44-e)
8- Elektriksel ayırma. (Madde 44-f)

Şekil 11.2. Uluslararası standarta göre tercüme edilmiş elektrik tesisatı kontrol formu

11.1. Ark Patlaması Etkilerine Karşı Alınan Önlemlerin Kontrolü İle Klasik Kontrol Listesinin Genişletilmesi

Elektrik çarpmasına karşı yukarıda tanımlanan klasik kontrol ve denetlemeler maalesef ark patlaması tehlikelerini kapsamamaktadır. Elektrik tesisatı kontrolünün tam olarak yapılması için kontrol ve denetlemelerin eksik kalan kısmı olan ark patlaması (arc flash) etkilerinden korunmak için alınması gereken önlemlerin etkinliğinin de değerlendirmesi gerekir. Aşırı akım koruma cihazının tasarımı için yüke, kablo akım taşıma kapasitesine ve gerilim düşümüne göre tahkik edilmesi işlemleri yapılır. Bu işlemler tesisat denetlemesi kapsamında olmamakla beraber uygulamanın doğruluğu ve işletme sırasındaki kayıtdışı değişikliklerin tespiti bağlamında kontrol prosedürüne eklenmiştir. Benzer şekilde kısa devre akımı hesabı ve ark patlaması analizi de tesisatın tasarımında değerlendirilecek konulardır. Tesisat denetlemesi sırasında uygulamada alınan önlemlerin doğruluğu ve kayıt dışı değişikliklerin olup olmadığı kontrol edilmelidir. Örneğin panodaki devre kesicilerin kısa devre kesme kapasitesi, panonun önceden hesaplanmış olan kısa devre akımıyla uyumlu mudur? Pano önünde çalışan elektrikçinin giymesi gereken KKD, önceden hesaplanmış olan ark patlamasının şiddetine uygun mudur? Pano önünde belirlenen etkili ark mesafesi, önceden tahkik edilmiş mesafeye uygun mudur? Sonuç olarak klasik elektrik çarpmasına karşı koruma testlerine ek olarak ark patlaması tehlikesine ilişkin alınacak önlemlerin kontrollerinin eklenmesiyle, denetlemeler geliştirilecektir.

11.2. Ark Patlaması Etkilerinin Kontrolü İle Genişletilmiş Elektrik Tesisat Denetlemesinin Adımları

TS HD 60364-6:2016 standartında ve elektrik iç tesisleri yönetmeliğinin 46. maddesinde belirlenen klasik elektrik çarpmasına karşı koruma önlemlerinin kontrolüne ek olarak NFPA 70E:2018 ve IEEE 1584:2018 (IEEE 1584, 2018) standartlarında belirtilen ark patlaması tehlikesine karşı alınan önlemler eklendiğinde aşağıdaki kontrol listesi oluşmaktadır (Garnham) (Lovegrove, 1993).

Elektrik tesisat kontrolünde kullanılan terimler;

Önlemin varlığının kontrolü: Bir önlemin var olup olmadığı kontrol edilir. Örneğin; Mahfaza dış kapak kilidinin olması durumunda kontrolden geçer.

Önlemin uygunluğu: Bir önlemin değerlendirmesi ve belirli bir baz değere göre karşılaştırarak verilen uygunluktur. Örneğin; koruma iletkenlerinin direnci için R2 < 1 ohm ise uygunluk verilir. Elektrik tesisatının incelenmesindeki kontrol adımları aşağıdaki gibi yapılandırılabilir (Dudor, 2000) (Bicheno, 2008).

1- Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma
2- Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)
3- Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25 m)
4- Pano dış kapak kilidi
5- Pano dış kapağı topraklama köprüsü
6- Pano iç kapağının uygunluğu
7- Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)
8- Pano tipi-ark dayanımı
9- Pano sismik (deprem) kontrolü
10- Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel
11- Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı
12- Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması
13- Şemalar, Talimatlar, Devre Çizimleri ve Kısa Bilgiler
14- Tehlike İşaretleri ve Diğer Uyarı İşaretleri
15- Koruma Cihaz ve Terminal Etiketleri
16- Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma
17- Kablo Renk Kodu, Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil
18- Kablo yalıtımı uygunluğu
19- Aşırı akım devre kesicinin, koruduğu kabloyla uygunluğu
20- RCD uygunluğu (BEAMA, 2010)
21- Aşırı gerilim cihazı uygunluğu
22- Devamlılık testi uygunluğu
23- Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu
24- RCD performans testleri uygunluğu (BEAMA, 2010)
25- Toprak çevrim empedansı uygunluğu (György vd.)

26- Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu (Hadziefendic vd., 2019)
27- Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu
28- Panonun maksimum kısa devre akımı hesaplanmış mıdır (Vivanco , 1998b)
29- Şalter kısa devre kesme kapasitesinin pano kısa devre akımına uygunluğunun kontrolu
30- Arkın en etkili olduğu mesafe hesaplanmış mıdır (Coache vd., 2018)
31- Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (< 1,2 cal/cm^2) hesaplanmış mıdır?
32- Çalışma mesafesinde ısı yoğunluğu belirlenmiş midir?
33- Çalışma mesafesinde ark patlama kategorisi belirlenmiş midir (Coache vd. 2018)

11.3. Elektrik Tesisatı Kontrol Adımlarının Ağırlığı ve Önem Sırasının Belirlenmesi İçin Yöntem Seçimi

Elektrik tesisat denetlemesindeki adımlarının ağırlıkları eşit öneme sahip olmayıp, önemine göre sıralanması, düzeltici faaliyetlerin önceliklendirilmesi gereklidir. Örneğin pano terminal etiketlemesi uygunluğu ile panonun önündeki yalıtım papasının kontrolündeki denetim ağırlığı ve düzeltici faaliyet önceliği aynı değildir. İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesi yönetmeliğindeki Madde 10-a planlama maddesinde; etkilerin büyüklüğüne ve önemine göre sıralama yapılması gerektiği belirtilmiştir. Bu sıralamanın yapılmasında çok ölçekli karar verme tekniği; tesisat denetleme adımlarının önceliklendirilmesi için uygun yöntemler sunmaktadır. Çok ölçekli karar verme tekniği, Risk yönetimi-Risk değerlendirme teknikleri başlığı ile TS EN IEC 31010:2019 standartında MCA (Multi critera analysis) şeklinde yer almıştır. Çok ölçekli karar verme tekniklerinin bazıları;

-Ağırlıklı ortalama yöntemi
-Analitik hiyerarşi süreci
-Analitik ağ süreci
-Moora yöntemi
-Electre yöntemi

-Topsis yöntemi

-Vikor yöntemi

-Promethee yöntemi

-Uta yöntemi

ve bunların bulanık versiyonlarıdır (Cho) Burada çok ölçekli karar verme yöntemi olan analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve bulanık AHP kullanılmıştır.

Önceliklendirme ağırlığının belirlenmesinde uzmanın psikolojisi ve mesleki yetkinliği çerçevesinde matematik kullanılarak alternatifler önceliklendirilebilir (Kisa, 2014).

11.3.1. Analitik hiyerarşi süreci (prosesi)-AHP

Thomas L. Saaty tarafından 1977'de geliştirilen yöntem istatiksel ve sezgisel olarak anlamlı sonuçlar vermesi bakımdan oldukça etkili bir modeldir (Harker ve Vargas 1987) AHP'nin değerlendirilmesinde hem kesikli hem de sürekli değişkenlere ait ikili karşılaştırmalar yapıldığından karar verici uzmanın deneyimi önem kazanmaktadır (Partovi ve Hopton, 1994).

AHP yönteminde karar veya sıralama için gerekli ölçütler belirlendikten sonra uygun hiyerarşik katmalar oluşturularak varyasyon sayısı düşürülür. İkili karşılaştırma matrisleri oluşturularak uzmanlardan ikili karşılaştırmaları yapması istenir. Yapılan karşılaştırmada 3'lü, 5'li veya 9'lu üstünlük puanlamaları yapılır. Puanlamaların işlendiği sütunların toplamları bulunur. Her bir eleman sütun toplamına bölünüp, satır ortalaması alındığında ağırlıklar ortaya çıkmış olur. Ağırlık toplamının 1 (%100) olması önemlidir. Bulunan ağırlıkların tutarlılığının da değerlendirilmesi gerekir. Keza ikili değerlendirmelerin kendi içinde bir mantığı olmalıdır. CR tutarlılık oranının 0,1'den küçük olmaması durumunda değerlendirme tekrarlanır. Bulunan ağırlıklar matrisinin λ_{max} maksimum özdeğeri bulunup CI tutarlık endeksi oluşturulur (Braunschweig, 2009).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \qquad (11.1)$$

CI: Tutarlılık endeksi

n: Uzman değerlendirmesinde karşılaştırılan seçenek sayısı

Rassal endeks değeri n uzman değerlendirmesinde karşılaştırılan seçenek sayısına göre tablodan seçilir.

Çizelge 11.1. Rassal endeks tablosu

n	3	4	5	6	7	8
RI	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

CI tutarlılık endeksi, RI rassal endeksle oranlandığında CR tutarlılık oranı bulunmuş olur. Tutarlık oranının 0,1'den küçük olması durumunda uzman değerlendirme matrisi tutarlıdır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{11.2}$$

RI: Rassal endeks

Her uzman ikili karşılaştırma değerlendirmeleri her hiyerarşi katmanında tamamlandıktan ve tutarlılık analizleri yapıldıktan sonra ağırlık sıralamalarına ulaşılır.

11.3.2. Ark patlaması etkileriyle genişletilmiş elektrik tesisatı kontrol listesi adımlarının ağırlığı ve önem sırasının AHP yöntemiyle belirlenmesi

Elektrik tesisatının denetlenmesinde listelenmiş olan 33 ölçütün önceliğinin 33×33 tek bir matriste karşılaştırılarak değerlendirilmesi oldukça zordur. Bunun yerine ölçütleri belirli bir hiyerarşi düzeni içinde yönetmelik ve standartlarda belirtilen başlıklara uygun olarak gruplamak hem ikili karşılaştırmaları kolaylaştıracak hem de tutarlılığı 0,1'in altında tutacaktır. 33 ölçütün 33 × 33 matristeki ikili karşılaşmalarının kombinasyonu 528'tir;

$$C(n,x) = \frac{n!}{(n-x)!.x!} \tag{11.3}$$

$C(n,x)$: n ölçütün x'li kombinasyonu

$C(30,2) = \frac{33!}{(33-2)!.2!} = 528$

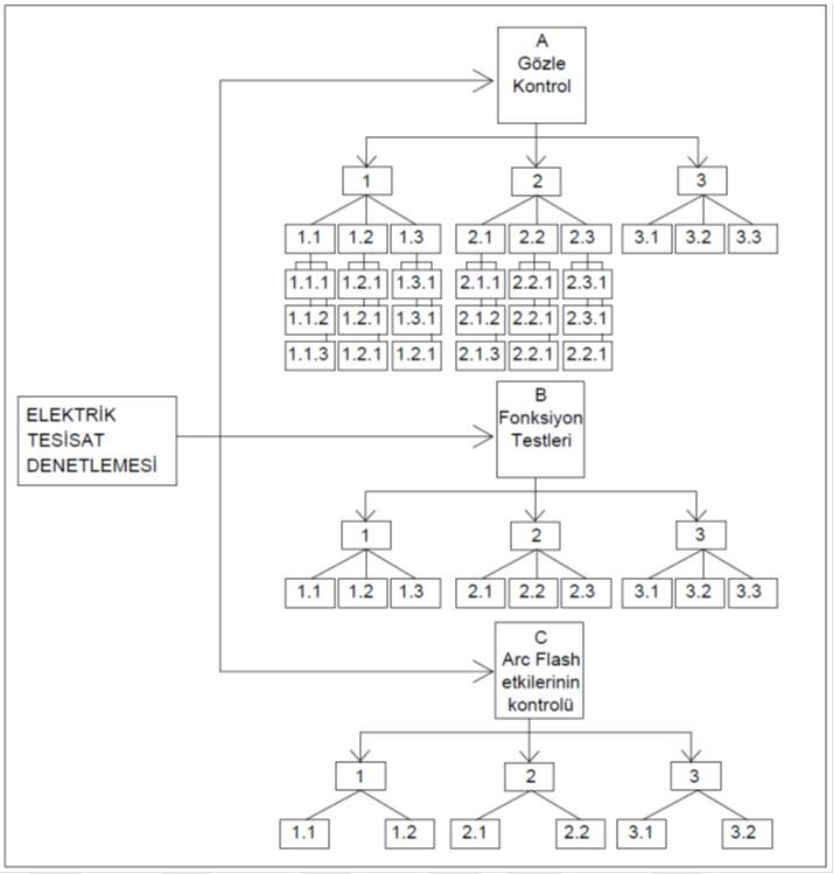
Buna karşın uzmanın bir kerede yapacağı karşılaştırma üç ölçütün ikili karşılaştırmaları olup kombinasyon sayısı ise sadece 3'tür.

$C(3,2) = \frac{3!}{(3-2)!.2!} = 3$

Karar verici uzmanlara ikili karşılaştırma yapılacak 3 × 3 matrislerle 33 ölçütü birkaç hiyerarşi katmanıyla taranması, bir adet 33 × 33 matriste bir kerede 528 karşılaştırma yapmaktan çok daha pratik ve tutarlığı daha yüksek olacaktır (Özdağoğlu, 2011).

11.3.3. Ark patlaması etkileriyle genişletilmiş elektrik tesisatı kontrol kriterlerinde hiyerarşi katmanlarının oluşturulması

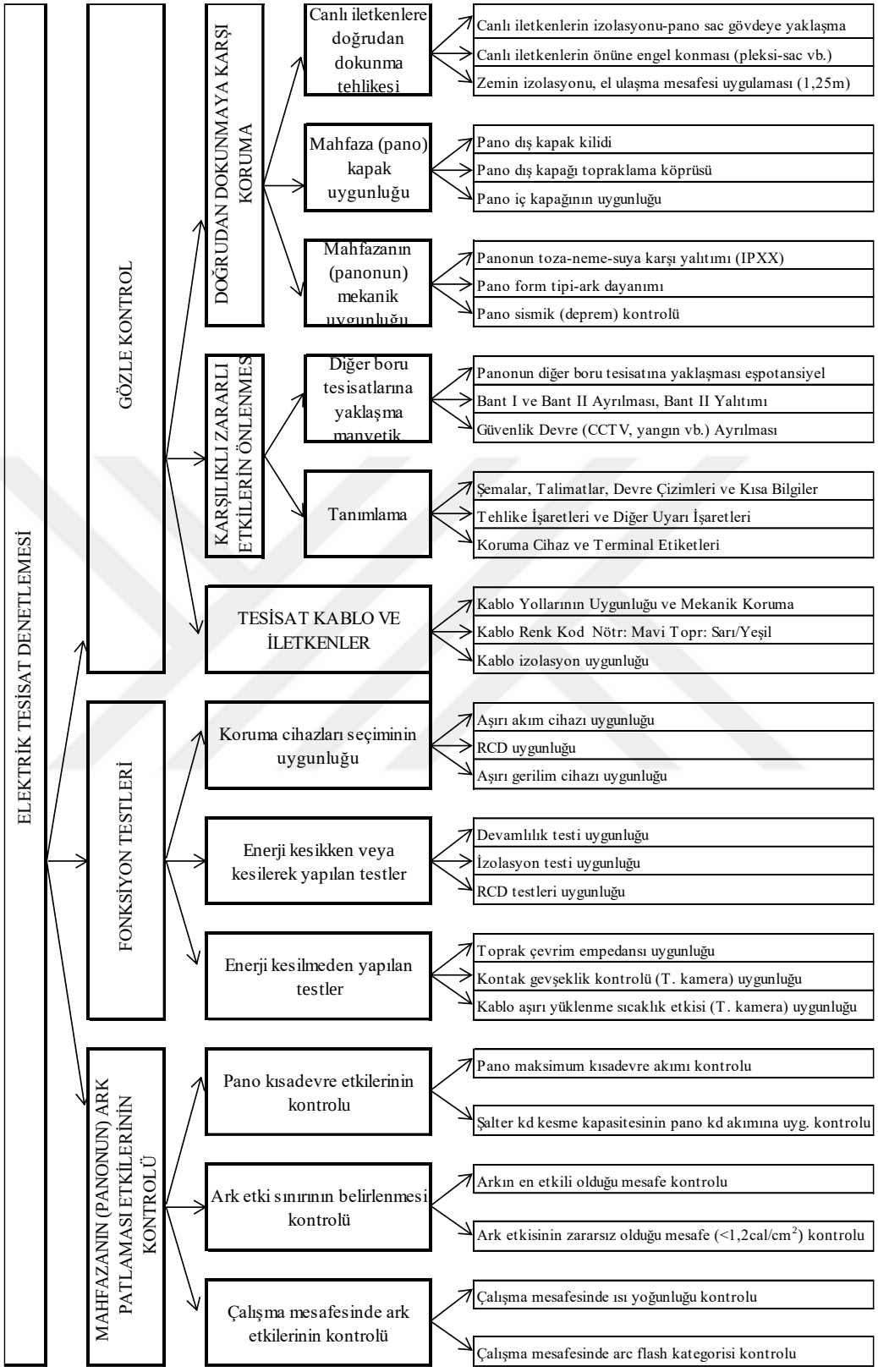
Elektrik tesisat denetlemesi hiyerarşisinin ilk aşamasında gözle kontrol, fonksiyon testleri ve mahfazanın (panonun) ark patlama etkilerinin kontrolü şeklinde üç ana kontrol kıstasına ayrılmıştır. Gözle kontrol ve fonksiyon testleri TS HD 60364-6: 2016 standartında ve elektrik iç tesisleri yönetmeliğinin 46. maddesinde belirlenen klasik elektrik çarpmasına karşı koruma önlemlerinin kontrolünde tanımlanmakta, ark patlamasının etkileri ise NFPA 70E:2018 ve IEEE 1584:2018 standartlarına dayanmaktadır.



Şekil 11.3. Elektrik tesisat denetlemesinin hiyerarşisi

Kontrol listesinin hiyerarşik bir düzen içinde oluşturulması kontrolün yönetmelikte belirlenmiş hangi yöntem üzerinden yapıldığının takibi açısından önemlidir.

Çizelge 11.2. Elektrik tesisatı denetleme listesi hiyerarşisi



A) Gözle kontrol

A.1-Temel koruma, doğrudan dokunmaya karşı koruma

A.1.1-Canlı iletkenlere doğrudan dokunma tehlikesi

A.1.1.1-Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma

İzolatör üzerindeki canlı iletkenlerin metal sac gövdeye yaklaşması kontrol edilir. Yaklaşma olasılığı olan yerlerdeki canlı iletkenlerin üzerine geçirilmiş olan yalıtkan makaron kontrol edilir.

A.1.1.2-Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)

Doğrudan dokunmayı önlemek amacıyla canlı iletkenlerin önüne pleksi yalıtkan veya sac iç kapak engelinin kontrolü.

A.1.1.3-Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25 m)

Mahfaza önündeki yalıtımın uygunluğu. Sertifikalı yalıtkan halı kullanılmaması durumunda uygun bir yöntemle zemin yalıtımının 0,5 megaohm'dan daha yüksek olduğu doğrulanmalıdır. Pano önünde el ulaşma mesafesini sağlayacak şekilde 1,25 m eninde ve pano yanlarından 0,75 m dışarı taşacak şekilde boyutlandırılmalıdır.

A.1.2-Mahfaza (pano) kapak uygunluğu

A.1.2.1-Pano dış kapak kilidi

Panonun dış kapağı kilitli olmalıdır. Bu kilidin anahtarı sadece bu elektrik konusunda eğitimli yetkilendirilmiş personelde olmalıdır.

A.1.2.2-Pano dış kapağı topraklama köprüsü

Pano dış kapağı ile gövde arasında 6 mm^2 kablo ile köprü yapılmalıdır.

A.1.2.3-Pano iç kapağının uygunluğu

Pano iç kapağı yerlerinde olmalı, kısa devrenin dinamik kuvvetlerinin ve ısıl etkilerinin engellenmesi için sabitleme cıvataları yerine takılmış olmalıdır.

