

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**IEEE 1584 STANDARDINA GÖRE  
ARK FLAŞ ANALİZİ VE UYGULAMALARI**

**VURAL AYDOĞAN**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**IEEE 1584 STANDARDINA GÖRE  
ARK FLAŞ ANALİZİ VE UYGULAMALARI**

**VURAL AYDOĞAN**

**Prof.Dr. Ayşen BASA ARSOY  
Danışman, Kocaeli Üniv.**

.....

**Doç.Dr. Nuran YÖRÜKEREN  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

.....

**Dr. Fatih Mehmet NUROĞLU  
Jüri Üyesi, KTÜ**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 10.07.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde elektrik enerjisi hayatın her alanında yaygınlaşmış ve vazgeçilemez bir hal almıştır. Bu durum enerjinin kesintisiz olarak sunulmasının da önemini artırmıştır. Özellikle endüstriyel yapılar ve enerji santralleri gibi tesislerde kısa süreli elektrik kesintilerinin bile ekonomik olarak büyük etkileri olabilmektedir. Bu nedenle özellikle son yıllarda bakım onarım çalışmalarının enerji altında yapılması ihtiyacını meydana getirmiştir.

Elektrik sistemlerinin tasarımında sistem ekipmanlarının güvenliğinin sağlanmasının yanı sıra personelinde can güvenliğinin sağlanması dikkat edilmesi gereken bir husustur. Enerji altında çalışmada ise bu husus daha da önemli bir hal almaktadır. Enerji altında çalışan personel için en büyük risklerden birisi ark flaş patlamalarına maruz kalmasıdır. Olası bir ark flaş patlamasında personelin zarar görmemesi için uygun kişisel koruyucu donanımlar kullanması gerekir. Uygun donanımın seçimi ark flaş analizi ve risk değerlendirmesi çalışmasının yapılması ile mümkündür.

Bu çalışmada ark flaş analizi konusu incelenmiş, ark flaş analiz süreçleri açıklanmış ve ark flaş tehlikesini azaltıcı önlemler belirtilmiştir. Bunlar örnek sistemlerde yapılan benzetim uygulamaları ile desteklenmiştir. Ayrıca IEEE 1584 ark flaş hesabı standardının 2002 versiyonu ve güncel (2018) versiyonu karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmamın her aşamasında bana destek olan hocam Sayın Prof. Dr. Ayşen BASA ARSOY'a, yoğun iş temposuna rağmen yüksek lisans çalışmam için beni teşvik eden ve bana izin veren yöneticim Sinan KARAHAN'a ve tez çalışmam için sağladıkları yazılım lisansından dolayı Siemens PTI bölümüne teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemin en büyük vesilesi olan sevgili annem ve babama, bu süreçte kızım Zeynep'in bana düşen sorumluluklarını yüklenen değerli eşim Kübra'ya minnettarım.

Temmuz 2020

Vural AYDOĞAN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ .....	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT .....	ix
GİRİŞ.. .....	1
1. ARK FLAŞ ANALİZİNE GENEL BAKIŞ .....	3
1.1. Ark Flaş Olayı .....	3
1.2. Ark Flaş Analizinin Amacı.....	6
1.3. Kişisel Koruyucu Donanımlar ve Ark Flaş Uyarı Etiketleri .....	7
1.4. Ark Flaş Analiz Yöntemleri .....	10
1.5. Literatür Taraması ve Tezin Katkısı.....	14
2. IEEE 1584 STANDARDINA GÖRE ARK FLAŞ HESABI.....	17
2.1. Ark flaş analiz süreci .....	17
2.2. IEEE 1584 2002 & 2018 Arasındaki Temel Farklar .....	24
2.3. IEEE 1584-2002'ye Göre Ark Flaş Hesabı .....	25
2.3.1. Hesap modeli uygulama aralığı .....	25
2.3.2. Ark akımı hesabı.....	27
2.3.3. Olay enerjisi hesabı .....	27
2.3.4. Yaklaşım sınırı hesabı .....	28
2.4. IEEE 1584-2018'e Göre Ark Flaş Hesabı .....	28
2.4.1. Hesap modeli uygulama aralığı .....	28
2.4.2. Ark akımı ara değer hesabı .....	31
2.4.3. Ark akımı son değer hesabı .....	32
2.4.4. Olay enerjisi ara değer hesabı.....	32
2.4.5. Olay enerjisi son değer hesabı.....	33
2.4.6. Yaklaşım sınırı ara değer hesabı.....	33
2.4.7. Yaklaşım sınırı son değer hesabı .....	34
2.4.8. İndirgenmiş ark akımı hesabı .....	35
2.4.9. Panel boyutu düzeltme faktörü hesabı.....	36
3. IEEE 1584 2002 VE 2018 STANDARDINA GÖRE ARK FLAŞ HESABI ÖRNEK UYGULAMA.....	39
3.1. Hesaplama Adımları Örnek Uygulama .....	40
3.1.1. IEEE 1584-2002'ye göre ark flaş hesap örneği.....	40
3.1.2. IEEE 1584-2018'e göre ark flaş hesap örneği.....	42
3.2. IEEE 1584 2002 ve 2018'e Göre Analiz Sonuçları.....	50
3.3. Elektrot Yapılandırmalarına Göre Analiz Sonuçları .....	51
4. ARK FLAŞ TEHKİLESİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ.....	54
4.1. Kısa Devre Akımını Sınırlama .....	54
4.1.1. Yüksek empedanslı transformatör kullanımı.....	54
4.1.2. Düşük güçlü transformatör kullanımı.....	55

4.1.3. Arıza akımı sınırlayıcı donanım kullanımı .....	56
4.2. Arıza Temizleme Süresini Azaltma.....	58
4.2.1. Açma-Kapama Cihaz Seçimi.....	58
4.2.2. Ayar Parametrelerinin Geçici Olarak Değiştirilmesi.....	59
4.2.3. Optik Sensör Kullanımı .....	60
4.3. Elektrot Yapılandırılmasının Değişimi.....	62
4.4. Çalışma Mesafesinin Artırılması .....	62
4.5. Elektrotlar Arası Açıklığı Azaltmak.....	63
5. OLAY ENERJİSİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ UYGULAMASI.....	65
5.1. Benzetim Modeli Verileri.....	65
5.2. Kısa Devre Analizi .....	70
5.3. Koruma Koordinasyon Çalışması.....	73
5.4. Mevcut Durum Ark Flaş Analizi .....	78
5.5. Ark Flaş Olay Enerjisini Azaltma Senaryoları .....	81
5.6. Ark Flaş Analizi Sonuçları .....	82
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	88
KAYNAKLAR .....	90
EKLER.....	93
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	97
ÖZGEÇMİŞ .....	98

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Ark flaş olayının meydana gelme süreci.....	3
Şekil 1.2. Ark flaş oluşum örneği.....	4
Şekil 1.3. Ark flaş uyarı etiketi örneği .....	10
Şekil 1.4. Kapalı (Box) şalt için analiz yöntemine göre olay enerjisi değerleri.....	13
Şekil 1.5. Açık şalt için analiz yöntemine göre olay enerjisi değerleri .....	13
Şekil 2.1. Baralar arası mesafe örneği.....	20
Şekil 2.2. Ark flaş yaklaşım sınırı ve çalışma mesafesi .....	23
Şekil 2.3. IEEE 1584-2002'ye göre hesaplama algoritması.....	25
Şekil 2.4. IEEE 1584-2018'e göre hesaplama algoritması.....	29
Şekil 3.1. IEEE 1584-2018 ve 2002'ye göre olay enerjisi değerleri.....	50
Şekil 3.2. IEEE 1584 2018 ve 2002'ye göre ark flaş yaklaşım sınırı değerleri .....	51
Şekil 3.3. Farklı konfigürasyonlara göre olay enerjisi değerleri .....	52
Şekil 3.4. Farklı konfigürasyonlara göre ark flaş yaklaşım sınırı değerleri .....	52
Şekil 4.1. Akım sınırlama reaktörü .....	56
Şekil 4.2. KHAAS örnek devre modeli.....	57
Şekil 4.3. Is sınırlayıcı akım yolu .....	57
Şekil 4.4. Akım zaman eğrisi .....	59
Şekil 4.5. Örnek prensip tek hat şeması .....	60
Şekil 4.6. Nokta ve fiber optik sensör .....	61
Şekil 4.7. Örnek optik sensör kullanım şeması .....	61
Şekil 4.8. Çalışma mesafesi için uygun ekipman kullanım örneği .....	63
Şekil 4.9. Uzaktan kontrol raf güç ünitesi kullanımı.....	63
Şekil 4.10. Elektrotlar arası açıklığa göre olay enerjisi değişimi .....	64
Şekil 5.1. Benzetim modeli .....	69
Şekil 5.2. Maksimum kısa devre analiz sonuçları.....	71
Şekil 5.3. Minimum kısa devre analiz sonuçları .....	72
Şekil 5.4. H0, H1 ve H1.1 şalter açma eğrileri.....	74
Şekil 5.5. H0, H2 ve H2.1 şalter açma eğrileri.....	75
Şekil 5.6. H0, H3 ve H3.1 şalter açma eğrileri.....	76
Şekil 5.7. H0, H4 ve H4.1 şalter açma eğrileri.....	77
Şekil 5.8. Mevcut durum ark flaş analiz sonuçları senaryo 1.....	79
Şekil 5.9. Mevcut durum ark flaş analiz sonuçları senaryo 2.....	80
Şekil 5.10. Senaryo 1 ark flaş analiz sonuçları.....	83
Şekil 5.11. Senaryo 2 ark flaş analiz sonuçları.....	84
Şekil 5.12. Senaryo 3 ark flaş analiz sonuçları.....	85

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. NFPA 70E-2018'e göre ark flaş KKD kategorisi .....	8
Tablo 1.2. NFPA 70E-2018'de kategori 1 için önerilen KKD.....	8
Tablo 2.1. Ekipman sınıfına göre baralar arası tipik mesafeler.....	19
Tablo 2.2. Gerçek ekipman ve elektrot yapılandırması arasındaki ilişki .....	21
Tablo 2.3. Ekipman sınıfına göre tipik çalışma mesafeleri.....	22
Tablo 2.4. Ekipman tipi ve gerilime bağlı x katsayısı.....	27
Tablo 2.5. Panel eşdeğer boyut belirleme kuralları.....	37
Tablo 2.6. Panel sınıfına göre tanımlı katsayılar.....	38
Tablo 3.1. Örnek sistemleri verileri .....	39
Tablo 5.1. OG bara kısa devre verileri .....	65
Tablo 5.2. Transformatör verileri .....	65
Tablo 5.3. Kablo ve busbar verileri.....	66
Tablo 5.4. Asenkron motor verileri.....	66
Tablo 5.5. Panel verileri .....	67
Tablo 5.6. Şalter ayar değerleri .....	73
Tablo 5.7. Analiz senaryolarına göre olay enerjisi değerleri .....	86
Tablo 5.8. Analiz senaryolarına göre ark flaş yaklaşım sınırı değerleri.....	86
Tablo A.1. Ark akımı ara değer hesabı için katsayılar .....	94
Tablo A.2. Olay enerjisi ve AFB ara değer hesabı için katsayılar .....	95
Tablo A.3. Ark akımı indirgeme faktörü hesabı için katsayılar .....	96

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

AFB	: Ark flaş yaklaşım sınırı, (mm)
AFB <sub>1</sub>	: Ark flaş yaklaşım sınırı birinci enterpolasyon terimi, (kA)
AFB <sub>2</sub>	: Ark flaş yaklaşım sınırı ikinci enterpolasyon terimi, (kA)
AFB <sub>3</sub>	: Ark flaş yaklaşım sınırı üçüncü enterpolasyon terimi, (kA)
AFB <sub>600</sub>	: 600 V için ara yaklaşım sınırı, (mm)
AFB <sub>2700</sub>	: 2700 V için ara yaklaşım sınırı, (mm)
AFB <sub>14300</sub>	: 14300 V için ara yaklaşım sınırı, (mm)
CF	: Panel boyutuna bağlı düzeltme faktörü
D	: Çalışma mesafesi, (mm)
D <sub>p</sub>	: Panel derinliği, (mm)
E	: Olay enerjisi, (J/cm <sup>2</sup> )
E	: Olay enerjisi sınırı, (J/cm <sup>2</sup> )
E <sub>n</sub>	: Normalleştirilmiş olay enerjisi, (J/cm <sup>2</sup> )
E <sub>1</sub>	: Olay enerjisi birinci enterpolasyon terimi, (J/cm <sup>2</sup> )
E <sub>2</sub>	: Olay enerjisi ikinci enterpolasyon terimi, (J/cm <sup>2</sup> )
E <sub>3</sub>	: Olay enerjisi üçüncü enterpolasyon terimi, (J/cm <sup>2</sup> )
E <sub>600</sub>	: 600V için ara olay enerjisi, (J/cm <sup>2</sup> )
E <sub>2700</sub>	: 2700V için ara olay enerjisi, (J/cm <sup>2</sup> )
E <sub>14300</sub>	: 14300V için ara olay enerjisi, (J/cm <sup>2</sup> )
ESS	: Eşdeğer panel boyutu
I <sub>arc</sub>	: Ark akımı, (kA)
I <sub>arc_600</sub>	: 600 V için ara ark akımı, (kA)
I <sub>arc_2700</sub>	: 2700 V için ara ark akımı, (kA)
I <sub>arc_14300</sub>	: 14300 V için ara ark akımı, (kA)
I <sub>bf</sub>	: Arıza akımı (bolted fault current), (kA)
uk	: Bağlı kısa devre gerilimi, (%)
% <sub>ur</sub>	: Bağlı kısa devre gerilimi omik bileşeni, (%)
Sn	: Nominal güç, (kVA)
T	: Ark süresi, (ms)
VarC <sub>f</sub>	: Ark akımı indirgeme faktörü
V <sub>n1</sub>	: Primer gerilimi, (kV)
V <sub>n2</sub>	: Sekonder gerilimi, (kV)
V <sub>oc</sub>	: Faz-faz sistem gerilimi, (V)
W	: Gerçek panel genişliği, (mm)
W <sub>1</sub>	: Eşdeğer panel genişliği, (mm)



## **Kısaltmalar**

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)

NFPA : National Fire Protection Association (Ulusal Yangından Korunma Derneği)

KKD : Kişisel Koruyucu Donanım



# IEEE 1584 STANDARDINA GÖRE ARK FLAŞ ANALİZİ VE UYGULAMALARI

## ÖZET

Yapılan araştırmalar elektrik kazalarının yaklaşık %80'ninin ark flaş kaynaklı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle bir tesiste ark flaş analizinin yapılması ve analiz çıktılarına göre gerekli önlemlerin alınması can güvenliği açısından önem arz etmektedir. Bu kapsamda IEEE 1584 Ark Flaş Tehlike Hesaplama Kılavuzunu endüstride ark flaş hesabı için yaygın olarak kullanılmaktadır.

İlk versiyonu 2002 yılında yayınlanan bu standartta 2018 yılında kapsamlı bir revizyon gerçekleşti. Bu durum güncel versiyonun katkılarının incelenmesi, eski ve güncel versiyona göre elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması ihtiyacını ortaya çıkarılmıştır.

Bu alışmada IEEE 1584 standardının 2002 ve 2018 versiyonlarına göre ark flaş analiz sonuçları karşılaştırılarak genel bir fikre ulaşılması ve ark flaş azaltıcı yöntemlerin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda öncelikle ark flaş olayının gelişimi açıklamış ve ark flaş analiz süreçleri belirtilmiştir. Daha sonra standardın eski (2002) ve güncel versiyonu (2018) arasındaki temel farklardan bahsedilmiştir. Her iki versiyona göre hesaplama adımları açıklanmıştır. Sonrasında çeşitli güç sistemlerinde 2002 ve 2018 versiyonlarına göre ark flaş hesabı yapılmıştır. Ayrıca alışma kapsamında ark flaş tehlikesini azaltıcı yöntemler açıklanmıştır. Bu azaltıcı yöntemlerin etkisi PSS 16 yazılımı kullanılarak benzetim çalışmaları ile incelenmiştir. Son olarak elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ark Flaş Analizi, IEEE 1584-2002, IEEE 1584-2018, Kişisel Koruyucu Donanım (KKD), Olay Enerjisi Azaltma.

## **ARC FLASH ANALYSIS AND APPLICATIONS ACCORDING TO IEEE 1584 STANDARD**

### **ABSTRACT**

Researches have shown that approximately 80% of electrical accidents are caused by arc flash. For this reason, performing arc flash analysis in a facility and taking necessary measures according to the analysis outputs are important for life safety. In this context, IEEE 1584 Arc Flash Hazard Calculation Guide is widely used in the industry for arc flash calculation.

In this standard, the first version of which was published in 2002, a comprehensive revision took place in 2018. This situation revealed the need to examine the contributions of the current version and to compare the results obtained from the old and current version.

In this study, by comparing the results of arc flash analysis according to 2002 and 2018 versions of IEEE 1584 standard, it is aimed to reach a general opinion and to evaluate arc flash reduction methods. In this context, firstly, the development of the arc flash event was explained and arc flash analysis processes were specified. Then, the main differences between the old (2002) and the current version (2018) of the standard are mentioned. Calculation steps are explained according to both versions. Afterwards, arc flash calculations were made in various power systems according to 2002 and 2018 versions. Also, methods to reduce the arc flash hazard are explained in the study. The effect of these methods has been examined by simulation studies using PSS 16 software. Finally, the findings were evaluated.

**Keywords:** Arc Flash Analysis, IEEE 1584-2002, IEEE 1584-2018, Personal Protective Equipment (PPE), Incident Energy Reduction.

## GİRİŞ

Geleneksel elektrik sistemleri, optimum fayda ve maliyet dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Buna göre bir elektrik sisteminin tasarımında öncelikle sistemin verimli olması, ekipmanların uzun yıllar çalışması ve sistemin güvenilir olması dikkate alınmaktadır. Tüm bunların yanında elektrik sistemlerinin tasarımında personelin can güvenliği de dikkate alınmaktadır. Ancak elektrik enerjisinin kullanım alanının her geçen gün artması bazı sistemlerde personelin enerji altında çalışması zorunlu hale getirmektedir. Bu durum elektik sistemlerinin tasarımında enerji altında çalışacak personelin can güvenliğinin sağlanması konusu da beraberinde getirmektedir.

Enerji altında çalışan personel için en büyük risk ark flaş tehlikesidir. Yapılan araştırmalar elektrik kazalarının yaklaşık %80'nin ark flaş olayı sonucunda meydana geldiğini ortaya koymuştur [7]. Olası bir ark flaş olayında personelin can güvenliğinin sağlanması için ark flaş risk değerlendirilmesi yapılmalıdır. Ark flaş risk değerlendirmesinde en önemli husus ark flaş olayında serbest kalan enerjinin hesaplanmasıdır. Hesaplanan bu enerjinin değerine göre enerji altında çalışacak personel için uygun kişisel koruyucu donanım (KKD) seçimi, ark flaş risk alanlarının belirlenmesi ve ark flaş uyarı etiketlilerinin oluşturulması gerçekleştirilir.

Ark flaş olay enerjisinin hesaplanmasında çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı "IEEE 1584 Ark Flaş Hesaplama Kılavuzu" standardıdır. İlk olarak 2002'de yayınlanan bu standart özellikle endüstriyel tesislerin ark flaş hesabında yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart 2018 yılına kadar birkaç küçük revizyon haricinde kayda değer bir değişikliğe uğramamıştır. 2018 yılında kapsamlı bir değişikliğe uğramıştır, eski versiyona göre hesaplama denklemleri ve hesaplama algoritması değişmiştir. Tez çalışmasının bir kısmında IEEE 1584'ün eski ve yeni versiyonuna göre hesap sonuçları karşılaştırılarak eski versiyona göre ark flaş hesabı yapılan bir tesisin yeni versiyona göre hesaplarının güncellenmesi gerekir gerekmeyeceği konusunda genel bir yargıya varılmak hedeflenmiştir. Bununla birlikte, özellikle enerji altında bakım-onarım çalışması yapılması gereken tesislerde elektrik sistemlerinin tasarımında ark flaş tehlikesini azaltıcı önlemlerin dikkate

alınması gerekir. Bu kapsamda tez çalışmasının da ark flaş tehlikesini azaltıcı yöntemler de ayrıca değerlendirilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde, öncelikle ark flaş olayının gelişim süreci açıklanmış, ark flaşı meydana getiren sebepler ve ark flaşın etkileri belirtilmiştir. Daha sonra ark flaş analizinin amacı açıklanmış, ark flaş hesabına ilişkin mevcut yöntemlerden bazıları hakkında bilgi verilmiş ve son olarak literatür taramasının özeti sunulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde, IEEE 1584 Standardının 2002 ve 2018 versiyonlarına göre ark flaş analizi detaylıca açıklanmıştır. Bu kapsamda öncelikle IEEE 1584'e göre ark flaş analiz sürecine açıklanmıştır. Daha sonra IEEE 1584'ün 2002 ve 2018 versiyonları arasındaki temel farklar belirtilmiştir. Sonrasında sırasıyla IEEE 1584-2002 ve 2018'e göre ark flaş hesaplama adımları ve eşitlikler sunulmuştur.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, örnek sistem modellerinde IEEE 1584'ün 2002 ve 2018 ark flaş ark flaş hesabı yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikle örnek uygulamanın gerçekleştirildiği sistemlere ait veriler sunulmuştur. Daha sonra bu örnek sistemler için 2002 ve 2018'e göre ark flaş hesabı yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ayrıca farklı elektrot yapılandırmalarına göre ark flaş sonuçlarının değişimi de değerlendirilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, ark flaş tehlikesini azaltıcı bazı yöntemler açıklanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde, ark flaş tehlikesini azaltıcı yöntemler örnek bir sistemde benzetim çalışması ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle benzetim uygulamasının gerçekleştirildiği örnek sisteme ait veriler sunulmuştur. Daha sonra örnek sistemde mevcut durum için kısa devre akımları, koruma koordinasyon çalışması verileri ve ark flaş analiz sonuçları belirtilmiştir. Daha sonra ark flaş tehlikesini azaltma yöntemlerine ilişkin senaryolar oluşturularak bu senaryolara göre ark flaş analizi yapılmış ve sonuçlar mevcut durum ile kıyaslanmıştır.

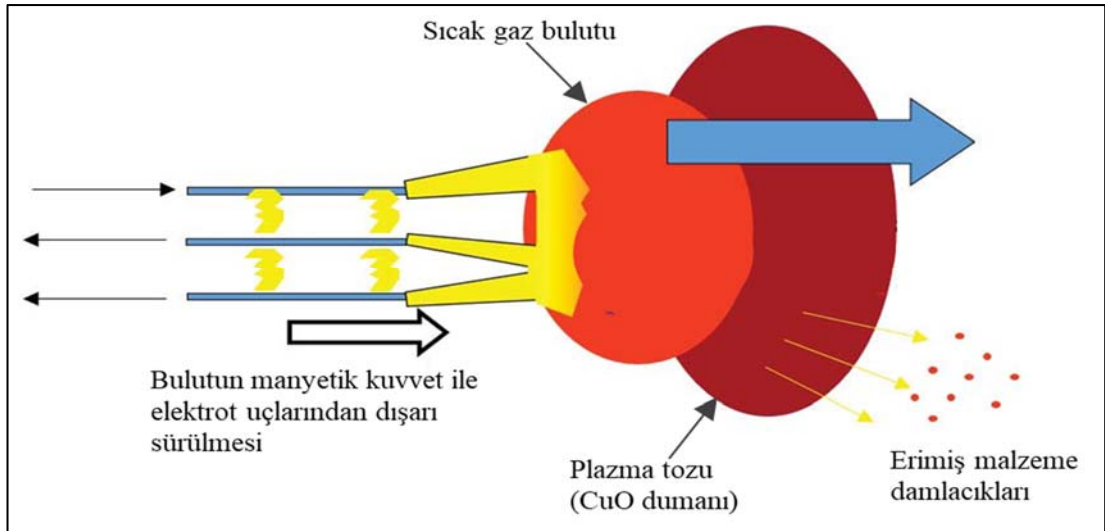
Çalışmanın altıncı bölümünde, elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler belirtilmiştir.