A.1.3-Mahfazanın (panonun) mekanik uygunluğu

A.1.3.1-Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)

Panonun IPXX kodu, panonun kullanıldığı yerdeki toz, nem ve damlayan-püsküren suya karşı yalıtımı uygun olmalıdır.

A.1.3.2-Pano form tipi-ark dayanımı

Pano bölmelendirme form tipi örneğin 4b gibi ark dayanımına uygun olmalıdır.

A.1.3.3-Pano sismik (deprem) kontrolü

Deprem olduğunda panonun devrilmesine karşı alınan önlemler kontrol edilmelidir.

A.2-Karşılıklı zararlı etkilerin önlenmesi

A.2.1-Diğer boru tesisatlarına yaklaşma elektrik ve manyetik etkiler

A.2.1.1-Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması ve eşpotansiyel

Panonun ve bağlı kablo yollarının doğalgaz tesisatı, su tesisatı gibi diğer boru tesisatı ile en az 6 mm^2 en fazla 25 mm^2 bakır kablo ile potansiyel dengeleme yapıldığı kontrol edilmelidir.

A.2.1.2-Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı

Bant I (zayıf akımlı data, sinyal vb. kablo ve ekipmanlar) ile Bant II (400/230V tesisat kablo ve ekipmanları) eğer aynı panoda ise ayrı sac bölmelerde ve ayrı sac tavalarda taşınmalıdır (seperatörlü tavalara izin verilir).

A.2.1.3-Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması

Güvenlik Devreleri (CCTV, yangın vb.) Bant I ve Bant II'den ayrılmalıdır.

A.2.2-Tanımlama

A.2.2.1-Şemalar, Talimatlar, Devre Çizimleri ve Kısa Bilgiler

Panonun kapak cebinde şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler bulunmalıdır.

A.2.2.2-Tehlike İşaretleri ve Diğer Uyarı İşaretleri

Pano önünde hem elektrik çarpma tehlikesi hem de ark patlaması tehlikeleri ile ilgili etkiket bulunmalıdır.

A.2.2.3-Koruma Cihaz ve Terminal Etiketleri

Tüm terminaller projesine uygun olarak etiketlenmiş olmalıdır.

A.3-Tesisat kablo ve iletkenler

A.3.1-Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma

Kablo tavalarının bağlantı ve destek elemanlarının uygunluğu kontrol edilmelidir.

A.3.2-Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi Toprak: Sarı/Yeşil

Nötr ve koruma iletkeni yalıtkan renkleri uygun olmalıdır. Aksi durumda sadece uçlardan işaretlemeye izin verilir.

A.3.3-Kablo yalıtımı uygunluğu

Kablo tesisatındaki yalıtım sıyrılmaları kontrol edilmelidir.

B) Fonksiyon testleri

B.1-Koruma cihazları seçiminin uygunluğu

B.1.1-Aşırı akım koruma cihazı uygunluğu

I_b: Yük akımı, I_n: Koruma cihazının anma akımı, I_z: kablo akım taşıma kapasitesi olmak üzere; $I_b < I_n < I_z$ sıralaması sağlanıyorsa uygunluk verilir.

B.1.2-RCD uygunluğu

Seçilen topraklama sisteminden (TT, TN) bağımsız olarak tüm tesislerde; linye devre kesicisi 32 A'e kadar olan genel kullanım prizlerinde, nemli yerlerde, (WC-Banyo ve mutfaklarda vb.) 30 mA kaçak akım rölesi kullanılması durumunda uygunluk verilir.

Linye devre kesicisi 32 A'e kadar olan mobil cihazlarda (seyyar matkap, spiral taş vb.) ve harici yerlerdeki prizlerde 30 mA RCD kullanılması durumunda uygunluk verilir.

Seçilen topraklama sistemine bağlı olarak TT sistemi kullanan tesislerde diğer tüm devrelerin de RCD ile korunması durumunda uygunluk verilir. TN sistemlerdeki diğer devrelerde RCD'ye bağlı olarak uygunluk değerlendirmesi yapılamaz. TN alt sistemlerden TN-C sistemlerde RCD kullanılamaz. TN-CS sistemlerde ise ana dağıtım panolarında RCD kullanılamaz. Sadece TN-CS için yapılan Nötr-Toprak köprüsünün bulunduğu tali panolardan sonra TN-S bölümünde RCD kullanılabilir.

B.1.3-Aşırı gerilim koruma cihazı uygunluğu

Yıldırımdan korunma risk analizine uygun olarak aşırı gerilim koruma cihazı kullanılması zorunlu yerlerde alçak gerilim parafudr'larının mevcut olması ve uygunluğu kontrol edilir.

B.2-Enerji kesikken veya kesilerek yapılan testler

B.2.1-Devamlılık testi uygunluğu

Devamlılık testi; koruma iletkenleri için $R_2 < 1$ ohm, potansiyel dengeleme iletkenleri için $R_2 < 0{,}1$ ohm olması durumunda uygunluk verilir. Direnci bilinen (R_1) yardımcı ölçme kablosu kullanılması durumunda $R_1 + R_2$ ölçüm sonucu tahkikte kullanılabilir.

B.2.2-Yalıtım testi uygunluğu

400/230 V tesisat kablolarının yalıtım testinin sonucu > 0,5 Megaohm olması durumunda uygunluk verilir.

B.2.3-RCD testleri uygunluğu

RCD testlerin beyan açma akımı ve beyan açma zamanına uygunluk kontrol edilir.

B.3-Enerji kesilmeden yapılan testler

B.3.1-Toprak çevrim empedansı uygunluğu

R_a: Topraklama direnci, Z_s: Çevrim empedansı, I_a: Koruma cihazının açma akımı olmak üzere TT sistemde $R_a < 50V/I_a$, TN sistemde $Z_s < 230V/I_a$ olması durumunda uygunluk verilir.

B.3.2-Kontak gevşeklik kontrolü (Termal kamera) uygunluğu

Kontak gevşekliği durumunda ortaya çıkan seri arkların yarattığı kontak ısınmaları termal kamera ile tespit edilmediğinde uygunluk verilir.

B.3.3-Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (Termal kamera) uygunluğu

PVC yalıtkanlı kablolarda sıcaklık 70^oC'yi aşmadığı durumda uygunluk verilir.

C) Mahfazanın (panonun) ark patlaması etkilerinin kontrolü

C.1-Pano kısa devre etkilerinin kontrolu

C.1.1-Pano maksimum kısa devre akımının kontrolu

Panodan geriye doğru trafo geçit izolatörüne kadar üç fazlı kısa devre akımının hesaplanıp hesaplanmadığı kontrol edilir. Çevrim empedansı ölçme aleti ile iki faz üzerinden ölçülen toplam çevrim empedansının yarısı hat empedansı olup 230V gerilim üzerinden kısa devre akımı bulunur. Böylece hesaplanan kısa devre akımı doğrulanır.

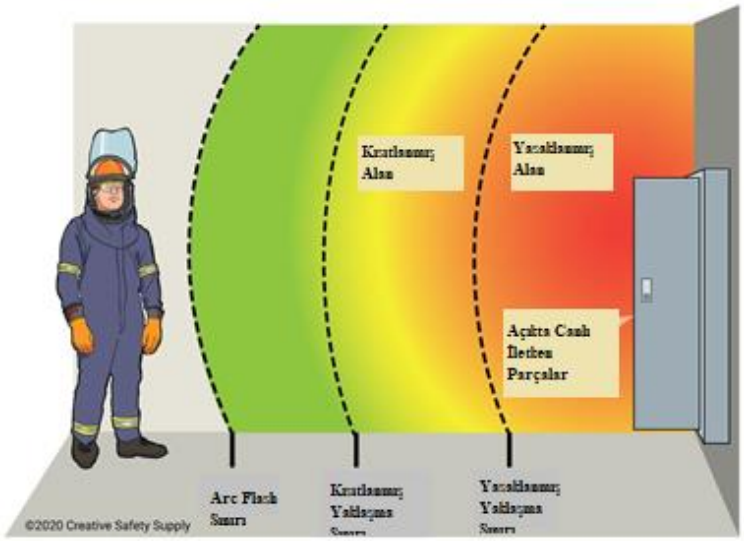
C.1.2- Şalter kısa devre kesme kapasitesinin pano kısa devre akımına uygunluğunun kontrolu

Panoda bulunan tüm devre kesicilerin kısa devre kesme kapasiteleri kontrol edilir. Devre kesici kısa devre kesme kapasitesi pano kısa devre akımından daha büyük olması durumunda uygunluk verilir.

C.2-Ark patlamasının etki sınırının belirlenmesi kontrolü

C.2.1-Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu

Kısa devre akımına göre bulunan ark akımı ve ark maruziyet özenerjisinin en etkili olduğu çalışma mesafesinin (yasaklanmış yaklaşma sınırı) işaretlenmesi veya etikette belirtilmesi durumunda uygunluk verilir.



Şekil 11.4. Ark patlaması yaklaşma sınırları (www.creativesafetysupply.com, 2022)

C.2.2- Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (< 1,2 cal/cm^2) kontrolu

Kısa devre akımına göre bulunan ark akımı ve ark enerjisi maruziyet özenerjisinin 1,2 cal/cm^2 (2. derece iyileşebilir deri yanığı) seviyesine düştüğü (ark patlama sınırı) etki mesafesinin işaretlenmesi veya etikette belirtilmesi durumunda uygunluk verilir.

C.3-Çalışma mesafesinde ark etkilerinin kontrolü

C.3.1-Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu

Pano önünde hesaplanan ark maruziyet özenerjisinin burada çalışan personele zarar vermemesi için ark dayanımlı KKD'nin kategorisinin belirlenmesi için ısı yoğunluğunun NFPA 70E ve IEEE 1584 standartlarına göre hesaplanması gerekir. Isı yoğunluğun belirlenmiş olması durumunda uygunluk verilir.

C.3.2-Çalışma mesafesinde ark patlama kategorisi kontrolu

Pano önünde hesaplanan ark ısı yoğunluğunun burada çalışan personele zarar vermemesi için bu ısı yoğunluğuna dayanıklı KKD temin edilmesi gerekir. Ark etki mesafesi içinde çalışanların giyeceği KKD kategorisinin etikette belirlenmiş olması durumunda uygunluk verilir.

11.3.4. Uzmanların ikili karşılaştırma değerlendirmeleri

AHP yönteminin uygulaması için elektrik tesisat meslek alanında çalışan deneyimli 24 uzman mühendisin görüşlerine başvurulmuştur. Uzmanlar tüm kontrol adımlarını hiyerarşinin her adımında belirlenen kıstasa göre ikişerli karşılaştırılmasını yaparak elektrik tesisat denetlemesinin önceliklendirilmesi için her adımın ağırlığını belirlemiştir.

Değerlendirme kullanılan ölçek 1-9 ölçeği olmakla birlikte 1-5 veya 1-3 ölçekleri daha tutarlı olmaktadır (Moisiadis 1999). Bu yüzden sadece tek sayılar kullanılmış, böylece 5 adet puan kullanılarak seçenek azaltılmıştır. Yakın kararlarda ise ayırıcı olarak çift sayılar kullandırılmıştır.

Uzmanın mesleki tecrübesiyle belirlediği önem derecesi;
1 olduğunda seçeneklerin aynı ağırlıkta olduğunu düşündüğü,
3 olduğunda seçeneklerin birinin ağırlığının biraz daha yüksek olduğunu düşündüğü,
5 olduğunda seçeneklerin birinin ağırlığının yüksek olduğunu düşündüğü,
7 olduğunda seçeneklerin birinin ağırlığının çok yüksek olduğu uygulamada da görüldüğü,
9 olduğunda seçeneklerin birinin ağırlığının çok çok yüksek olduğu uygulamadaki yaygın görüş olduğunu değerlendirmiştir.
Aradaki çift sayılar önem derecelerinin arasında kalınması durumunda kullanılır. Örneğin birinci adımdaki Gözle kontrol, fonksiyon testleri ve mahfazanın (panonun) ark patlaması etkilerinin kontrolü Çizelge 11.3'te değerlendirilmiştir.

Çizelge 11.3. Hiyerarşi katmanındaki uzman değerlendirme örnek tablosu

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Gözle kontrol									×									Fonksiyon testleri
											×							Mahfazanın (Panonun) Ark patlaması etkilerinin kontrolu
Fonksiyon testleri													×					

Uzman değerlendirmeleri her kriter için ve her hiyerarşi adımında ikili karşılaştırma matrislerine işlenir. Satırdaki seçeneklerden hangisi daha önemli ise onun tarafındaki puanlama değerlendirilir. Örneğin gözle kontrol ile mahfazanın (panonun) ark patlaması etkilerinin kontrolü karşılaştırıldığında sağda verilen 3 puan sağdaki seçeneğin daha önemli olduğu anlamına gelir. Bu değer matrise işlenirken sağdaki değer 1/p şeklinde işlenir. Eğer soldaki seçeneğin daha önemli olduğu düşünülseydi ona yakın olan puanlar matrise aynen p şeklinde işlenecektir.

Matris sağ köşegenin 1 olacağı açıktır. Köşegenin altındaki değerler üstündekilerin çarpmaya göre tersi olarak ölçeklendirilir. Böylece sadece 3 değerlendirme yapılması yeterli olacaktır (Genest ve Zhang, 1996).

Herbir eleman sütun toplamına bölünüp, satır ortalaması alındığında ağırlıklar ortaya çıkmış olur. Ağırlık toplamının 1 (%100) olması önemlidir.

Bu durumda en yüksek önceliklendirme %65,54 ile mahfazanın (panonun) ark patlaması etkilerinin kontrolü olmakta, sonra %18,67 ile gözle kontrol testleri gelmekte, son olarak da fonksiyon testleri olmaktadır. Hiyerarşi oluşturulurken alt katmalar bu katsayıları kullanacaktır. Düzeltici faaliyetlerin önceliklendirmesi de bu kontrollerin sonucuna göre değerlendirilecektir.

Çizelge 11.4. Örnek ikili karşılaştırma matrisi

İkili Karşılaştırma Matrisi	Gözle Kontrol	Fonksiyon	Mahfazanın (Panonun)
Gözle Kontrol	1,000000	1,000000	0,333333
Fonksiyon Testleri	1,000000	1,000000	0,200000
Mahfazanın (Panonun)	3,000003	5,000000	1,000000
Sütun Toplamı	5,000003	7,000000	1,533333

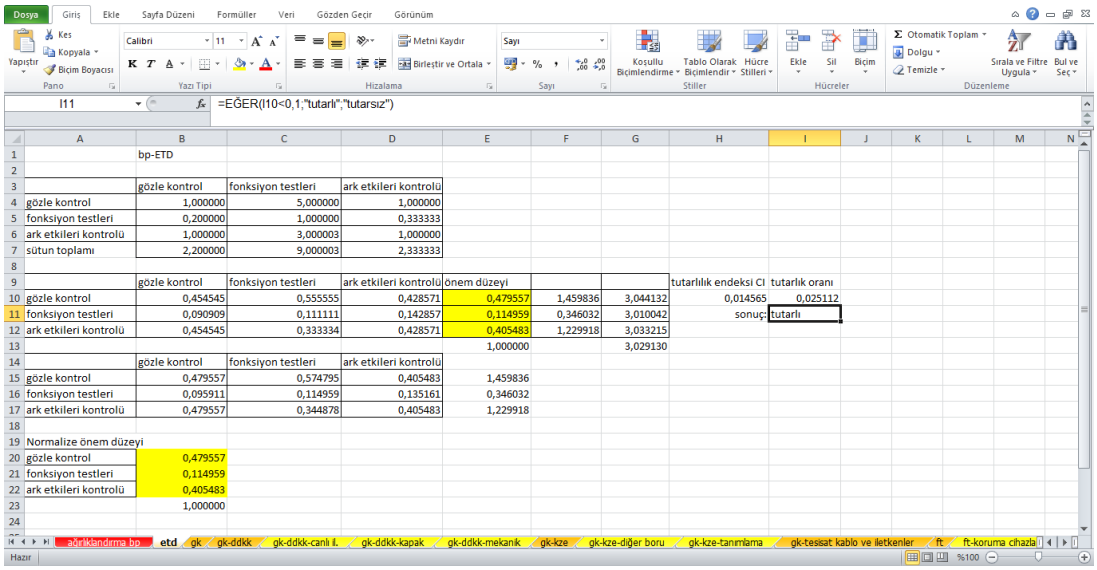
Örneğin;

Gözle kontrol: ……..0,186749

Fonksiyon testleri:……..0,157764

Mahfazanın (Panonun) Ark patlaması etkilerinin kontrolü:……..0,655487

1,000000



Şekil 11.5. Ms excell programı örnek ekran görüntüsü

11.3.5. Tutarlılık kontrolü

Bulunan ağırlıkların tutarlılığının da değerlendirilmesi gerekir. Keza ikili değerlendirmelerin kendi içinde bir mantığı olmalıdır. CR tutarlılık oranının 0,1'den küçük olmaması durumunda değerlendirme tekrarlanır (Nezhad ve Baharlou, 1991).

Bulunan ağırlık 3 × 1 (satır × sütun) matrisi, uzman değerlendirmesi 3 × 3 matrisi ile sütun sütuna çarpılıp satır toplamı alındığında;

Gözle kontrol:.....0,563009
Fonksiyon testleri:.....0,475611
Mahfazanın (panonun) ark patlaması etkilerinin kontrolü:.....2,004555

Bulunan 3 × 1 matris ağırlık sıralaması için bulunan 3 × 1 matris ile birebir oranlanıp sütunun ortalaması alındığında ikili karşılaştırmalar matrisinin λ_{max} maksimum özdeğeri bulunmuş olur.

λ_{max}= 3,029199
11.1. formülünden,

$CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$ (Braunschweig, 2009)

CI: Tutarlılık endeksi

n: Uzman değerlendirmesinde karşılaştırılan seçenek sayısı

$n = 3$

$$CI = \frac{3{,}029199 - 3}{3 - 1}$$

$CI = 0{,}01460$

Tutarlılık oranı CR'nin 0,1'den küçük olması durumunda uzman değerlendirme matrisi tutarlıdır (Nezhad ve Baharlou 1991).

11.2. formülünden

$CR = \frac{CI}{RI}$

RI: Rassal endeks

$RI = 0{,}58$ (çizelge 11.1 rassal endeks tablosundan)

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$CR = \frac{0{,}01460}{0{,}58} = 0{,}025172 < 0{,}1$ Tutarlı

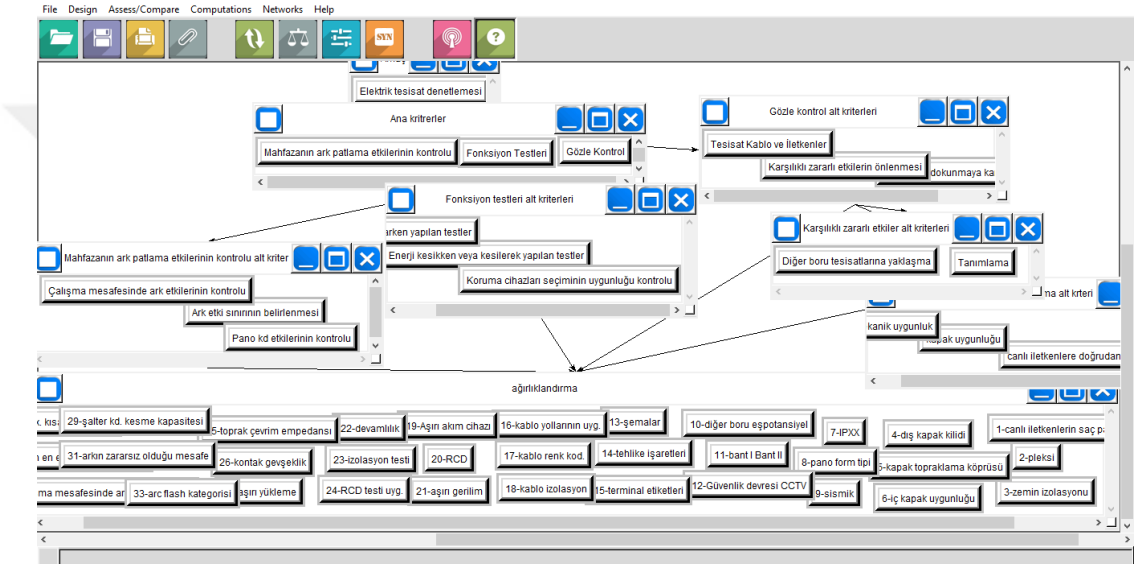
Her uzman ikili karşılaştırma değerlendirmeleri her hiyerarşi katmanında tamamlandıktan ve tutarlılık analizleri yapıldıktan sonra ağırlık sıralamalarına ulaşılır.

Çizelge 11.5. 23 uzmanın oluşturduğu ETD değerlendirmelerinin geometrik ortalaması AHP yöntemi ile işlenmesi

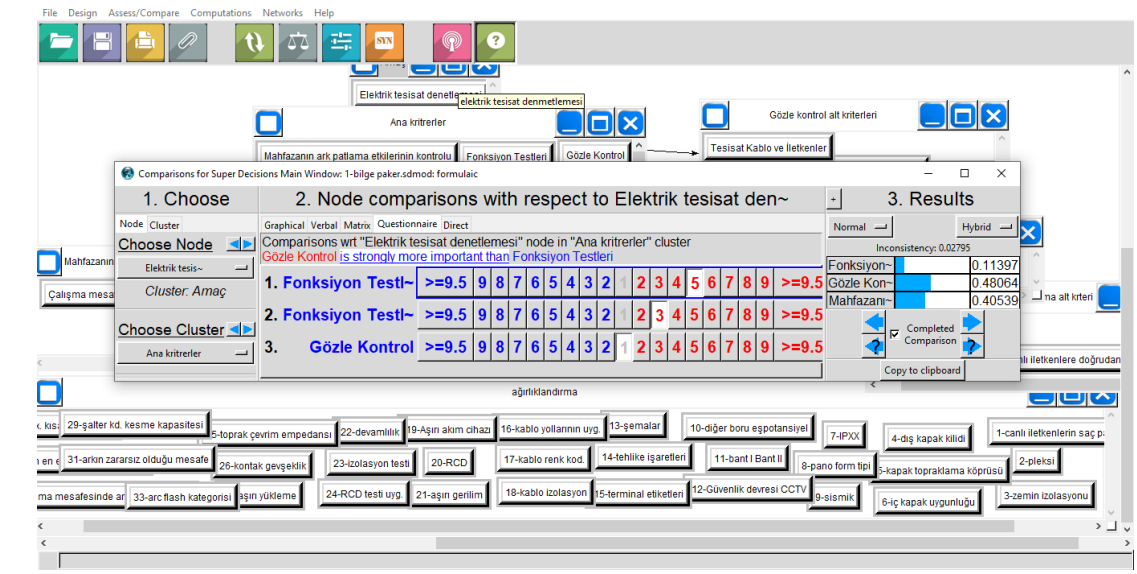
BAZ	ETD	AHP
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	7,54%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	4,58%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	3,40%
4	Pano dış kapak kilidi	2,09%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	2,21%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,92%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	3,31%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	1,79%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,92%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	2,60%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	0,91%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	1,47%
13	Şemalar, Talimatlar, Devre Çizimleri ve Kısa Bilgiler	0,99%
14	Tehlike İşaretleri ve Diğer Uyarı İşaretleri	0,74%
15	Koruma Cihaz ve Terminal Etiketleri	0,72%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	2,26%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi Toprak: Sarı/Yeşil	2,31%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	5,74%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	8,61%
20	RCD uygunluğu	4,26%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	2,90%
22	Devamlılık testi uygunluğu	3,30%
23	Yalıtım testi uygunluğu	2,01%
24	RCD testleri uygunluğu	2,22%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	2,59%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	2,51%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	1,60%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	6,75%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	3,35%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	3,89%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2cal/cm2) kontrolu	2,66%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	4,06%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	4,77%
		100,00%

11.3.6. Super Decision programı ile sağlama

Super Decision programı temel karar problemlerinin çözümü amacıyla Bill Edams ve Elena Rokou tarafından tasarlanarak 14/01/2019 tarihinde Windows programında çalıştırılmak üzere 8.5 versiyonu ile yayınlanmıştır. 23 uzmanın ikili karşılaştırma matrisleri AHP ile ayrı ayrı Ms Excell programı ile ağırlıklandırılmış ve yapılan tüm hesaplamaların sağlaması super decision programı ile yapılmıştır.



Şekil 11.6. Super Decision programı örnek ekran görüntüsü



Şekil 11.7. Super Decision programı ikili karşılaştırma örnek ekran görüntüsü

11.3.7. Üçgensel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (TFAHP)

AHP'de önceliklendirmenin temeli, uzmanların öznel risk algısını değerlendirmesidir. Önceliklendirmede algı temelli belirsizlik, bulanık bir küme ile modellenebilir. Bu bağlamda, FAHP, geleneksel AHP'ye kıyasla kesin sonuçlar vermektedir. Üçgen bulanık sayılar (TFN) *l, m, u* şeklinde gösterilebilir; burada *l* ≤ *m* ≤ *u*, *l* ve *u* sırasıyla alt ve üst değerleri temsil eder ve *m* orta değerdir. TFN ve dilsel parametreler aşağıdaki şekildedir.

1, 1, 2 uzman, seçeneklerin önem-ağırlığının aynı olduğunu düşünür,

1, 2, 3 ara değer,

2, 3, 4 uzmanı, bir seçeneğin önem-ağırlığının biraz daha yüksek olduğunu düşünür,

3, 4, 5 ara değer,

4, 5, 6 uzman, bir seçeneğin önem-ağırlığının daha yüksek olduğunu düşünür,

5, 6, 7 ara değer,

6, 7, 8 uzman, bir seçeneğin önem-ağırlığının çok daha yüksek olduğunu düşünür,

7, 8, 9 ara değer,

8, 9, 9 uzman, bir seçeneğin önem-ağırlığının kesinlikle çok daha yüksek olduğunu düşünür (Dayanandan and Kalimuthu 2018).

Bu nedenle, ikili karşılaştırma matrislerindeki uzman değerlendirmeleri aşağıdaki gibi üçgen bulanık sayılara dönüştürülmüştür.

$$a_{ij}{}_{n\times n} = \begin{bmatrix} 1,1,1 & l_{12}, m_{12}, u_{12} & \dots & l_{1n}, m_{1n}, u_{1n} \\ \vdots & 1,1,1 & & \vdots \\ l_{n1}, m_{n1}, u_{n1} & l_{n2}, m_{n2}, u_{n2} & \dots & 1,1,1 \end{bmatrix} \quad (11.4)$$

Sentez sıra değerini bulmak için, 23 uzmanın değerlendirmelerinin geometrik ortalamasından oluşturulan genelleştirilmiş matrisin her satırı toplanarak ve normalize edilmiştir (Mastura vd., 2015).

$$S_{irow} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \quad (11.5)$$

$$S_{inorm} = S_{irow} / \sum_{j=1}^{n} S_j \quad (11.6)$$

Genişletilmiş Chang yöntemine [11.7] göre $M_2(l_2, m_2, u_2) \geq M_1(l_1, m_1, u_1)$ olasılığı için,

$$V(M_2 \geq M_1)=\begin{cases} 1, & eğer\ m_2 \geq m_1 \\ 0, & eğer\ l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1-u_2}{(m_2-u_2)-(m_1-l_1)} & diğer\ durumlar \end{cases} \quad (11.7)$$

Bununla birlikte, Chang'ın yönteminde, sıfır ağırlık değerlendirmeleri hiyerarşi katmanlarında veri kaybına neden olur ($0, eğer\ l_1 \geq u_2$). Bu nedenle önceliklendirme problemlerinde Chang'ın yöntemi (Rostami vd., 2015) yerine Roy ve arkadaşlarının önerdiği toplam integral yönteminin kullanılması daha uygundur (Akyurt ve Kabadayı, 2020).

$$I_T^{\alpha}(Si) = \frac{1}{2}\alpha(m_i + u_i) + \frac{1}{2}(1-\alpha)(l_i + m_i) = \frac{1}{2}[\alpha u_i + m_i + (1-\alpha)l_i] \quad (11.8)$$

Burada α, uzmanın iyimserlik derecesidir, 0 ile 1 arasında belirlenir. Kötümserlikten iyimserliğe, sırasıyla 0'dan 1'e değişen bakış açısını gösterir. Elektriksel tehlikeler olduğu için bu çalışmada α = 0.2 alınarak karamsarlığa yakın bir değerlendirme yapılmıştır. Normalleştirilmiş öncelik vektörü $W = (w_1, w_2, \ldots, w_n)^T$, bulanık olmayan bir sayıdır.

$$w_i = \frac{I_T^{\alpha}(Si)}{\sum_{i=1}^{n} I_T^{\alpha}(Si)} \quad (11.9)$$

Tutarlılık kontrolü için öncelikle bulanık karar matrisi değerleri Kwong Bai yöntemi ile durulaştırılmıştır (Kwong ve Bai, 2003).

$$M = \frac{l + 4m + u}{6} \quad (11.10)$$

Klasik AHP yönteminde (11.1) ve (11.2) formülleri ile tutarlılık kontrolü CR < 0,1 şeklinde olup olmadığı hesaplanır. 2 × 2 ikili karşılaştırma matrislerinde tutarlık hesabına gerek yoktur. Keza Çizelge 11.1. rassal indeks tablosu $n \geq 3$ için geçerlidir. Genel ETD üçgensel FAHP (TFAP) önceliklendirmesi oluşturmak için

yukarıdaki işlemler her hiyerarşi katmanının ağırlıklarıyla çarpılarak tekrarlanır. Son olarak ağırlık önceliklendirilmeleri normalize edilir.

Çizelge 11.6. 23 uzmanın oluşturduğu ETD değerlendirmelerinin geometrik ortalaması TFAHP yöntemi ile işlenmesi

BAZ	ETD	TFAHP N
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	2,05%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	1,80%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	1,77%
4	Pano dış kapak kilidi	1,01%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	1,15%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,59%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	1,40%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	0,94%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,73%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	3,13%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	1,59%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	2,83%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	1,32%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	1,18%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	1,18%
16	Kablo yollarının uygunluğu ve mekanik koruma	2,91%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi Toprak: Sarı/Yeşil	2,76%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	5,87%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	6,38%
20	RCD uygunluğu	29,54%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	3,44%
22	Devamlılık testi uygunluğu	2,62%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	2,32%
24	RCD testleri uygunluğu	2,81%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	3,51%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	3,87%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	2,48%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	10,56%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	4,16%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	4,36%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	3,26%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	5,87%
33	Çalışma mesafesinde ark patlama kategorisi kontrolu	4,90%
		100,00%

11.3.8. Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (SFAHP)

Üç boyutlu bulanık kümelerden olan Küresel Bulanık Kümeler (Spherical Fuzzy Sets/SFS), Gündoğdu ve Kahraman tarafından 2018'de geliştirilmiştir (Gündoğdu ve Kahraman, 2020). Üyelik işlevi küre yüzeyi üzerinde tanımlanarak etki alanı genelleştirilmiş ve örneğin üçgensel bulanık kümelerden daha büyük bir etki alanının tanımlanmasına izin verilmiştir. Küresel bir bulanık sayı (SFN) μ, ν, π şeklinde gösterilip her biri 1'den küçüktür. Burada μ üye olma derecesi, ν üye olmama derecesi ve π kararsızlık üyelik derecesidir. Küresel bulanık sayının, SI sayı değeri aşağıdaki formüllerle hesaplanır (Gündoğdu ve Kahraman, 2020).

$$SI = (|100*((\mu_S - \pi_S)^2 - (\nu_S - \pi_S)^2)|)^{1/2} \quad (11.11)$$

Aynı önem ağırlığının altındaki değerler için

$$1/SI = 1/(|100*((\mu_S - \pi_S)^2 - (\nu_S - \pi_S)^2)|)^{1/2} \quad (11.12)$$

Orjinal makalede küresel bulanık sayılar (SFN), dilsel parametreler ve sayı değerleri SI ve $1/SI$ aşağıdaki şekilde düzenlenmektedir.

0,90 0,10 0,00 SI = 9
0,80 0,20 0,10 SI = 7
0,70 0,30 0,20 SI = 5
0,60 0,40 0,30 SI = 3
0,50 0,50 0,40 SI = 1
0,40 0,60 0,30 $1/SI$ = 1/3*
0,30 0,70 0,20 $1/SI$ = 1/5**
0,20 0,80 0,10 $1/SI$ = 1/7***
0,10 0,90 0,00 $1/SI$ = 1/9

Aynı önem ağırlığının altındaki değerler için verilen 11.12 formülüne göre hesaplanan $1/SI$ değerleri aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenmelidir.

*0,40 0,60 0,30 $1/SI$ = 1,048 yerine 1/3 = 0,333 verecek bulanık sayı,
**0,30 0,70 0,20 $1/SI$ = 1,154 yerine 1/5 = 0,200 verecek bulanık sayı,
***0,20 0,80 0,10 $1/SI$ = 1,400 yerine 1/7 = 0,142 verecek bulanık sayı kullanılmalıdır.

0,50 0,50 0,40 ile 0,35 0,65 0,55 arasındaki sayılar listeden çıkarılmıştır.
*0,40 0,60 0,50 $1/SI$ = 1 sayı değeri mükerrer olduğundan listeden çıkarılmıştır.
0,45 0,55 0,45 ara değeri $1/SI$ = 10 sayı değeri anlamsız olduğundan listeden çıkarılmıştır.

Düzeltilmiş küresel bulanık sayılar(SFN), dilsel parametreleri, sayı değerleri SI, $1/SI$ ve çift ara değerlerle genişletilmiş liste aşağıdaki şekildedir.
0,90 0,10 0,00 önem-ağırlığı kesinlikle çok daha yüksek, SI=9
0,85 0,15 0,05 ara değer, SI = 8
0,80 0,20 0,10 önem-ağırlığı çok daha yüksek olduğunu düşünür, SI=7
0,75 0,25 0,15 ara değer, SI = 6
0,70 0,30 0,20 önem-ağırlığı daha yüksek, SI = 5
0,65 0,35 0,25 ara değer, SI = 4
0,60 0,40 0,30 önem-ağırlığı biraz daha yüksek, SI = 3
0,55 0,45 0,35 ara değer, SI = 2
0,50 0,50 0,40 önem-ağırlığı aynı, SI = 1
0,35 0,65 0,55 ara değer, $1/SI$ = 1/2
0,30 0,70 0,60 önem-ağırlığı biraz daha düşük, $1/SI$ = 1/3
0,25 0,75 0,65 ara değer, $1/SI$ = 1/4
0,20 0,80 0,70 önem-ağırlığı daha düşük, $1/SI$ = 1/5
0,15 0,85 0,75 ara değer, $1/SI$ = 1/6
0,10 0,90 0,80 önem-ağırlığı çok daha düşük, $1/SI$ = 1/7
0,05 0,90 0,85 ara değer, $1/SI$ = 1/8
0,00 0,90 0,90 önem-ağırlığının kesinlikle çok daha yüksek, $1/SI$ = 1/9

Küresel bulanık AHP yöntemi uygulamasında aşağıdaki süreç izlenmiştir (Kocakaya vd., 2021).

İkili karşılaştırma matrislerindeki uzman değerlendirmeleri μ, ν, π şeklindeki küresel bulanık sayılara dönüştürülmüştür.

$$a_{ij}{}_{n\times n} = \begin{bmatrix} 0{,}5,0{,}5,0{,}4 & \mu_{12},\nu_{12},\pi_{12} & \dots & \mu_{1n},\nu_{1n},\pi_{1n} \\ \vdots & 0{,}5,0{,}5,0{,}4 & & \vdots \\ \mu_{n1},\nu_{n1},\pi_{n1} & \mu_{n2},\nu_{n2},\pi_{n2} & \dots & 0{,}5,0{,}5,0{,}4 \end{bmatrix} \quad (11.13)$$

Oluşturulan matrislerin tutarlılığı küresel bulanık sayıların sayı değerleri olan SI karşılıkları ile bulunur. Daha sonra klasik AHP yönteminde (11.1) ve (11.2) formülleri ile tutarlılık kontrolü $CR < 0{,}1$ şeklinde olup olmadığı hesaplanır. 2×2 ikili karşılaştırma matrislerinde tutarlılık hesabına gerek yoktur. Keza Çizelge 11.1 rassal indeks tablosu $n \geq 3$ için geçerlidir. 23 uzmanın değerlendirmelerinin geometrik ortalamasını bulmak için SWGM operatörü kullanılmıştır.

$$\text{SWGM}=\begin{pmatrix} \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_{si}}^{w_i} \ , \ \left(1-\prod_{i=1}^{n}\left(1-\nu_{A_{si}}^{2}\right)\right)^{\frac{1}{2}}, \\ \left[\left(\prod_{i=1}^{n}(1-\nu_{A_{si}}^{2}\right)^{w_i}-\left(\prod_{i=1}^{n}(1-\nu_{A_{si}}^{2}-\pi_{A_{si}}^{2}\right)^{w_i}\right]^{1/2} \end{pmatrix} \quad (11.14)$$

İkili karşılaştırma martislerinin birleşimi bulunduktan sonra ağırlığın bulabilmesi için gerekli olan satır aritmetik ortalamaları SWAM operatörü ile yapılmıştır.

$$\text{SWAM}=\begin{pmatrix} \left[1-\left(\prod_{i=1}^{n}(1-\mu_{A_{si}}^{2}\right)^{w_i}\right]^{1/2}, \ \prod_{i=1}^{n} \nu_{A_{si}}^{w_i} \ , \\ \left[\left(\prod_{i=1}^{n}(1-\mu_{A_{si}}^{2}\right)^{w_i}-\left(\prod_{i=1}^{n}(1-\mu_{A_{si}}^{2}-\pi_{A_{si}}^{2}\right)^{w_i}\right]^{1/2} \end{pmatrix} \quad (11.15)$$

Skor fonksiyonu kullanılarak küresel bulanık sayılar durulaştırılır.

$$S(\tilde{w}_j^s)=\sqrt{|100\ \times [(3\mu_{\tilde{A}S}-\frac{\pi_{\tilde{A}S}}{2})^2-(\frac{\nu_{\tilde{A}S}}{2}-\pi_{\tilde{A}S})^2]|} \quad (11.16)$$

SFAP önceliklendirmesi oluşturmak için yukarıdaki işlemler her hiyerarşi katmanında çarpılarak tekrarlanır ve normalize edilir.