## 1. ARK FLAŞ ANALİZİNE GENEL BAKIŞ

Bu bölümde ark flaş analizi konusunda genel bilgiler verilmiştir. Bu kapsamda öncelikle ark flaş olayı açıklanmıştır. Daha sonra ark flaş analizinin amacı, analiz sonucunda elde edilen çıktılar belirtilmiştir. Ark flaş analizinin temel amaçlarından biri olan kişisel koruyucu donanımların seçimi açıklanmıştır. Sonrasında ark flaş analiz yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Son olarak literatür taraması sunulmuş ve tezin katkısı belirtilmiştir.

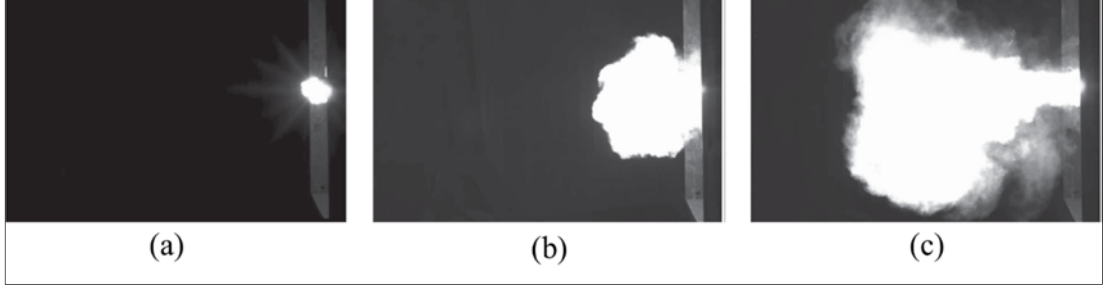
### 1.1. Ark Flaş Olayı

Ark flaş, farklı potansiyeldeki iletkenler arasındaki havanın çeşitli nedenlerden dolayı iyonize olması sonucu meydana gelen ani elektriksel boşalmalar (patlamalar) olarak tanımlanabilir [1]. Ark olayı sırasında akım, plazma bulutunu önemli ölçüde genişleten ardışık ve itici manyetik kuvvet yaratır. Bulut, elektrot uçlarından dışarı doğru sürülür. Bununla birlikte erimiş malzemeleri bulut akışıyla birlikte uçlardan dışarı iter. Daha sonra akım havayı iyonize etmeye başlar ve iyonizasyon işleminden sonra büyük miktarlarda ısı açığa çıkar. Açığa çıkan bu yüksek ısıya sahip gazlar buhar formuna dönüşmüş iletkenlerle birleşir ve patlama yoluyla dışarı atılır [2]. Ark flaş olayının meydana gelmesini açıkladığı bu süreç Şekil 1.1’de sembolize edilmiştir.



Şekil 1.1. Ark flaş olayının meydana gelme süreci [2]

Ark olayının gelişim süreci ait örnek bir görsel Şekil 1.2'de belirtilmiştir. Şekil 1.2'de belirtilen görselde fotoğrafın ilk karesi (a) arkın ilk gözlemlendiği karedir. İkinci kare (b) bundan 1 ms sonrasındır. Son kare (c) ise 4 ms sonrasındır. [3]



Şekil 1.2. Ark flaş oluşum örneği [3]

Ark flaş olayının nedenleri:

Ark flaş olaylarının temel nedeni iletkenler arasındaki izolasyonun bozulmasıdır. Ancak sadece izolasyonun bozulması değil farklı nedenlerde dolayı da ark flaş arızaları meydana gelebilmektedir. Elektriksel ekipmanda ark flaş oluşumuna neden olan başlıca etkenler aşağıda belirtilmiştir [4-5]

- Toz ve kirlilik: Yalıtkan yüzeylerde biriken toz ve kir nedeniyle yüzeyde kıvılcım olarak başlayan ark izolasyonun giderek bozulması ile daha büyük elektriksel arka yol açabilmektedir.
- Korozyon: Elektriksel ekipmanların korozyonu, iletken terminaller arasındaki teması zayıflatır. Böylece kontaktörler arasında meydana gelen ısı kıvılcımlar oluşturabilir.
- Enerjili iletken üzerine sehven çalışma aletlerinin düşürülmesi
- Enerjili iletkene temas
- Elektriksel teçhizatlarına yaşlanması ile izolasyonun eskimesi
- Aşırı gerilimler sonucu yalıtım malzemesinin hasar görmesi
- Aşırı yüklenme, aşırı ısınma
- Çıplak canlı iletkenler
- Gevşek bağlantı
- Devre kesicilerin bakımlarının uygun yapılmaması
- Elektrikli ekipmanlara su vb. sıvı teması
- Hasarlı bakım araç gereçleri
- Standart dışı malzemelerin kullanılması ve montaj hataları

Ark flaş olayının etkileri;

Ark flaş olayı sonucunda yüksek ısı, yüksek hava basıncı, ultraviyole ışık, zehirli gaz, yüksek ses ve çevreye yayılan metal parçacıklar meydana gelir. Buna bağlı olarak ark flaşa maruz kalan bir personelde aşağıdaki etkiler görülebilir. Bunlar:

- Yanma: Ark olayında ortaya çıkan yüksek sıcaklık seviyeleri ciddi yanıklara neden olabilir. Erimiş metal parçaları veya aşırı ısı ikinci-üçüncü derece yanıklara hatta ölümlere neden olabilir.

- Materyal etkisi: Ark flaş olayında metal partiküllerinin veya ekipmanın gevşek parçalarının fırlaması, insan vücudunun göz, baş ve göğüs gibi kısımlarında ciddi yaralanmalara neden olabilir. Ark patlaması nedeniyle fırlayan parçalar kemik kırılması, uzuv kaybı hatta ölümlere neden olabilir.

- Patlama etkisi: Ark flaş sonucunda üretilen yoğun patlama basıncı tehlikeli olabilir. Bu itici kuvvet ark flaşa maruz kalan personelin havaya fırlaması, düşmesi vb. durumların oluşmasına ve buna bağlı olarak çarpma düşme etkisi ile yaralanmasına neden olabilir. Ayrıca ark flaş sonucu açığa çıkan yüksek basınç personelin vücudunda doğrudan bir hasara da yol açabilir. Çevredeki hava itici kuvvete sahip şiddetli hava dalgaları, işçileri ayaklarından havaya uçurabilir veya merdivenlerden atabilir ve hatta insan vücudunu mermi parçalarıyla yaralayabilir.

- Yoğun ışık etkisi: Ark parlaması ile meydana gelen yoğun ışık flaş körlüğü olarak bilinen geçici körlüğe neden olabilir. Ayrıca ortaya çıkan ultraviyole ışık kornea ve retinaya zarar verebilir.

- Yüksek ses etkisi: Ark olayı sırasında patlama yoğun ve büyük ses çıkarır, bu da kalıcı işitme kaybına neden olabilir. 5 ila 30 kA arasındaki ark akımlarını içeren ark testlerinde ses seviyesi arktan 10 fit mesafede 140 dB üzerinde ölçülmüştür [6].

- Zehirli gaz etkisi: Ark flaş sırasında yanmış yalıtım malzemeleri veya buharlaşmış metaller zehirli gazların ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu gazların solunması çeşitli solunum yolu hastalıklarına ve zehirlenmeye bağlı olarak ölümlere neden olabilir.



## 1.2. Ark Flaş Analizinin Amacı

Elektrik enerjisine kullanım alanının her geçen gün yaygınlaşması, bu enerjinin kullanıcılara kesintisiz olarak sunulmasının önemini de artırmıştır. Özellikle endüstriyel tesislerde kısa süreli kesintiler bile sistemi olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle enerji kesintisinin kritik önem taşıdığı endüstriyel tesislerde bakım onarım çalışmalarının enerji altında yapılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu durum enerji altında çalışacak personelin can güvenliğinin sağlanması konusunu da beraberinde getirmiştir. Yapılan araştırmalara göre elektriksel yaralanmaların %80'ine yakını ark flaş olayından kaynaklandığı kaydedilmiştir [7]. Bu nedenle enerji altında çalışacak personelin ark flaş tehlikesine karşı korunması büyük önem arz etmektedir.

Bir tesiste ark flaş etkisini tamamen ortadan kaldırmak genellikle mümkün olmadığından personelin ark flaş tehlikesine karşı korumasına yönelik alınabilecek en etkili yöntem kişisel koruyucu donanımların (KKD) kullanılmasıdır. KKD seçiminde en önemli kriter ark flaş olayı sırasında açığa çıkacak enerji miktarına uygun seçim yapmaktır. Olay enerjisinin değeri hesaplanmadan mümkün olan en koruyucu KKD'nin kullanılması personelin hareket kabiliyetini sınırlayarak enerji altında çalışmasını zorlaştıracaktır. Bu nedenle olay enerjisine uygun KKD seçimi personelin çalışma kabiliyeti açısından da önemlidir. Burada diğer bir önemli husus ise ark flaş tehlikesine karşı koruma amacıyla üretilen KKD'ler maksimum 40 cal/cm<sup>2</sup> olay enerjisine dayanmaktadır. Bu nedenle çalışma yapılan ekipmanda ark flaş olay enerjisinin değeri 40 cal/cm<sup>2</sup>'den büyük ise KKD kullanımı ile personelin can güvenliği sağlanamayacaktır. Bu durumda en yüksek koruma seviyesine sahip KKD kullanılsa dahi enerji altında çalışma yapılması yasaklanmıştır [8].

Ayrıca enerji altında çalışma yapılan bir ortamda çalışmayı yapacak personel haricinde ortamın yakınında bulunan ve çalışmaya katılmayacağı için KKD kullanmayan personelinde olası bir ark flaş olayından etkilenmemesi için çalışma yapılacak ekipmandan belirli bir uzaklıkta durması gereklidir. Bu uzaklık standart bir değer olmayıp ark flaş analizi sonucunda belirlenmektedir.

Tüm bu hususlara göre ark flaş analizinin amacı, ark flaş olayı sırasında açığa çıkan enerji miktarını belirleyerek enerji altında çalışacak personel için uygun KKD seçmek ve KKD kullanmayan personelin ark kaynağı ile koruması gereken minimum mesafeyi belirlemek olarak özetlenebilir. Ark flaş analizi çıktıları, ark flaş yaklaşım sınırı ve tanımlanan çalışma mesafesinde meydana gelecek ark flaş olay enerjisidir.

### **1.3. Kişisel Koruyucu Donanımlar ve Ark Flaş Uyarı Etiketleri**

Ark flaş çalışmalarında, enerji altında çalışan personel için güvenli çalışma koşullarının oluşturulması ve mevcut işletmede çalışma güvenliğinin artırılması, yaralanma riskinin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ark flaş tehlikesine karşı en etkin önlemlerden birisi enerji altında çalışacak personelin uygun kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanmasıdır.

29 Aralık 1970 tarihinde İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunuyla birlikte her işverenin çalışanlarını ciddi fiziksel yaralanmalara veya ölüme neden olabilecek tehlikelerden arınmış güvenli iş yeri sağlamasını zorunlu kılınmıştır [9]. Bununla birlikte elektrik kazalarına karşı güvenlik önlemlerini belirleyen yeni bir standarda ihtiyaç duyulmuştur. Böylece 7 Ocak 1976'da NFPA 70E (İşyerinde Elektrik Güvenliği) standartları geliştirme komitesi kurulmuştur. Bu komite ilk baskısını 1979 yılında yayınlamıştır. Bu baskıda ark flaş olayları elektriksel bir tehlike olarak görülmemiştir.

Ark flaş olayının önem kazanması, beraberinde enerji altında çalışan personel için güvenli çalışma koşullarının oluşturulması konusunu ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte NFPA 70E'nin 1995'de yayınlanan beşinci baskısında ark flaş tehlikesi bir standartta ilk defa ele alınmıştır. Bu baskıda ark flaş için kişisel koruyucu ekipmanlarının gereklilikleri belirtilmiştir.

1997 ve 1998'de ark flaş patlaması için kişisel koruyucu donanım testi üzerine iki makale yayınlanmıştır [10,11]. Bu çalışmalarda, farklı büyükteki ark parlamalarına maruz kaldığında giysilerin yanıcılığını test edilmiştir. Çalışma sonucunda olay enerjisi aralıklarına göre giysi sınıfları önerilmiştir. Bu araştırma, bir ark flaş olayında personel güvenliğine yönelik zemin sağlamıştır.

Zaman içerisinde ark flaş olayına ilişkin yaşanan gelişmelerin paralelinde NFPA 70E standardı da güncellemeler meydana gelmiştir. NFPA 70E standardına göre enerjili ekipmanlar üzerinde çalışma yapacak uzman personelin bir dizi kişisel koruyucu donanım kullanması gerektiği belirtilmiştir. Kullanılacak KKD'nin niteliği enerji altında çalışılacak ekipmanda meydana gelebilecek olay enerjisinin değerine göre 4 farklı kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler Neal ve Bingham tarafından önerilen kategorilere çok benzerdir. Bunlar Tablo 1.1'de belirtilmiştir.

Tablo 1.1. NFPA 70E-2018'e göre ark flaş KKD kategorisi [8]

Risk Kategorisi	Olay Enerjisi Değeri
Kategori 1	$\leq 4 \text{ cal/cm}^2$ $\leq 16,75 \text{ J/cm}^2$
Kategori 2	$4 < E \leq 8 \text{ cal/cm}^2$ $16,75 < E \leq 33,5 \text{ J/cm}^2$
Kategori 3	$8 < E \leq 25 \text{ cal/cm}^2$ $33,5 < E \leq 104,7 \text{ J/cm}^2$
Kategori 4	$25 < E \leq 40 \text{ cal/cm}^2$ $104,7 < E \leq 167,5 \text{ J/cm}^2$

Bu kategorilere göre ark flaş tehlikesi için NFPA 70E-2018 standardında önerilen kişisel koruyucu donanımların özeti Tablo 1.2'de belirtilmiştir. Koruyucu ekipmanlara ilişkin detaylar için bakınız NFPA 70E Tablo 130.7(C)(16).

Tablo 1.2. NFPA 70E-2018'de kategori 1 için önerilen KKD [8]

<p>Risk Kategorisinde Belirtilen Ark Derecesine Dayanıklı Giysiler Arc Resistant Clothing Specified in the Risk Category</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ark dereceli uzun kollu gömlek (Arc-rated long-sleeve shirt) (AR)</li> <li>- Ark dereceli pantolon (Arc-rated pants) (AR)</li> <li>- Ark dereceli tulum (Arc-rated coverall) (AR)</li> <li>- Ark-dereceli ark flaş elbise ceketi (Arc-rated arc flash suit jacket) (AR)</li> <li>- Ark dereceli ark flaş takım elbise pantolonu (Arc-rated arc flash suit pants) (AR)</li> <li>- Ark dereceli ark flaş elbise başlığı (Arc-rated arc flash suit hood)</li> <li>- Ark dereceli eldivenler (Arc-rated gloves<sup>c</sup>)</li> <li>- Ark dereceli ceket, yağmurluk veya kask astarı (Arc-rated jacket, parka, rainwear, or hard hat liner) (AN)</li> </ul>
<p>Koruyucu Ekipman (Protective Equipment)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Baret (Hard hat)</li> <li>- Koruyucu gözlük veya koruma gözlüğü (Safety glasses or safety goggles) (SR)</li> <li>- İşitme koruması (kulak kanalı ekleri)<sup>c</sup> (Hearing protection (ear canal inserts)<sup>c</sup>)</li> <li>- Ağır hizmet deri eldiven (Heavy-duty leather gloves<sup>d</sup>)</li> <li>- Deri ayakkabı (Leather footwear) (AN)</li> </ul>

AN: Opsiyonel (As needed), AR: Önerilir (As required), SR: Gerekli (Selection required)

<sup>b</sup>: Yüz siperleri, sadece yüzü değil, alını, kulakları ve boynu korumak için etrafı saran bir korumaya sahip olmalıdır veya alternatif olarak, ark dereceli bir arkflaş takım kaputunun giyilmesi gerekir.

<sup>c</sup>:Diğer tip işitme korumasının, ark dereceli bir arflaş elbise başlığı altında giyilmesi şartıyla kulak kanalı eklerinin yerine veya bunlara ek olarak kullanılmasına izin verilir.

<sup>d</sup>:Deri koruyuculu kauçuk yalıtım eldivenler kullanılıyorsa, ek deri veya ark dereceli eldivenler gerekli değildir. Kauçuk koruyucu eldivenlerin deri koruyucularla kombinasyonu ark parlaması koruma gereksinimini karşılar.

Enerji altında çalışmada NFPA 70E-2018’de önerilen (yukarıdaki tablolarda belirtilen) kişisel koruyucu ekipmanların haricinde, yapılacak işin niteliği, kullanılacak bakım onarım ekipmanları ve ortam koşullarına göre gerekli olan diğer koruyucu ekipmanların iş güvenliği uzmanlarınca belirlenmesi gereklidir. Ayrıca enerji altında çalışmanın sadece uzman personeller tarafından yapılması gerektiği dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardandır.

Ark flaş tehlikesinden korumak için alınacak bir diğer önlem de uyarı etiketlerinin kullanılmasıdır. Bu uyarı etiketleri enerji altında ayar ve bakım gerektiren tüm elektrik panoları, endüstriyel kontrol panelleri, motor kontrol merkezleri, sayaç kutuları gibi ark flaş tehlikesi bulunan tüm ekipmanlarda kullanılmadığıdır. Bu etiketlerin kullanılmasının amacı ark flaş tehlikesi bulunan bölgede çalışacak personelin uygun KKD kullanması gerektiği konusunda uyarılması ve KKD kullanmayan personelin çalışma sırasında ark flaş tehlikesi bulunan bölge ile koruması gereken minimum mesafe konusunda uyarılmasıdır.

NFPA 70E’de bir ark flaş uyarı etiketinde bulunması gereken asgari parametreler şöyledir;

- Nominal sistem gerilimi
- Ark flaş yaklaşım sınırı (Arc flash boundary)
- Çalışma mesafesi (working distance)
- Olay enerjisi (Incident Energy) veya risk kategorisi (risk category)
- Giysi için minimum ark derecesi (arc rating)
- Çalışma sahasına özgü KKD

Bu hususlara göre örnek bir ark flaş uyarı etiketi Şekil 1.3’de belirtilmiştir.

<b>UYARI</b>	
<b>Ark Flaş ve Çarpma Tehlikesi Uygun PPE Gerekli</b>	
Ark Flaş Sınırı	1606 mm
Ark Flaş Enerjisi	24,1 J/cm <sup>2</sup>
Çalışma Mesafesi	610 mm
NFPA 70E'nin son sürümüne dayalı KKD	
Sınırlı Yaklaşım	1067 mm
Kısıtlı Yaklaşım	305 mm
<b>Bara: 4904MCC, Anma Gerilimi: 0,40 kV</b>	

Şekil 1.3. Ark flaş uyarı etiketi örneği [12]

#### 1.4. Ark Flaş Analiz Yöntemleri

Ark flaş analizine ilişkin çeşitli hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler gerek teorik altyapısı gerek kabul edilebilir sonuçlar verdiği sistem modeli açısından birbirinden farklıdır. Burada başlıca ark flaş hesaplama yöntemlerine kısaca değinilmiştir.

ARCPRO yazılımı:

Kanada Toronto da Kinectrics firması tarafından geliştirilen ARCPRO yazılımı ark arızasında ısı akışını hesaplamak için kullanılır [13]. Teorik tabanlı bir modeldir. Yazılımda kullanılan hesaplama yönteminin teorik alt yapısı, bir ark arızasında ısı akışını hesaplanması prensibine dayandırılmıştır. Tek fazlı sistemlerde dikey olarak yerleştirilen iletkenler arasında ark sonucunda belirli uzaklıktaki termal enerji hesaplanır. Arcpro yazılımı, kullanıcıların yeterli koruyucu giysi seçmesine yardımcı olmak ve termal tehlikeleri ark mesafesinin bir fonksiyonu olarak tanımlamak için tasarlanmıştır. Bu model aşağıdaki özelliklere sahip sistemler için doğrulanmış sonuçlar vermektedir.

- Ark akımı 3,5 – 21 kA
- İletkenler arası mesafe 2,54 – 30,48 cm
- Ark süresi 4 -30 çevrim
- Ark mesafesi (çalışma mesafesi) 20,3 – 60,9 cm

Tek fazlı sistemler için geliştirilen bu yazılım düzeltme katsayıları ile üç fazlı sistemler için kullanılabilir. Düzeltme katsayısı çok az sayıda örnek için değerlendirilmiş ancak net bir değer belirtilmemiş olup kullanıcının değerlendirilmesine bırakılmaktadır.

Duke Power ısı akışı hesaplayıcısı:

Alan Privette tarafından geliştirilmiş DOS tabanlı ücretsiz bir yazılımdır. Yazılımdaki hesaplama yöntemi radyasyon ve ısı transferi teorisine dayanmaktadır. Kısa süreli alevlenme arkları için geliştirilmiştir. Tek fazlı ve açık şalt tipi sistemler için geliştirilmiştir. Diğer sistem tipleri için kullanılması durumunda düzeltme faktörlerinin kullanılması gerekmektedir. Ancak çalışmalar aynı sistem için birbirinden farklı düzeltme faktörleri önermektedir [14,15].

Lee Yöntemi:

Ralp Lee tarafından maksimum güç aktarım teorisine dayalı olarak türetilmiş teorik tabanlı bir hesaplama yöntemidir. Pratikte daha çok IEEE 1584'ün uygulanabilir olmadığı sistemlerde tercih edilir. Örneğin sistem geriliminin 15 kV'dan büyük olması durumu gibi. Çoğu güç sistemi analizi paket programı Lee yöntemine göre ark flaş analizini desteklemektedir. Teorik tabanlı bir hesaplama yöntemi olduğundan bu yöntem ile elde edilen sonuçların doğruluğu tam olarak kabul görmüş değildir. Ancak ark flaş hesabına ilişkin ilk denklemler Lee yönteminde ortaya konulmuştur.

NFPA 70E (Doughty) Yöntemi:

NFPA 70E standardında belirtilen ark flaş hesaplama yöntemidir. R.L. Doughty tarafından geliştirilmiştir. Çeşitli testler sonucunda elde edilen istatistiksel verilere dayanır. Bu yöntem aşağıdaki özelliklere sahip sistemler için uygulanabilir [7].

- İşletme gerilimi  $\leq 600$  V
- Üç faz kısa devre akımı 16 – 50 kA
- Çalışma mesafesi  $\geq 45,7$  cm (18 inç)

IEEE 1584 yöntemi:

IEEE 1584 Ark Flaş Tehlike Hesapları Yapma Kılavuzunda (Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations) belirtilen hesaplama yöntemi çok sayıda laboratuvar testlerinden elde edilen istatistiksel verilerin analizi ve eğri uydurma ile geliştirilmiş

ampirik denklemlere dayalıdır. Bu yöntemle göre olay enerjisinin hesaplanmasında kısa devre akımı, arıza süresi, panel boyutu, baralar arası mesafe, baraların yerleşim düzeni vb. parametreler değişken olarak dikkate alınır. Özellikle endüstriyel tesislerde ark flaş hesabında en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu nedenle birçok güç sistemi analizi paket programı IEEE 1584'e göre hesaplamayı desteklemektedir. Bu yöntemin uygulanabildiği sistem özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- Sistem gerilimi 208 V–15 000 V (faz-faz)
- Frekans 50 veya 60 Hz
- Üç faz kısa devre akımı 200 A–106000 A.
- Baralar/iletkenler arası mesafe 6,5 mm–254 mm
- Çalışma mesafesi  $\geq 305$  mm
- Bu yöntemle ilişkin detaylı bilgiler tezin ilerleyen kısımlarında sunulmuştur.