Çizelge 11.7. 23 uzmanın oluşturduğu ETD değerlendirmelerinin geometrik ortalaması SFAHP yöntemi ile işlenmesi

BAZ	ETD	SFAHP N
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	0,23%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	0,55%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	0,52%
4	Pano dış kapak kilidi	0,50%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	0,48%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,32%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	0,56%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	0,36%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,38%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	1,64%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	1,86%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	3,65%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	3,02%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	1,55%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	2,58%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	1,23%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil	1,25%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	1,11%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	2,93%
20	RCD uygunluğu	5,58%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	6,87%
22	Devamlılık testi uygunluğu	5,13%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	3,23%
24	RCD testleri uygunluğu	5,60%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	5,86%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	2,82%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	3,55%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	11,60%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	5,03%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	4,48%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	2,86%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	8,02%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	4,63%
		100,00%

11.3.9. Ağırlık tablolarının değerlendirilmesi birleştirilmesi ve Önceliklendirme

Çizelge 11.8. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), yöntemiyle bulunan sonuçlar

BAZ	ETD	AHP N
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	8,61%
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	7,54%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	6,75%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	5,74%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	4,77%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	4,58%
20	RCD uygunluğu	4,26%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	4,06%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	3,89%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	3,40%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	3,35%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	3,31%
22	Devamlılık testi uygunluğu	3,30%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	2,90%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	2,66%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	2,60%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	2,59%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	2,51%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil	2,31%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	2,26%
24	RCD testleri uygunluğu	2,22%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	2,21%
4	Pano dış kapak kilidi	2,09%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	2,01%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	1,79%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	1,60%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	1,47%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	0,99%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,92%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,92%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	0,91%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	0,74%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	0,72%

Çizelge 11.9. Üçgensel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (TFAHP) yöntemiyle bulunan sonuçlar

BAZ	ETD	TFAHP N
20	RCD uygunluğu	23,76%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	8,50%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	5,13%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	4,72%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	4,72%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	3,94%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	3,51%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	3,34%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	3,11%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	2,83%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	2,77%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	2,63%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	2,52%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	2,34%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	2,28%
24	RCD testleri uygunluğu	2,26%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil	2,22%
22	Devamlılık testi uygunluğu	2,11%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	2,00%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	1,86%
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	1,65%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	1,45%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	1,43%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	1,28%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	1,13%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	1,06%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	0,95%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	0,95%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	0,93%
4	Pano dış kapak kilidi	0,81%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	0,75%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,59%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,47%

Çizelge 11.10. Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (SFAHP) yöntemiyle bulunan sonuçlar

BAZ	ETD	SFAHP N
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	11,60%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	8,02%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	6,87%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	5,86%
24	RCD testleri uygunluğu	5,60%
20	RCD uygunluğu	5,58%
22	Devamlılık testi uygunluğu	5,13%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	5,03%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	4,63%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	4,48%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	3,65%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	3,55%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	3,23%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	3,02%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	2,93%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	2,86%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	2,82%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	2,58%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	1,86%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	1,64%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	1,55%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil	1,25%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	1,23%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	1,11%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	0,56%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	0,55%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	0,52%
4	Pano dış kapak kilidi	0,50%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	0,48%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,38%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	0,36%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,32%
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	0,23%

Klasik AHP yöntemine göre yapılan sıralamada (Çizelge 11.8) yerine getirilmediğinde riskli durumların ortaya çıkacağı koruma önlemleri ilk 19 sıraya yerleşmiştir. Bunlardan aşırı akım koruma cihazının cihazının kablo akım taşıma kapasitesine göre uygunluğunun kontrolü önem sırasında en üst seviyeye gelmiştir. Canlı iletkenlerin yalıtımı, canlı iletkenlerin önüne konması gereken plexi veya sac gibi engellerin kontrolü ile pano kısadevre akımının kontrolü üst seviyelerde gerçekleşmiştir.

Topraklamanın kontrolü ve yangın tehlikesinin kontrolundan sonra 20. sırayla birlikte kablo renk kodlarının uygunluğu ve kablo yollarının (tava) kontrolü ile birlikte daha minör önlemlerin kontrolü aşamasına geçilmiştir. Sıralamada en düşük ağırlıklar, 32. sıradaki Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri ile son sıradaki koruma cihaz ve terminal etiketlerinin kontrolü olmuştur. Bu yöntemde genel olarak daha riskli durumlar daha yukarı sıralara yerleşmiş, daha düşük riskli maddelerin daha düşük puan alarak dengeli dağıldığı görülmüştür. Bu bağlamda Klasik AHP yöntemi önlemlerin ağırlık sıralamasının yapılması için kullanışlı bir yöntem olduğu görülmektedir.

Üçgensel bulanık AHP yöntemine göre yapılan sıralamada (Çizelge 11.9) yerine getirilmediğinde riskli durumların ortaya çıkacağı koruma önlemleri ilk 23 sıraya yerleşmiştir. Bunlardan kaçak akım rölesinin (RCD) uygunluğunun kontrolü önem sırasında en üst seviyeye gelmiştir. Pano kısadevre akımının kontrolü ile aşırı akım koruma cihazının cihazının kablo akım taşıma kapasitesine göre uygunluğunun kontrolü üst seviyelerde gerçekleşmiştir. Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.) ve zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25 m) konrolünden sonra Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı ile panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX) kontrolü ile birlikte daha minör önlemlerin kontrolü aşamasına geçilmiştir. Sıralamada en düşük ağırlıklar, Pano sismik (deprem) kontrolü ile son sıradaki pano iç kapağının uygunluğu'nun kontrolü olmuştur. Bu yöntemde genel olarak daha riskli durumlar daha yukarı sıralara yerleşmiş olmakla birlikte daha düşük riskli Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil kontrolü maddelerin daha yüksek puan aldığı görülmüştür.

Küresel bulanık AHP yöntemine göre yapılan sıralamada (Çizelge 11.10) yerine getirilmediğinde riskli durumların ortaya çıkacağı koruma önlemleri ilk 27 sıraya yerleşmiştir. Bunlardan pano maksimum kısa devre akımı kontrolu önem sırasında en üst seviyeye gelmiştir. Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolü ile toprak çevrim empedansı uygunluğu'nun kontrolü üst seviyelerde gerçekleşmiştir. Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX), canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.) ile zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25 m) kontrolü ile birlikte daha minör önlemlerin kontrolü aşamasına geçilmiştir.

Sıralamada en düşük ağırlıklar, pano iç kapağının uygunluğu ile canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşmasının kontrolü olmuştur. Bu yöntemde genel olarak daha riskli durumlar daha yukarı sıralarda olmakla birlikte koruma cihaz ve terminal etiketlerinin kontrolü gibi bazı düşük riskli maddelerin daha yüksek puan aldığı görülmüştür.

Bu değerlendirmelere göre tüm baz satırların ortalaması alınarak üç yöntemin bileşkesi oluşturulabilir. Bu ortalama ağırlıklarla yapılan tablo Çizelge 11.11'de verilmiştir. Ortalamanın önceliklendirmesinde (çizelge 11.12) yerine getirilmediğinde riskli durumların ortaya çıkacağı koruma önlemleri ilk 20 sıraya yerleşmiştir. Bunlardan kaçak akım rölesinin (RCD) uygunluğunun kontrolü önem sırasında en üst seviyede oluşmuş, daha minör önlemler 21. sıradan itibaren sıralanmışlardır.

Çizelge 11.11. Analitik Hiyerarşi Süreci-AHP, Üçgensel Analitik Hiyerarşi Süreci TFAHP ve Küresel Analitik Hiyerarşi Süreci-SFAHP yöntemleriyle bulunan sonuçların ortalaması

BAZ	AHP N	TFAHP N	SFAHP N	Ort. N
1	7,54%	1,65%	0,23%	3,14%
2	4,58%	1,45%	0,55%	2,19%
3	3,40%	1,43%	0,52%	1,78%
4	2,09%	0,81%	0,50%	1,13%
5	2,21%	0,93%	0,48%	1,20%
6	0,92%	0,47%	0,32%	0,57%
7	3,31%	1,13%	0,56%	1,66%
8	1,79%	0,75%	0,36%	0,97%
9	0,92%	0,59%	0,38%	0,63%
10	2,60%	2,52%	1,64%	2,25%
11	0,91%	1,28%	1,86%	1,35%
12	1,47%	2,28%	3,65%	2,47%
13	0,99%	1,06%	3,02%	1,69%
14	0,74%	0,95%	1,55%	1,08%
15	0,72%	0,95%	2,58%	1,41%
16	2,26%	2,34%	1,23%	1,95%
17	2,31%	2,22%	1,25%	1,93%
18	5,74%	4,72%	1,11%	3,86%
19	8,61%	5,13%	2,93%	5,56%
20	4,26%	23,76%	5,58%	11,20%
21	2,90%	2,77%	6,87%	4,18%
22	3,30%	2,11%	5,13%	3,51%
23	2,01%	1,86%	3,23%	2,37%
24	2,22%	2,26%	5,60%	3,36%
25	2,59%	2,83%	5,86%	3,76%
26	2,51%	3,11%	2,82%	2,82%
27	1,60%	2,00%	3,55%	2,38%
28	6,75%	8,50%	11,60%	8,95%
29	3,35%	3,34%	5,03%	3,91%
30	3,89%	3,51%	4,48%	3,96%
31	2,66%	2,63%	2,86%	2,71%
32	4,06%	4,72%	8,02%	5,60%
33	4,77%	3,94%	4,63%	4,45%
	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Çizelge 11.12. Elektrik tesisat denetlemesi adımlarının 23 uzman değerlendirmesinin işlenmesiyle bulunan ağırlıklarının önceliklendirilmesi

BAZ	ETD	Ağırlık
20	RCD uygunluğu	11,20%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	8,95%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	5,60%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	5,56%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	4,45%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	4,18%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	3,96%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	3,91%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	3,86%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	3,76%
22	Devamlılık testi uygunluğu	3,51%
24	RCD testleri uygunluğu	3,36%
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	3,14%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	2,82%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	2,71%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	2,47%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	2,38%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	2,37%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	2,25%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	2,19%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	1,95%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil	1,93%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	1,78%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	1,69%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	1,66%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	1,41%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	1,35%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	1,20%
4	Pano dış kapak kilidi	1,13%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	1,08%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	0,97%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,63%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,57%

Genelleştirilmiş 33 satırlı tablonun ağırlıklarının büyükten küçüğe doğru sıralanması; aynı zamanda iş kazasının ortaya çıkaracağı sonuçların sıralanmasını oluşturur. Bununla birlikte oluşturulan önceliklendirme tablosu elektrik mühendisi uzmanların deneyimlerine ve mühendislik tecrübesine bağlı olarak önceliklendirme bölümler halinde değerlendirilebilir. Tablodaki bölüm sınırlarının belirlenmesinin kriteri, uygunsuzluğu durumunda ortaya çıkacak yaralanmanın şiddetiyle ilişkilidir. Örneğin canlı iletkenlere dokunma uygunsuzluğu ölüm tehlikesi ile sonuçlanabileceğinden majör (büyük) uygunsuzluk olarak tanımlanırken, toprak kablosunun rengini sarı/yeşil olması uygunsuzluğu minör (küçük) hatadır.

11.3.9.1. Önceliklendirmedeki ilk bölüm (Kırmızı: Majör uygunsuzluklar)

Yapılan önceliklendirmede uzmanların 33 kontrol maddesi arasında en önem verdiği konu RCD (kaçak akım rölesi) uygunluğunun kontrolu olmuştur. Gerçekten elektrik tesisatında RCD cihazlarının etkinliği temel önemdir. Canlı iletkenlere doğrudan dokunma yoluyla oluşabilecek elektrik çarpması tehlikeleri ve kısa devre akımının oluşturabileceği ark patlaması tehlikeleri uzmanların önem sırasının önceliklendirmesinde ilk sıralara girmiştir. Keza bu bölümde tespit edilen uygunsuzlar ölüm ve yaralanma oluşturması açısından en yüksek riskli bölümdür.

Bu bağlamdaki uzman değerlendirmelerin önceliklendirmenin ilk 20 maddesinde toplanmıştır. Burada belirlenen uygunsuzluklara majör uygunsuzluk denebilir. Keza diğer yönetim sistemleri gibi iş sağlığı ve güvenliği yönetim sisteminde de major uygunsuzluk terimi standardın gerekliliklerini karşılayan bir sistemin yokluğu veya uzun süreli aksamaya uğraması durumunda kullanılmaktadır. Elektrik çarpmasına karşı korumada canlı iletkenlere doğrudan dokunma tehlikesi, aşırı akım koruma cihazlarının yanlış seçilmesi veya cihazın kendisinin uygun olmaması, kısa devre sonucu oluşabilecek yüksek enerjili arkın iş kazasına yol açma tehlikesine karşı önlem alınmaması veya alınan önlemlerin uygun olmaması, majör uygunsuzluk tanımını karşılamaktadır.

Major uygunsuzluklar:

- Tolere edilemez risk. Acil olarak müdahele edilip düzeltilmeli.
- Ek kontroller uygulanır.
- Ayrıntılı aksiyon ve plan gerekli.
- Bu durumda çalışmaya devam edilemez.

11.3.9.2. Önceliklendirmedeki ikinci bölüm (Mavi: Minor uygunsuzluklar)

Bu bölümde; ölüm veya yaralanma riskinin devam etmekle birlikte ilk bölümde olduğu kadar yüksek olmadığı uygunsuzluklar tespit edilir. Yapılan önceliklendirme sıralamasında 21. sıradan itibaren elektrik tesisatında panonun koruma önlemlerinin etkinliğinin kontrol basamakları sıralanmıştır. Bu bölümde şemalar, talimatlar, devre çizimleri, koruma cihaz terminal etiketleri gibi kontrol adımları bulunmaktadır. Bu bağlamdaki uzman değerlendirmelerin önceliklendirmenin 21. ila 33. maddeleri arasında toplanmıştır. Burada belirlenen uygunsuzluklara minor uygunsuzluk denebilir. Keza diğer yönetim sistemleri gibi iş sağlığı ve güvenliği yönetim sisteminde de minor uygunsuzluk terimi standartın veya prosedürün gerekliliklerinin yeterince sağlanamaması, yetersiz olması veya sapma olması durumunda kullanılmaktadır. Örneğin pano dış kapağı ile gövde arasındaki topraklama köprüsünün bulunmaması, tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri gibi uygunsuzluklar minör uygunsuzluk tanımını karşılamaktadır.

Minor uygunsuzluklar:

- Tolere edilebilir risk. İlk fırsatta düzeltilmelidir.
- Düşük bir miktar risk içerir. Yönetimin özel sorumluluğu.
- Ek kontroller gerektirir.

11.3.10. Elektrik tesisatı kontrolunun değerlendirmesi

Kontrol listeleri üzerinden uygunsuzluk alan her bir kontrol adımının ağırlık toplamlarından faydalanılarak, o panoya risk durumunu ortaya koyan bir değerlendirme yapılmıştır. Kırmızı etiketli panolar çok yüksek riskli, mavi etiketli panolar orta riskli, yeşil etiketli panolar düşük riskli olarak

etiketlendirilmiştir. Elektrik tesisatı kontrolü için yapılan kontrol listesi için uygunsuzluk ağırlıklarının toplamına uygun olarak tüm tesisat için veya belli bir tesisat bölümü için kantitatif bir değerlendirme yapılabilir.

Çizelge 11.13. Ark patlaması etkileriyle genişletilmiş elektrik tesisatı denetlemesi risk kontrolü

Elektrik tesisat denetlemesi risk kontrol tablosu		
ΣW toplam ağırlığı	ΣW > 55%	Çok yüksek risk
	20% < ΣW ≤ 55%	Orta risk
	ΣW ≤ 20%	Düşük risk*

*Bu bölümde majör uygunsuzluk bulunamaz

Örneğin elektrik tesisat kontrol listesindeki uygunsuzluklar toplamı; %45,69 olduğunda orta risk kategorisine girer. Panoya mavi etiket düzenlenebilir.
20% ≤ 45,69% < 55%: Orta risk.

12. ARK MARUZİYET ÖZENERJİSİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ

Ark patlaması olaylarının etkilerinin azaltılması çalışmalarında ark patlaması analizinin çıktıları geri besleme olarak değerlendirilebilir. Ark enerjisinin azaltılması ile vereceği hasar, servis sürekliğindeki aksamaların azalması ve bunun yanı sıra çalışan personelin güvenliğinin de arttırılmasına yardımcı olacaktır. Bir ark patlaması olayında oluşan ısıl ve basınç etkilerden korunma bağlamında uygulanabilecek önlemler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (www. library.e.abb.com, 2022).

12.1. Ark Etkilerinin Azaltılmasında Proaktif Önlemler

Ark patlaması analizi sayesinde arkın etkili olduğu bölge sınırları belirlendikten sonra mümkün olduğu kadar bu bölge içinden manevra yapılmaması yani uzaktan izleme ve manevra yapılma olanaklarının oluşturulması, çekmeceli (kızaklı) bölmeler ile ark riskini arka bölümde tutmak, proaktif önlemeler olarak değerlendirilebilir.

Uzaktan izleme sisteminde örneğin mevcut kontak sıcaklığı verisi gibi, ekipman yaşlanma verisi gibi kestirimci bakım programı oluşturulabilir.

12.2. Ark Etkilerinin Azaltılmasında Aktif Önlemler

Kısa devrelere karşı koruma genellikle devre kesicilerle (termik manyetik şalterler), sigortalarla (eriyen telli) ve röle açtırma üniteleriyle yapılır. Kısa devre temizleme süresi 0,2 ila 0,4 saniye arasındadır.

12.2.1. Seçicilik (Selektivite)

TS-EN 60947-1 Alçak Gerilim Anahtarlama ve Kontrol Elemanları Standardı Genel Kurallar bölümüne göre seçiciliğin sağlanması, birden fazla koruma cihazı seri bağlandığında, sadece arızalı olan bölümünün tesisattan ayrılmasını sağlayacak şekilde belirlenmesi ile mümkün olmaktadır.

TS-EN 60947-2 Alçak Gerilim Anahtarlama ve Kontrol Elemanları Standardı Devre Kesiciler bölümünde seçicilik tanımı tam seçicilik ve kısmi seçicilik olarak iki bölüme ayrılmaktadır.

Tam seçicilikte; İki devre kesici anahtarlama elemanı (açık tip devre kesici, termik manyetik şalter, anahtarlı otomatik sigorta, buşon veya bıçaklı sigorta) seri bağlandığında ve yük tarafında bir hata oluştuğunda, yük tarafındaki koruma cihazının, diğerinin açmasına izin vermeksizin tam koruma yaptığı durumdur.

Buşonlu (D tipi) ya da bıçaklı (NH tipi) sigortalarda seçicilik kolayca oluşturulur. Art arda devreleri koruyan iki sigortanın anma akımları arasında $I_{n1} > 1{,}6 \times I_{n2}$ koşulu varsa, bu iki sigorta arasında tam seçicilik sağlanmış olur.

Kısmi (amperometrik) seçicilikte; İki devre kesici anahtarlama elemanı (açık tip devre kesici, termik manyetik şalter, anahtarlı otomatik sigorta, buşon veya bıçaklı sigorta) seri bağlandığında ve yük tarafında bir hata oluştuğunda, yük tarafındaki koruma cihazının, diğerinin açmasına izin vermeme durumunun tam olarak değil belirli bir akım seviyesine kadar koruma yaptığı durumdur.
Devre kesiciler normal şartlarda; üzerinden geçen hata akımı arttıkça, açma süresinin azaldığı bir ters zaman karakteristiğine göre çalışır. Ardışık bağlı iki devre kesicinin selektif çalışmaları için açma süreleri, akım ayar değerleri arıza anında anahtarlama elemanından geçen akım değerlerini gösteren açma eğrilerinin çakışmaması gerekir.

Elektronik tip koruma üniteleriyle donatılan devre kesicilerde, I^2t=sabit fonksiyonuna göre açma gerçekleştiğinden; Yükte oluşan bir arıza akımı; ardışık bağlı iki elektronik tip koruma üniteleriyle donatılan devre kesiciden şebeke tarafı anma akım değerinin % 105'ini geçmemiş ve yük tarafı anma değerinin % 120'sini geçmiş ise yük tarafı şalteri açar ve kısmi seçicilik gerçekleşmiş olur.

12.2.2. Hızlı açma yöntemleri

Ark enerji yayılması veya maruziyet özenerjisi zamana bağlı bir büyüklük olduğundan arkı besleyen akım ne kadar kısa sürede kesilirse o kadar az enerji açığa çıkar. Bu bağlamda devre kesicileri çok hızlı çalıştıracak aktif önlemler alınmalıdır.

-Optik tabanlı ark parlaması algılama cihazları

-İç ark tespitinden sonra ark yolu köprülenerek yeni bir kısa devre yolu hazırlanması

-Akım sınırlayıcı (limiter) sigortalarla ark söndürme sisteminin kombinasyonu.

-Mevcut şalterden daha küçük açma akımına sahip bakım anahtarı ile ark enerjisini büyümeden sınırlandırmak.

-Hızlı topraklama anahtarı ile alan bazlı seçicilik kilitlemesi ile şalter özelinde zaman-akım seçiciliği yerine bölgesel seçicilik kilidi kullanılması.

-Bara diferansiyel koruması ile baraya gelen ve çıkan tüm hatların izlenmesi ile bölge oluşturulması

-Şalter mevcut ayarlarının yanı sıra şalterin 2. Ayar seti oluşturulmasına izin vermesi.

-Optik tabanlı ark parlaması sisteminin tetikleyeceği küçük açma zamanlı setin devreye alınması yöntemleri kullanılabilir.

12.3. Ark Etkilerinin Azaltılmasında Pasif Önlemler

Ark patlamasına dayanıklı mahfazalar (arc rated enclosure) ile etkilerin dışarı çıkmasının önlenmesi, yalıtılmış baralarla ark riskinin düşürülmesi, ark sonrası

çıkan erimiş metal buharlarının ve kopan parçacıkların zarar vermeyecek şekilde yönlendirilmesi şeklinde tanımlanabilecek pasif önlemler alınmalıdır.

Alçak gerilimli panolarda oluşabilecek iç ark olaylarının dışarıya nüfuz etmemesi için

IEC 61641 (iç ark deneyi 0,5 s trip süresinde) testleriyle garanti edilebilir.
Maksimum koruma sınıfı I (AIPZ)
Minimum C sınıfı 0,5 s

IEC 61439 -1 ve TS EN/IEC 61439-2'e uygun olarak tip testlerini tamamlamış mahfazalar,

Ark dayanımlı panolar,
-Yalıtılmış baralar
-İç ark sırasında oluşan basınca mekanik dayanım,
-İç ark sırasında oluşan aşırı sıcak gazların ve metal parçacıklarının kontrollü tahliyesi,
-İç arkın diğer ekipmanlara zarar vermesini önlemek için metal iç bölmeler yapılması (Form 4b)
-Ark önleyici bölge oluşturulması önlemleri kullanılabilir.

13. SONUÇ VE ÖNERİLER

İş sağlığı ve güvenliği bağlamında çalışanların etkileneceği yaralanma veya ölüm gibi maruziyetlerin elektrik kaynaklı olması durumu genel olarak elektrik çarpması veya ark etkileri şeklinde değerlendirilebilir. Elektrik çarpmasının insan vücuduna etkileri ve bundan korunma yöntemleri elektriğin tarihsel gelişimi ile birlikte gelişmiştir. İstatistiksel olarak elektrik çarpmasından dolayı ölüm sayıları özellikle alçak gerilimli sistemlerde düşüş eğilimi içindedir.

Elektrik çarpmasında, yangın üçgenine benzeyen, kenarları akım, zaman ve yol olan bir elektrik çarpması üçgeni kullanılabilir. Böyle bir elektrik şok üçgenini ilk defa Ravel F. Ammerman kendi Doktora tezinde göstermiştir. Burada verilen sadece üçgen üzerinde herhangi bir sayısal ölçeklendirme mevcut olmayıp üçgenin kenarları akım, zaman ve yol şeklindedir. Bu çalışmadaki çarpma üçgeni ise standarta uygun olarak ölçeklendirildiğinden öncekine göre çok daha gelişmiş ve kullanışlı bir grafik olarak literatürde yenilik olarak yerini almıştır.

Elektrik kaynaklı iş kazalarının değerlendirilmesinde ark maruziyeti konusu elektrik çarpması maruziyeti konusuna göre daha yeni bir konudur. Ark olayı tam kısa devre (bolted) akımına bağlı olarak incelenmektedir. Keza incelenen alçak gerilimli ark sırasında akan ve büyük hasara sebep olan akım hiçbir zaman kısa devre akımından büyük olamaz. Bu yüzden öncelikle kısa devre olayı ve kısa devre çeşitleri incelenmiştir. Kısa devre akımının hesaplanmasında özellikle dengesiz asimetrik kısa devreler için yüksek gerilimli şebekelerde kullanılan simetrili bileşenler yöntemi literatürde yenilik olarak alçak gerilime uyarlanarak TN-C, TN-S, TN-CS ve TT sistemine göre modellenmiştir.

Ark patlaması terimi bir elektrik tesisatı içinde arızadan kaynaklanan ark için kullanılmaktadır. Ark bir gazın içinde kendi kendini besleyebilen elektriksel bir boşalmadır. Gaz iyonizasyonu sebebiyle oluşur ve iyonizasyon nedeniyle farklı potansiyeldeki elektrotlar arasında ya da elektrot ve toprak arasında iletken bir bağlantı oluşturur. Ark patlaması sırasında büyük miktarda enerji ortaya çıkar. Bu enerji kontrol edilerek ark kaynağı ve ark fırını teknolojisi geliştirilmiştir.

Ancak ark patlaması kontrolsüz durumda büyük hasara sebep olur. Ark sırasında yoğun ısı, ses, basınç ve ışık formunda enerji oluşur. Ark patlamasının insan vücudu üzerindeki etkileri de ark patlamasının ısı yoğunluğu, basınç, ses ve ışık etkisi üzerinden değerlendirmiştir. Özellikle ark patlamasının basınç etkisinin panonun bulunduğu binaya veya odaya vereceği hasar etkileri ile insan vücuduna olan ölüm veya yaralanma etkileri modellenmiştir. Ark patlamasının ısıl etkilerine karşı ark dayanımlı kişisel koruyucu donanımlar ark maruziyet özenerjisi hesabı yapılarak seçilmelidir. NFPA 70E:2018 ve IEEE 1584:2018 standartlarına göre Cat I-E ≤ 4 cal/cm^2, Cat II-E ≤ 8 cal/cm^2, Cat III-E ≤ 25 cal/cm^2, Cat IV-E ≤ 40 cal/cm^2 olmalıdır. Bu gereklilik Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliğinin Ek II-3.8.1 maddesine eklenmelidir.

IEEE 1584:2018 standartına göre ark ısı yoğunluğu ve ark etki mesafesi formülleri anma şebeke gerilimine, kısa devre akımına, bara düzenine, pano boyutlarına bağlı olarak verilmiştir. Bu çalışma alçak gerilimli ark patlamalarını konu ettiğinden genel kullanıma bağlı konfigurasyonlarda VCB elektrot düzeni ve 400 V anma şebeke gerilimi baz alınarak modellenmiştir. Standartta verilen ampirik formüllerdeki logaritma hataları düzeltilmiş, eksik olan katsayı ise sp olarak eklenmiş ve bir saha uygulaması hesabı adımları verilmiştir.

Ark patlama riskinin değerlendirmesi ve risk kontrolünde iş sağlığı ve güvenliği metodolojisi içinde (5 × 5) şiddet ve olasılık büyüklüklerinin belirlenmesi için modelleme yapılmıştır. NFPA 70E çalışma alanlarında elektrik güvenliği ile ilgili Christopher D. ve arkadaşlarının çalışmalarında ark ısı yoğunluğuna bağlı maruziyet şiddeti hesaplarının sonuçlarına göre yapılan ısı yoğunluğu modellemesi verilmiş ancak olasılık değerlendirmesi sadece meydana gelecek tehlikeli olayın sıklığı ve süresi ile sınırlı bırakılmış yanı sıra verilen olasılık katmanı detaylandırılmamıştır. Bu çalışmada maruziyet olasılığı için iki yeni katman daha oluşturulmuştur. Meydana gelecek tehlikeli olayın farkedilme olasılığı ve yaralanmadan kaçınma veya tehlikeli olayın sınırlanma olasılığı katmanları literatürde yenilik kullanılmıştır.

İşletmelerde elektrik kaynaklı tehlikelerin belirlenmesinde mevcut durumda iş güvenliği profesyonelleri tarafından alçak gerilimli tesislerde elektrik çarpmasına karşı alınan önlemler bir kontrol listesi üzerinden değerlendirilmektedir. Bu kontrol listeleri Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği'nde ve TS HD 60364-6'da verilmektedir. Halbuki elektrik ile ilgili tehlikeler sadece çarpma tehlikesi olmayıp, ark patlaması tehlikeleri de mevcuttur. Literatürde yenilik olarak ark patlaması etkilerine karşı alınan önlemler de kontrol listelerine (check-list) eklenmiştir. Ark patlaması etkilerine karşı alınacak önlemlerin, Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği'nin 46. maddesine eklenmesi can güvenliği açısından önemlidir.

Yönetmeliklerde ve standartlarda kontrol listeleri verilirken herhangi bir satırın, diğerlerine göre ağırlığı ve önceliği belirtilmemektedir. Bu çalışmada standart ve yönetmeliklere uygun olarak hazırlanan 33 satırdan oluşan kontrol listesinin her bir kontrol adımının ağırlığının aynı olması beklenemez. Kontrol listesindeki adımların önem sırasının önceliğinin belirlenmesi literatürde yenilik olarak modellenmiştir. Modellemede çok kriterli karar verme tekniklerinden, kriterlerin sıralamasını alternatiflerden bağımsız olarak yapabilen analitik hiyerarşi süreci (AHP), üçgensel bulanık sayı kümelerini kullanan üçgensel bulanık analitik hiyerarşi süreci (TFAHP) ve küresel bulanık sayı kümelerini kullanan küresel bulanık analitik hiyerarşi süreci (SFAHP) yöntemleri kullanılmıştır. Ağırlıklandırmalar 23 uzman tesisat denetleme mühendisinin ikili karşılaştırma matrislerinin değerlendirmeleri üzerinden yapılmıştır. Önceliklendirmede ölüm tehlikesine karşı alınan doğrudan dokunmaya karşı koruma ve ark etkilerine karşı koruma önlemlerinin eksikliği majör uygunsuzluklar, doğrudan ölüm tehlikesine yol açmayan uygunsuzluklar minör uygunsuzluklar olarak belirlenmiştir. Böylece iş güvenliği profesyonellerinin yapacağı aksiyon planı için uygunsuzlukların düzeltilmesindeki bu önceliklendirme yol gösterici olacaktır.

Elektrik tesisatı kontrolunda kullanılan önceliklendirme ağırlıkları, kontrol edilen panonun veya tesisatın risk durumunu net olarak ortaya koyacaktır. Kontrol listeleri üzerinden uygunsuzluk alan her bir kontrol adımının

ağırlıklarının toplamlarından faydalanılarak, o panoya risk durumunu ortaya koyan kantitatif bir değerlendirme literatürde yenilik olarak yapılmıştır. Örneğin kırmızı etiketli panolar çok yüksek riskli, mavi etiketli panolar orta riskli, yeşil etiketli panolar düşük riskli olarak etiketlendirilebilir. Böylece panodaki veya tesisat bölümündeki uygunsuzluk ağırlıkların toplamına göre karşılaştırılabilir elektrik tesisatı uygunluk puanı oluşturulmuştur.

Ark etkilerinin azaltılmasında kullanılacak proaktif, aktif ve pasif önlem modelleri de ark patlamasının oluşturacağı hasarların azaltılmasında etkili olacaktır.

Bilindiği gibi elektrik şebekeleri, Avrupa'da ve Türkiye'de şebeke frekansı 50 Hz Amerika'da ise 60 Hz olarak işletilmektedir. IEEE 1584:2018'deki ark maruziyet özenerjisi ve ark patlaması sınırı hesapları da doğal olarak 60 Hz üzerinden yapılmıştır. IEEE'de verilen bu formüllerin Türkiye ve Avrupa'daki 50 Hz frekansa dönüşümüyle ilgili bir çalışma yapılması önerilmektedir.

Ark patlaması olayı olarak tanımlanan mühendislik probleminin çözümünde fiziksel durumların kısmi türevli (diferansiyel) denklemlerden oluşan matematiksel modelleri oluşturulmaktadır. Özellikle başlangıç ve sınır değerlerinin belirlendiği diferansiyel denklemler birçok mühendislik probleminin çözümünde etkili olur. Fiziksel durumu tam olarak açıklayan diferansiyel denklemlerin tam (analitik) çözümü oldukça karmaşık olduğundan yeterli hassasiyette sayısal yöntemlerin kullanılması tolerans sınırları içinde yeterli yaklaşıklıkla doğru sonuç vermektedir. Bu sayısal yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemine dayanan Ansys veya Comsol gibi paket programlar sahada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu programların alt modülleri vasıtasıyla ark patlamasının ısıl, basınç, ses ve ışık dağılımlarını aynı anda (çoklu fiziksel analiz ile) incelenerek standartlarla verilen amprik formüllerin doğrulamasının yapılması önerilmektedir.

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte araç şarj istasyonları da yaygınlaşmaktadır. Şarj süresinin kısaltılması için kurulan DC şarj noktalarında

araç bataryalarına aktarılan yüksek enerjiden dolayı oluşan tehlikeler ve bunlara karşı alınacak önlemler önem kazanmaktadır. Bu bağlamda şarj istasyonlarındaki DC ark patlaması tehlikeleri ile risk azaltma modellerinin yapılandırması için çalışma yapılması önerilmektedir.

Elektrikli araç şarj istasyonlarının, akaryakıt istasyonlarının içinde kurulduğu hibrit istasyonların yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Akaryakıt istasyonlarının ATEX zone 0 ve 1 (kanopi altı) bölgelerinde yangın ve patlama tehlikesi çok yüksek olduğundan bu tehlikeli bölgelere kurulan DC şarj ünitelerinin risklerinin değerlendirileceği bir çalışma yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Akyurt İ., Kabadayı. N, 2020. Fuzzy AHP and Fuzzy Gray Relational Method for Cargo Aircraft Type Selection, A Case Study in a Turkish Airline Company, 38–55, Journal of Yaşar University, İzmir, Türkiye.

Ammerman R., 2008. Improved Models for Predicting Incident Thermal Energy Exposures Caused by High Energy Arcing Faults in Low- And Medium-Voltage Power Systems, Doctor of Philosophy Dissertation, Colorado School of Mines Golden, Arthur Lakes Library, ProQuest, Michigan, USA.

Aydın A., İriz T., 2005. Alçak Gerilim Kısa Devre Hesapları, Erişim Tarihi: 04.09.2019, https://www.emo.org.tr/ekler/ c0c64c33ed3a246_ek.pdf? tipi =2&turu=X&sube=7, TMMOB-EMO, Ankara, Türkiye.

Alkoç A., Yılmaz F., 2018. İmalat Tesislerinde Yangın Tesisatlarından Kaynaklanan Risklerin Sıralama Yöntemi İle Analizi. Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi 2 (1) 1–11, Zonguldak, Türkiye.

Alperöz N., 1987. Elektrik Enerjisi Dağıtımı, 207-231, Nesil Matbaacılık, İstanbul, Türkiye.

Anders A., 2003. Tracking down the Origin of Arc Plasma Science I. Early Pulsed and Oscillating Discharges, Journal of IEEE Transactions on Plasma Science 31 (5 II): 1052–59, IEEE, New York, USA.

Arefi M., 2014. Applying Optimization Methods to Reduce Arc Flash in Low Voltage Systems, Master of Science in Electrical Engineering, Northeastern University Boston, Massachusetts, USA.

Arthur B., Vijay V., 2000. Power Systems Analysis, 445-495, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Babrauskas V., 2017. Electric Arc Explosions A Review, Fire Safety Journal, 7–15, Open Access Elsevier, USA.

Bajić Z., Bogdanov J., Jeremić R., 2009, Blast Effects Evaluation Using TNT Equivalent, Scientific Technical Review Journal LIX (3) 50–53, Belgrad, Serbia.

BEAMA, 2010. British Electrotechnical and Allied Manufacturers' Association, The RCD Handbook, Selection Guide and Application, London, UK.

Bern D., 2013. Ten founding fathers of the electrical science VIII. Michael Faraday, Electrical Engineering Journal, 73, IEEE, New York, USA.

Bicheno P., 2011. Periodic Inspection and the Electrical Installation Condition Report, IET Wiring Matters Journal, 31–34, London, UK.

Bueno B., Catalán I., Cañas P., Cavallé S., 2007. Arc Roots FEM Modelling and Simulation at Plane Electrodes, 8th International Conference on Electric Fuses and Their Applications, ICEFA 2007, no. 1: 139–43, Blaise Pascal Academic Press, Ceyrat, France.

Chévrier P., Barrault M., Fiévet C., 1996. Hydrodynamic Model for Electrical Arc Modelling, IEEE Transactions on Power Delivery 11 (4) 1824–29, IEEE, New York, USA.

Cicik S., 2016. Asansör Montaj İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Faktörlerinin Değerlendirilmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

Coache C., Moniz G., 2018. Handbook for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E 2018, Massachusetts, USA.

Čonka Z., Máslo K., Bátora B., 2018. Short Circuit Current Calculations, 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE, Proceedings, Prague, Czech Republic.

Cowdrey J., 2006. The War of The Currents. Home Power Journal, no. 11, 88–92, Oregon, USA.

Crow R., 2020. Checklists Improve Human, IEEE Copyright Material, Paper No, ESW2020-08 D, IEEE, New York, USA.

Crowl D., Louvar J., 2011. Chemical Process Safety Fundamentals With Applications, Second Edition, Prentice Hall, Boston, USA.

Dalfes M., 1993. Elektroteknik, Doğru akım ve alternatif akım temel kanunlar makineler problemler elektronik elektrik teknolojisi, Seç yayın dağıtım ISBN 975-7670-02-2, İstanbul, Türkiye.

Dayanandan U., Kalimuthu V., 2018. A Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) Based Software Quality Assessment Model, Maintainability Analysis, International Journal of Intelligent Engineering and Systems 11 (4) 88–96, Fukuoka, Japan.

Divinnie D., Stacy J., Parsons A., 2015. Arc Flash Mitigation Using Active High-Speed Switching, IEEE Transactions on Industry Applications 51 (1): 28–35, IEEE, New York, USA.

DGUV, 2020. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung Information 203-077 Thermische Gefährdung Durch Störlichtbögen, Berlin, Deutschland.

Dudor S., 2000. Application and Use of Inspection Checklists, IEEE Copyright Material, Paper No. PCIC-88-32, IEEE, New York, USA.

Dursun E., 2009. Bulanık AHP Yöntemi ile Tedarikçi Seçimi ve Tekstil Sektöründe Bir Uygulama, İşletme Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Erken S., 2017. Yüksek Gerilim Güç Sistemlerinde Ark Patlamalarının Modellenmesi ve Analizi, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Ersoy Y., 2018. Bulanık AHP Bulanık VZA Yöntemleri Kullanılarak Tedarikçi Performansının Ölçülmesi, Tekstil Sektöründe Bir Uygulama, İşletme Doktora Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, Türkiye.

Font A., 2012. Alçak Gerilim Ark Modelleri ve Arkın Isıl Analizi, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Fortescue C., 1918. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 37, 1027–1140, AIEE, USA.

Furfari F., Wallace H., 2001. A Different Kind of Chemistry: A History of Tungsten Halogen Lamps. IEEE Industry Applications Magazine 7 (6)10–17, IEEE, New York, USA.

Furfari F., 2006. Early Development of the Incandescent Lamp, IEEE Industry Applications Magazine 12 (2) 7–9, IEEE, New York, USA.

Garnham E, 1988. Inspection and Testing of Electrical Installations, IEE Conference Publication European Conference on optical communication, ECOC 8 (287) 87-91, London, England.

Genest C., Zhang S., 1996. A Graphical Analysis of Ratio-Scaled Paired Comparison Data, Management Science Journal, Informs, Maryland, USD.

Göktolga Z., Gökalp B., 2012. İş Seçimini Etkileyen Kriterlerin ve Alternatiflerin AHP Metodu İle Belirlenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi 13 (1): 17–41, Sivas, Türkiye.

Guarnieri M., 2013a. The Beginning of Electric Energy Transmission Part One, IEEE Industrial Electronics Magazine 7 (2) 50–52, IEEE, New York, USA.

Guarnieri M., 2013b. The Beginning of Electric Energy Transmission Part Two, IEEE Industrial Electronics Magazine 7 (2) 57–60, IEEE, New York, USA.

Gurain A., 2003. Investigation and Analysis of Thermal Aging of XLPE and PVC Cable Insulation Materials Manufactured, Master of Science in Electrical Engineering, King Fahd University, Dhahran , Saudi Arabia.