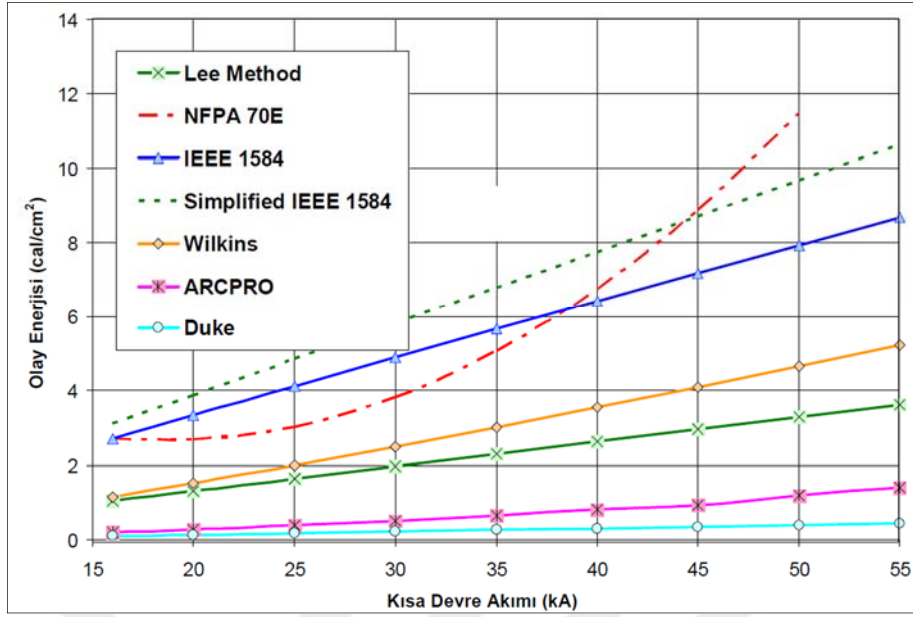
Wilkins Yöntemi:

Wilkins, yöntemi M. Allison ve M. Lang tarafından geliştirilen yaklaşımın basitleştirilmiş bir versiyonudur [16]. Çeşitli deneyler ve zaman domeninde analiz ile geliştirilmiş bir yöntemdir. IEEE 1584-2002'ye göre hesaplanan olay enerjisi ve ark akımındaki anormallikleri düzeltmek için geliştirilmiştir.

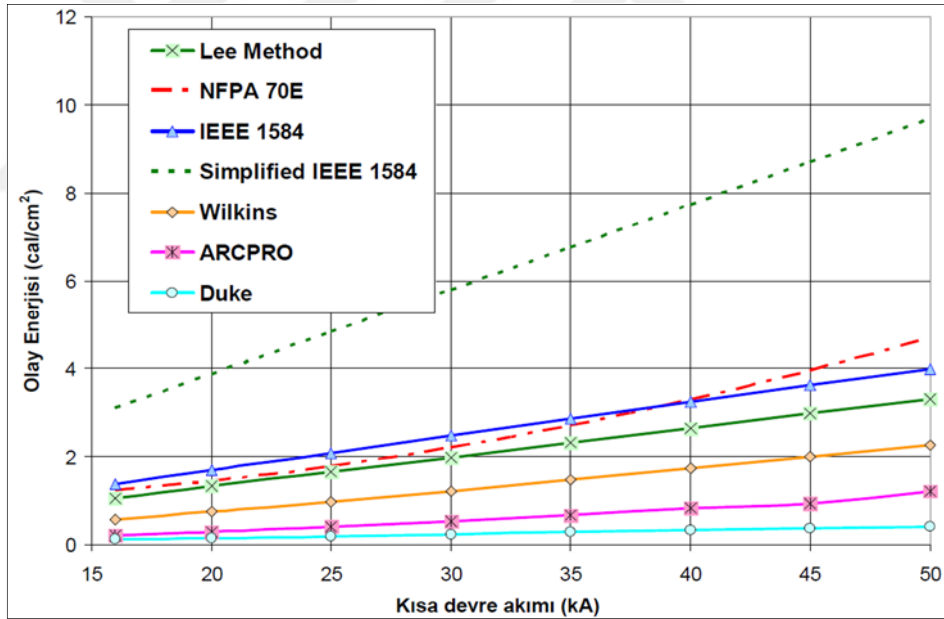
Yukarıda bahsi geçen ark flaş hesaplama yöntemlerinin gerek dayandığı teorik-deneysel altyapının gerek uygulanabilir olduğu sistemler açısından birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Ark flaş hesaplama yöntemlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmadan [4] olay enerjisinin hesaplama yöntemine göre değişimine ilişkin bir örnek Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'de sunulmuştur. Bu örneklere ait sistem verileri;

Faz-faz gerilimi 480 V

- Çalışma mesafesi 60,9 cm (24 inç)
- Arıza temizleme süresi 100 ms



Şekil 1.4. Kapalı (Box) şalt için analiz yöntemine göre olay enerjisi değerleri [4]



Şekil 1.5. Açık şalt için analiz yöntemine göre olay enerjisi değerleri [4]

Elde edilen çalışmalarda bir yöntemin tüm sistemler için uygulanabilir olmadığı hatta bazı durumlarda tanımlı olduğu uygulanabilir sistem aralığında dahi doğru sonuçlar vermediği görülmüştür [4]. Bu farklılıklar ark flaş analizi için daha gelişmiş bir yöntemin gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca Şekil 1.4 ve Şekil 1.5’de belirtilen karşılaştırmada dikkate alınan IEEE 1584 yöntemi 2002 versiyonu içindir.



## 1.5. Literatür Taraması ve Tezin Katkısı

Alice Stoll 1959'da termal radyasyona bağlı doku hasarı konusunda yaptığı çalışmasında [17] vücudu için iyileştirilebilir yanma eşiğinin  $1.2 \text{ cal/cm}^2$  olduğu belirledi. Bununla birlikte 1970'de iş sağlığı ve güvenliği kanununun yayınlanması işverenin çalışanları ölüm ve ciddi fiziksel yaralanmalardan koruması şartını ortaya koydu. Tüm gelişmelerin paralelinde elektrik kazalarının sadece iletkenlere temas sonucu meydana gelen elektrik çarpmaları ile sınırlı olmadığı, ark flaş patlamalarına bağlı yaralanmaların elektrik kazalarının büyük bir kısmını oluşturduğu fark edildi. Tüm bu hususlar ark flaş üzerinde yapılan araştırmaların odağını ark flaş olayı sırasında açığa çıkan enerjiyi hesaplamaya yöneltti.

Ark flaş olay enerjisi hesabının ele alındığı ilk çalışmalardan birisi [18] Ralph tarafından gerçekleştirildi. Ralph Lee, bu çalışmasında ark flaş olay enerjisinin hesaplanmasına ilişkin teorik bir yöntem sundu. Lee sunduğu bu yöntemi maksimum güç transferi teorisine dayandırmıştır. Ayrıca farklı sıcaklıktaki nesnelere arasındaki ısı transferinde nesnelere arasındaki mesafenin önemi arasında ilişkiyi açıkladı. Ek olarak Ralph Lee, meydana gelen basıncın etkisini de 1987 yılında yayınladığı bir çalışmasında [19] değerlendirmiştir.

Doughty, Neal, Dear ve Bingham tarafından 1997'de yayınlanan bildiride [11] alçak gerilimde ark flaş oluşumuyla ilişkili olay enerji seviyeleri ayrıntılı olarak açıklamıştır. Bu, panolarda ve açık şaltta arkın nasıl geliştiğini tanımlayan ilk yayındır.

2000 yılında Doughty, Floyd, ve Neal tarafından yayınlanan bir çalışmada [20] 600 V'luk sistemlerde ark flaş olayında açığa çıkan enerjinin hesaplanması deneysel olarak değerlendirildi. Çalışmada 600 V'da 25 farklı ark arızası için olay enerjisinin arıza akımı, ark süresi ve ark direncine bağlı değişimi açık şalt ve paneller için değerlendirdi. Bu çalışmada belirtilen denklemler, NFPA 70E'ye bir ark flaş tehlike analizinde olay enerjisini hesaplamak için kabul edilebilir bir yöntem olarak dahil edilmiştir.

2000 yılında çeşitli araştırmacılar tarafından yayınlanan bir çalışmada [21] ark flaş oluşumu ve insan üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak adına model mankenler kullanılarak deneysel çalışmalar yapıldı.

Tüm bu bulgular, elektrik güvenliğinde ark flaşın önemini artırmakla birlikte ark flaşla ilgili bir standartlarda duyulan ihtiyacı da beraberinde getirmiştir. 2002 yılında IEEE tarafından “Standart 1584 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations” [22] yayınladı. Bu kılavuz, bir elektrik sisteminde ilgilenilen noktada ark flaş olay enerjisini hesaplamak için ilk eksiksiz kılavuz setini sağlamıştır. Olay enerjisi, ark akımı ve ark flaş yaklaşım sınırı hesaplama yöntemi ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu kılavuzda belirtilen hesaplama yöntemi 300 adet laboratuvar testinden elde edilen istatistiksel verilerin analizi ve eğri uydurma ile geliştirilmiş ampirik denklemlere dayalıdır. IEEE 1584-2002 standardı yayınlandığı tarihten itibaren özellikle endüstriyel tesislerde ark flaş hesabı yapmak için baskın bir yöntem halini almıştır.

2005’de R. Wilkins, M. Allison ve M. Lang tarafından yayınlanan bir çalışmada [23] IEEE 1584 test sistemlerine benzer sistemlerde yatay ve dikey elektrot için ark flaş olay enerjisine ilişkin ölçümler yapılmıştır. Çalışma yatay elektrotlu sistemde panel önündeki olay enerjisinin dikey elektrotlu sistemine göre daha büyük olduğunu ortaya koydu.

2006’da Stokes ve Sweeting, IEEE 1584 standart gelişimi için ark flaş tehlikesini değerlendirmek için uygulanan test metodolojisini ve özellikle elektrot oryantasyonunu eleştirel olarak değerlendiren bir araştırma [24] yayınladı. Araştırmalarında, olay enerjisini ölçmek için kullanılan kalorimetreler yatay elektrotların önüne yerleştirildiğinde, ark plazması kalorimetrelere doğru yönelirken, dikey elektrotlar sisteminde ise ark plazmasının doğrudan elektrotların önüne yerleştirilen kalorimetreye doğru değil yere doğru yönlendiği gözlemlendi. Bu da yatay elektrot sistemlerinde ölçülen olay enerjisinin sadece dikey elektrot sistemleri dikkate alınarak geliştirilmiş IEEE 1584-2002’ye göre hesaplanan değerden önemli ölçüde büyük olduğunu ortaya koymuştur.

Wilkins, Lang ve Allison tarafından 2006’da yayınlan bir çalışmada [25] dikey elektrotlar yalıtım bariyerleri ile sonlandırılarak testler yapıldı. Elde edilen sonuçlar yatay elektrod sistemleri ile benzerlik gösterdi. Bu da Stokes ve Sweeting’in çalışmaları doğruluğunu güçlendirildi.

M. Golovkov, E. Hoagland, H. Schau, ve C. Maurice tarafından 2015’de yayınlanan bir çalışmada [26] ark flaş olayında açığa çıkan enerjinin pamuklu bir kumaşa etkisi elektrot tipine ve mesafeye göre deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada açık havada yatay elektrot, açık havada dikey elektrot ve muhafaza içinde dikey elektrot sistemleri kullanılmıştır. Çalışmanın ortaya koyduğu sonuçlardan birisi de özellikle yatay elektrot sisteminde ölçülen değer ile hesaplanan değer arasında çoğu zaman önemli ölçüde fark olduğudur.

Bu süre zarfında IEEE 1584-2002 standardında zaman içerisinde bazı küçük revizyonlar meydana geldi ancak 2018 yılına kadar kapsamlı bir değişiklik olmadı. Bu araştırmalar sonucunda elde edilen bulgular dikkate alınarak IEEE 1584 standardı 2002 yılında yayınlanan versiyonuna göre çok daha kapsamlı testler neticesinde 2018 yılında güncellendi. IEEE 1584’ün 2018 versiyonunda 1800’den fazla test yapıldı. Ayrıca bu güncel versiyonda sadece dikey elektrot sistemleri değil yatay elektrot sistemlerinde dikkate alındı. Tüm bu hususlara göre hesaplama metodolojisi ve denklemler yeniden oluşturuldu. [1]

IEEE 1584’ün özellikle endüstriyel tesislerde en yaygın kullanılan ark flaş hesaplama yöntemi olması ve güncellenmenin kapsamlı olması birçok endüstriyel tesis için ark flaş hesaplarının 2018’versiyonuna göre güncellemesi gerekip gerekmeyeceği sorusunu ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada farklı tesisler için IEEE 1584’ün 2002 ve 2018 versiyonuna göre ark flaş hesabı yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan elde edilen bulgulara göre 2002 versiyonuna göre ark flaş analizi yapılmış bir tesisin ark flaş analizinin 2018’e göre yeniden yapılması gerekip gerekmeyeceği konusunda genel bir yargıya varılmak amaçlanmıştır. Bu kısımda yapılan hesaplar çalışma kapsamında geliştirilen bir elektronik hesap tablosu ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra ark flaş tehlikesini azaltmaya yönelik yöntemler açıklanmıştır. Bu yöntemlerin etkisi örnek bir sistem için PSS Sincal güç sistemleri analiz yazılımında yapılan benzetim çalışmaları ile incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında geliştirilen ark flaş hesabına ilişkin elektronik hesap tablosundan alınan sonuçlar güç sistemleri analiz yazılımı ile test edilmiştir. Tablodan elde edilen sonuçların güç sistemi analiz yazılımından elde edilen sonuçlar ile aynı olduğu teyit edilmiştir.

## 2. IEEE 1584 STANDARDINA GÖRE ARK FLAŞ HESABI

Bu bölümde IEEE 1584 standardının 2002 ve 2018 versiyonlarına göre ark flaş analizinin nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Öncelikle ark flaş analiz süreci ve ark flaş analizine ilişkin genel kavramlar açıklanmıştır. Daha sonra IEEE 1584 standardının 2018 ve 2002 versiyonları arasındaki temel farklardan bahsedilmiştir. Son olarak sırasıyla 2002 ve 2018 versiyonuna göre ark flaş hesaplama adımları ve eşitlikler açıklanmıştır.

### 2.1. Ark flaş analiz süreci

Bir ark flaş analizi, kısa devre çalışması ve koruma-koordinasyon çalışması ile veya bunun devamı olarak yapılabilir. Ark flaş analizinde tam bir koordinasyon çalışması gerekli olmayabilir, ancak hesaplanan ark akımlarında koruyucu cihazın açma süresi belirlenmelidir.

IEEE 1584-2018' göre ark flaş analizine ilişkin uygulama adımları aşağıda belirtilmiştir [1].

Adım 1: Sistem verilerinin toplanması,

Ark flaş çalışmalarında en önemli kısım gerekli verilerin doğru bir şekilde toplanmasıdır. Bu kısım süreç bakımından çalışmanın en yoğun bölümünü oluşturur. Hali hazırda güncel tek hat diyagramları, akım-zaman eğrileri ve kısa devre analiz çalışması olan bir tesis için bile veri toplama çalışmanın yarısını kapsayabilir. Ark flaş çalışması doğrudan personel güvenliğine yönelik olduğundan halihazırda mevcut veriler ile sahadaki verilerin uyuşup uyuşmadığının kontrol edilmesi önerilmektedir.

Ark flaş analizi için gerekli olan veriler kısa devre ve koruyucu cihaz koordinasyon çalışmaları için toplanan verilere benzemektedir. Kısa devre ve koruma-koordinasyon için toplanan verilere ek olarak panel boyutu, elektrot yapılandırması verilerinin de belirlenmesi gereklidir. Bunun için sahada ölçüm yapmak gerekebilir.

Veri toplama çalışmasında enerji altında bakım, onarım ve ayar gerektiren ve açma kapama manevraları sırasında ark flaş tehlikesi olan tüm ekipmanlar için (motor yol vericiler, motor kontrol merkezleri, güç dağıtım üniteleri, kontrol panelleri, sayaç panelleri vb.) ark flaş analizinin gerekli olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Adım 2: Çalışma senaryolarının belirlenmesi,

Elektrik sistemi farklı çalışma senaryolarına sahip olabilir. Çalışma senaryosuna göre meydana gelecek kısa devre akımları da farklılık gösterecektir. Koruma cihazının açma eğrisine bağlı olarak kısa devre akımına göre açma süresi değişebilir. Bu durumda daha düşük bir kısa devre akımında açma süresi artacağından daha yüksek bir olay enerjisi görülebilir. Bu nedenle tüm çalışma senaryoları göz önünde bulundurularak maksimum ve minimum kısa devre akımlarının belirlenmesi gerekir. Bir güç sisteminde aşağıda belirtilen çalışma senaryoları görülebilir. Bunlar;

- Bir veya daha fazla besleme olması
- Farklı beslemeler arasındaki kublajın açık veya kapalı olması
- Trafoları arasındaki kublajın açık veya kapalı olması
- Generatörlerin şebeke ile paralel veya ada modunda çalışması
- Tüm motorlar devre dışıyken açma – kapamada minimum arıza akımlarının görülmesi
- İşletme senaryosuna göre farklı röle ayar parametrelerinin aktif olması

Adım 3: Arıza akımlarının belirlenmesi,

Arıza akımı (Bolted fault current), arıza empedansının sıfır kabul edildiği durum için hesaplanan kısa devre akımıdır. Üç faz simetrik kısa devre akımı olarak dikkate alınır.

Ark-flaş çalışması, tesis için güncel bir kısa devre çalışmasına dayanmalıdır. Mevcut bir kısa devre çalışması yoksa, ark flaş çalışması kapsamında kısa devre analizlerinin yapılması gerekecektir. Ark flaş analizi kapsamındaki tüm noktalar için kısa devre akımları belirlenmelidir.

Burada hem maksimum hem de minimum kısa devre akımları, daha yüksek ark flaş olay enerjilerine neden olabilir. Yüksek kısa devre akımları, aşırı akım koruyucu cihazlar için daha kısa açma sürelerine ve sonuçta daha düşük bir enerji ortaya çıkmasına neden olabilir. Aşırı akım koruyucu cihazın açma süresinde bir azalma

olmadan daha yüksek arıza akımları daha yüksek bir olay enerjisiyle sonuçlanır. Düşük arıza akımları, aşırı akım koruyucu cihaz için daha uzun bir açma süresine yol açabilir, böylece olay enerjisini arttırır.

Bu nedenle maksimum olay enerjisinin minimum kısa devre akımında da meydana gelebileceği dikkate alınmalıdır. Gerçek arıza akımı hakkında şüphe varsa, olası arıza akımı seviyeleri için bir aralık belirlemek ve aşırı akım koruyucu cihaz açma sürelerini ve ark flaşı olay enerji seviyelerini belirli bir koşul kümesi yerine bir aralık üzerinde hesaplamak gerekebilir.

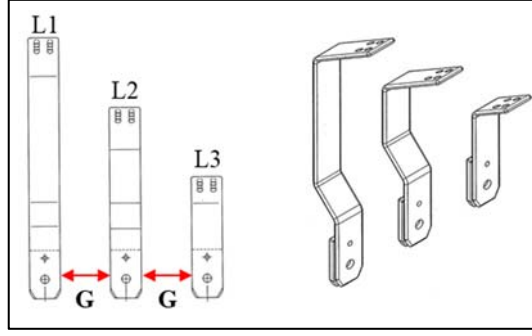
Adım 4: Muhafaza boyutu ve iletkenler/baralar arası mesafenin belirlenmesi, Çalışma kapsamındaki her bir ekipman için faz iletkenleri arasındaki mesafenin ve panel boyutlarının (genişlik, yükseklik, derinlik) belirlenmesi gereklidir. Bu değerler panel üreticisi tarafından sağlanmalı veya sahada ölçüm yapılarak belirlenmelidir.

IEEE 1584-2018 standardında ekipman sınıfına göre tipik mesafeler Tablo 1.1’de belirtilmiştir.

Tablo 2.1. Ekipman sınıfına göre baralar arası tipik mesafeler [1]

Ekipman Sınıfı	Baralar Arası Boşluk [mm]	Panel Boyutu (H × W × D)	
		[mm]	[inç]
15 kV şalt cihazı (15 kV switchgear)	152	1143 × 762 × 762	45 × 30 in × 30
15 kV motor kontrol panel (15 kV MCC)	152	914,4 × 914,4 × 914,4	36 × 36 × 36
5 kV şalt cihazı (5 kV switchgear)	104	914,4 × 914,4 × 914,4	36 × 36 × 36
5 kV şalt cihazı (5 kV switchgear)	104	1143 × 762 × 762	45 × 30 × 30
5 kV motor kontrol panel (5 kV MCC)	104	660,4 × 660,4 × 660,4	26 × 26 × 26
Alçak gerilim devre şalt cihazı (Low voltage switchgear)	32	508 × 508 × 508	20 × 20 × 20
Sığ tip AG MCC ve kontrol paneli (Shallow LV, MCCs and panelboards)	25	355,6 × 304,8 × ≤203,2	14 × 12 × ≤8

Tablo 1.1’de belirtilen bu veriler IEEE 1584-2018 hesap modeli için yapılan testlerde kullanılan test sistemlerine ait olup analiz için gerekli olan gerçek veriler sahadan toplanmalıdır. Baralar arası mesafeye ilişkin örnek bir görsel Şekil 2.1’de belirtilmiştir.



Şekil 2.1. Baralar arası mesafe örneği

Adım 5: Elektrot yapılandırmasının belirlenmesi,

Elektrot yapılandırması, hesaplama modelinin geliştirme için yapılan testlerde kullanılan elektrotların oryantasyonu ve düzenlenmesidir. IEEE 1584-2018 standardında yapılan testlerde elektrotların başka bir ifadeyle baraların panel-şalt içindeki yerleşimlerine göre farklı tiplere ayrılmıştır. Bunlar;

VCB: Kapalı bir panelde düşey iletkenler (Vertical conductors inside a metal box/enclosure)

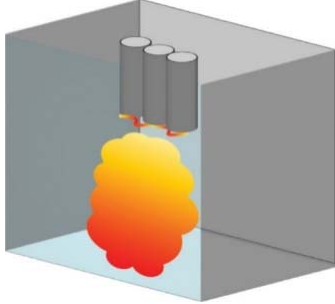

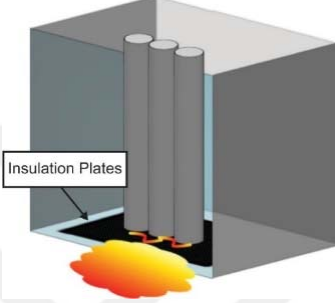

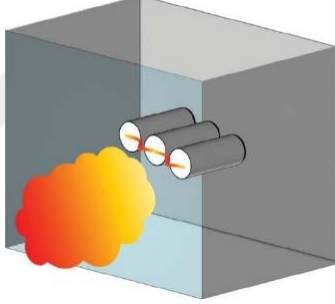

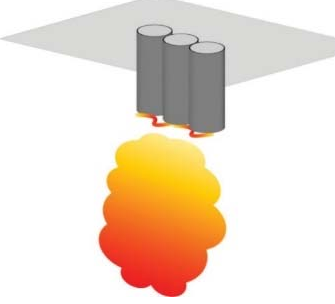

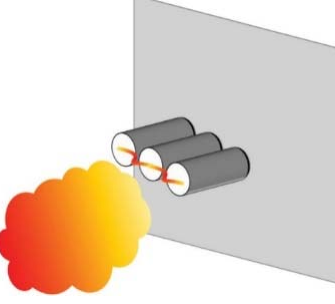

VCBB: Kapalı bir panelde yalıtkan bariyeri ile sonlandırılmış dikey iletkenler (Vertical conductors terminated in an insulating barrier inside a metal box/enclosure)

HCB: Kapalı bir panelde yatay iletkenler (Horizontal conductors inside a metal box/enclosure)

VOA: Açık havada dikey iletkenler (Vertical conductors/electrodes in open air)

HOA: Açık havada yatay iletkenler (Horizontal conductors/electrodes in open air)  
Ark flaş hesabında ekipman için gerçek elektrot yapılandırması bunlar içerisinde en çok benzeyene göre seçilir. Tablo 2.2'de test sisteminde kullanılan bu yapılandırmaların temsil ettiği sistemlere ait örnekler verilmiştir.

Tablo 2.2. Gerçek ekipman ve elektrot yapılandırması arasındaki ilişki [1]

Yapı	Test elektrot yapılandırılması	Ekipman elektrot yapılandırması
VCB		
VCBB		
HCB		
VOA		
HOA		



Adım 6: Çalışma mesafesinin belirlenmesi,

Çalışma mesafesi ark flaş kaynağı ile çalışma yapacak personelin başı ve/veya gövdesi arasındaki mesafedir [1]. IEEE 1584-2018 standardında ekipman sınıfına göre tipik çalışma mesafeleri Tablo 2.3’de belirtilmiştir. Bunlar tipik değerler olup gerçek çalışma mesafesi yapılacak işin niteliği, kullanılacak bakım onarım ekipmanı ve sahadaki diğer koşullar göz önüne alınarak belirlenmelidir.