Gündoğdu F., Kahraman C., 2020. A novel spherical fuzzy analytic hierarchy process and its renewable energy application, Soft Computing 24 4607–4621, Springer-Verlag GmbH Germany.

Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M., 2019. Detection of Poor Contacts in Low-Voltage Electrical Installations, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 9 (1): 129–37, IEEE, New York, USA.

Harker P., Vargas L., 1987. Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process, Management Science Journal, Informs, Maryland, USD.

Ho J., Jow T., Boggs S., 2010. Historical Introduction to Capacitor Technology, IEEE Electrical Insulation Magazine 26 (1): 20–25, IEEE, New York, USA.

Hussin I., Teng A., 2015. Assessment of Arc Flash Detection System in Distribution Network, The 3rd National Graduate Conference (NatGrad2015), Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya Campus, Malaysia.

IEEE Std 1584™, 2018. IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations Developed, IEEE, New York, USA.

Iragaba I., Lee W., 2017. 3D Modeling of AC Electric Arc on 60 Hz and 400 Hz. IEEE IAS Electrical Safety Workshop 33 (2), University of Texas Arlington, Texas, USA.

Kabelo K., 2013. Arc Fault Pressure Detector in Low Voltage Switchboard, International Journal of Scientific and Research Publications, 3 (6) 1–7, New Delhi, India.

Kececi A., Parlak N., Cesin A., 2021. Ark Tehlikesi TS EN 50110-1 (2013) Ek B6 IEEE 1584 Ed 2(2018) ve DGUV-I 203-077 Bölüm-1, Erişim Tarihi: 01.04.2021,www.emo.org.tr/ekler/672d42ebc1a1dd0_ek.pdf?tipi=1&turu=X&sube=0, TMMOB-EMO, Ankara, Türkiye.

Kısa Y., 2014. Döküm Atölyelerindeki İş Sağlığı ve Güvenliği Koşullarının Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleriyle Değerlendirilmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

Kothari V., Chakraborty S., 2015. Thermal Protective Performance of Clothing Exposed to Radiant Heat, Journal of the Textile Institute 106 (12): 1388–93. Manchester, England.

Kocakaya K., Engin T., Tektaş M., Aydın U., 2021. Türkiye'de Bölgesel Havayolları için Uçak Tipi Seçimi Küresel Bulanık AHP-TOPSIS Yöntemlerinin Entegrasyonu, Bandırma Onyedieylül Üniversitesi, Akıllı Ulaşımistemleri ve Uygulama Dergisi, 4,1,27-58, Bandırma, Balıkesir, Türkiye.

Kwong C., Bai H., 2003. Determining the Importance Weights for the Customer Requirements in QFD Using a Fuzzy AHF with an Extent Analysis Approach, IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers) 35 (7) 619–26, Tandfonline, London, England.

Layık E., 2016. Gıda Sektöründe Toz Patlamalarının Araştırılması ve Patlamadan Korunma Dokümanının Hazırlanması Bir Uygulama Örneği, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

Lee R., 1987. Pressures Developed by Arcs, IEEE Transactions on Industry Applications, IA, 23 4, IEEE, New York, USA.

Lee W., Gammon T., Zang Z., Johnson B., Vogel S., 2012. IEEE NFPA Collaboration on Arc Flash Phenomena Research Project, IEEE Power and Energy Magazine, IEEE, New York, USA.

Li M., Wu Y., Yifei Wu, Liu Y., Hu Y., 2014. MHD Modeling of Fault Arc in a Closed Container, IEEE Transactions on Plasma Science 42 (10): 2714–15, IEEE, New York, USA.

Lindmayer M., Stammberger H., 1995. Application of Numerical Field Simulations for Low-Voltage Circuit Breakers, IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A 18 (3): 708–17, IEEE, New York, USA.

Lovegrove H., 1993. Inspection, Testing and Verification, IEE Conference Publication, no. 375: 74–79, London, England.

Mastura M., Sapuan S., Mansor M., 2015. A Framework for Prioritizing Customer Requirements in Product Design: Incorporation of FAHP with AHP, Journal of Mechanical Engineering and Sciences 9 1655–70, Universiti Malaysia, Pahang, Malaysia.

Mehlem M., 2016. New Approach in Distribution, I.Occupational Health And Safety Symposium In Electrıcity Distributıon Sector, Elder-Issa, International Social Security Association in ILO, Geneva, Switzerland.

Metz-noblat B., Dumas F., Poulain C., 2005. Calculation of short-circuit currents, Cahier technique no. 158, Schneider Electric Collection technique, France.

Mızrak P., 2014. Bulanık Önceliklendirme Metodu ve Hata Türü ve etkileri Analizini Birleştiren Yeni Bir Risk Analizi Yöntemi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 29 (4) 755–68, Ankara, Türkiye.

Mikerov A., 2012. From History of Electrical Engineering Electricity and Magnetism in Old, Middle Ages and Renaissance, Petersburg State Electrotechnical University, Russia.

Mobarak Y., A. Alshehri A., 2016. Perspectives of Safe Work Practices Improving Personal Electrical Safety of Low-Voltage Systems from Electrical Hazards, Engineering Technology and Applied Science Research 6 (6) 1307–15, Crete, Greece.

Moisiadis F., 1999. Case Study on the Use of Scaling Methods for Prioritising Requirements, INCOSE International Symposium 9 (1): 1451–57, Wiley, New Jersey, USA.

Mutrunu R., Pulikanti S., 2006. Fault analysis and investigation of voltage dips, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Nezhad, G., Baharlou A., 1991. To Drill or Not to Drill A Synthesis of Experts' Judgments, International Journal of Systems Science, 22, 1613-1624, Tandfonline, London, England.

NFPA 70E, 2021. Standard for Electrical Safety in the Workplace, Erişim Tarihi: 15.05.2021, https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70E, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA.

Oğuz Y., Kaysal A., 2016. Modelling of Adıgüzel Hydroelectric Power Plants for Short Circuit Analysis in the Transmission Network, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 5 (9), Tamilnadu, India.

Özdağoğlu A., 2007. Comparison of AHP and Fuzzy AHP for The Multi-Criteria Decision Making Processes With Linguistic Evaluations, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6 11 65-85, İstanbul, Türkiye.

Paker S., 2017. Elektrik İç Tesislerinde Yangından Korunma Yöntemleri, Elektrik Mühendisliği Dergisi, sayı 462, TMMOB-Elektrik Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye

Paker S., 2014. Endüstriyel Tesislerde İş Kazalarına Karşı Artık Akım Cihazlarının Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Partovi F., Hopton W., 1994. The Analytic Hierarchy Process as Applied to Two Types of Inventory Problems, Production and Inventory Management Journal, APICS - The Educational Society for Resource Management, USA.

Prigmore J., Schaffer J., 2017. Triggered Current Limiters-Their Arc Flash Mitigation and Damage Limitation Capabilities, IEEE Transactions on Power Delivery 32 (2) 1114–22, IEEE, New York, USA.

Rajvanshi R., Hawkins T., 2016. Value of Insulated Bus Bars in Reducing Arcing Fault Duration in Low-Voltage Systems. IEEE Transactions on Industry Applications 52 (2): 1280–84, IEEE, New York, USA.

Rakov A., 2012. Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection, Journal of Lightning Research 4 (1), 3–11, Bentham Open, Wallasey, Merseyside, England.

Rangel E., Queiroz A., and Oliveira M., 2016. The Importance of Inspections on Electrical Installations in Hazardous Locations, IEEE Transactions on Industry Applications 52 (1), IEEE, New York, USA.

Rau S., 2016. AC Arc Flash Light Intensity Estimator and MHD Based DC Arc Model, Doctor of Philosophy Dissertation, The University of Texas At Arlington, Texas, USA.

Reynolds S., Bernstein T., 1989. Edison and the Chair, IEEE Technology and Society Magazine 8 (1)19–28, IEEE, New York, USA.

Rondot L., Chadebec O., Meunier G., 2014. 3-D Magnetostatic Moment Method Dedicated to Arc Interruption Process Modeling, IEEE Transactions on Magnetics 50 (2) 4–7, IEEE, New York, USA.

Rostami M, Goudarzi A., Zaj M., 2015. Defining Balanced Scorecard Aspects in Banking Industry Using FAHP Approach, International Journal of Economics and Business Administration 1 (1) 25–38, Boston, USA.

Sarkar, K., Salazar-Palma M., Sengupta D., 2009. Who Was James Clerk Maxwell and What Was and Is His Electromagnetic Theory, IEEE Antennas and Propagation Magazine 51 (4) 97–116, IEEE, New York, USA.

Selvan T., 2007. Engineering Education Presentation of Maxwell's Equations in Historical Perspective and the Likely Desirable Outcomes, IEEE Antennas and Propagation Magazine 49 (5) 155–60, IEEE, New York, USA.

Sha C., 2012. Volta's Battery, Animal Electricity, and Frankenstein, European Romantic Review 23 (1): 21–41, Tandfonline, London, England.

Shea J., 2007. Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 30 (3) 532–39, IEEE, New York, USA.

Shin D., Golosnoy I., Mcbride J., 2017. A Study of Arc Modelling in Low-Voltage Switching Devices, ePrints Soton, University of Southampton Institutional Research Repository, Southampton, England.

Society R., 1997. II. A Letter Concerning the Electricity of Water, from Mr. Stephen Gray to Cromwell Mortimer, (1731), Philosophical Transactions of the Royal Society of London 37 (422): 227–60, London, England.

Sweeting D., 2012. Applying IEC 60909, Fault Current Calculations, IEEE Transactions on Industry Applications, 48:575–80, IEEE, New York, USA.

Şimşekoğlu M., 2021. Ark Patlamalarından Korunma, Elektrik Mühendisliği Tasarım II, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Lea T., 1999. Improved Arcing-Fault Current Models for Low-Voltage Power Systems (< 1 kV), Doctor of Philosophy Dissertation, The Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.

Tatic B., Bogojević N., Šoškić Z., Petrović Z., 2011. Railway Vehicles As The Source of the Noise in the Urban Areas, VII Triennial International Conference Heavy Machınery - HM 2011, 71-80, Zlatibor, Serbia.

Tian M., Li J., 2020. A Method to Predict Burn Injuries of Firefighters Considering Heterogeneous Skin Thickness Distribution Based on the Instrumented Manikin System." International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 1–13, Tandfonline, London, England.

Uçan M., 2011. Enterkonnekte Sisteme Bağlı Generatör ya da Yüksek Gerilim Transformatörlerinin Yıldız Noktasının Topraklamasının Bilgisayar Destekli İncelenmesi, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

Vivanco J., 1998. IEC Short-Circult Calculation, IEEE Cement Industry Conference 41–56, Rapid City, South Dakota, IEEE, New York, USA.

Vujic, J., Marincic A., Ercegovac M., Milovanovic B., 2001. Nikola Tesla 145 Years of Visionary Ideas, 5th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, TELSIKS, Proceedings of Papers 1 323–26, Nis, Yugoslavia (Serbia).

Waes V., Provoost F., Merwe J., Cobben J, Deursen A., Riet M., Laan P., 2000. Current Distribution in LV Networks during 1-Phase MV Short-Circuit, IEEE Power Engineering Society, Conference Proceedings, IEEE, New York, USA.

Wang J., Hihara E., 2004. A Unified Formula for Calculating Body Surface Area of Humans and Animals." European Journal of Applied Physiology 92 (1–2) 13–17, Springer-Verlag, Berlin, Deutschland.

Waterway W., 2005. Benjamin Franklin From Kite to Lightning Rod, Water Encyclopedia, 4, 741-745, Wiley, New Jersey, USA.

www.ampqes.com, 2020. https://ampqes.com/wp-content/uploads /2020/10 /1-OEL_Dig_Catalog-14.jpg, Erişim Tarihi:04.06.2022

www.creativesafetysupply.com, 2022. https://www.creativesafetysupply.com /qa/arc-flash/how-to-determine-ac-flash-boundaries, Erişim Tarihi: 04.06.2022

www.ehs.cornell.edu, 2022. https://ehs.cornell.edu/sites/default/files/2020-02/HearingProtection.jpg, Erişim Tarihi:15.03.2022

www.electricalindia.in, 2018. https://www.electricalindia.in/arc-flash-analytics-and-protection/ Erişim Tarihi:15.03.2022.

www.hse.gov.uk, 2022. https://www.hse.gov.uk/statistics/pdf/fatalinjuries.pdf Erişim Tarihi:04.02.2022.

www.library.e.abb.com, 2022. https://library.e.abb.com/public/2b5f3d9051 ccdd76852576ac006dc16b/1SXU210204G0201.pdf, Erişim Tarihi: 04.06.2022

www.revisionscience.com, 2022. https://revisionscience.com/node/241, Erişim Tarihi:15.03.2022

www.sound2020.org, 2020. https://sound2020.org/images/audibility.png Erişim Tarihi:15.03.2022.

www.statista.com, 2021. http://Number of full-time employees in the United States from 1990 to 2021; statista.com, Erişim Tarihi:04.02.2022.

www.statista.com, 2020. http://www.statista.com/statistics/187112/number-of-occupational-injury-deaths-in-the-us-since-1992/2020, Erişim Tarihi:04.02.2022.

www.studyingdiagrams.com, 2022. https://studyingdiagrams.com/light-sensitive-receptor-cell-from-the-eye-diagram/ Erişim Tarihi:04.06.2022

Yilmaz N., Şenol M., 2017. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Süreci İçin Bulanık Çok Kriterli Bir Model ve Uygulaması, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 32 (1) 85–95, Ankara, Türkiye.

Zhang Z., 2015. Arc Flash Hazards Analysis, Doctor of Philosophy Dissertation, The University of Texas At Arlington, Texas, USA.

Zhang Z., Rau S., Lee W., Gammon T., Johnson B., 2016. Arc Flash Pressure Measurement System Design. IEEE Transactions on Industry applications 52 (6): 5241–47, IEEE, New York, USA.

EKLER

EK A. Önceliklendirmede Analitik Hiyerarşi Süreci, AHP Yöntemi Hesap Detayı

EK B. Önceliklendirmede Üçgensel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci, TFAHP Yöntemi Hesap Detayı

EK C. Önceliklendirmede Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci, SFAHP Yöntemi Hesap Detayı

EK A. Önceliklendirmede Analitik Hiyerarşi Süreci AHP Yöntemi Hesap Detayı

Şekil 11.3'te verilen elektrik tesisat denetlemesinin hiyerarşisine göre
Kriter: Elektrik tesisat denetlemesi

Alt Kriteler: A-Gözle Kontrol, B-Fonksiyon Testleri, C-Ark Etkileri Kontrolu

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Gözle kontrol	Fonksiyon Testleri	Ark Etkileri Kontrolu
Gözle kontrol	1,000000	1,533333	1,690536
Fonksiyon testleri	0,652174	1,000000	1,216927
Ark etkileri kontrolü	0,591528	0,821742	1,000000

Normalize önem düzeyi	
Gözle kontrol	0,445118
Fonksiyon testleri	0,300054
Ark etkileri kontrolü	0,254828

Tutarlık oranı
0,000934 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A-Gözle Kontrol
Alt Kriteler: A1-Doğrudan Dokunma, A2-Karşılıklı Zararlı Etkiler, A3-Tesisat Kablo ve İletkenler

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Doğrudan dokunma	Karşılıklı zararlı etkiler	Tesisat kablo ve iletkenler
Doğrudan dokunma	1,000000	3,804540	2,464252
Karşılıklı zararlı etkiler	0,262844	1,000000	0,759480
Tesisat kablo ve iletken.	0,405803	1,316691	1,000000

Normalize önem düzeyi

Doğrudan dokunma	0,267701
Karşılıklı zararlı etkiler	0,074290
Tesisat kablo ve iletken.	0,103127

Tutarlık oranı
0,002429 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1-Doğrudan Dokunma
Alt Kriteler: A1.1-Canlı İletkenlere D.D., A1.2-Kapak Uygunluğu, A1.3-Mekanik Uygunluk

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Canlı iletkenlere doğrudan dokunma	Kapak uygunluğu	Mekanik uygunluk
Canlı iletkenlere d.d.	1,000000	3,063459	2,505663
Kapak uygunluğu	0,326428	1,000000	0,893007
Mekanik uygunluk	0,399096	1,119812	1,000000

Normalize önem düzeyi

Canlı iletkenlere d.d.	0,155285
Kapak uygunluğu	0,052213
Mekanik uygunluk	0,060204

Tutarlık oranı
0,000739 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1.1- Canlı İletkenlere Doğrudan Dokunma
Alt Kriteler: A1.1.1-Canlı İletkenlerin Yalıtımı, A1.1.2-Engel-Plexi, A1.1.3-Zemin Yalıtımı

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Canlı iletkenlerin yalıtımı	Engel-pleksi	Zemin yalıtımı
Canlı iletken. yalıtımı	1,000000	1,589445	2,295270
Engel-pleksi	0,629151	1,000000	1,301674
Zemin yalıtımı	0,435679	0,768242	1,000000

Normalize önem düzeyi

Canlı iletkenlerin yalıtımı	0,075416
Engel-pleksi	0,045844
Zemin yalıtımı	0,034025

Tutarlık oranı
0,001032 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1.2- Kapak Uygunluğu
Alt Kriteler: A1.2.1-Dış Kapak Kilidi, A1.2.2-Topraklama Köprüsü, A1.2.3-İç Kapak Uygunluğu

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Dış kapak kilidi	Topraklama köprüsü	İç kapak uygunluğu
Dış kapak kilidi	1,000000	0,841604	2,571144
Topraklama köprüsü	1,188207	1,000000	2,133716
İç kapak uygunluk	0,388932	0,468666	1,000000

Normalize önem düzeyi

Dış kapak kilidi	0,020937
Topraklama köprüsü	0,022067
İç kapak uygunluğu	0,009208

Tutarlık oranı
0,012361 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1.3- Mekanik Uygunluk
Alt Kriteler: A1.3.1-IPXX, A1.3.2-Pano Form, A1.3.3-Pano Sismik

23 Uzman Geometrik Ortalaması	IPXX	Pano form	Pano sismik
IPXX	1,000000	1,769831	3,769775
Pano form	0,565026	1,000000	1,876452
Pano sismik	0,265268	0,532921	1,000000

Normalize önem düzeyi

IPXX	0,033101
Pano form	0,017937
Pano sismik	0,009166

Tutarlık oranı
0,001539 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A2- Karşılıklı Zararlı Etkiler
Alt Kriteler: A2.1-Diğer Boru Tesisatına Yaklaşma, A2.2-Tanımlamalar

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Diğer boru tesisatına yaklaşma	Tanımlamalar
Diğer boru tesisatı	1,000000	2,038892
Tanımlamalar	0,490463	1,000000

Normalize önem düzeyi

Diğer boru tesisatına	0,049843
Tanımlamalar	0,024446

Kriter: A2.1- Diğer Boru Tesisatına Yaklaşma
Alt Kriteler: A2.1.1-Doğalgaz Boru, A2.1.2-Bant I Bant II, A2.1.3-Güvenlik Devre

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Doğalgaz boru	Bant I Bant II	Güvenlik devre
Doğalgaz boru	1,000000	3,571207	1,454345
Bant I Bant II	0,280017	1,000000	0,751736
Güvenlik devre	0,687595	1,330254	1,000000

Normalize önem düzeyi

Doğalgaz boru	0,026035
Bant I Bant II	0,009075
Güvenlik devre	0,014733

Tutarlık oranı
0,036214 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A2.1- Tanımlamalar
Alt Kriteler: A2.2.1-Şemalar, Talimatlar, A2.2.2-Tehlike İşareti, A2.2.3-Terminal Etiketi

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Şema, talimatlar	Tehlike işareti	Terminal etiketi
Şema, talimatlar	1,000000	1,415027	1,314618
Tehlike işareti	0,706700	1,000000	1,077250
Terminal etiketi	0,760677	0,928289	1,000000

Normalize önem düzeyi

Şema, talimatlar	0,009910
Tehlike işareti	0,007359
Terminal etiketi	0,007177

Tutarlık oranı
0,002099 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A3- Tesisat Kablo ve İletkenler
Alt Kriteler: A3.1-Kablo Yollarının Uygunluğu, A3.2-Kablo Renk Kodlarının Uygunluğu A3.3-Kablo Yalıtımı Uygunluğu

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Kablo yollarının uygunluğu	Kablo renk kod.	Kablo yalıtımı
Kablo yollarının	1,000000	1,039168	0,371124
Kablo renk kod.	0,962308	1,000000	0,427314
Kablo yalıtımı	2,694516	2,340199	1,000000

Normalize önem düzeyi

Kablo yollarının uyg.	0,022632
Kablo renk kod. uyg.	0,023121
Kablo yalıtım uyg.	0,057374

Tutarlık oranı
0,003085 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B- Fonksiyon Testleri
Alt Kriteler: B.1-Koruma Cihazları, B.2-Enerji Kesikken Yada Kesilerek Yapılan Testler B.3-Enerji Kesilmeden Testler

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Koruma cihazları	Enerji kesik	Enerji varken
Koruma cihazları	1,000000	2,206481	2,235049
Enerji kesik	0,453210	1,000000	1,185376
Enerji varken	0,447417	0,843614	1,000000

Normalize önem düzeyi

Koruma cihazları	0,157684
Enerji kesik	0,075365
Enerji varken	0,067004

Tutarlık oranı
0,002368 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B1- Koruma Cihazları
Alt Kriteler: B.1.1-Aşırı Akım Cihazı, B.1.2-RCD, B.1.3-Aşırı Gerilim

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Aşırı akım cihaz	RCD	Aşırı gerilim
Aşırı akım cihazı	1,000000	1,993417	3,016359
RCD	0,501651	1,000000	1,449681
Aşırı gerilim	0,331526	0,689807	1,000000

Normalize önem düzeyi

Aşırı akım cihazı	0,086125
RCD	0,042594
Aşırı gerilim	0,028965

Tutarlık oranı
0,000176 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B2- Enerji Kesikken Yada Kesilerek Yapılan Testler
Alt Kriteler: B.2.1-Devamlılık, B.2.2-İzolasyon, B.2.3-RCD Performans Testleri

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Devamlılık	Yalıtım	RCD testleri
Devamlılık	1,000000	1,647612	1,478085
Yalıtım	0,606939	1,000000	0,909512
RCD testleri	0,676551	1,099490	1,000000

Normalize önem düzeyi

Devamlılık	0,033009
Yalıtım	0,020126
RCD testleri	0,022230

Tutarlık oranı
0,000018 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B3- Enerji Kesilmeden Yapılan Testler
Alt Kriteler: B.3.1-Toprak Çevrim Empedansı, B.3.2-Kontak Gevşeklik Kont, B.3.3-Isınma Kontrolu

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Toprak çevrim empedansı	Kontak gevşeklik kontrolu	Isınma kontrolu
Toprak çevrim emp.	1,000000	0,987037	1,686680
Kontak gevşeklik ko	1,013134	1,000000	1,499868
Isınma kontrolu	0,592881	0,666725	1,000000

Normalize önem düzeyi

Toprak çevrim emp.	0,025876
Kontak gevşeklik kont.	0,025101
Isınma kontrolu	0,016027

Tutarlık oranı
0,001630 < 0,1
Tutarlı

Kriter: C- Ark Etkileri Kontrolu
Alt Kriteler: C1-Pano Kd., C.2-Ark Sınırı, C.3-Ark Etkileri

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Pano kd.	Ark sınırı	Ark etkileri
Pano kd.	1,000000	1,405705	1,259925
Ark sınırı	0,711387	1,000000	0,673095
Ark etkileri	0,793698	1,485674	1,000000

Normalize önem düzeyi

Pano kd.	0,101081
Ark sınırı	0,065444
Ark etki	0,088304

Tutarlık oranı
0,007862 < 0,1
Tutarlı

Kriter: C1- Pano Kd.
Alt Kriteler: C1.1-Pano Max Kd., C1.2-Şalter Kd.Kesme Kapasitesi

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Pano max. kd.	Şalter kd. kapasitesi
Pano max. kd.	1,000000	2,013158
Şalter kd. kapasitesi	0,496732	1,000000

Normalize önem düzeyi

Pano max. kd.	0,067534
Şalter kd.	0,033547

Kriter: C2- Ark Sınırı
Alt kriteler: C2.1-En etkili mesafe., C2.2-Zarasız mesafe,

23 Uzman Geometrik Ortalaması	En etkili mesafe	Zararsız mesafe
En etkili mesafe	1,000000	1,464605
Zararsız mesafe	0,682778	1,000000

Normalize önem düzeyi

En etkili mesafe	0,038890
Zararsız mesafe	0,026553

Kriter: C3- Ark etkileri
Alt kriteler: C3.1- Ark Maruziyet özenerjisi, C3.2-Ark kategorisi,

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Maruziyet özenerjisi	Ark kategorisi
Maruziyet özenerjisi	1,000000	0,850304
Ark kategorisi	1,176050	1,000000

Normalize önem düzeyi

Maruziyet özenerjisi	0,040580
Ark kategorisi	0,047724

Normalize edilmiş önem düzeyleri toplu liste (çizelge 11.5)

BAZ	ETD	AHP
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	7,54%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	4,58%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	3,40%
4	Pano dış kapak kilidi	2,09%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	2,21%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,92%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	3,31%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	1,79%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,92%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	2,60%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	0,91%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	1,47%
13	Şemalar, Talimatlar, Devre Çizimleri ve Kısa Bilgiler	0,99%
14	Tehlike İşaretleri ve Diğer Uyarı İşaretleri	0,74%
15	Koruma Cihaz ve Terminal Etiketleri	0,72%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	2,26%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi Toprak: Sarı/Yeşil	2,31%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	5,74%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	8,61%
20	RCD uygunluğu	4,26%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	2,90%
22	Devamlılık testi uygunluğu	3,30%
23	Yalıtım testi uygunluğu	2,01%
24	RCD testleri uygunluğu	2,22%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	2,59%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	2,51%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	1,60%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	6,75%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	3,35%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	3,89%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2cal/cm2) kontrolu	2,66%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	4,06%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	4,77%
		100,00%

EK B. Önceliklendirmede Üçgensel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci TFAHP Yöntemi Hesap Detayı

Şekil 11.3'te verilen elektrik tesisat denetlemesinin hiyerarşisine göre
Kriter: Elektrik tesisat denetlemesi
Alt Kriteler: A-Gözle Kontrol, B-Fonksiyon Testleri, C-Ark Etkileri Kontrolu

23 Uzman Geometrik Ort.	Gözle Kontrol			Fonksiyon Test.			Ark Etkileri Kont.		
Gözle Kontrol	1,00	1,00	1,00	0,83	1,03	1,36	0,77	0,96	1,21
Fonksiyon Testleri	0,74	0,97	1,20	1,00	1,00	1,00	0,76	0,90	1,18
Ark Etkileri Kontrol	0,82	1,04	1,30	0,85	1,11	1,31	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Gözle Kontrol	0,25	0,33	0,46
Fonksiyon Testleri	0,24	0,32	0,32
Ark Etkileri Kontrolü	0,25	0,35	0,34

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,34	0,34
0,32	0,32
0,34	0,34

Tutarlık Oranı
0,015555 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A-Gözle Kontro1
Alt Kriteler: A1-Doğrudan Dokunma, A2-Karşılıklı Zararlı Etkiler, A3-Tesisat Kablo ve İletkenler

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Doğrudan Dokunma			Karşılıklı Zararlı Etkiler			Tesisat Kablo ve iletkenler		
Doğrudan Dokunma	1,00	1,00	1,00	0,78	0,96	1,26	0,77	0,96	1,21
Karşılıklı Zararlı Etki.	0,80	1,04	1,28	1,00	1,00	1,00	0,81	0,94	1,21
Tesisat Kablo ve İle	0,82	1,04	1,30	0,82	1,06	1,23	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Doğrudan Dokunma	0,24	0,32	0,44
Karşılıklı Zararlı Etkiler	0,25	0,33	0,33
Tesisat Kablo ve İlet.	0,25	0,34	0,34

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,33	0,11
0,33	0,11
0,34	0,12

Tutarlık Oranı
0,014632 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1-Doğrudan Dokunma

Alt Kriteler: A1.1-Canlı İletkenlere D.D., A1.2-Kapak Uygunluğu, A1.3-Mekanik Uygunluk

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Canlı İletkenlere dokunma			Kapak Uygunluğu			Mekanik Uygunluk		
Canlı iletkenlere dokunma	1,00	1,00	1,00	1,22	1,59	2,09	1,38	1,70	2,04
Kapak Uygunluğu	0,48	0,63	0,82	1,00	1,00	1,00	0,67	0,87	1,02
Mekanik Uygunluk	0,49	0,59	0,72	0,98	1,15	1,50	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Canlı İletkenlere D.D.	0,32	0,45	0,62
Kapak Uygunluğu	0,19	0,26	0,25
Mekanik Uygunluk	0,22	0,29	0,29

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,49	0,06
0,24	0,03
0,27	0,03

Tutarlık Oranı
0,019632 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1.1- Canlı İletkenlere D.D.,
Alt Kriteler: A1.1.1-Canlı İletkenlerin Yalıtımı, A1.1.2-Engel-Plexi, A1.1.3-Zemin Yalıtımı

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Canlı iletken yalıtımı			Engel-Pleksi			Zemin yalıtımı		
Canlı iletken yalıtımı	1,00	1,00	1,00	0,78	1,07	1,51	0,97	1,17	1,38
Engel-Pleksi	0,66	0,93	1,27	1,05	1,07	1,10	0,78	0,97	1,17
Zemin yalıtımı	0,72	0,86	1,03	0,85	1,03	1,29	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Canlı iletken yalıtımı	0,26	0,36	0,50
Engel-Pleksi	0,23	0,33	0,33
Zemin yalıtımı	0,24	0,32	0,31

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,37	0,02
0,32	0,02
0,32	0,02

Tutarlık Oranı
0,040483 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1.2- Kapak Uygunluğu
Alt Kriteler: A1.2.1-Dış Kapak Kilidi, A1.2.2-Topraklama Köprüsü, A1.2.3-İç Kapak Uygunluğu

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Dış Kapak Kilidi			Topr. Köprüsü			İç Kapak Uygunluğu		
Dış Kapak Kilidi	1,00	1,00	1,00	0,57	0,71	1,00	1,52	1,74	2,26
Topr. Köprüsü	1,00	1,41	1,76	1,00	1,00	1,00	1,60	1,71	2,50
İç Kapak Uygunluğu	0,44	0,57	0,66	0,40	0,59	0,63	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Dış Kapak Kilidi	0,26	0,35	0,50
Topr. Köprüsü	0,30	0,42	0,45
İç Kapak Uygunluğu	0,16	0,22	0,19

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,37	0,01
0,42	0,01
0,21	0,01

Tutarlık Oranı
0,027909 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A1.3- Mekanik Uygunluk
Alt Kriteler: A1.3.1-IPXX, A1.3.2-Pano Form, A1.3.3-Pano Sismik

23 Uzman Geometrik Ortalaması	IPXX			Pano Form			Pano Sismik		
IPXX	1,00	1,00	1,00	1,02	1,32	1,75	1,65	2,00	2,34
Pano Form	0,57	0,76	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99	1,24	1,52
Pano Sismik	0,43	0,50	0,61	0,66	0,80	1,01	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
IPXX	0,33	0,45	0,61
Pano Form	0,23	0,31	0,31
Pano Sismik	0,19	0,24	0,23

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,46	0,01
0,31	0,01
0,24	0,01

Tutarlık Oranı
0,017916 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A2- Karşılıklı Zararlı Etkiler
Alt Kriteler: A2.1-Diğer Boru Tesisatına Yaklaşma, A2.2-Tanımlamalar

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Diğer Boru Tesisatına			Tanımlamalar		
Diğer Boru Tesisatına	1,00	1,00	1,00	1,32	2,04	2,78
Tanımlamalar	0,36	0,49	0,76	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Diğer Boru Tesisatına	0,42	0,67	1,03
Tanımlamalar	0,25	0,33	0,32

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,67	0,08
0,33	0,04

Kriter: A2.1- Diğer Boru Tesisatına Yaklaşma
Alt Kriteler: A2.1.1-Doğalgaz Boru, A2.1.2-Bant I Bant II, A2.1.3-Güvenlik Devre

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Doğalgaz Boru			Bant I Bant II			Güvenlik Devre		
Doğalgaz Boru	1,00	1,00	1,00	1,43	1,88	2,47	0,80	1,08	1,42
Bant I Bant II	0,40	0,53	0,70	1,00	1,00	1,00	0,44	0,55	0,71
Güvenlik Devre	0,70	0,93	1,25	1,41	1,83	2,30	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Doğalgaz Boru	0,27	0,40	0,60
Bant I Bant II	0,16	0,21	0,20
Güvenlik Devre	0,26	0,38	0,38

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,41	0,03
0,21	0,02
0,37	0,03

Tutarlık Oranı
0,020982 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A2.1- Tanımlamalar
Alt Kriteler: A2.2.1-Şemalar, Talimatlar, A2.2.2-Tehlike Işareti, A2.2.3-Terminal Etiketi

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Şema Talimat			Tehlike İşareti			Terminal Etiketi		
Şema Talimat	1,00	1,00	1,00	0,79	1,05	1,46	0,84	1,08	1,43
Tehlike İşareti	0,69	0,96	1,26	1,00	1,00	1,00	0,81	0,99	1,19
Terminal Etiketi	0,70	0,93	1,20	0,84	1,01	1,23	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Şema Talimat	0,24	0,35	0,51
Tehlike İşareti	0,23	0,33	0,32
Terminal Etiketi	0,24	0,33	0,32

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,36	0,01
0,32	0,01
0,32	0,01

Tutarlık Oranı
0,019574 < 0,1
Tutarlı

Kriter: A3- Tesisat Kablo ve İletkenler
Alt Kriteler: A3.1-Kablo Yollarının Uygunluğu, A3.2-Kablo Renk Kodlarının Uygunluğu A3.3-Kablo Yalıtımı Uygunluğu

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Kablo Yollarının			Kablo Renk Kod.			Kablo yalıtımı Uygunlu.		
Kablo Yollarının Uyg.	1,00	1,00	1,00	0,72	0,99	1,37	0,39	0,49	0,62
Kablo Renk Kod. Uyg.	0,73	1,01	1,40	1,00	1,00	1,00	0,37	0,45	0,56
Kablo yalıtımı Uyg.	1,62	2,05	2,54	1,79	2,22	2,69	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Kablo Yollarının Uyg.	0,17	0,24	0,35
Kablo Renk Kod. Uyg.	0,17	0,24	0,24
Kablo yalıtımı Uyg.	0,36	0,52	0,51

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,25	0,03
0,24	0,03
0,51	0,06

Tutarlık Oranı
0,019839 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B- Fonksiyon Testleri
Alt Kriteler: B.1-Koruma Cihazları, B.2-Enerji Kesikken Yada Kesilerek Yapılan Testler B.3-Enerji Kesilmeden Testler

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Koruma Cihazları			Enerji Kesik			Enerji Varken		
Koruma Cihazları	1,00	1,00	1,00	1,23	1,59	2,11	1,24	1,53	1,86
Enerji Kesik	0,47	0,63	0,81	1,00	1,00	1,00	0,61	0,74	0,90
Enerji Varken	0,54	0,66	0,81	1,11	1,35	1,64	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Koruma Cihazları	0,31	0,43	0,61
Enerji Kesik	0,19	0,25	0,24
Enerji Varken	0,24	0,32	0,31

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,44	0,14
0,25	0,08
0,31	0,10

Tutarlık Oranı
0,020855 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B1- Koruma Cihazları
Alt Kriteler: B.1.1-Aşırı Akım Cihazı, B.1.2-RCD, B.1.3-Aşırı Gerilim

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Aşırı Akım Cihazı			RCD			Aşırı Gerilim		
Aşırı Akım Cihazı	1,00	1,00	1,00	1,09	1,43	1,89	1,49	1,88	2,31
RCD	0,53	0,70	0,92	1,00	1,00	1,00	0,94	1,19	1,42
Aşırı Gerilim	0,43	0,53	0,67	0,70	0,84	1,06	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Aşırı Akım Cihazı	0,32	0,45	0,64
RCD	0,22	0,30	0,30
Aşırı Gerilim	0,19	0,25	0,24

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,46	0,06
0,30	0,04
0,25	0,03

Tutarlık Oranı
0,017269 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B2- Enerji Kesikken Yada Kesilerek Yapılan Testler
Alt Kriteler: B.2.1-Devamlılık, B.2.2-Yalıtım, B.2.3-RCD Performans Testleri

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Devamlılık			Yalıtım			RCD Testleri		
Devamlılık	1,00	1,00	1,00	0,80	1,04	1,41	0,74	0,93	1,17
Yalıtım	0,71	0,96	1,25	1,00	1,00	1,00	0,64	0,79	1,01
RCD Testleri	0,86	1,08	1,35	0,99	1,26	1,57	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Devamlılık	0,24	0,33	0,46
Yalıtım	0,22	0,30	0,30
RCD Testleri	0,26	0,37	0,36

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,34	0,03
0,30	0,02
0,36	0,03

Tutarlık Oranı
0,019045 < 0,1
Tutarlı

Kriter: B3- Enerji Kesilmeden Yapılan Testler
Alt Kriteler: B.3.1-Toprak Çevrim Empedansı, B.3.2-Kontak Gevşeklik Kont, B.3.3-Isınma Kontrolu

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Toprak Çevrim Empedansı			Kontak Gevşeklik Kontrolu			Isınma Kontrolu		
Toprak Çevrim Emp	1,00	1,00	1,00	0,64	0,81	1,08	1,06	1,43	1,89
Kontak Gevşeklik Ko	0,93	1,23	1,57	1,00	1,00	1,00	1,26	1,50	1,75
Isınma Kontrolu	0,53	0,70	0,94	0,57	0,67	0,80	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Toprak Çevrim Emp	0,25	0,35	0,50
Kontak Gevşeklik Kont.	0,29	0,40	0,39
Isınma Kontrolu	0,19	0,25	0,25

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,36	0,04
0,39	0,04
0,25	0,02

Tutarlık Oranı
0,019638 < 0,1
Tutarlı

Kriter: C- Ark Etkileri Kontrolu
Alt Kriteler: C1-Pano Kd., C.2-Ark Sınırı, C.3-Ark Etkileri

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Pano Kd.			Ark Sınırı			Ark Etki		
Pano Kd.	1,00	1,00	1,00	1,39	1,82	2,41	1,04	1,42	1,83
Ark Sınırı	0,42	0,55	0,72	1,00	1,00	1,00	0,54	0,60	0,70
Ark Etki	0,55	0,70	0,96	1,44	1,65	1,84	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Pano Kd.	0,30	0,44	0,63
Ark Sınırı	0,17	0,22	0,21
Ark Etki	0,26	0,34	0,33

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,44	0,15
0,22	0,08
0,34	0,12

Tutarlık Oranı
0,022213 < 0,1
Tutarlı

Kriter: C1- Pano Kd.
Alt Kriteler: C1.1-Pano Max Kd., C1.2-Şalter Kd.Kesme Kapasitesi

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Pano Max. Kd.			Şalter Kd.		
Pano Max. Kd.	1,00	1,00	1,00	1,54	2,01	2,51
Şalter Kd.	0,40	0,50	0,65	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
Pano Max. Kd.	0,49	0,67	0,89
Şalter Kd.	0,27	0,33	0,32

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,70	0,11
0,30	0,04

Kriter: C2- Ark Sınırı
Alt kriteler: C2.1-En etkili mesafe., C2.2-Zarasız mesafe,

23 Uzman Geometrik Ortalaması	En etkili mesafe			Zararsız mesafe		
En etkili mesafe	1,00	1,00	1,00	1,01	1,22	1,52
Zararsız mesafe	0,66	0,82	0,99	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebe		
En etkili mesafe	0,44	0,55	0,69
Zararsız mesafe	0,37	0,45	0,44

Normalize Sıralama	Alt Kriter Ağırlıklı
0,58	0,04
0,42	0,03

Kriter: C3- Ark etkileri
Alt kriteler: C3.1-Ark maruziyet özenerjisi, C3.2-Ark kategorisi,

23 Uzman Geometrik Ortalaması	Maruziyet özenerjisi			Ark Kategorisi		
Maruziyet özenerjisi	1,00	1,00	1,00	0,72	0,90	1,16
Ark Kategorisi	0,86	1,11	1,40	1,00	1,00	1,00

	Sentez Mertebesi		
Maruziyet özenerjisi	0,38	0,47	0,60
Ark Kategorisi	0,41	0,53	0,53

Normalize Sıralama	Ağırlıklı
0,50	0,06
0,50	0,05

Normalize edilmiş önem düzeyleri toplu liste (çizelge 11.6.)