Tablo 2.3. Ekipman sınıfına göre tipik çalışma mesafeleri [1]

Ekipman Sınıfı	Tipik Çalışma Mesafesi	
	[mm]	[inç]
15 kV şalt cihazı (15 kV switchgear)	914,4	36
15 kV motor kontrol paneli (15 kV MCC)	914,4	36
5 kV şalt cihazı (5 kV switchgear)	914,4	36
5 kV motor kontrol panel (5 kV MCC)	914,4	36
Alçak gerilim şalt cihazı (Low-voltage switchgear)	609,6	24
Sığ tip AG MCC ve kontrol paneli (Shallow low-voltage MCCs and panelboards)	457,2	18
Tipik AG MCC ve kontrol paneli (Deep low-voltage MCCs and panelboards)	457,2	18
Kablo bağlantı kutusu (Cable junction box)	457,2	18

Adım 7: Ark akımının hesaplanması,

Ark akımı, ark flaş olayı sırasında elektrik ark plazmasından akan akımdır. Olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırının hesaplanmasında kullanılır. Belirli bir konumdaki toplam ark akımı, o konumdaki toplam kısa devre arıza akımına göre hesaplanır. Ark akımı, ark empedansından dolayı kısa devre akımından daha düşüktür.

Adım 8: Ark süresinin belirlenmesi,

Ark süresi, ark arızasının meydana geldiği andan arkı besleyen akımın kesilmesine kadar geçen süredir. Başka bir ifadeyle ark süresi, arıza kesme süresi olarak da tanımlanabilir. Ark akımının değerine ve koruyucu cihazın açma karakteristiğine göre belirlenir.

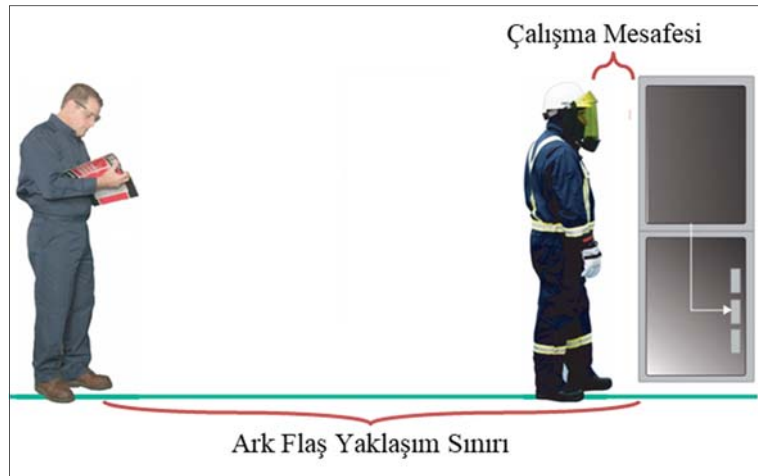
Adım 9: Olay enerjisinin hesaplanması,

Olay enerjisi ark flaş patlaması sırasında kaynaktan belirli bir mesafede birim yüzeye etki eden enerji miktarıdır [1].  $J/cm^2$  veya  $cal/cm^2$  cinsinden hesaplanır. Olay enerjisi belirlenen çalışma mesafesi için hesaplanır.

Olay enerjisi hesabında dikkat edilmesi gereken en önemli husus sistemin yapısına göre bir ekipmanda farklı olay enerjilerinin meydana gelebileceğidir. Bu nedenle olası tüm işletme senaryoları dikkate alınarak maksimum ve minimum kısa devre akımları için olay enerjileri hesaplanmalıdır. Ayrıca ark arızası koruyucu cihazın yük tarafında veya bara tarafından meydana gelebilir. Sistemde ana beslemenin haricinde motor, jeneratör gibi arızayı ters yönde de besleyecek ekipmanlar varsa hat tarafı ve yük tarafındaki arızalar için ayrı ayrı değerlendirme yapmak gerekir. Tüm bu durumda göre hesaplanan sonuçlardan en büyüğü analizin nihai sonucu olarak dikkate alınır.

Adım 10: Ark flaş yaklaşım sınırının hesaplanması,

Ark flaş yaklaşım sınırı KKD kullanmayan bir personelin ark flaş patlaması sırasında ikinci derece yanıklara maruz kalmaması için ark kaynağı ile koruması gereken minimum mesafe olarak tanımlanır. Yapılan bir araştırmada insan vücudunda ikinci derece yanıklara neden olan enerji sınırı  $5 J/cm^2$  ( $1,2 cal/cm^2$ ) olarak belirlenmiştir [17]. Buna göre başka bir ifadeyle ark flaş yaklaşım sınırı olay enerjisinin  $5 J/cm^2$  ( $1,2 cal/cm^2$ ) olduğu mesafe olarak tanımlanabilir. Yaklaşım sınırı ve çalışma mesafesini tanımlayan örnek bir görsel Şekil 2.2’de belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Ark flaş yaklaşım sınırı ve çalışma mesafesi

## 2.2. IEEE 1584 2002 & 2018 Arasındaki Temel Farklar

IEEE 1584 standardının 2018 ve 2002 versiyonu arasındaki temel farklar;

### 1- Elektrot yapılandırması

IEEE 1584-2002 versiyonunda kullanılan test sistemlerinde sadece dikey (VCB ve VOA) elektrot yapılandırmaları dikkate alınmıştır. IEEE 1584-2018 standardında kullanılan test sistemlerinde ise yatay ve dikey elektrot yapılandırmaları dikkate alınmıştır.

### 2- Panel boyutu

IEEE 1584-2002'de panel boyutunun olay enerjisine etkisi dikkate alınmamıştır. IEEE 1584-2018'de ise panel boyutunun olay enerjisine etkisi dikkate alınmıştır. Yapılan ek testler ile farklı derinlik ve yükseklikteki paneller için düzeltme katsayıları tanımlanmıştır.

### 3- Topraklama sistemi

IEEE 1584-2002 versiyonundaki hesaplama yönteminde sistemin topraklı olup olmamasına göre farklı katsayılar tanımlanmıştır. Dolayısıyla sonuçlar sistemin topraklama durumuna göre kayda değer oranda değişmektedir. 2018 versiyonunda ise yapılan kapsamlı testler neticesinde sistem topraklamasının sonuçlara kayda değer etkisi olmadığı gözlemlenmiş ve sistemin topraklaması değişken olarak değerlendirilmemiştir.

### 4- İndirgenmiş ark akımı

IEEE 1584-2002 versiyonunda indirgenmiş ark akımı normal ark akımının %85'i olarak dikkate alınır. 2018 versiyonunda ise indirgenmiş ark akımı elektrot yapısı, sistem gerilimi gibi değişkenler dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

### 5- Hesaplama yöntemi

Bu farklılıklardan dolayı IEEE 1584-2018 hesaplama yöntemi 2002 versiyonuna göre çok daha kapsamlı bir hale getirilmiştir. Hesaplama algoritması, değişkenler ve katsayılar yeniden düzenlenmiştir.

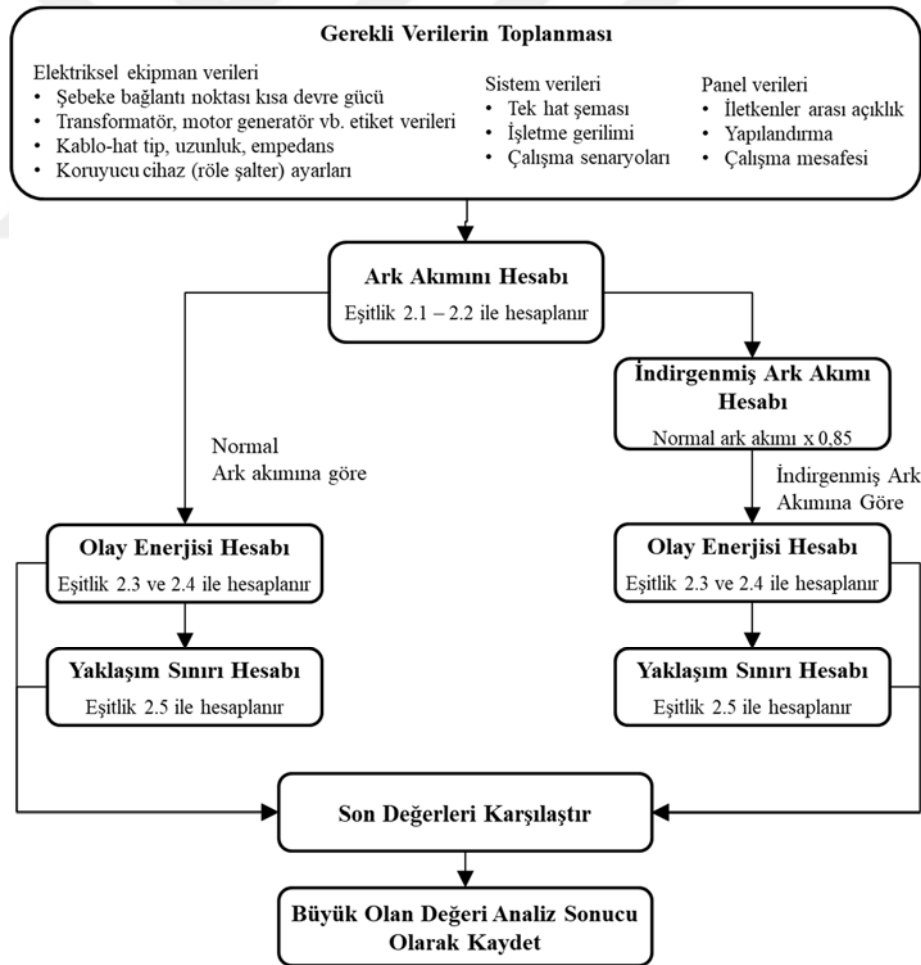
## 2.3. IEEE 1584-2002'ye Göre Ark Flaş Hesabı

### 2.3.1. Hesap modeli uygulama aralığı

IEEE 1584-2002 standardında [21] sunulan hesaplama modeli aşağıdaki parametre aralığına sahip sistemler için geçerlidir. Bunlar;

- Faz-faz gerilimi 208 V ile 15000 V olan üç fazlı sistemler
- Frekans 50 Hz veya 60 Hz
- Simetrik üç faz kısa devre akımı (bolted fault current) 700 A ile 106000 A
- İletkenler/elektrotlar arası açıklık 13 mm – 152 mm

IEEE 1584 -2002 standardına belirtilen hesaplama adımları dikkate alındığında ark flaş hesap algoritması Şekil 2.3'deki gibi özetlenebilir.



Şekil 2.3. IEEE 1584-2002'ye göre hesaplama algoritması

Şekil 2.3’de belirtilen algoritmaya ilişkin eşitlikler çalışmanın devamında açıklanmıştır. Bu bölümdeki denklemlere ait kısaltmalar aşağıda belirtilmiştir. Bölümün diğer kısımlarında her denklem için ayrıca sunulmamıştır. Bunlar;

$I_{bf}$  : Arıza akımı (bolted fault current) [kA]

$V_{oc}$  : Faz-faz gerilimi [kV]

$I_{arc}$  : Ark akımı [kA]

$E_n$  : Normalleştirilmiş olay enerjisi [ $J/cm^2$ ]

$E_b$  : Olay enerjisi sınırı. 5  $J/cm^2$  olarak dikkate alınır. [ $J/cm^2$ ]

$E$  : Olay enerjisi [ $J/cm^2$ ]

$AFB$  : Ark flaş yaklaşım sınırı [mm]

$G$  : İletkenler/elektrotlar arası boşluk [mm]

$D$  : Çalışma mesafesi [mm]

$T$  : Ark süresi (arıza temizleme süresi) [s]

$K$  : Açık şalt için= -0,153, kapalı tip (panel) yapılar için= -0,0097

$K_1$  : Açık şalt için -0,792; Kapalı (Box) tip için -0,555

$K_2$  : Topraksız veya yüksek direnç üzerinden topraklanmış sistemler için 0;  
Topraklanmış sistemler için -0,113

$C_f$  : 1kV ve üzeri sistemler için =1, 1kV altı sistemler için =1,5

$x$  : Ekipman tipi ve gerilim seviyesine bağlı katsayı (Bakınız Tablo 2.4)

Tablo 2.4. Ekipman tipi ve gerilime bağlı x katsayısı [22]

V <sub>oc</sub> [kV]	Ekipman Tipi	Tipik İletken Aralığı [mm]	x
0,208 ≤ V <sub>oc</sub> ≤ 1	Açık şalt (Open air)	10–40	2
	Şalt cihazı (Switchgear)	32	1,473
	MCC	25	1,641
	Kablo	13	2
1 < V <sub>oc</sub> ≤ 5	Açık şalt (Open air)	102	2
	Şalt cihazı (Switchgear)	13–102	0,973
	Kablo	13	2
5 < V <sub>oc</sub> ≤ 15	Açık şalt (Open air)	13–153	2
	Şalt cihazı (Switchgear)	153	0,973
	Kablo	13	2

### 2.3.2. Ark akımı hesabı

Faz-faz gerilimi 1000 V altındaki sistemlerde ark akımı Eşitlik (2.1) ile hesaplanır. 1000 V ve üzeri sistemlerde Eşitlik (2.2) ile hesaplanır.

$$\log I_{arc} = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966 V_{oc} + 0,000526 G + 0,5588 V_{oc} (\log I_{bf}) - 0,00304 G (1 \log I_{bf}) \quad (2.1)$$

$$\log I_{arc} = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (2.2)$$

İndirgenmiş ark akımı Eşitlik (2.1) veya (2.2) ile hesaplanan ark akımının %85'i olarak dikkate alınır. Bu indirgenmiş ark akımına göre arıza temizleme süresi yeniden belirlenir. Buna göre olay enerjisi ve yaklaşım sınırları yeniden hesaplanır.

### 2.3.3. Olay enerjisi hesabı

Olay enerjisi hesabında öncelikle normalleştirilmiş olay enerjisi hesaplanır. Bu normalleştirilmiş olay enerjisi 0,2 saniye arıza temizleme süresi ve 610 mm çalışma mesafesi için tanımlanmış bir ara değer olarak değerlendirilebilir. Daha sonra normalleştirilmiş olay enerjisine bağlı olarak olay enerjisinin son değeri hesaplanır. Normalleştirilmiş olay enerjisi ve olay enerjisi son değerinin hesabı sırasıyla Eşitlik (2.3) ve (2.4)'da ifade edilmektedir.

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \text{ Log} I_{\text{arc}} + 0,0011 G \quad (2.3)$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left( \frac{T}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.4)$$

#### 2.3.4. Yaklaşım sınırı hesabı

Yaklaşım sınırı hesabı Eşitlik (2.5)'de ifade edilmektedir.

$$\text{AFB} = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{T}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.5)$$

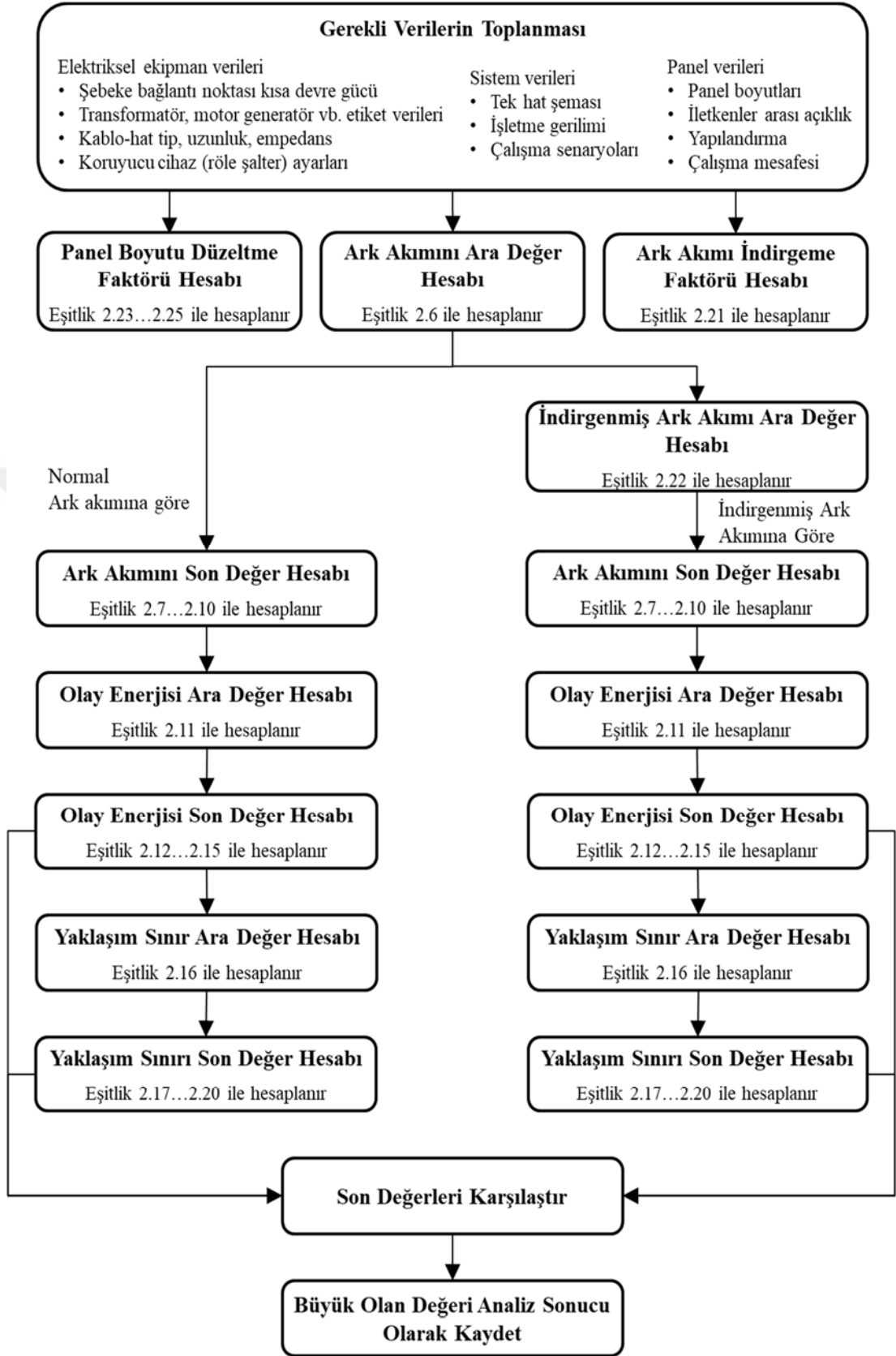
### 2.4. IEEE 1584-2018'e Göre Ark Flaş Hesabı

#### 2.4.1. Hesap modeli uygulama aralığı

IEEE 1584-2018 standardında [1] sunulan hesaplama modeli aşağıdaki parametre aralığına sahip sistemler için geçerlidir. Bunlar;

- Faz-faz gerilimi 208 V ile 15000 V olan üç fazlı sistemler
- Frekans 50 Hz veya 60 Hz
- Simetrik üç faz kısa devre akımı (bolted fault current)
  - 208V'dan 600 V'a kadar olan sistemlerde 500 A ile 106000 A
  - 601V'tan 15000 V'a kadar olan sistemlerde 200 A ile 65000 A
- İletkenler/elektrotlar arası açıklık
  - 208V'dan 600 V'a kadar olan sistemlerde 6,35 mm ile 76,2 mm
  - 601V'tan 15000 V'a kadar olan sistemlerde 19,05 mm ile 254 mm
- Çalışma mesafesi  $\geq 305$  mm
- Kabin genişliği elektrotlar arası açıklığın dört katından büyük olmalı

IEEE 1584 -2018 standardında belirtilen hesaplama adımları dikkate alındığında ark flaş hesap algoritması Şekil 2.4'deki gibi özetlenebilir.



Şekil 2.4. IEEE 1584-2018'e göre hesaplama algoritması



Şekil 2.4'de belirtilen algoritmaya ilişkin eşitlikler çalışmanın devamında açıklanmıştır. Bu bölümdeki ark akımı, olay enerjisi ve AFB hesabına ilişkin denklemlere ait kısaltmalar aşağıda belirtilmiştir. Bölümün diğer kısımlarında her denklem için ayrıca sunulmamıştır. Bunlar;

$V_{oc}$  : Faz-faz gerilimi [kV]

$I_{bf}$  : Simetrik üç faz kısa devre akımı (bolted fault current) [kA]

$I_{arc}$  : Ark akımı son değeri [kA]

$E$  : Olay enerjisi son değeri [kA]

$AFB$  : Ark flaş yaklaşım sınırı son değeri [kA]

$G$  : İletkenler/elektrotlar arası boşluk [mm]

$D$  : Çalışma mesafesi [mm]

$T$  : Ark süresi (arıza temizleme süresi) [ms]

$CF$  : Panel boyutuna bağlı düzeltme faktörü (Bakınız Bölüm 2.4.9)

$k_1..k_{10}$  : Ark akımı ara değer hesabı için panel tipi ve gerilim seviyesine bağlı katsayılar (Bakınız Ek-A Tablo A.1)

$k_1..k_{13}$  : Olay enerjisi ve AFB ara değer hesabı için panel tipi ve gerilim seviyesine bağlı katsayılar (Bakınız Ek-A Tablo A.2)

$I_{arc\_600}$  :  $V_{oc}=600V$  için ara ark akımı [kA]

$I_{arc\_2700}$  :  $V_{oc}=2700V$  için ara ark akımı [kA]

$I_{arc\_14300}$  :  $V_{oc}=14300V$  için ara ark akımı [kA]

$I_{arc\_1}$  : 600V-2700V aralığı için tanımlanan ark akımı enterpolasyon terimi [kA]

$I_{arc\_2}$  :  $V_{oc} > 2700V$  için tanımlanan ark akımı enterpolasyon terimi [kA]

$I_{arc\_3}$  :  $V_{oc} < 2700V$  için tanımlanan ark akımı enterpolasyon terimi [kA]

$E_{600}$  :  $V_{oc}=600V$  için ara olay enerjisi [ $J/cm^2$ ]

$E_{2700}$  :  $V_{oc}=2700V$  için ara olay enerjisi [ $J/cm^2$ ]

$E_{14300}$  :  $V_{oc}=14300V$  için ara olay enerjisi [ $J/cm^2$ ]

$E_1$  : 600-2700V aralığı için tanımlanan olay enerjisi enterpolasyon terimi [ $J/cm^2$ ]

$E_2$  :  $V_{oc} > 2700V$  için tanımlanan olay enerjisi enterpolasyon terimi [ $J/cm^2$ ]

$E_3$  :  $V_{oc} < 2700V$  için tanımlanan olay enerjisi enterpolasyon terimi [ $J/cm^2$ ]

$AFB_{600}$  :  $V_{oc}=600V$  için ark flaş yaklaşım sınırı ara değeri [mm]

$AFB_{2700}$  :  $V_{oc}=2700V$  için ark flaş yaklaşım sınırı ara değeri [mm]

$AFB_{14300}$  :  $V_{oc}=14300V$  için ark flaş yaklaşım sınırı ara değeri [mm]

$AFB_1$  : 600-2700V aralığı için tanımlı ark flaş yaklaşım sınırı enterpolasyon terimi [mm]

$AFB_2$  :  $V_{oc} > 2700V$  için tanımlı ark flaş yaklaşım sınırı enterpolasyon terimi [mm]

$AFB_3$  :  $V_{oc} < 2700V$  için tanımlı ark flaş yaklaşım sınırı enterpolasyon terimi [mm]

#### 2.4.2. Ark akımı ara değer hesabı

Ark akımı ara değerlerinin hesabı Eşitlik (2.6)'de ifade edilmektedir,

$$I_{arc\_Voc} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_{bf} + k_3 \log G)} (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (2.6)$$

Ark flaş analizi yapılan noktada faz-faz gerilimi ne olursa olsun 600V, 2700V ve 14300V gerilim değerleri için  $I_{arc\_600}$ ,  $I_{arc\_2700}$  ve  $I_{arc\_14300}$  ara ark akımları hesaplanır. Daha sonra hesaplanan bu değerlerden yararlanarak ark akımının son değeri hesaplanır.

### 2.4.3. Ark akımı son değer hesabı

Ark akımı son değer hesabında eğer ark flaş analizi yapılan noktada  $V_{oc} \leq 600V$  ise ark akımının son değeri Eşitlik (2.7) ile hesaplanır.

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{oc}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{arc\_600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 - I_{bf}^2}\right)\right]}} \quad (2.7)$$

Eğer ark flaş analizi yapılan noktada  $600V < V_{oc} \leq 15000V$  ise öncelikle ara ark akımlarına bağlı olarak üç adet enterpolasyon değeri hesaplanır. Enterpolasyon değeri hesabında ilişkin eşitlikler aşağıdaki belirtilmiştir.

$$I_{arc\_1} = \frac{I_{arc\_2700} - I_{arc\_600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc\_2700} \quad (2.8)$$

$$I_{arc\_2} = \frac{I_{arc\_14300} - I_{arc\_2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc\_14300} \quad (2.9)$$

$$I_{arc\_3} = \frac{I_{arc\_1}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc\_2}(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (2.10)$$

Son olarak ark flaş analizi yapılan noktadaki faz-faz gerilimine göre ark akımı son değeri aşağıdaki gibi belirlenir

$$600V < V_{oc} \leq 2700V \text{ ise } I_{arc} = I_{arc\_3}$$

$$V_{oc} > 2700V \text{ ise } I_{arc} = I_{arc\_2}$$

### 2.4.4. Olay enerjisi ara değer hesabı

Olay enerjisi ara değerleri hesabına ilişkin eşitlikler aşağıda ifade edilmektedir,

$$E_{Voc} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left( k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc} V_{oc}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc} V_{oc} + \log \frac{1}{CF} \right)} \quad (2.11)$$

Ark flaş analizi yapılan noktada faz-faz gerilimi ne olursa olsun 600V, 2700V ve 14300V gerilim değerleri için  $E_{600}$ ,  $E_{2700}$  ve  $E_{14300}$  ara olay enerjileri hesaplanır. Daha sonra hesaplanan bu değerlerden yararlanarak olay enerjisinin son değeri hesaplanır.

#### 2.4.5. Olay enerjisi son değer hesabı

Olay enerjisi son değer hesabında eğer ark flaş analizi yapılan noktada  $V_{oc} \leq 600V$  ise olay enerjisi son değeri Eşitlik (2.7) ile hesaplanır.

$$E = \frac{12,552}{50} T_x 10^{\left( k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc} 600}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc} + \log \frac{1}{CF} \right)} \quad (2.12)$$

Eğer ark flaş analizi yapılan noktada  $600V < V_{oc} \leq 15000V$  ise öncelikle ara olay enerjilerine bağlı olarak üç adet enterpolasyon değeri hesaplanır. Enterpolasyon değeri hesabında ilişkin eşitlikler aşağıdaki belirtilmiştir.

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (2.13)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (2.14)$$

$$E_3 = \frac{E_1 (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2 (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (2.15)$$

Son olarak ark flaş analizi yapılan noktadaki faz-faz gerilimine göre olay enerjisi son değeri aşağıdaki gibi belirlenir;

$$600V < V_{oc} \leq 2700V \text{ ise } E = E_3$$

$$V_{oc} > 2700V \text{ ise } E = E_2$$

#### 2.4.6. Yaklaşım sınırı ara değer hesabı

Yaklaşım sınırı ara değerleri hesabına ilişkin eşitlikler aşağıda ifade edilmektedir,

$$AFB_{V_{oc}} = 10^{\left( \frac{k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc} V_{oc}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc} V_{oc} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right)} \quad (2.16)$$

Ark flaş analizi yapılan noktada faz-faz gerilimi ne olursa olsun 600V, 2700V ve 14300V gerilim değerleri için  $E_{600}$ ,  $E_{2700}$  ve  $E_{14300}$  ara olay enerjileri hesaplanır. Daha sonra hesaplanan bu değerlerden yararlanarak ark flaş yaklaşım sınırının son değeri hesaplanır.

#### 2.4.7. Yaklaşım sınırı son değer hesabı

Yaklaşım sınırı son değer hesabında eğer ark flaş analizi yapılan noktada  $V_{oc} \leq 600V$  ise ark flaş yaklaşım sınırı son değeri Eşitlik (2.17) ile hesaplanır.

$$AFB=10^{\left( \frac{k_1+k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc,600}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right)} \quad (2.17)$$

Eğer ark flaş analizi yapılan noktada  $600V < V_{oc} \leq 15000V$  ise öncelikle ara olay enerjilerine bağlı olarak üç adet enterpolasyon değeri hesaplanır. Enterpolasyon değeri hesabında ilişkin eşitlikler aşağıdaki belirtilmiştir.

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (2.18)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (2.19)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (2.20)$$

Son olarak ark flaş analizi yapılan noktadaki faz-faz gerilimine göre ark flaş yaklaşım sınırı son değeri aşağıdaki gibi belirlenir;

$$600V < V_{oc} \leq 2700V \text{ ise } AFB = AFB_3$$

$$V_{oc} > 2700V \text{ ise } AFB = AFB_2$$

#### 2.4.8. İndirgenmiş ark akımı hesabı

Pratikte hesaplanan ark akımı gerçek ark akımından daha düşük değerde olabilir. Koruma ekipmanının arıza temizleme karakteristiği ters zamanlı ise (örneğin sigorta) düşük ark akımında arıza temizleme süresi artacaktır. Bu durumda meydana gelen olay enerjisinin değeri normal ark akımına göre meydana gelen olay enerjisi değerinden fazla olabilir. Bu nedenle IEEE 1584-2018 standardında indirgenmiş ark akımı için olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırının hesaplanması tavsiye edilmiştir. Ark akımı indirgeme faktörü ve indirgenmiş ark akımı hesabı sırasıyla Eşitlik (21) ve (22)'de ifade edilmektedir.

$$\text{VarC}_f = k_1 V_{oc}^6 + k_2 V_{oc}^5 + k_3 V_{oc}^4 + k_4 V_{oc}^3 + k_5 V_{oc}^2 + k_6 V_{oc} + k_7 \quad (2.21)$$

$$I_{arc\_min\_Voc} = I_{arc\_Voc} \times (1 - 0,5 \times \text{VarC}_f) \quad (2.22)$$

Burada;

$V_{oc}$  : Faz-faz gerilimi [kV]

$I_{arc\_Voc}$  : Normal ara ark akımı [kA]

$I_{arc\_min\_Voc}$  : İndirgenmiş ara ark akımı [kA]

$\text{VarC}_f$  : Ark akımı indirgeme faktörü

$k_1..k_7$  : Ark akımı indirgeme faktörü hesabı için panel tipine bağlı katsayılar (Bakınız Ek-A Tablo A.3)

İndirgenmiş ark akımı hesabında öncelikle  $\text{VarC}_f$  değeri hesaplanır. Daha sonra Bölüm 2.4.2'de hesaplanan ark akımı ara değerleri ve Eşitlik (2.22) yardımı ile ark akımı için indirgenmiş ara değerler hesaplanır. Normal ara değer hesabında olduğu gibi indirgenmiş ara değer hesabında da 600V, 2700V ve 14300V değerler ayrı ayrı hesaplanır. Son olarak hesaplanan indirgenmiş ara değerler kullanılarak Bölüm 2.4.3'de belirtildiği gibi indirgenmiş ark akımının son değeri hesaplanır.

İndirgenmiş ark akımına göre arıza temizleme süresi yeniden belirlenir. Bu arıza süresi ve indirgenmiş ark akımına Bölüm 2.4.4...Bölüm 2.4.7’de belirtilen adımlar tekrar edilerek olay enerjisi ve yaklaşım sınırları yeniden hesaplanır. Hesaplanan bu değerler normal ark akımına göre hesaplanan değerler ile karşılaştırılır. Güvenlik açısından daha büyük olan değerler ark flaş analizi sonucu olarak dikkate alınır.

#### **2.4.9. Panel boyutu düzeltme faktörü hesabı**

Ark flaş hesabına ilişkin eşitlikler 508x508x508 mm boyutundaki paneller için normalleştirilmiştir. Daha küçük veya daha büyük boyuttaki panellerde olay enerjisindeki değişim panel boyutu düzeltme faktörü (CF) kullanılarak ayarlanmıştır. Panel boyutu düzeltme faktörü hesabında öncelikle panel sınıfı belirlenir. Daha sonra panel sınıfı ve panel boyutlarına göre eşdeğer panel boyutu belirlenir. Son olarak eş değer panel boyutlarına göre düzeltme faktörü hesaplanır.

Panel sınıfının belirlenmesi:

IEEE 1584-2018’de paneller tipik (typical) ve sığ (shallow) olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Aşağıda belirtilen şartların tamamı sağlanıyor ise panel sınıfı sığ olarak tanımlanır. Bunlar;

- Faz- faz gerilimi 600 V'tan düşük ise
- En ve boy 508 mm'den az ise
- Derinlik  $\leq 203,2$  mm (8 inç) ise

Bu şartlardan herhangi biri sağlanmıyor ise panel sınıfı tipik olarak dikkate alınır.

Eşdeğer panel boyutlarının belirlenmesi:

Eşdeğer panel boyutları Tablo 2.5, Eşitlik (2.23), (2.24) ve (2.25) ile belirlenir.

Tablo 2.5. Panel eşdeğer boyut belirleme kuralları [1]

Yapı	Eşdeğer Boyutlar	Gerçek Panel Boyutu Aralığı [mm]			
		<508	≥508 ve ≤660,4	>660,4 ve ≤1244,6	>1244,6
VCB	W <sub>1</sub>	$\frac{20 \text{ (Tipik ise)}}{0,03937 \times W \text{ (Sığ ise)}}$	0,03937 × W	Eşitlik (2.23) ile gerçek genişliğe göre hesaplanır	W=1244,6 mm için Eşitlik (2.23) göre hesaplanır
	H <sub>1</sub>	$\frac{20 \text{ (Tipik ise) or}}{0,03937 \times H \text{ (Sığ ise)}}$	0,03937 × H	0,03937 × H	49
VCBB	W <sub>1</sub>	$\frac{20 \text{ (Tipik ise) or}}{0,03937 \times W \text{ (Sığ ise)}}$	0,03937 × W	Eşitlik (2.23) ile gerçek genişliğe göre hesaplanır	W=1244,6 mm için Eşitlik (2.23) göre hesaplanır
	H <sub>1</sub>	$\frac{20 \text{ (Tipik ise) or}}{0,03937 \times H \text{ (Sığ ise)}}$	0,03937 × H	Eşitlik (2.24) ile gerçek yüksekliğe göre hesaplanır	H=1244,6 mm için Eşitlik (2.24) göre hesaplanır
HCB	W <sub>1</sub>	$\frac{20 \text{ (Tipik ise) or}}{0,03937 \times W \text{ (Sığ ise)}}$	0,03937 × W	Eşitlik (2.23) ile gerçek genişliğe göre hesaplanır	W=1244,6 mm için Eşitlik (2.23) göre hesaplanır
	H <sub>1</sub>	$\frac{20 \text{ (Tipik ise) or}}{0,03937 \times H \text{ (Sığ ise)}}$	0,03937 × H	Eşitlik (2.24) ile gerçek yüksekliğe göre hesaplanır	H=1244,6 mm için Eşitlik (2.24) göre hesaplanır

$$W_1 = \left( 660,4 + (W - 660,4) \times \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (2.23)$$

$$H_1 = \left( 660,4 + (H - 660,4) \times \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (2.24)$$

$$ESS = \left( \frac{H_1 + W_1}{2} \right) \quad (2.25)$$

Burada;

W : Gerçek panel genişliği [mm]

H : Gerçek panel yüksekliği [mm]

W<sub>1</sub> : Eşdeğer panel genişliği

H<sub>1</sub> : Eşdeğer panel yüksekliği

ESS : Eşdeğer panel boyutu



A : VCB için 4'e, VCBB ve HCB için 10

B : VCB için 20, VCBB 24 ve HCB için 22

Burada panel boyutu ve sınıfına göre Tablo 2.5'in ve yukarıdaki eşitliklerin kullanımı şöyledir. Örneğin; panel tipi VCBB, sınıfı tipik, W= 500 mm ve H= 1300 ise;

Eşdeğer genişlik  $W_1 = 20$

Eşdeğer yükseklik  $H_1 =$  Eşitlik (2.24)'a göre hesaplanır.  $H=1244,6$  mm alınır.

Panel boyutu düzeltme faktörünün belirlenmesi:

Tipik paneller için Eşitlik (26), sığ paneller için (27) ile hesaplanır.

$$CF = b_1 \times ESS^2 + b_2 \times ESS + b_3 \quad (2.26)$$

$$CF = \frac{1}{b_1 \times ESS^2 + b_2 \times ESS + b_3} \quad (2.27)$$

Burada;

CF : Panel boyut düzeltme faktörü

ESS : Eşdeğer panel boyutu

$b_1..b_3$  : Panel sınıfına göre tanımlı katsayılar (Bakınız Tablo 2.6)

Tablo 2.6. Panel sınıfına göre tanımlı katsayılar [1]

Sınıf	Konfigürasyon	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Tipik (Typical)	VCB	-0,000302	0,03441	0,4325
	VCBB	-0,0002976	0,032	0,479
	HCB	-0,0001923	0,01935	0,6899
Sığ (Shallow)	VCB	0,002222	-0,02556	0,6222
	VCBB	-0,002778	0,1194	-0,2778
	HCB	-0,0005556	0,03722	0,4778

VOA ve HOA konfigürasyonları için  $CF = 1$  olarak dikkate alınır.

### 3. IEEE 1584 2002 VE 2018 STANDARDINA GÖRE ARK FLAŞ HESABI ÖRNEK UYGULAMA

Bu bölümde, IEEE 1584 standardının 2002 ve 2018 versiyonlarına göre analiz sonuçları karşılaştırılarak genel bir kanıya varılmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda çeşitli örnek sistemler için IEEE 1584-2018 ve 2002'ye göre ark flaş analizleri yapılmıştır.

IEEE 1584-2018 standardında 5 tip konfigürasyon tanımlanmıştır. IEEE 1584-2002'de ise iki tip (VCB ve VOA) konfigürasyon tanımlanmıştır. Bu nedenle her iki versiyona göre sonuçların daha etkin şekilde karşılaştırılması için örnek sistem modellerinde sadece VCB konfigürasyonu dikkate alınmıştır. Buna göre analizlerde kullanılan örnek sistemlere ilişkin veriler Tablo 3.1'de belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Örnek sistemleri verileri

Parametre	Sembol	Birim	Sistem 1	Sistem 2	Sistem 3
Konfigürasyon	-	-	VCB	VCB	VCB
Sistem gerilimi	Voc	kV	0,4	1,92	6,3
Panel yüksekliği	H	mm	2080	2200	2200
Panel genişliği	W	mm	1000	800	800
Panel derinliği	D <sub>p</sub>	mm	800	1080	1285
Baralar arası açıklık	G	mm	50	104	130
Kısa devre akımı	I <sub>bf</sub>	kA	47,61	16,28	7,34
Arıza süresi	T	ms	400	100	500
Çalışma mesafesi	D	mm	610	914	914
Topraklama	-	-	*	*	*

(\*) Topraklı ve topraksız olma durumları ayrı ayrı dikkate alınmıştır.

Tablo 3.1'de belirtilen bu veriler, ilgili sistemlere ait kısa devre analizi, koruma koordinasyon raporu ve panel teknik dokümanlarından elde edilmiştir.

Örnek sistemlerde;

- Sistem 1’de belirtilen veriler bir jeotermal enerji santralinde bulunan alçak gerilim dağıtım panelinin giriş hücresine aittir.

- Sistem 2’de belirtilen veriler bir çimento fabrikasında 12 pulse transformatör üzerinden beslendiği bir motor kontrol hücresine aittir.

- Sistem 3’de belirtilen veriler bir içme suyu arıtma tesisinin orta gerilim pompalarının beslendiği dağıtım panelinin giriş hücresine aittir.

### 3.1. Hesaplama Adımları Örnek Uygulama

Bu kısımda, ark flaş hesabına ilişkin hesaplama adımları ve ara işlemler çalışmanın diğer kısımları için örnek teşkil etmesi amacıyla sayısal bir örnek üzerinde belirtilmiştir. Tezin diğer kısımlarında ark flaş hesabına ilişkin ara işlemler belirtilmemiş doğrudan sonuçlar verilmiştir. Bu örnek hesaplama Tablo 3.1’de belirtilen sistem 3 için yapılmıştır.

#### 3.1.1. IEEE 1584-2002’ye göre ark flaş hesap örneği

Adım 1: Ark akımının hesaplanması,

IEEE 1584-2002’de 1000 V üzerindeki sistemlerde ark akımı aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 2.2) ile hesaplanır.

$$\log I_{\text{arc}} = 0,00402 + 0,983 \log I_{\text{bf}}$$

Tablo 3.1’de belirtilen sistem 3 verilerine göre;

$$\log I_{\text{arc}} = 0,00402 + 0,983 \log 7,34 = 0,855$$

$$I_{\text{arc}} = 10^{0,855} = 7,16 \text{ kA olarak hesaplanır.}$$

Adım 2: Olay enerjisinin hesaplanması,

Olay enerjisi hesabında öncelikle eşitlik 2.3 yardımı ile normalleştirilmiş olay enerjisi hesaplanır.

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_{\text{arc}} + 0,0011 G$$

Burada;

$$K_1 = -0,555 \text{ (VCB için)}$$

$$K_2 = -0,113 \text{ (Sistemin topraklı olduğu varsayılmıştır)}$$

Buna göre;

$$\log E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log 7,16 - 0,001 \times 130 = 0,399$$

$$E_n = 10^{0,399} = 2,51 \text{ J/cm}^2$$

Daha sonra eşitlik 2.4 ile olay enerjisi hesaplanır.

$$E = 4,184 C_f E_n \left( \frac{T}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

Burada

$$C_f = 1 \text{ (1000 V üzeri sistemler için)}$$

$$x = 0,973 \text{ (Bakınız Tablo 2.4)}$$

Buna göre;

$$E = 4,184 \times 1 \times 2,51 \left( \frac{0,5}{0,2} \right) \left( \frac{610^{0,973}}{914^{0,973}} \right) = 17,70 \text{ J/cm}^2 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Adım 3: Yaklaşım sınırının hesaplanması,

Yaklaşım sınırı eşitlik 2.5 yardımı ile hesaplanır.

$$AFB = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{T}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_b} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

Burada;

$C_f=1$  (1000 V üzeri sistemler için)

$x=0,973$  (Bakınız Tablo 2.4)

$E_n=2,51 \text{ J/cm}^2$  (Önceki adımda hesaplandı)

$E_b=5 \text{ J/cm}^2$  (IEEE 1584-2002’de belirtilmiştir. Sabittir.)

Buna göre;

$$AFB = \left[ 4,184 \times 10^{2,51} \left( \frac{0,5}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{5} \right) \right]^{1/x} = 3351 \text{ mm olarak hesaplanır.}$$

Adım 4: İndirgenmiş ark akımının hesaplanması,

IEEE 1584-2002’de indirgenmiş ark akımı normal ark akımının %85’i olarak dikkate alınır. Buna göre;

$$I_{\text{arc\_min}} = 7,16 \times 0,85 = 6,086 \text{ kA olarak hesaplanır.}$$

İndirgenmiş ark akımına göre arıza temizleme süresinin değişip değişmediğinin kontrol edilmelidir. Eğer arıza temizleme süresi değişiyor ise hesaplanan bu indirgenmiş ark akımına göre adım 2 ve 3’te belirtilen ara işlemler yapılarak olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı hesaplanır. Daha sonra normal ark akımı ve indirgenmiş ark akımı için hesaplanan değerler karşılaştırılarak büyük olan değer ark flaş hesap sonucu olarak dikkate alınır. Bu örnek hesaplamada dikkate alınan sistemde arıza temizleme süresi sabit zamanlı olduğundan indirgenmiş ark akımı için hesaplama yapılmamıştır. Normal ark akımı için hesaplanan değerler dikkate alınmıştır.

### 3.1.2. IEEE 1584-2018’e göre ark flaş hesap örneği

Adım 1: Ark akımı ara değerlerinin hesaplanması,

Ark akım ara değerleri aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 2.6) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$I_{\text{arc\_voc}} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_{\text{bf}} + k_3 \log G)} (k_4 I_{\text{bf}}^6 + k_5 I_{\text{bf}}^5 + k_6 I_{\text{bf}}^4 + k_7 I_{\text{bf}}^3 + k_8 I_{\text{bf}}^2 + k_9 I_{\text{bf}} + k_{10})$$

Burada öncelikle panel yapılandırmasına göre katsayılar belirlenmelidir. Bu katsayılar Ek-A Tablo A.1’de belirtilmiştir. Buna göre;

600 V için;

$$k_1 = -0,04287 \quad k_2 = 1,035 \quad k_3 = -0,083 \quad k_4 = 0 \quad k_5 = 0 \quad k_6 = -4,783 \cdot 10^{-9} \quad k_7 = 1,962 \cdot 10^{-6}$$

$$k_8 = -0,000229 \quad k_9 = 0,003141 \quad k_{10} = 1,092$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.6’da yerine konursa 600 V için ark akımı ara değeri;

$$I_{arc\_600} = 5,253 \text{ kA olarak hesaplanır.}$$

2700 V için;

$$k_1 = 0,0065 \quad k_2 = 1,001 \quad k_3 = -0,024 \quad k_4 = -1,557 \cdot 10^{-12} \quad k_5 = 4,556 \cdot 10^{-10} \quad k_6 = -4,186 \cdot 10^{-8}$$

$$k_7 = 8,346 \cdot 10^{-7} \quad k_8 = 5,482 \cdot 10^{-5} \quad k_9 = -0,003191 \quad k_{10} = 0,9729$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.6’da yerine konursa 2700 V için ark akımı ara değeri;

$$I_{arc\_2700} = 6,328 \text{ kA olarak hesaplanır.}$$

14300 V için;

$$k_1 = 0,005795 \quad k_2 = 1,015 \quad k_3 = -0,011 \quad k_4 = -1,557 \cdot 10^{-12} \quad k_5 = 4,556 \cdot 10^{-10} \quad k_6 = -4,186 \cdot 10^{-8}$$

$$k_7 = 8,346 \cdot 10^{-7} \quad k_8 = 5,482 \cdot 10^{-5} \quad k_9 = -0,003191 \quad k_{10} = 0,9729$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.6’da yerine konursa 14300 V için ark akımı ara değeri;

$$I_{arc\_14300} = 6,921 \text{ kA olarak hesaplanır.}$$

Adım 2: Ark akımı son değer hesabı,

Sistem gerilimi >600 V olduğundan ark akımı son değeri Eşitlik 2.8, 2.9 ve 2.10 yardımı ile hesaplanmalıdır. Buna göre

$$I_{arc\_1} = \frac{I_{arc\_2700} - I_{arc\_600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc\_2700}$$

$$I_{arc_1} = \frac{6,328 - 5,253}{2,1} (6,3 - 2,7) + 6,328 = 8,170 \text{ kA}$$

$$I_{arc_2} = \frac{I_{arc_14300} - I_{arc_2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc_14300}$$

$$I_{arc_2} = \frac{6,921 - 6,328}{11,6} (6,3 - 14,3) + 6,921 = 6,512 \text{ kA}$$

$$I_{arc_3} = \frac{I_{arc_1} (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc_2} (V_{oc} - 0,6)}{2,1}$$

$$I_{arc_3} = \frac{8,17(2,7 - 6,3)}{2,1} + \frac{6,512(6,3 - 0,6)}{2,1} = 3,669 \text{ kA}$$

$V_{oc} > 2700 \text{ V}$  ise  $I_{arc} = I_{arc_2}$  olduğundan ark akımı son değeri  $I_{arc} = 6,512 \text{ kA}$

Adım 3: Panel boyutu düzeltme faktörünün hesaplanması (CF),

Panel boyutu düzeltme faktörü hesabında öncelikle panel tipi belirlenmelidir. IEEE 1584'de tanımlandığı üzere;

- $V_{oc} < 600 \text{ V}$
- En ve boy  $< 508 \text{ mm}$
- Derinlik  $\leq 203,2 \text{ mm}$

koşulları sağlanmıyor ise panel tipik (typical) olarak dikkate alınır. Bu koşulların tamamı sağlanıyor ise panel sığ (shallow) olarak dikkate alınır. Panel tipi belirlendikten sonra Tablo 2.6 ve Eşitlik 2.23... 2.27 yardımı ile düzeltme faktörü hesaplanır. Buna göre;

$660,4 \text{ mm} < W \leq 1244,6 \text{ mm}$  olduğundan  $W_1$  Eşitlik 2.23 ile hesaplanır. (Bakınız Tablo 2.5)

$$W_1 = \left( 660,4 + (W - 660,4) \times \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1}$$

Burada VCB için  $A=4$ ,  $B= 20$

$$W_1 = \left( 660,4 + (800 - 660,4) \times \left( \frac{6,3 + 4}{20} \right) \right) \times 25,4^{-1} = 28,83$$

H > 1244.6 mm olduğundan H<sub>1</sub> = 49 (Bakınız Tablo 2.5)

$$ESS = \left( \frac{H_1 + W_1}{2} \right)$$

$$ESS = \left( \frac{49 + 28,83}{2} \right) = 38,915$$

$$CF = b_1 \times ESS^2 + b_2 \times ESS + b_3$$

VCB için b<sub>1</sub> = -0,000302 b<sub>2</sub> = 0,03441 b<sub>3</sub> = 0,4325 (Bakınız Tablo 2.6)

$$CF = -0,000302 \times 38,915^2 + 0,03441 \times 38,915 + 0,4325 = 1,314$$

$$CF = 1,314$$

Adım 4: Olay enerjisi ara değerlerinin hesaplanması,

Olay enerjisi ara değerleri aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 2.11) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$E_{Voc} = \frac{12,552}{50} \times 10^{\left( k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc\_Voc}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc\_Voc} + \log \frac{1}{CF} \right)}$$

Burada öncelikle elektrot yapılandırmasına göre katsayılar belirlenmelidir. Bu katsayılar Ek-A Tablo A.2'de belirtilmiştir. Buna göre;

600 V için;

$$k_1 = 0,753364 \quad k_2 = 0,566 \quad k_3 = 1,752636 \quad k_4 = 0 \quad k_5 = 0 \quad k_6 = -4,783 \cdot 10^{-9} \quad k_7 = 0,000001962$$

$$k_8 = -0,000229 \quad k_9 = 0,003141 \quad k_{10} = 1,092 \quad k_{11} = 0 \quad k_{12} = -1,598 \quad k_{13} = 0,957$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.11'de yerine konursa 600 V için olay enerjisi ara değeri E<sub>600</sub> = 10,581 J/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanır.



2700 V için;

$$k_1 = 2,40021 \quad k_2 = 0,165 \quad k_3 = 0,354202 \quad k_4 = -1,557 \cdot 10^{-12} \quad k_5 = 4,556 \cdot 10^{-10}$$

$$k_6 = -4,186 \cdot 10^{-8} \quad k_7 = 8,346 \cdot 10^{-7} \quad k_8 = 5,482 \cdot 10^{-5} \quad k_9 = -0,003191 \quad k_{10} = 0,9729 \quad k_{11} = 0$$

$$k_{12} = 1,569 \quad k_{13} = 0,9778$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.11'de yerine konursa 2700 V için olay enerjisi ara değeri  $E_{2700} = 15,394 \text{ J/cm}^2$  olarak hesaplanır.

14300 V için;

$$k_1 = 3.825917 \quad k_2 = 0,11 \quad k_3 = -0.999749 \quad k_4 = -1,557 \cdot 10^{-12} \quad k_5 = 4,556 \cdot 10^{-10}$$

$$k_6 = -4,186 \cdot 10^{-8} \quad k_7 = 8,346 \cdot 10^{-7} \quad k_8 = 5,482 \cdot 10^{-5} \quad k_9 = -0,003191 \quad k_{10} = 0,9729 \quad k_{11} = 0$$

$$k_{12} = 1,568 \quad k_{13} = 0,99$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.11'de yerine konursa 14300 V için olay enerjisi ara değeri  $E_{2700} = 17,297 \text{ J/cm}^2$  olarak hesaplanır.

Adım 5: Olay enerjisi son değer hesabı,

Sistem gerilimi  $>600 \text{ V}$  olduğundan olay enerjisi son değeri Eşitlik 2.13...2.15 yardımı ile hesaplanır. Buna göre

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700}$$

$$E_1 = \frac{15,394 - 10,581}{2,1} (6,3 - 2,7) + 15,394 = 23,645 \text{ J/cm}^2$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300}$$

$$E_2 = \frac{17,297 - 15,394}{11,6} (6,3 - 14,3) + 17,297 = 15,984 \text{ J/cm}^2$$

$$E_3 = \frac{E_1 (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2 (V_{oc} - 0,6)}{2,1}$$

$$E_3 = \frac{23,645(2,7 - 6,3)}{2,1} + \frac{15,984(6,3 - 0,6)}{2,1} = 2,85 \text{ J/cm}^2$$

$V_{oc} > 2700\text{V}$  ise  $E = E_2$  olduğundan olay enerjisi son değeri  $E = 15,984 \text{ J/cm}^2$

Adım 6: Yaklaşım sınırı ara değerlerinin hesaplanması,

Yaklaşım sınırı ara değerleri aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 2.16) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$AFB_{V_{oc}} = 10^{\left( \frac{k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc\_Voc}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc\_Voc} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right)}$$

Burada öncelikle elektrot yapılandırmasına göre katsayılar belirlenmelidir. Bu katsayılar Ek-A Tablo A.2’de belirtilmiştir. Buna göre;

600 V için;

$$k_1=0,753364 \quad k_2=0,566 \quad k_3=1,752636 \quad k_4=0 \quad k_5=0 \quad k_6=-4,783 \cdot 10^{-9} \quad k_7=0,000001962$$

$$k_8=-0,000229 \quad k_9=0,003141 \quad k_{10}=1,092 \quad k_{11}=0 \quad k_{12}=-1,598 \quad k_{13}=0,957$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.16’da yerine konursa 600 V için ark flaş yaklaşım sınırı ara değeri  $AFB_{600} = 1457 \text{ mm}$  olarak hesaplanır.

2700 V için;

$$k_1= 2,40021 \quad k_2= 0,165 \quad k_3= 0,354202 \quad k_4= -1,557 \cdot 10^{-12} \quad k_5= 4,556 \cdot 10^{-10}$$

$$k_6=-4,186 \cdot 10^{-8} \quad k_7= 8,346 \cdot 10^{-7} \quad k_8= 5,482 \cdot 10^{-5} \quad k_9= -0,003191 \quad k_{10}= 0,9729 \quad k_{11}=0$$

$$k_{12}=1,569 \quad k_{13}=0,9778$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.16’da yerine konursa 2700 V için ark flaş yaklaşım sınırı ara değeri  $AFB_{2700} = 1866 \text{ mm}$  olarak hesaplanır.

14300 V için;

$$k_1= 3.825917 \quad k_2= 0,11 \quad k_3= -0.999749 \quad k_4= -1,557 \cdot 10^{-12} \quad k_5= 4,556 \cdot 10^{-10}$$

$$k_6=-4,186 \cdot 10^{-8} \quad k_7= 8,346 \cdot 10^{-7} \quad k_8= 5,482 \cdot 10^{-5} \quad k_9= -0,003191 \quad k_{10}= 0,9729 \quad k_{11}=0$$

$$k_{12}=1,568 \quad k_{13}=0,99$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.16'da yerine konursa 14300 V için ark flaş yaklaşım sınırı ara değeri  $AFB_{14300} = 2011$  mm olarak hesaplanır.

Adım 7: Yaklaşım sınırı son değeri hesabı,

Sistem gerilimi  $>600$  V olduğundan ark flaş yaklaşım sınırı son değeri Eşitlik 2.18...2.20 yardımı ile hesaplanır. Buna göre

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700}$$

$$AFB_1 = \frac{1866 - 1457}{2,1} (6,3 - 2,7) + 1866 = 2568 \text{ mm}$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300}$$

$$AFB_2 = \frac{2011 - 1866}{11,6} (6,3 - 14,3) + 2011 = 1912 \text{ mm}$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2 (V_{oc} - 0,6)}{2,1}$$

$$AFB_3 = \frac{2568(2,7 - 6,3)}{2,1} + \frac{1912(6,3 - 0,6)}{2,1} = 786 \text{ mm}$$

$V_{oc} > 2700$  V ise  $AFB = AFB_2$  olduğundan ark flaş yaklaşım sınırı son değeri  $E = 1912$  mm

Adım 8: İndirgenmiş ark akımı hesabı,

Buraya kadar olan adımlarda ark flaş hesabı için en önemli çıktılar olan olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değerler normal ark akımı içindir. Ancak pratikte hesaplanan ark akımı gerçek ark akımından düşük olabilir. Bu durum arıza temizleme süresinin artması ve olay enerjisinin değişmesi söz konusudur.

Bu nedenle IEEE 1584'e göre ark flaş hesabında indirgenmiş ark akımı için de olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı hesaplanır.

İndirgenmiş ark akımı Eşitlik 2.21 ve 2.22 yardımı ile hesaplanır.

$$\text{Var}C_f = k_1 V_{oc}^6 + k_2 V_{oc}^5 + k_3 V_{oc}^4 + k_4 V_{oc}^3 + k_5 V_{oc}^2 + k_6 V_{oc} + k_7$$

$$I_{\text{arc\_min\_Voc}} = I_{\text{arc\_Voc}} \times (1 - 0,5 \times \text{Var}C_f)$$

Burada öncelikle elektrot yapılandırmasına göre katsayılar belirlenmelidir. Bu katsayılar Ek-A Tablo A.3'de belirtilmiştir. Buna göre;

$$k_1 = 0 \quad k_2 = -0,0000014269 \quad k_3 = 8,31 \cdot 10^{-5} \quad k_4 = -00019382 \quad k_5 = 0,02237 \quad k_6 = -0,12645$$

$$k_7 = 0,3023$$

Sabitler ve diğer parametreler Eşitlik 2.21'de yerine konursa ark akımı indirgeme faktörü ( $\text{Var}C_f$ ) 0,02563 olarak hesaplanır.

Buna göre indirgenmiş ark akımı ara değerleri

$$I_{\text{arc\_min\_600}} = 5,253 \times (1 - 0,5 \times 0,02563) = 5,185 \text{ kA}$$

$$I_{\text{arc\_min\_2700}} = 6,328 \times (1 - 0,5 \times 0,02563) = 6,247 \text{ kA}$$

$$I_{\text{arc\_min\_14300}} = 6,921 \times (1 - 0,5 \times 0,02563) = 6,832 \text{ kA}$$

olarak hesaplanır.

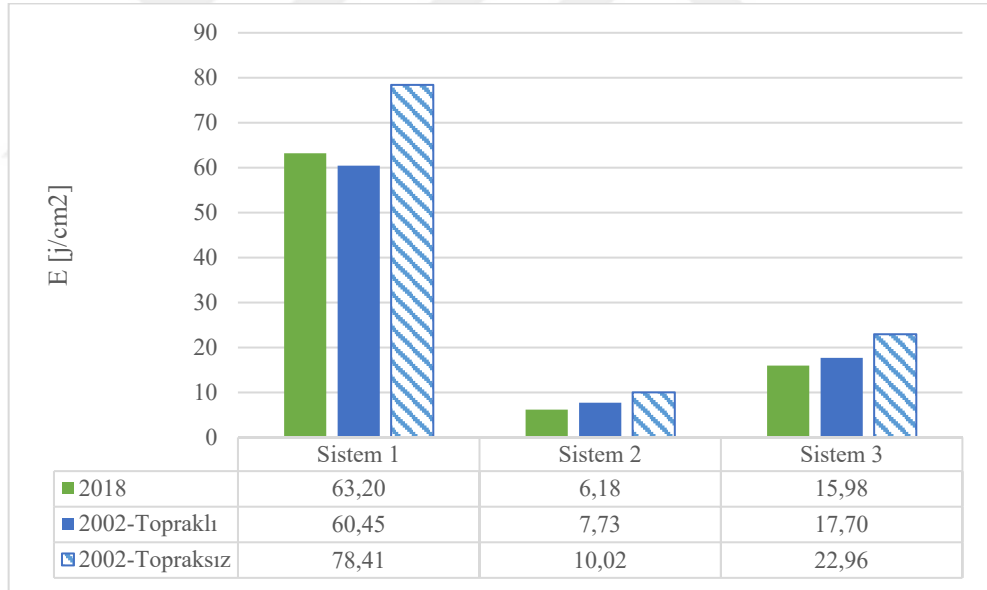
IEEE 1584 2002'de olduğu gibi burada da bu indirgenmiş ark akımına göre olay enerjisi ve yaklaşım sınırı değerleri yeniden hesaplanır. Daha sonra normal ark akımı ve indirgenmiş ark akımı için hesaplanan değerler karşılaştırılarak büyük olan değer ark flaş hesap sonucu olarak dikkate alınır. Bu örnek hesaplamada dikkate alınan sistemde arıza temizleme süresi sabit zamanlı olduğundan indirgenmiş ark akımı için hesaplama yapılmamıştır. Normal ark akımı için hesaplanan değerler dikkate alınmıştır.

### 3.2. IEEE 1584 2002 ve 2018'e Göre Analiz Sonuçları

Bu kısımda Tablo 3.1'de belirtilen sistemler için IEEE 1584-2018 ve 2002 standardına göre ark flaş sonuçları karşılaştırılmıştır. Ark flaş hesapları Bölüm 3.1'deki örnek hesaplarda belirtildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

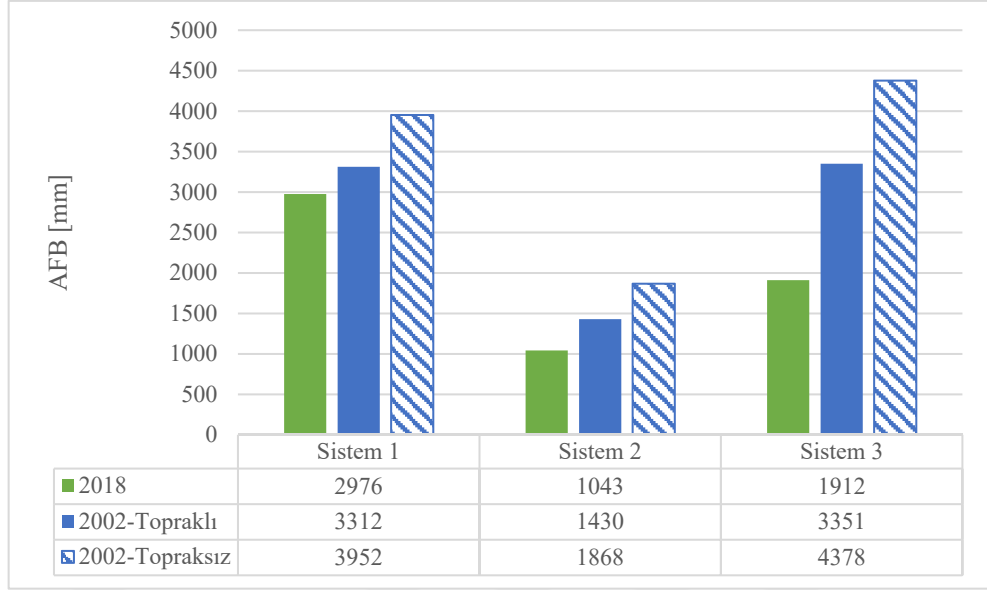
IEEE 1584-2002 standardında sistemin topraklaması değişken olarak dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla sistemin topraklı olup olmama durumuna göre sonuçlar kayda değer oranda değişmektedir. Bu nedenle Tablo 3.1'de belirtilen örnek sistemlerin topraklı ve topraksız olması durumları IEEE 1584-2002 için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1'de belirtilen sistemler için IEEE 1584-2018 ve 2002'ye göre hesaplanan olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı değerleri sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de belirtilmiştir.



Şekil 3.1. IEEE 1584-2018 ve 2002'ye göre olay enerjisi değerleri

Şekil 3.1'de belirtilen sonuçlarda görüldüğü üzere sistemin topraklı olması durumunda IEEE 1584-2018'e göre hesaplanan olay enerjisi değerleri sistem 1'de IEEE 1584-2002'ye göre hesaplanan değerden daha yüksek iken sistem 2, 3'de daha düşüktür. Sistemin topraksız olması durumunda ise her üç sistemde de 2002'ye göre hesaplanan değer 2018'e göre hesaplanan değerden büyüktür.



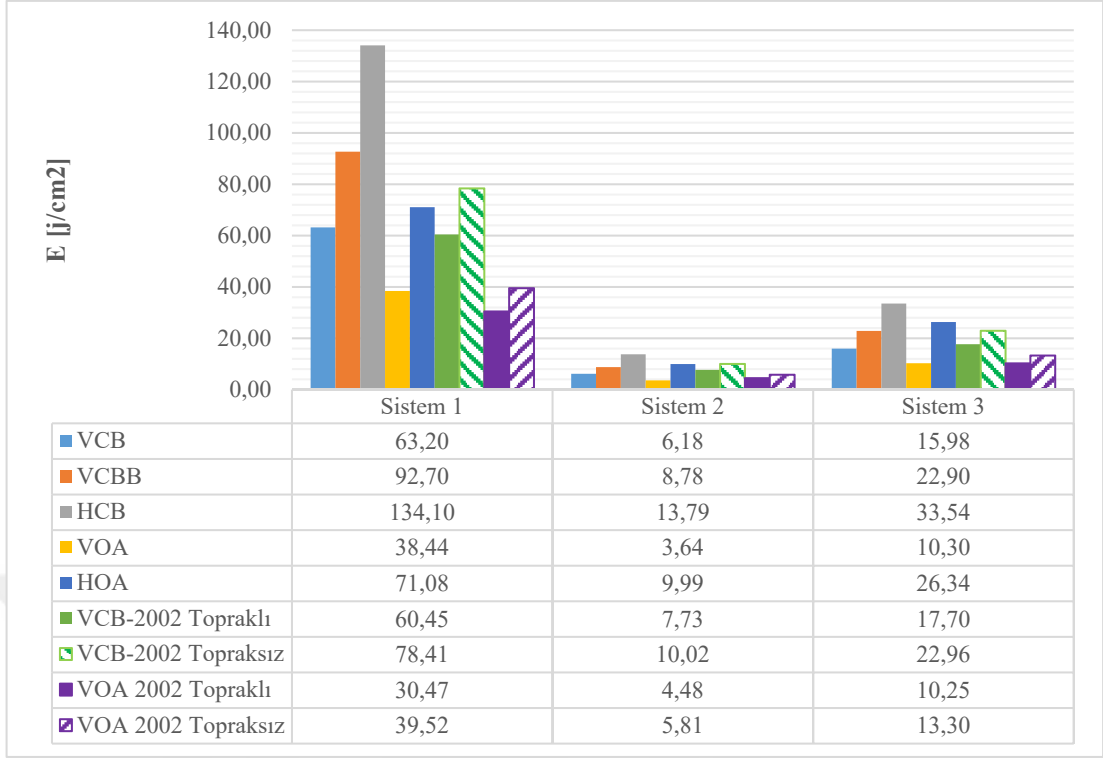
Şekil 3.2. IEEE 1584 2018 ve 2002’ye göre ark flaş yaklaşım sınırı değerleri

Şekil 3.2’ de belirtilen sonuçlarda görüldüğü üzere sistemin topraklı veya topraksız olması durumunda üç sistem içinde 2002’ye göre hesaplanan ark flaş yaklaşım sınırı 2018’e göre hesaplanan değerden büyüktür.

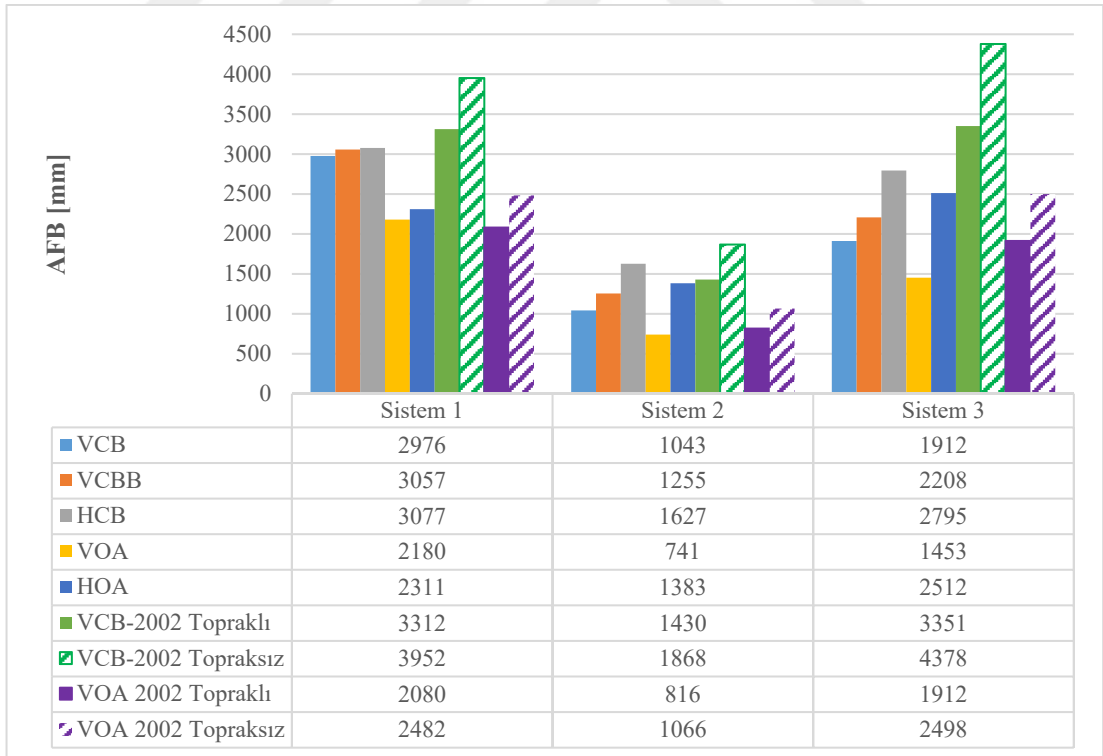
### 3.3. Elektrot Yapılandırmalarına Göre Analiz Sonuçları

Ark flaş analiz sonuçlarını etkileyen en önemli parametrelerden birisi elektrot yapılandırmasıdır. IEEE 1584-2018’e göre ark flaş hesabında kullanılan katsayılar ( $k_1, \dots, k_{13}$ ) elektrot yapılandırmasına göre değişmektedir. Dolayısıyla bir sistemde sadece elektrot yapılandırmasının değişmesinin sonuçları kayda değer oranda etkileyeceği öngörülmektedir.

Bölüm 3.2’de yapılan analizlerde IEEE 1584 2018 ve 2002’de ortak olan VCB konfigürasyonu dikkate alınmıştı. Bu kısımda ise elektrot yapılandırmasının ark flaş sonuçlarına etkisini incelenmiştir. Bu kapsamda Tablo 3.1’de belirtilen sistem 1,2 ve 3 için farklı elektrot konfigürasyonlarına göre ark flaş analizi yapılmıştır. Bu sistemlerde sadece elektrot konfigürasyonları değiştirilmiştir. Diğer parametrelerin aynı kaldığı kabul edilmiştir. Ayrıca önceki bölümde olduğu gibi IEEE 1584-2002 için sistemin topraklı ve topraksız olma durumları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Bu hususlara göre hesaplanan olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı değerleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de belirtilmiştir.



Şekil 3.3. Farklı konfigürasyonlara göre olay enerjisi değerleri



Şekil 3.4. Farklı konfigürasyonlara göre ark flaş yaklaşım sınırı değerleri

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de belirtilen sonuçlarda görüldüğü üzere bir sistemde sadece elektrot yapılandırmasının değişmesi sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir.

Bölüm 3.2’de aynı elektrot konfigürasyonları için (VCB) 2018 ve 2002’ye göre olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı değerleri karşılaştırıldığında sonuçların bazı sistemlerde 2018’ için hesaplanan değer büyük olduğu, bazı sistemlerde ise 2002’ için hesaplanan değer büyük olduğu görülmüştü.

IEEE 1584-2002 standardı oluşturulurken kullanılan test sistemlerinde sadece VCB ve VOA dikkate alındığından 2018 standardı yayınlanana kadar IEEE 1584’ e göre yapılan ark flaş hesaplarında sistemin elektrot yapılandırması VCB veya VOA olduğu kabul edilmekteydi. Dolayısıyla IEEE 1584-2002’ye göre ark flaş analizi yapılmış bir sistemde elektrot yapılandırması VCB veya VOA değil ise hesaplanan değer gerçek değerden (yani IEEE 1584-2018 ile gerçek elektrot yapılandırmasına göre hesaplanan değerinden) oldukça farklı olduğu görülmektedir.

Hesaplanan olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı değerlerinin gerçek değerden düşük olması can ve mal güvenliği için risk oluştururken gerçek değerden büyük olması ise kişisel koruyucu ekipmanların aşırı boyutlandırılmasına dolayısıyla bakım onarım personelinin hareket kabiliyetinin sınırlandırılmasına neden olacaktır.

Tüm bu hususlara göre, IEEE 1584-2002 standardına göre ark flaş analizi yapılmış bir sistemde eğer elektrot yapılandırması VCB veya VOA değil ise sistemin IEEE 1584-2018’e göre ark flaş analizinin güncellenmesi önerilir. Öte yandan VCB ve VOA konfigürasyonlar için de 2018 ve 2002’ye göre hesaplanan değerler birbirinden farklı olduğundan ve hesaplanan değerlerin bazı sistemlerde 2018’de, bazı sistemlerde ise 2002’de büyük olduğundan bu durum için de ark flaş analizinin 2018’e göre güncellenmesi yararlı olacaktır.



#### **4. ARK FLAŞ TEHKİLESİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ**

Alınacak her türlü önleme rağmen kazaların meydana gelmesi muhtemeldir. Bu nedenle, ark flaş olay enerjisini mümkün olan en düşük seviyede tutmak personelin can güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu bölümde ark flaş olay enerjisini azaltmaya yönelik yöntemler ve ekipmanlar hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 2'deki eşitliklerde görüldüğü üzere olay enerjisini etkileyen başlıca büyüklükler kısa devre akımı, arıza süresi, elektrot yapılandırması, panel boyutu, elektrotlar arası açıklık ve çalışma mesafesidir. Gerek tasarım aşamasında gerek kurulu bir tesiste uygulanabilecek bazı yöntem ve ekipmanlar ile bu parametreler değiştirilerek olay enerjisi minimum seviyeye getirilebilir. Olay enerjisini etkileyen sistem parametrelerini değiştirmeye yönelik yöntem ve ekipmanlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

##### **4.1. Kısa Devre Akımını Sınırlama**

Bölüm 2.4'de belirtilen eşitliklerde görüldüğü üzere olay enerjisi kısa devre akımı ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla olay enerjisini azaltmak için kısa devre akımını minimum seviyeye getirmek gerekir. Kısa devre akımının büyüklüğü transformatör gücü, transformatör bağıl kısa devre gerilimi, kablo/havai hat kesiti, uzunluğu, işletme gerilimi vb. parametrelere bağlıdır. Bu nedenle kısa devre akımını azaltmak daha çok tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Kısa devre akımını sınırlamaya ilişkin başlıca yöntemleri aşağıda belirtilmiştir.

##### **4.1.1. Yüksek empedanslı transformatör kullanımı**

Bir transformatörün sekonder tarafındaki kısa devre akımı büyük oranda transformatörün bağıl kısa devre gerilimine (%uk) değerine bağlıdır. Bir sistemde transformatörün primer tarafındaki empedanslar (hat empedansı, şebeke empedansı vs.) dikkate alınmaz ise sekonder taraftaki yaklaşık kısa devre akımı aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

$$I_k = \frac{S_N}{V_{N2}\sqrt{3}} \times \frac{100}{\%uk} \quad (4.1)$$

Burada;

$S_N$  : Transformatör nominal gücü [kVA]

$V_{N2}$  : Sekonder sargı nominal gerilimi [kV]

$\%uk$  : Transformatör bağlı kısa devre gerilimi

$I_k$  : Simetrik üç faz kısa devre akımı [A]

Eşitlik 4.1’de görüldüğü üzere  $\%uk$  değeri büyük bir transformatör kullanmak kısa devre akımını önemli ölçüde azaltacaktır. Örneğin 2500 kVA 34,5/0,4kV bir dağıtım transformatörü için  $\%uk$  değerinin  $\%6$  ve  $\%8$  olması durumu için sekonder taraftaki yaklaşık kısa devre akımları;

$\%uk = 6$  için  $I_k$ , 60 kA

$\%uk = 8$  için  $I_k$ , 45 kA

olarak hesaplanır.

Transformatör empedansının artması kısa devre akımını ve buna bağlı olarak alçak gerilim devre kesici cihazların maliyetini azaltacaktır, ancak transformatör kayıplarını ve gerilim düşümlerini artıracaktır. Bu nedenle transformatör seçiminde teknik ve ekonomik analizler yapılarak optimum  $\%uk$  değeri belirlenmelidir.

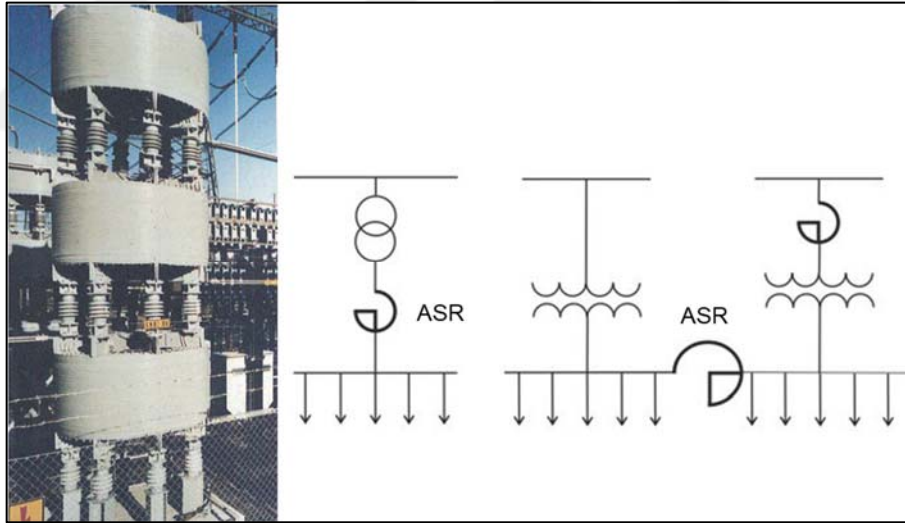
#### 4.1.2. Düşük güçlü transformatör kullanımı

Eşitlik 4.1’de görüldüğü üzere transformatörün sekonder tarafındaki kısa devre akımı transformatör gücü ile doğru orantılıdır. Buna göre büyük güçlü bir transformatör yerine toplam yükü daha düşük güçlü birden fazla transformatöre paylaşmak kısa devre akımının azaltılması ve işletme güvenilirliğinin artırılması açısından katkı sağlayacaktır. Ancak transformatör sayısının artması primer ve sekonder teçhizat maliyetini önemli ölçüde artıracaktır.

### 4.1.3. Arıza akımı sınırlayıcı donanım kullanımı

Arıza akımını sınırlama yöntemlerinden birisi de arıza empedansını artırıcı donanımlar kullanmaktır. Arıza akımını sınırlama yönelik kullanılan bazı donanımlar aşağıda açıklanmıştır.

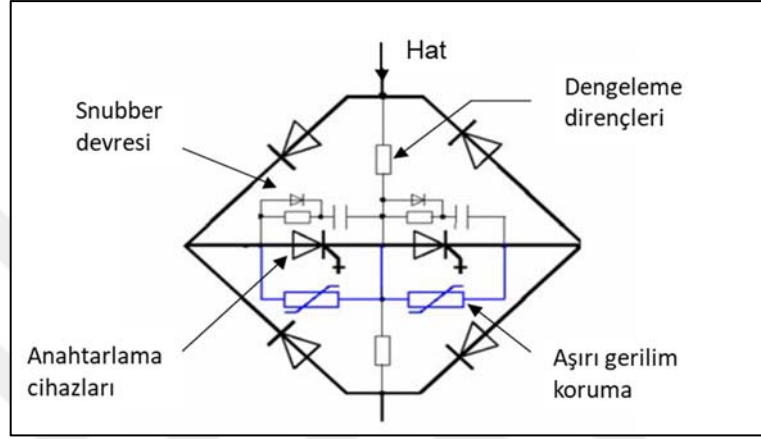
**Akım sınırlayıcı reaktörler (ASR):** Arıza akımını sınırlamak için devreye seri olarak bağlanır. Böylece devrenin toplam empedansını artırarak arıza akımının sınırlandırılmasını sağlarlar. Akım sınırlayıcı reaktörler sadece arıza durumunda değil normal işletme durumunda da devrede olduğundan reaktif güç kayıplarına ve gerilim düşümlerine neden olurlar. Daha çok yüksek gerilim enerji iletim sistemlerinde baralarda, izolatörlerde, devre kesicilerinde ve diğer sistem elemanlarında oluşan zorlayıcı etkiler azaltmak amacıyla kullanılır [27]. Diğer akım sınırlayıcı cihazlara göre daha ekonomiktir ve işletme kolaylığı sunmaktadır. Şekil 4.1’de örnek bir akım sınırlama reaktörü görseli ve prensip tek hat şeması belirtilmiştir.



Şekil 4.1. Akım sınırlama reaktörü

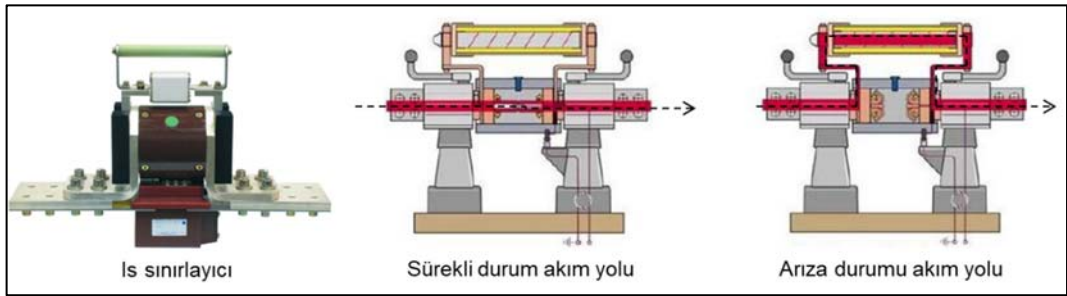
**Katı hal arıza akımı sınırlayıcılar (KHAAS):** Katı hal arıza akımı sınırlayıcılar (Solid-State Fault Current Limiters) güç elektroniği tabanlı cihazlardır [28]. Normal işletme koşullarında akım yolu üzerinde herhangi bir empedans etkisi göstermezler. Fakat arıza durumunda yüksek empedans değeri gösterirler. Bu nedenle normal işletmede gerilim düşümü ve kayıplar açısından akım sınırlayıcı reaktörlere göre daha avantajlıdır. Ancak kurulum maliyeti yüksek ve kontrol sistemleri karmaşıktır.

KHAAS uygulamaları için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde kullanılan güç elektroniği ekipmanları ve devre şemaları birbirinden farklı olmakla birlikte temel çalışma aynıdır. Hat akımı bir referans akım değeri ile karşılaştırılır. Hat akımı referans akımı geçtiğinde kontrol devresi bir tetikleme sinyali üretir. Bu tetikleme sinyali ilgili güç elektroniği ekipmanını tetikleyerek arıza akımını yüksek empedanslı bir yola iletir. Örnek bir KHAAS modeli devresi Şekil 4.2’de belirtilmiştir.



Şekil 4.2. KHAAS örnek devre modeli [28]

**Is sınırlayıcı:** Is sınırlayıcılar birbirine paralel bağlanmış iki akım yolundan oluşur. Bunlardan birisi sürekli yük akımını taşımak için tasarlanmış ana iletken diğeri ise arıza akımını sınırlamak için tasarlanmış sigortadır [29]. Normal işletme durumunda yük akımı ana iletken üzerinden geçer. Bir kısa devre durumunda ise arıza akımı akım sınırlayıcı sigorta üzerinden geçer. Şekil 4.3’de tipik bir Is sınırlayıcı ve akım yolu gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Is sınırlayıcı akım yolu [29]

Is sınırlayıcıdan akan akım ölçme cihazları ile denetlenir. Bir arıza durumunda kısa devre akımı belirlenen değerin üzerinde ise ana iletken üzerindeki sürekli akım yolu 1ms’den daha kısa bir sürede fiziksel olarak ortadan kaldırılır. Arıza akımı böylece

akım sınırlayıcı sigorta üzerinden akmaya zorlanır [29]. Çalışma sonrası akım yolu fiziksel olarak ortadan kaldırıldığından yeniden kullanım için bazı parçaların (sigorta, ana kontak iletkeni, şarj ünitesi) yenilenmesi gereklidir.

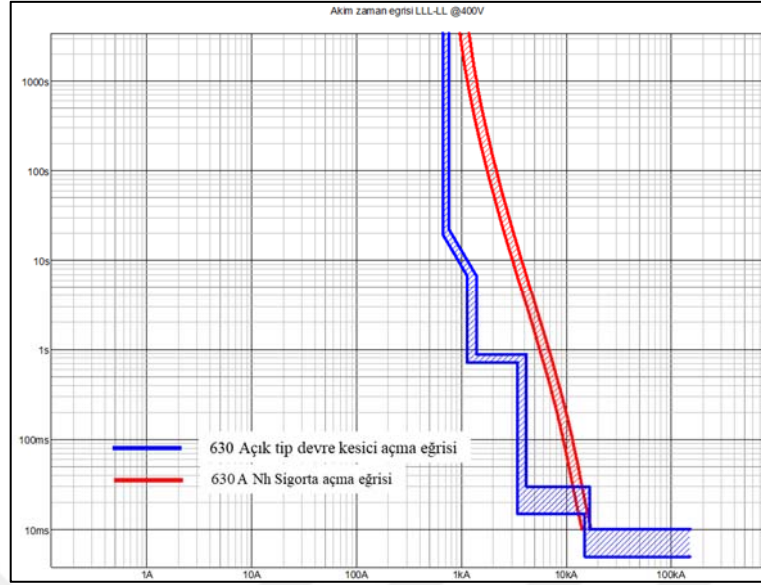
## **4.2. Arıza Temizleme Süresini Azaltma**

Bölüm 2.2’de belirtilen eşitliklerde görüldüğü üzere olay enerjisi arıza temizleme ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla olay enerjisini azaltma yöntemlerinden birisi de arıza süresini kısaltmaktır. Arıza süresinin değeri kullanılan koruyucu donanımların (sigorta, röle, kesici vb.) akım-zaman karakteristiğine ve ayar parametrelerine bağlıdır. Buna göre arıza temizleme süresini azaltmak için sistem topolojisine uygun koruyucu donanımların seçilmesi ve sistemin koruma koordinasyon çalışmasının yapılması önem arz etmektedir. Arıza temizleme süresini azaltmaya ilişkin bazı uygulamalar aşağıda belirtilmiştir.

### **4.2.1. Açma-Kapama Cihaz Seçimi**

Arıza temizleme süresi azaltmak için tasarım aşamasında alınacak en önemli önlem uygun açma kapama cihazının seçilmesidir. Güç sistemlerinde kullanılan açma kapama cihazları (sigorta, kesici, şalter vb.) arıza akımını temizleme süresi açısından koruma fonksiyonlarına göre iki tipte belirtilebilir. Bunlar, Ters zaman aşırı akım koruma ve ani aşırı akım korumadır.

Ters zaman aşırı akım koruma fonksiyonuna sahip cihazlar (örneğin sigortalar) arıza akımının büyüklüğüne bağlı olarak arızayı belirli bir sürede temizlerler. Burada temizleme süresi sigortanın karakteristik özelliğine bağlıdır. Herhangi bir süre ayarı mümkün değildir. Ani aşırı akım koruma fonksiyonuna sahip cihazlar ise (örneğin kompakt şalter, kesici vs.) arıza akımını çok daha kısa sürede temizler. Ayrıca bu cihazlarda arıza temizleme akımı ve süresini ayarlamakta mümkündür. Şekil 4.4’de aynı nominal akım değerine ait NH sigortanın ve açık tip devre kesicinin (ACB) akım-zaman açma eğrileri belirtilmiştir. Görüldüğü üzere ACB, Nh sigortaya göre arıza akımını daha hızlı temizlemektedir.



Şekil 4.4. Akım zaman eğrisi

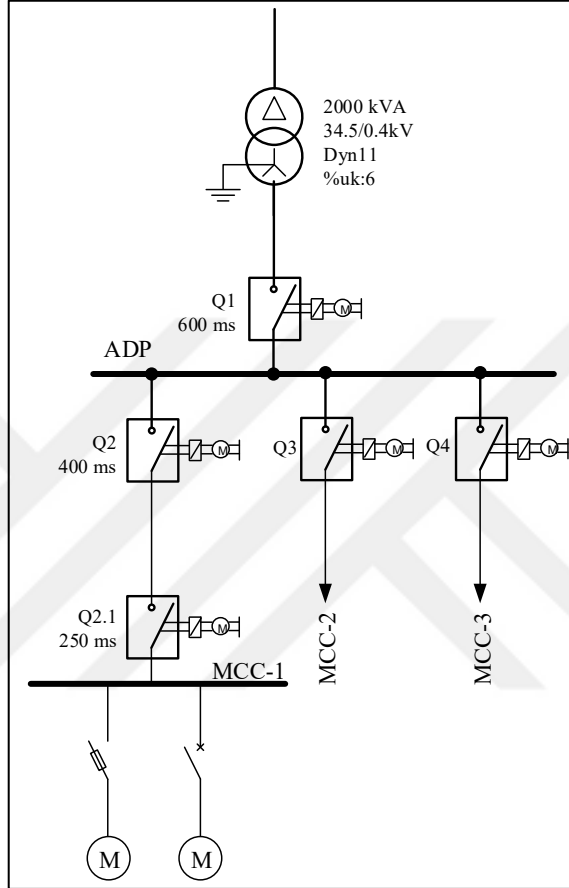
Ayrıca koruma cihazı seçiminde diğer bir önemli hususta cihaz nominal akımının değerinin doğru belirlenmesidir. Kompakt şalter, hava yalıtımlı şalter gibi cihazlarda kısa devre ayar akımı tipik olarak cihaz nominal akımının 1 ile 10 katı arasında ayarlanabilmektedir. Özellikle alçak gerilim seviyesinde kablo kesiti ve uzunluğuna bağlı olarak kısa devre akımı nominal akıma yakın değerlerde olabilir. Bu durumda cihaz gereğinden büyük boyutlandırıldığında kısa devre akımına karşı etkin bir koruma sağlayamayabilir. Sigortalarda ise herhangi bir süre ve akım ayarı söz konusu olmadığından uygun değer belirlenmesi çok daha önemlidir. Bu nedenle uygun açma kapama cihazlarının belirlenmesi için yük akışı ve kısa devre analizlerinin yapılması önerilmektedir.

#### 4.2.2. Ayar Parametrelerinin Geçici Olarak Değiştirilmesi

Normal işletme koşullarında herhangi bir arızada sadece arızalı bölgenin sistemden ayrılması, diğer kısımların işletmeye devam etmesi istenir. Bu nedenle aynı radyal güzergâh üzerindeki devre kesicilerin (röle şalter vs.) ayar parametreleri belirlenirken açma süreleri arasında belirli bir koordinasyon zaman aralığı bırakılır. Bu durumda kaynağa yaklaştıkça açma süresi de artmaktadır.

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi ark flaş olayı enerjili sistemde çalışma durumu için değerlendirilmektedir. Bu nedenle enerji altında çalışma sırasında ilgili ekipmanın beslendiği devre kesicinin ayar parametresi bakım esnasında geçici olarak

değiştirilerek arıza temizleme süresi azaltılabilir. Bu esnada can güvenliği riski yüksek olduğundan sistemin işletme sürekliliği göz ardı edilecektir. Şekil 4.5’deki prensip tek hat şemasında bir alçak gerilim dağıtım panelindeki koruma ekipmanlarının tipik açma süreleri belirtilmiştir.



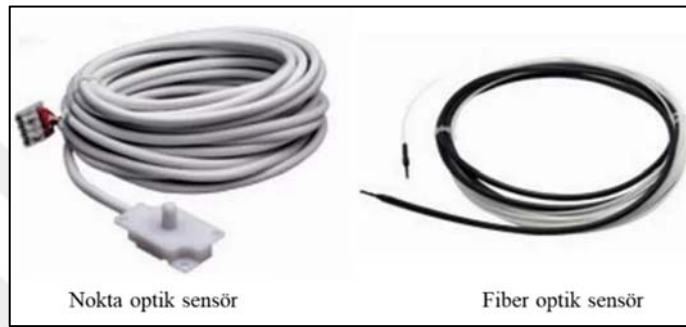
Şekil 4.5. Örnek prensip tek hat şeması

Şekil 4.5’de belirtilen süreler normal işletme durumu içindir. Örneğin MCC-1 panelinde bakım esnasında Q2 ve Q2.1 koruma ekipmanlarının açma süreleri minimum seviyeye ayarlanırsa (yaklaşık 20-30 ms) arıza temizleme süresi ve buna bağlı olarak ark flaş olay enerjisi değeri de önemli oranda azalacaktır.

#### 4.2.3. Optik Sensör Kullanımı

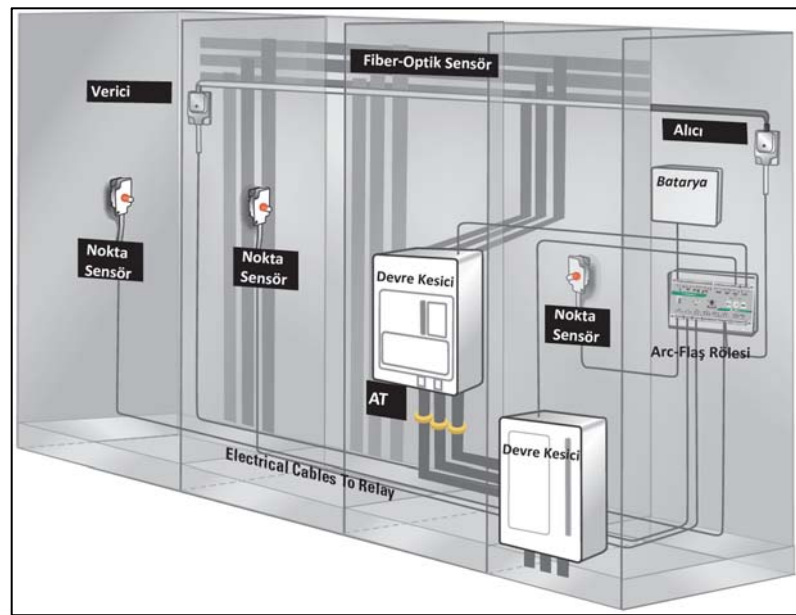
Optik sensör kullanımı, endüstride ark flaş tehlikelerini azaltmak için kullanılan modern bir tekniktir. Ark olayı oluşmaya başladığı andan itibaren bir ışık açığa çıkar. Bu ışığın yoğunluğu ortam ışığından çok daha yüksektir. Bu yöntemde ark flaş tarafından verilen yoğun ışık optik sensörler ile tespit edilir.

Ark flaş korumasında genel olarak iki tip optik sensör kullanılmaktadır. Bunlar nokta sensör ve fiber optik sensörlerdir [30]. Sensör seçimi uygulamaya göre belirlenir. Panelin farklı bölümleri arasında geçişlerin zor olduğu durumlarda nokta sensör kullanımı kurulum açısından avantaj sağlar. Ayrıca, sensör arızasında bakım onarım işlemi kolaydır. Fiber optik sensör ise geniş koruma alanlarında maliyet açısından avantaj sağlar. Tek bir fiber optik sensör ile 60 m'ye kadar olan bir alanda algılama yapılabilir [31]. Ancak kurulum ve bakım onarımı daha zordur. Şekil 4.6'de nokta ve fiber optik sensörlere ilişkin görseller belirtilmiştir.



Şekil 4.6. Nokta ve fiber optik sensör [32]

Bu sensörler ark flaş koruma fonksiyonuna sahip mikroişlemci tabanlı röleler ile ilişkilendirilir. Sensörler herhangi bir arıza tespit ettiğinde en yakın devre kesiciye çok kısa sürede bir açma sinyali gönderir. Optik sensörler ile ark flaş korumasına ilişkin tipik bir prensip şeması Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Örnek optik sensör kullanım şeması [33]



Optik sensör kullanımı ile arıza çok kısa bir sürede algılanır ve devre kesiciye açma birkaç milisaniye içerisinde açma sinyali gönderilir. Ancak geleneksel devre kesicilerde açma sinyalinin algılanmasından arızanın temizlenmesine kadar geçen süre yaklaşık 50 ms olarak öngörülebilir. Bu nedenle arızanın daha hızlı temizlenmesi için katı-hal devre kesicilerin kullanıldığı ark flaş koruma sistemleri geliştirilmiştir. Katı-hal devre kesici ve optik sensörlerin birlikte kullanımı ile arıza birkaç ms içerisinde temizlenebilmektedir. Bu yaklaşım IEC 62271-200 standardında kabul görmüştür [32].

#### **4.3. Elektrot Yapılandırılmasının Değişimi**

Elektrot yapılandırması olay enerjisini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. IEEE 1584-2018 standardında hesap modelinin geliştirilmesinde 5 farklı tipte farklı elektrot konfigürasyonları dikkate alınmıştır. Bu elektrot konfigürasyonlarına ilişkin tanımlar ve görseller Bölüm 0'de belirtilmiştir.

Bölüm 3.3'de yapılan incelemede görüldüğü üzere bir sistemde sadece elektrot yapılandırmasının değişmesi olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle panelin tasarım aşamasında elektrot yapılandırmasının ark flaş hesabına etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Elektrot yapılandırması sistem yapısının izin verdiği ölçüde olay enerjisini minimize edecek şekilde seçilmelidir.

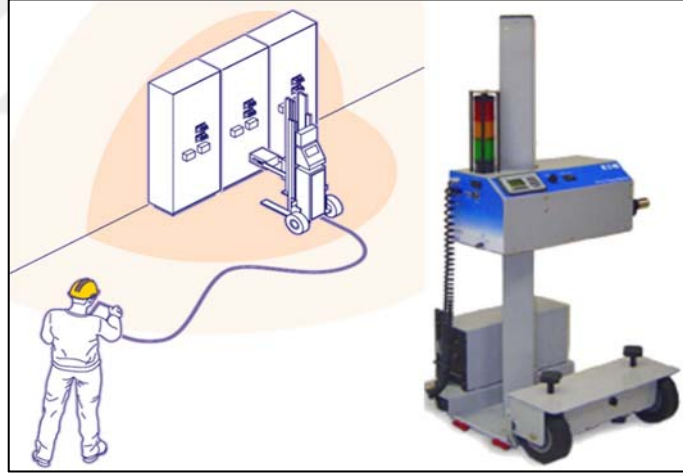
#### **4.4. Çalışma Mesafesinin Artırılması**

IEEE 1584 standardında çalışma mesafesi ark flaş kaynağı ile çalışma yapan personeli başı/gövdesi arasındaki mesafe olarak tanımlanır, olay enerjisi ise belirli bir çalışma mesafesi için hesaplanır. Bu nedenle çalışma mesafesinin belirlenmesi olay enerjisi ile doğrudan ilgilidir. Bölüm 2.4'de belirtilen eşitliklerde görüldüğü üzere olay enerjisi çalışma mesafesi ile ters orantılıdır. Dolayısıyla olay enerjisini azaltmak için çalışma mesafesini artırmak gerekir. Çalışma mesafesi, panelin fiziksel özellikleri, bakım onarım ekipmanları ve yapılacak işin niteliğine bağlıdır. Bu nedenle çalışma mesafesini artırmak ve/veya çalışma süresi boyunca bu mesafeyi korumak her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle ark flaş analizinde saha koşulları dikkate alınarak meydana gelebilecek minimum çalışma mesafesini göz önünde bulundurmaya can güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Tüm bunların yanı sıra çalışma mesafesini artırmak için alınabilecek önlemler raf tipi pano kullanmak, bakım onarım ekipmanlarında uzatma araçları kullanmak ve uzaktan kontrollü raf güç üniteleri kullanmak olarak belirtilebilir [34]. Bu uygulamalara ilişkin örnek görseller Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da belirtilmiştir.



Şekil 4.8. Çalışma mesafesi için uygun ekipman kullanım örneği



Şekil 4.9. Uzaktan kontrol raf güç ünitesi kullanımı

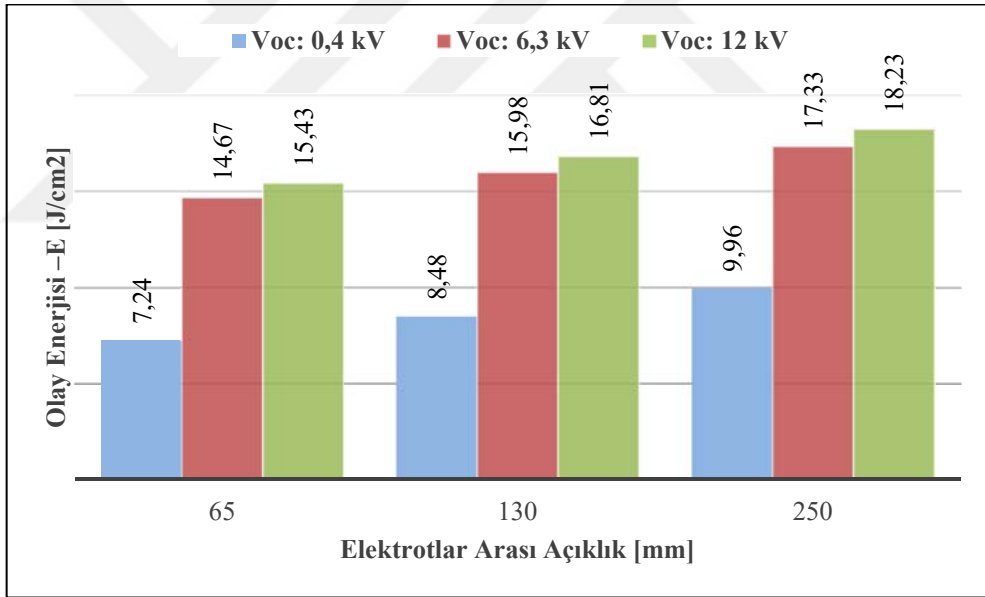
#### 4.5. Elektrotlar Arası Açıklığı Azaltmak

Bölüm 2.4’de belirtilen eşitliklerde görüldüğü üzere olay enerjisi elektrotlar arası açıklık (G) ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla olay enerjisini azaltmak için uygulanabilecek yöntemlerden birisi de elektrotlar arası açıklığı azaltmaktır.

Elektrotlar arası açıklık panel boyutuna, panel tasarımına ve paneldeki devre kesici ekipmanların fiziksel özelliklerine gibi parametrelere bağlıdır. Bu nedenle elektrotlar

arası açıklığı değiştirmek her zaman uygulanabilir bir yöntem olmayabilir. Öte yandan bu parametreler elektrotlar arası açıklığı azaltmaya uygun olsa da izolasyon zafiyeti meydana gelmemesi için elektrotlar arasında belirli bir mesafe bulunması gerekmektedir.

Tüm bu hususlar göz önünde bulundurularak panelin tasarımı sırasında elektrotlar arası açıklığı mümkün olduğu kadar düşük tutmak olay enerjisinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Elektrotlar arası açıklığın etkisi basit bir uygulama üzerinde incelenmiştir. Uygulamada Tablo 3.1’de belirtilen sistemlerden sistem 3 dikkate alınarak yapılmıştır. Burada sistem 3 için diğer tüm veriler sabit tutulup sadece elektrot arası açıklık ve işletme gerilimi değiştirilerek ark flaş analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre elektrotlar arası açıklığa göre olay enerjisinin değişimi Şekil 4.10’de belirtilmiştir. (Elektrot yapılandırması VCB olarak dikkate alınmıştır.)



Şekil 4.10. Elektrotlar arası açıklığa göre olay enerjisi değişimi

## 5. OLAY ENERJİSİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ UYGULAMASI

Bu bölümde olay enerjisini azaltma yöntemlerinin değerlendirilmesine ilişkin örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Uygulama PSS Sincal 16 güç sistemleri analiz yazılımı paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu örnek uygulama bir atık su arıtma tesisinin belirli bir bölümü için yapılmıştır. Çalışmada tesise ait alçak gerilim dağıtım merkezlerinden bir tanesi dikkate alınmıştır.

### 5.1. Benzetim Modeli Verileri

Çalışma kapsamında hazırlanan benzetim modeli tesise ait gerçek verilerden yararlanılarak oluşturulmuştur. Model oluşumunda kullanılan veriler aşağıda belirtilmiştir.

OG bara kısa devre verileri: Tesisin çalışma kapsamında değerlendirilen bölümünün beslendiği orta gerilim baranın kısa devre verileri tesisin kısa devre analiz raporundan [35] temin edilmiştir. İlgili veriler Tablo 5.1’de belirtilmiştir.

Tablo 5.1. OG bara kısa devre verileri

Gerilim [kV]	Maksimum		Minimum	
	Kısa Devre Akımı [kA]	Kısa Devre Gücü [MVA]	Kısa Devre Akımı [kA]	Kısa Devre Gücü [MVA]
34,5	10,12	605	0,57	34

Transformatör verileri: Çalışma kapsamında değerlendirilen bölümün beslendiği transformatöre ait veriler tesise ait kısa devre ve koruma koordinasyon raporundan [35] temin edilmiştir. İlgili veriler Tablo 5.2’de belirtilmiştir.

Tablo 5.2. Transformatör verileri

$V_{n1}$ [kV]	$V_{n2}$ [kV]	$S_n$ [kVA]	$u_k$ [%]	$u_r$ [%]	Bağlantı Grubu
34,5	0,4	2500	6	0,9	Dyn11

Kablo ve busbar verileri: Kabloların ve busbarın tip ve kesitleri tesise ait kısa devre ve koruma koordinasyon raporundan [35] temin edilmiştir. Buna göre benzetim modelinde kullanılan kablo ve busbar verileri Tablo 5.3'de belirtilmiştir.

Tablo 5.3. Kablo ve busbar verileri

Kablo / Busbar Tipi	r [Ω/km]	x [Ω/km]
3x6 mm <sup>2</sup> N2XH	3,08	0,091
3x150/70 mm <sup>2</sup> N2XH	0,124	0,084
1x120 mm <sup>2</sup> N2XH	0,153	0,073
1x185 mm <sup>2</sup> N2XH	0,099	0,073
3x6 mm <sup>2</sup> N2XCH	3,08	0,091
3x25/16 mm <sup>2</sup> N2XCH	0,727	0,103
3x10 mm <sup>2</sup> LI2XY(CUB)CY-(F2)	1,91	0,085
3x16 mm <sup>2</sup> LI2XY(CUB)CY-(F2)	1,21	0,082
3x50 mm <sup>2</sup> LI2XY(CUB)CY-(F2)	0,386	0,078
4400A Busbar	0,018	0,015

Motor verileri: Motorlara ait veriler t tesise ait kısa devre ve koruma koordinasyon raporundan [35] temin edilmiştir. Buna göre ilgili veriler Tablo 5.4'de belirtilmiştir.

Tablo 5.4. Asenkron motor verileri

Aktif Gücü (P) [kW]	Nominal Akımı (In) [A]	Yol Verme Tipi	Adet
5,3	9,5	Yumuşak yol verici	6
9 (Tip 1)	21	Frekans konvertör	3
9 (Tip 2)	15	Frekans konvertör	26
18,5	39	Yumuşak yol verici	6
30	54	Frekans konvertör	2
50	101	Frekans konvertör	6
350	506	Frekans konvertör	3

Panel verileri: Panellere ait veriler ilgili panellerin pano projelerinden [36...40] temin edilmiştir. Buna göre panel verileri Tablo 5.5'de belirtilmiştir.

Tablo 5.5. Panel verileri

Panel Adı	Yükseklik (H) [mm]	Genişlik (W) [mm]	Derinlik (Dp) [mm]	Baralar Arası Mesafe (G) [mm]
200MDB	2200	1200	1000	40
200MCC	2200	1000	1000	40
4904MCC	2200	400	1000	30
510MCC	2200	1000	1000	30
Blower VFD	1850	1000	800	25

Gerçekte paneller birden fazla bölümlere ayrılmıştır. Örneğin 200MCC paneli 5 adet 1000 mm genişliğindeki bölümden oluşmaktadır. Her ne kadar bir panel grubunun farklı bölümlerinde kısa devre akımları aynı olsa da farklı açma ekipmanları kullanıldığından arıza temizleme süresi farklı olacaktır. Bu nedenle ark flaş analizinde panelin her bölümü ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Bu çalışmada her panelin sadece giriş şalterinin bulunduğu bölüm dikkate alınmıştır. Açma süresi de giriş şalterinin ayar değerine göre belirlenmiştir.

Burada belirtilen genişlik panelin tamamı için değil bir bölüm içindir. Ayrıca bu bölümde yapılan tüm analizlerde çalışma mesafesi 610 mm olarak kabul edilmiştir.

Varsayımlar: Yukarıda belirtilen verilere ilave olarak benzetim modelinin oluşturulması ve çalışmanın devamındaki analizlerde bazı varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlar tesisin tamamına ait kısa devre analiz raporundan referansla belirlenmiştir. Bunlar;

- Frekans konvertör (VFD) sürücü üzerinden beslenen motorlarda ters yöndeki kısa devre akımları sürücü içerisindeki güç elektroniği ekipmanları sayesinde çok kısa sürede kesildiğinden VFD sürücülü motorların kısa devre katkısı motorun nominal akımı kadar olduğu kabul edilmiştir.

-Yumuşak yol verici (SS) üzerinden yol alan motorlarda yol alma sonrasında SS bypass edildiğinden ters yöndeki akımların kesilmesinde etkili olmamaktadır. Bu nedenle SS ile yol alan motorların kısa devre katkısı doğrudan yol alan motorlar gibi değerlendirilmiştir. Buna göre bu motorlarda kısa devre katkısı tipik bir değer olarak nominal akımın 6 katı kabul edilmiştir.

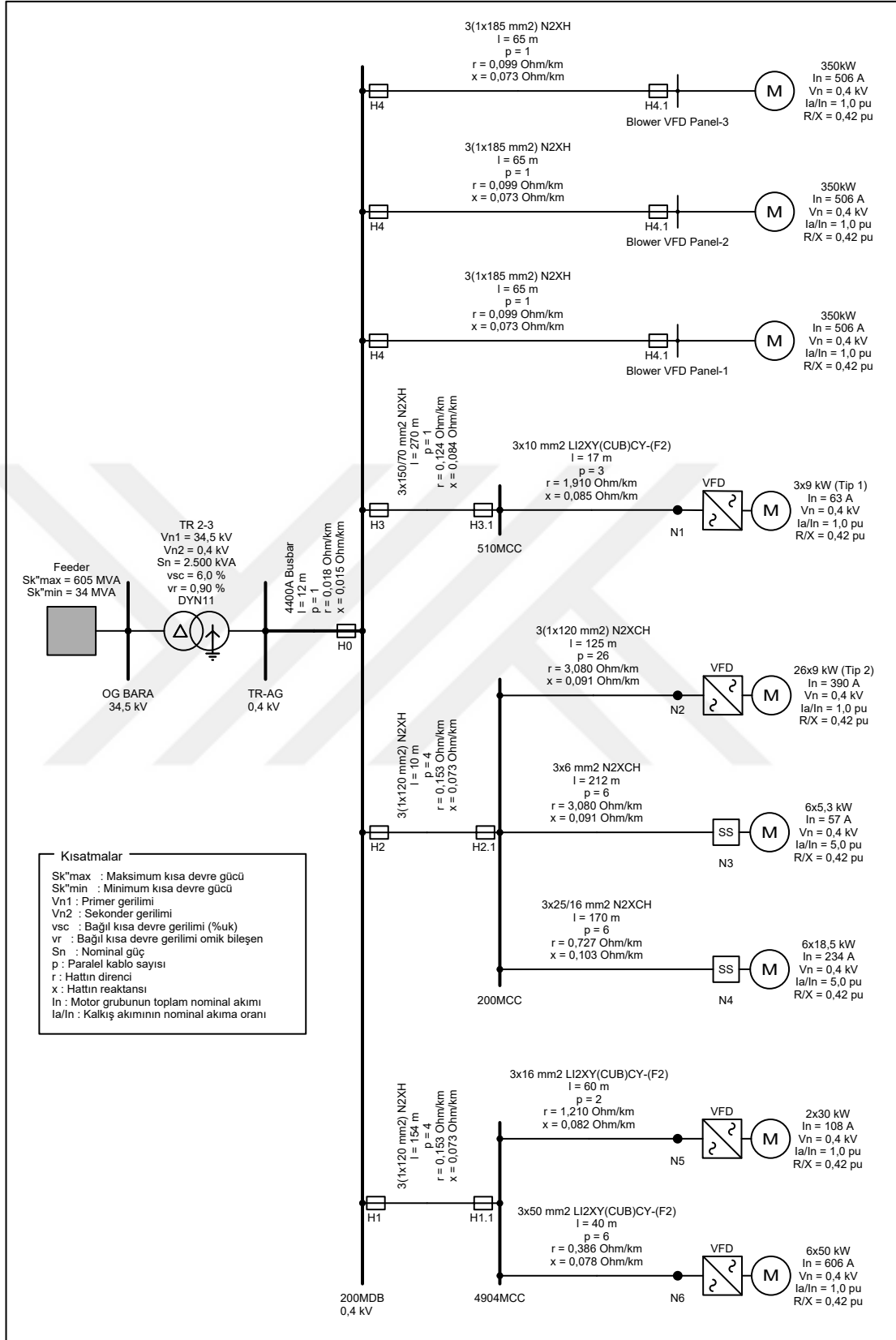
-Aynı güç ve özellikteki motorlar grup olarak modellenmiştir. Buna göre benzetim modelinde belirtilen nominal akım değeri gruptaki tüm motorlar için toplam nominal akım değeridir.

-350 kW blower motorların her biri ayrı bir VFD panelden beslendiğinden bu motorlar ayrı ayrı modellenmiştir.

-Vana, motorlu kapak vb. düşük güçlü motorların kısa devre katkısı ihmal edilmiştir. Bu nedenle bu motorlar benzetim modelinde belirtilmemiştir.

-Kısa devre analizine etkisi olmayan statik yükler (aydınlatma, priz vb.) benzetim modeline dahil edilmemiştir.

Tüm bu veriler ve varsayımlara göre oluşturulan benzetim modelinin görseli Şekil 5.1'de belirtilmiştir.



Şekil 5.1. Benzetim modeli



## 5.2. Kısa Devre Analizi

Ark flaş analizi yapılacak bir tesiste öncelikle kısa devre akımlarının belirlenmesi gereklidir. Analiz çalışması bir paket program ile yapılıyor ise oluşturulan benzetim modeli ile kısa devre akımları da otomatik olarak hesaplanacaktır. Ancak ark flaş analizi kısa devre akımlarının da hesaplandığı bir paket program ile yapılmıyor ise öncelikle ark flaş analizi yapılacak noktalar için kısa devre akımları hesaplanmalıdır.

Bu çalışmada, oluşturulan benzetim modeli sayesinde ark flaş analizi için kısa devre akımları paket programı tarafından otomatik olarak hesaplanacaktır. Ayrıca bir kısa devre analizinin yapılmasına ihtiyaç yoktur. Ancak, tezin ilerleyen bölümlerinde incelenen senaryolar ile mevcut durum arasındaki kısa devre akımlarının karşılaştırılması amacıyla bu kısımda mevcut durum için kısa devre analizi sonuçları ayrıca belirtilmiştir. Kısa devre analizleri maksimum ve minimum kısa devre durumu için gerçekleştirilmiştir.

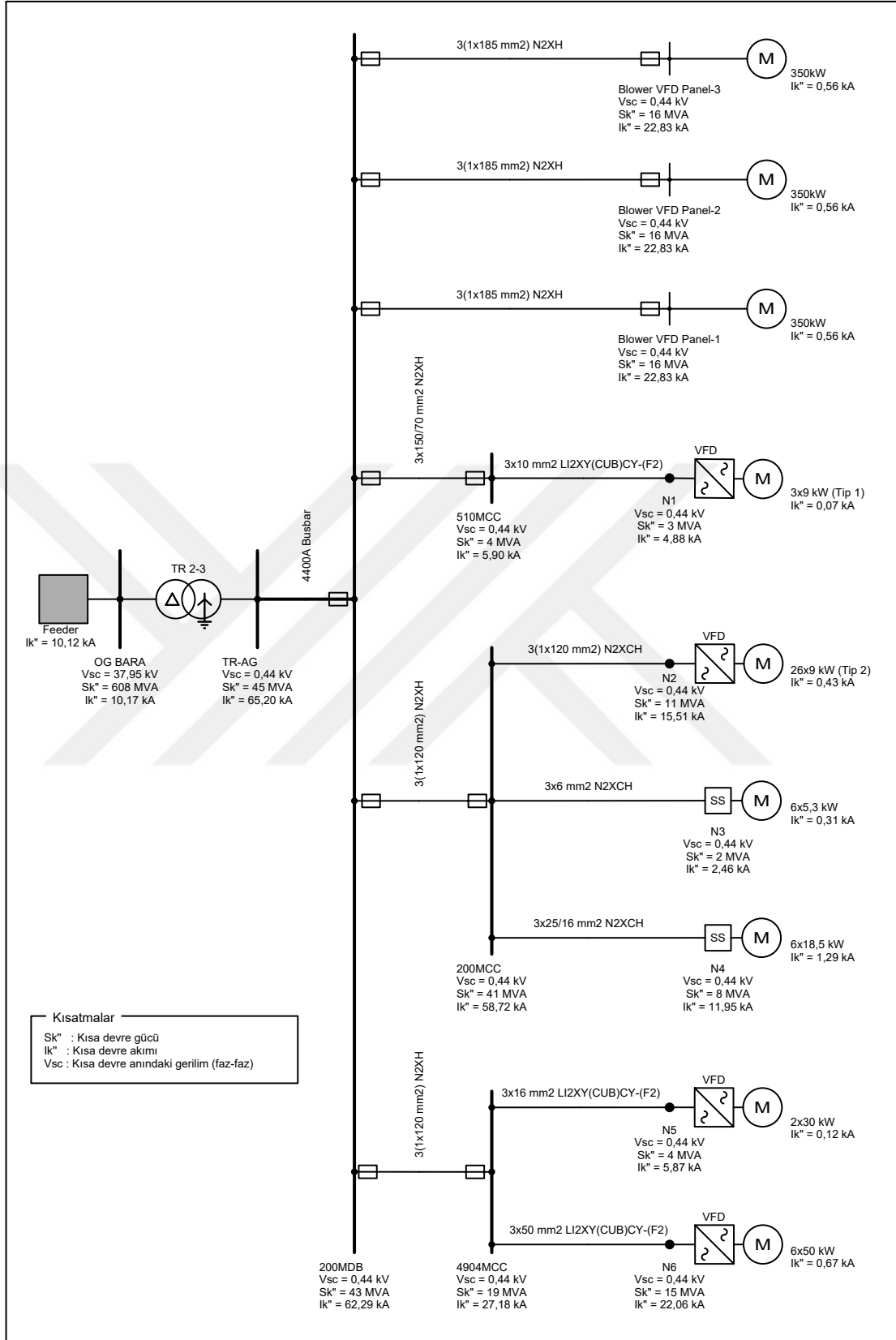
Maksimum kısa devre durumu;

- IEC 60909 standardının maksimum kısa devre koşullarına göre gerçekleştirilmiştir.
- OG bara kısa devre gücü için Tablo 5.1’de belirtilen maksimum kısa devre gücü dikkate alınmıştır.
- Motor kısa devre katkıları dikkate alınmıştır.