BAZ	ETD	TFAHP N
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	2,05%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	1,80%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	1,77%
4	Pano dış kapak kilidi	1,01%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	1,15%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,59%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	1,40%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	0,94%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,73%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	3,13%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	1,59%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	2,83%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	1,32%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	1,18%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	1,18%
16	Kablo yollarının uygunluğu ve mekanik koruma	2,91%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi Toprak: Sarı/Yeşil	2,76%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	5,87%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	6,38%
20	RCD uygunluğu	29,54%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	3,44%
22	Devamlılık testi uygunluğu	2,62%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	2,32%
24	RCD testleri uygunluğu	2,81%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	3,51%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	3,87%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	2,48%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	10,56%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	4,16%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	4,36%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	3,26%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	5,87%
33	Çalışma mesafesinde ark patlama kategorisi kontrolu	4,90%
		100,00%

EK C. Önceliklendirmede Küresel Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci SFAHP Yöntemi Hesap Detayı

Şekil 11.3.'te verilen elektrik tesisat denetlemesinin hiyerarşisine göre
Kriter: Elektrik tesisat denetlemesi
Alt Kriteler: A-Gözle Kontrol, B-Fonksiyon Testleri, C-Ark Etkileri Kontrolu
CR = 0,000934 < 0,1

23 uzman SWGM	Gözle kontrol			Fonksiyon testleri			Ark etkileri kontrolü		
Gözle kontrol	0,50	0,50	0,40	0,44	0,59	0,64	0,39	0,64	0,95
Fonksiyon testleri	0,34	0,69	1,05	0,50	0,50	0,40	0,41	0,62	1,05
Ark etkileri kontrolü	0,37	0,66	0,98	0,36	0,67	1,04	0,50	0,50	0,40

SWAG

Gözle kontrol	0,45	0,57	1,02
Fonksiyon testleri	0,42	0,60	0,70
Ark etkileri kontrolü	0,42	0,60	0,77

Ağırlık	N
3,82	0,20
8,30	0,43
7,31	0,38

Kriter: A-Gözle Kontrol
Alt Kriteler: A1-Doğrudan Dokunma, A2-Karşılıklı Zararlı Etkiler, A3-Tesisat Kablo ve İletkenler
CR = 0,002429 < 0,1

23 uzman SWGM	Doğrudan dokunma			Karşılıklı zararlı et.			Tesisat kablo ve il.		
Doğrudan dok.	0,50	0,50	0,40	0,43	0,59	0,64	0,40	0,63	0,96
Karşılıklı zararlı	0,00	1,00	0,00	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,00
Tesisat kablo	0,38	0,65	0,99	0,41	0,62	0,29	0,50	0,50	0,40

SWAG

Doğrudan dok.	0,45	0,57	1,03
Karşılıklı zararlı	0,30	0,79	0,26
Tesisat kablo	0,43	0,59	1,09

Ağırlık	N
3,47	0,25
7,64	0,56
2,57	0,19

Kriter: A1-Doğrudan Dokunma
Alt Kriteler: A1.1-Canlı İletkenlere D.D., A1.2-Kapak Uygunluğu, A1.3-Mekanik Uygunluk
CR = 0,000739 < 0,1

23 uzman SWGM	Canlı iletkenlere d.d.			Kapak uygunluğu			Mekanik uygunluk		
Canlı iletkenlere	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,62	0,48	0,56	1,08
Kapak uygunluğu	0,31	0,70	0,49	0,50	0,50	0,40	0,40	0,62	1,05
Mekanik uyg.	0,00	1,00	0,61	0,48	0,53	0,48	0,50	0,50	0,40

SWAG

Canlı iletkenlere	0,41	0,65	1,17
Kapak uygunluğu	0,41	0,60	1,14
Mekanik uyg.	0,41	0,64	0,50

Ağırlık	N
5,35	0,27
4,96	0,25
9,65	0,48

Kriter: A1.1- Canlı İletkenlere D.D.,
Alt Kriteler: A1.1.1-Canlı İletkenlerin Yalıtımı, A1.1.2-Engel-Plexi, A1.1.3-Zemin Yalıtımı
CR = 0,001032 < 0,1

23 uzman SWGM	Canlı ilet. İzolasyonu			Engel-pleksi			Zemin yalıtımı		
Canlı iletken yalıtımı	0,50	0,50	0,40	0,44	0,58	0,59	0,44	0,60	1,01
Engel-pleksi	0,00	1,00	0,63	0,50	0,50	0,40	0,40	0,62	1,04
Zemin yalıtımı	0,00	1,00	0,75	0,42	0,61	1,07	0,50	0,50	0,40

SWAG

Canlı iletken yalıtımı	0,46	0,56	1,08
Engel-pleksi	0,38	0,68	1,14
Zemin yalıtımı	0,38	0,67	1,13

Ağırlık	N
2,42	0,18
5,68	0,42
5,43	0,40

Kriter: A1.2- Kapak Uygunluğu
Alt Kriteler: A1.2.1-Dış Kapak Kilidi, A1.2.2-Topraklama Köprüsü, A1.2.3-İç Kapak Uygunluğu
CR = 0,012361 < 0,1

23 uzman SWGM	Dış kapak kilidi			Topr. Köprüsü			İç kapak uygunluğu		
Dış kapak kilidi	0,50	0,50	0,40	0,35	0,67	0,60	0,50	0,54	0,44
Topr. Köprüsü	0,00	1,00	0,00	0,50	0,50	0,40	0,50	0,53	0,43
İç kapak uygunluğu	0,00	1,00	0,00	-0,08	1,00	0,53	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Dış kapak kilidi	0,46	0,57	0,49	11,09	0,38
Topr. Köprüsü	0,42	0,64	0,36	10,76	0,37
İç kapak uygunluğu	0,31	0,79	0,40	7,17	0,25

Kriter: A1.3- Mekanik Uygunluk
Alt Kriteler: A1.3.1-IPXX, A1.3.2-Pano Form, A1.3.3-Pano Sismik
CR = 0,001539 < 0,1

23 uzman SWGM	IPXX			Pano form			Pano sismik		
IPXX	0,53	1,00	0,00	0,46	1,31	0,00	0,57	0,35	0,38
Pano form	0,00	1,00	0,64	0,53	1,00	0,00	0,49	1,00	0,78
Pano sismik	0,00	1,00	0,65	0,41	1,00	0,00	0,53	1,00	0,00

SWAG				Ağırlık	N
IPXX	0,53	0,77	0,24	14,52	0,43
Pano form	0,43	1,00	0,64	9,53	0,28
Pano sismik	0,40	1,00	0,37	9,92	0,29

Kriter: A2- Karşılıklı Zararlı Etkiler
Alt Kriteler: A2.1-Diğer Boru Tesisatına Yaklaşma, A2.2-Tanımlamalar

23 uzman SWGM	Diğer boru tesisatına			Tanımlamalar		
Diğer boru tesisatına	0,50	0,50	0,40	0,54	0,48	1,15
Tanımlamalar	0,32	0,68	0,86	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Diğer boru	0,52	0,49	1,23	3,15	0,33
Tanımlamalar	0,35	0,58	0,65	6,39	0,67

Kriter: A2.1- Diğer Boru Tesisatına Yaklaşma
Alt Kriteler: A2.1.1-Doğalgaz Boru, A2.1.2-Bant I Bant II, A2.1.3-Güvenlik Devre
CR = 0,036214 < 0,1

23 uzman SWGM	Doğalgaz boru			Bant I Bant II			Güvenlik devre		
Doğalgaz boru	0,50	0,50	0,40	0,54	0,49	0,56	0,41	0,62	0,99
Bant I Bant II	0,00	1,00	0,59	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,67
Güvenlik devre	0,36	0,66	0,45	0,55	0,48	0,45	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Doğalgaz boru	0,49	0,53	1,04	5,43	0,23
Bant I Bant II	0,30	0,79	0,56	6,15	0,26
Güvenlik devre	0,48	0,54	0,43	12,10	0,51

Kriter: A2.1- Tanımlamalar
Alt Kriteler: A2.2.1-Şemalar, Talimatlar, A2.2.2-Tehlike Işareti, A2.2.3-Terminal Etiketi
CR = 0,002099 < 0,1

23 uzman SWGM	Şema talimat			Tehlike işareti			Terminal etiketi		
Şema talimat	0,50	0,50	0,40	0,41	0,62	0,53	0,39	0,64	0,48
Tehlike işareti	0,02	1,00	0,61	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,80
Terminal etiketi	0,00	1,00	0,61	0,42	0,61	0,41	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Şema talimat	0,44	0,58	0,47	10,57	0,42
Tehlike işareti	0,30	0,79	0,63	5,44	0,22
Terminal etiketi	0,38	0,67	0,48	9,02	0,36

Kriter: A3- Tesisat Kablo Ve Iletkenler
Alt Kriteler: A3.1-Kablo Yollarının Uygunluğu, A3.2-Kablo Renk Kodlarının Uygunluğu A3.3-Kablo Yalıtımı Uygunluğu
CR = 0,003085 < 0,1

23 uzman SWGM	Kablo yollarının			Kablo renk kod. Uyg.			Kablo yalıtımı uyg.		
Kablo yollarının	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,58	0,00	1,00	0,54
Kablo renk kod.	0,00	1,00	0,71	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,00
Kablo yalıtımı	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,84	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Kablo yollarının	0,30	0,79	0,51	6,46	0,34
Kablo renk kod.	0,30	0,79	0,49	6,52	0,35
Kablo yalıtımı	0,30	0,79	0,59	5,81	0,31

Kriter: B- Fonksiyon Testleri
Alt Kriteler: B.1-Koruma Cihazları, B.2-Enerji Kesikken Yada Kesilerek Yapılan Testler B.3-Enerji Kesilmeden Testler
CR = 0,002368 < 0,1

23 uzman SWGM	Koruma cihazları			Enerji kesik			Enerji varken		
Koruma cihazları	0,52	1,00	0,78	0,51	0,52	1,04	0,45	0,56	0,47
Enerji kesik	0,00	1,00	0,00	0,52	1,00	0,78	0,02	1,00	0,00
Enerji varken	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,84	0,52	1,00	0,78

SWAG				Ağırlık	N
Koruma cihazları	0,49	0,66	1,03	6,73	0,37
Enerji kesik	0,31	1,00	0,63	6,11	0,34
Enerji varken	0,32	1,00	0,75	5,36	0,29

Kriter: B1- Koruma Cihazları
Alt Kriteler: B.1.1-Aşırı Akım Cihazı, B.1.2-RCD, B.1.3-Aşırı Gerilim
CR = 0,000176 < 0,1

23 uzman SWGM	Aşırı akım cihazı			RCD			Aşırı gerilim		
Aşırı akım cihazı	0,50	0,50	0,40	0,47	0,56	1,03	0,50	0,54	0,44
RCD	0,00	1,00	0,00	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,00
Aşırı gerilim	0,00	1,00	0,00	0,39	0,64	0,43	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Aşırı akım cihazı	0,49	0,53	1,10	4,01	0,19
RCD	0,30	0,79	0,26	7,64	0,36
Aşırı gerilim	0,37	0,68	0,36	9,41	0,45

Kriter: B2- Enerji Kesikken ya da Kesilerek Yapılan Testler
Alt Kriteler: B.2.1-Devamlılık, B.2.2- Yalıtım, B.2.3-RCD Performans Testleri
CR = 0,000018 < 0,1

23 uzman SWGM	Devamlılık			Yalıtım			RCD testleri		
Devamlılık	0,50	0,50	0,40	0,43	0,59	0,58	0,00	1,00	0,00
Yalıtım	0,00	1,00	0,66	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,64
RCD testleri	0,00	1,00	0,00	0,46	0,57	0,39	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Devamlılık	0,39	0,67	0,44	9,42	0,37
Yalıtım	0,30	0,79	0,57	5,94	0,23
RCD testleri	0,40	0,66	0,34	10,28	0,40

Kriter: B3- Enerji Kesilmeden Yapılan Testler
Alt Kriteler: B.3.1-Toprak Çevrim Empedansı, B.3.2-Kontak Gevşeklik Kont, B.3.3-Isınma Kontrolu
CR = 0,001630 < 0,1

23 uzman SWGM	Toprak çevrim emp			Kontak gevşeklik			Isınma kontrolu		
Toprak çevrim emp	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,00	0,46	0,57	0,47
Kontak gevşeklik kont.	0,02	1,00	0,78	0,50	0,50	0,40	0,00	1,00	0,80
Isınma kontrolu	0,00	1,00	0,60	0,00	1,00	0,64	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Toprak çevrim emp	0,40	0,66	0,38	10,11	0,48
Kontak gevşeklik kont.	0,30	0,79	0,68	4,87	0,23
Isınma kontrolu	0,30	0,79	0,55	6,13	0,29

Kriter: C- Ark Etkileri Kontrolu
Alt Kriteler: C1-Pano Kd., C.2-Ark Sınırı, C.3-Ark Etkileri
CR = 0,007862 < 0,1

23 uzman SWGM	Pano kd.			Ark sınırı			Ark etkileri		
Pano kd.	0,52	1,00	0,78	0,56	1,36	0,00	0,49	1,34	0,00
Ark sınırı	0,00	1,00	0,60	0,52	1,00	0,78	0,02	1,00	0,00
Ark etkileri	0,00	1,00	0,67	0,54	1,00	0,00	0,52	1,00	0,78

SWAG				Ağırlık	N
Pano kd.	0,52	1,22	0,56	12,89	0,45
Ark sınırı	0,31	1,00	0,68	5,69	0,20
Ark etki	0,44	1,00	0,66	9,81	0,35

Kriter: C1- Pano Kd.
Alt Kriteler: C1.1-Pano Max Kd., C1.2-Şalter Kd. Kesme Kapasitesi

23 uzman SWGM	Pano max. kd.			Şalter kd.		
Pano max. kd.	0,50	0,50	0,40	0,57	1,36	0,00
Şalter kd.	0,31	0,69	0,85	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
Pano max. kd.	0,54	0,83	0,25	14,85	0,70
Şalter kd.	0,35	0,59	0,64	6,45	0,30

Kriter: C2- Ark Sınırı
Alt kriteler: C2.1-En etkili mesafe, C2.2-Zararsız mesafe,

23 uzman SWGM	En etkili mesafe			Zararsız mesafe		
En etkili mesafe	0,50	0,50	0,40	0,44	0,60	0,50
Zararsız mesafe	0,02	1,00	0,00	0,50	0,50	0,40

SWAG				Ağırlık	N
En etkili mesafe	0,47	0,55	0,39	12,09	0,61
Zararsız mesafe	0,30	0,71	0,26	7,71	0,39

Kriter: C3- Ark etkileri

Alt kriteler: C3.1-Ark maruziyet özenerjisi, C3.2-Ark kategorisi,

23 uzman SWGM	Maruziyet özenerjisi			Ark kategorisi		
Maruziyet özenerjisi	0,50	0,50	0,40	0,40	0,62	0,54
Ark kategorisi	0,02	1,00	0,67	0,50	0,50	0,40

SWAG

				Ağırlık	N
Maruziyet özen.	0,45	0,56	0,41	11,46	0,63
Ark kategorisi	0,30	0,71	0,47	6,62	0,37

Normalize edilmiş önem düzeyleri toplu liste (Çizelge 11.7.)

BAZ	ETD	SFAHP N
1	Canlı iletkenlerin yalıtımı-pano sac gövdeye yaklaşma	0,23%
2	Canlı iletkenlerin önüne engel konması (pleksi-sac vb.)	0,55%
3	Zemin yalıtımı, el ulaşma mesafesi uygulaması (1,25m)	0,52%
4	Pano dış kapak kilidi	0,50%
5	Pano dış kapağı topraklama köprüsü	0,48%
6	Pano iç kapağının uygunluğu	0,32%
7	Panonun toza-neme-suya karşı yalıtımı (IPXX)	0,56%
8	Pano form tipi-ark dayanımı	0,36%
9	Pano sismik (deprem) kontrolü	0,38%
10	Panonun diğer boru tesisatına yaklaşması eşpotansiyel	1,64%
11	Bant I ve Bant II Ayrılması, Bant II Yalıtımı	1,86%
12	Güvenlik Devre (CCTV, yangın vb.) Ayrılması	3,65%
13	Şemalar, talimatlar, devre çizimleri ve kısa bilgiler	3,02%
14	Tehlike işaretleri ve diğer uyarı işaretleri	1,55%
15	Koruma cihaz ve terminal etiketleri	2,58%
16	Kablo Yollarının Uygunluğu ve Mekanik Koruma	1,23%
17	Kablo Renk Kodu Nötr: Mavi, Toprak: Sarı/Yeşil	1,25%
18	Kablo yalıtımı uygunluğu	1,11%
19	Aşırı akım cihazı uygunluğu	2,93%
20	RCD uygunluğu	5,58%
21	Aşırı gerilim cihazı uygunluğu	6,87%
22	Devamlılık testi uygunluğu	5,13%
23	Yalıtım (izolasyon) testi uygunluğu	3,23%
24	RCD testleri uygunluğu	5,60%
25	Toprak çevrim empedansı uygunluğu	5,86%
26	Kontak gevşeklik kontrolü (T. kamera) uygunluğu	2,82%
27	Kablo aşırı yüklenme sıcaklık etkisi (T. kamera) uygunluğu	3,55%
28	Pano maksimum kısa devre akımı kontrolu	11,60%
29	Şalter kd kesme kapasitesinin pano kd akımına uyg. kontrolu	5,03%
30	Arkın en etkili olduğu mesafe kontrolu	4,48%
31	Ark etkisinin zararsız olduğu mesafe (<1,2 cal/cm^2) kontrolu	2,86%
32	Çalışma mesafesinde maruziyet özenerjisi kontrolu	8,02%
33	Çalışma mesafesinde ark patlaması kategorisi kontrolu	4,63%
		100,00%

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Serdar PAKER

Eğitim Durumu:

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 1989

Yüksek Lisans : İstanbul Yeniyüzyıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Yüksek Onur Derecesi, 2013

Yayınları:

Paker S., Ekmekçi İ., 2022. Electrical Hazards In Industrial Facilities and Evaluation of the Measures, Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg. Vol.67, 2, pp.133–138, Bucarest, Roumaine

Paker S., 2018. Elektrik Sebepli Yangınlardan Korunma Yöntemleri, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı 9. Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Kongresi 6-9 Mayıs, Bildiri-Sözlü Sunum, İstanbul, Türkiye

Paker S., 2017. Elektrik İç Tesislerinde Yangından Korunma Yöntemleri, Elektrik Mühendisliği Dergisi, sayı 462, TMMOB-Elektrik Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye

Paker S., 2014. Endüstriyel Tesislerde İş Kazalarına Karşı Artık Akım Cihazlarının Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Paker S., 2013. Kaçak Akım, Elektrik Mühendisliği Dergisi, sayı 447, TMMOB-Elektrik Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye

Paker S., 2012. İş Sağlığı Ve Güvenliği Terminolojisi, Elektrik Mühendisliği Dergisi, sayı 445, TMMOB-Elektrik Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye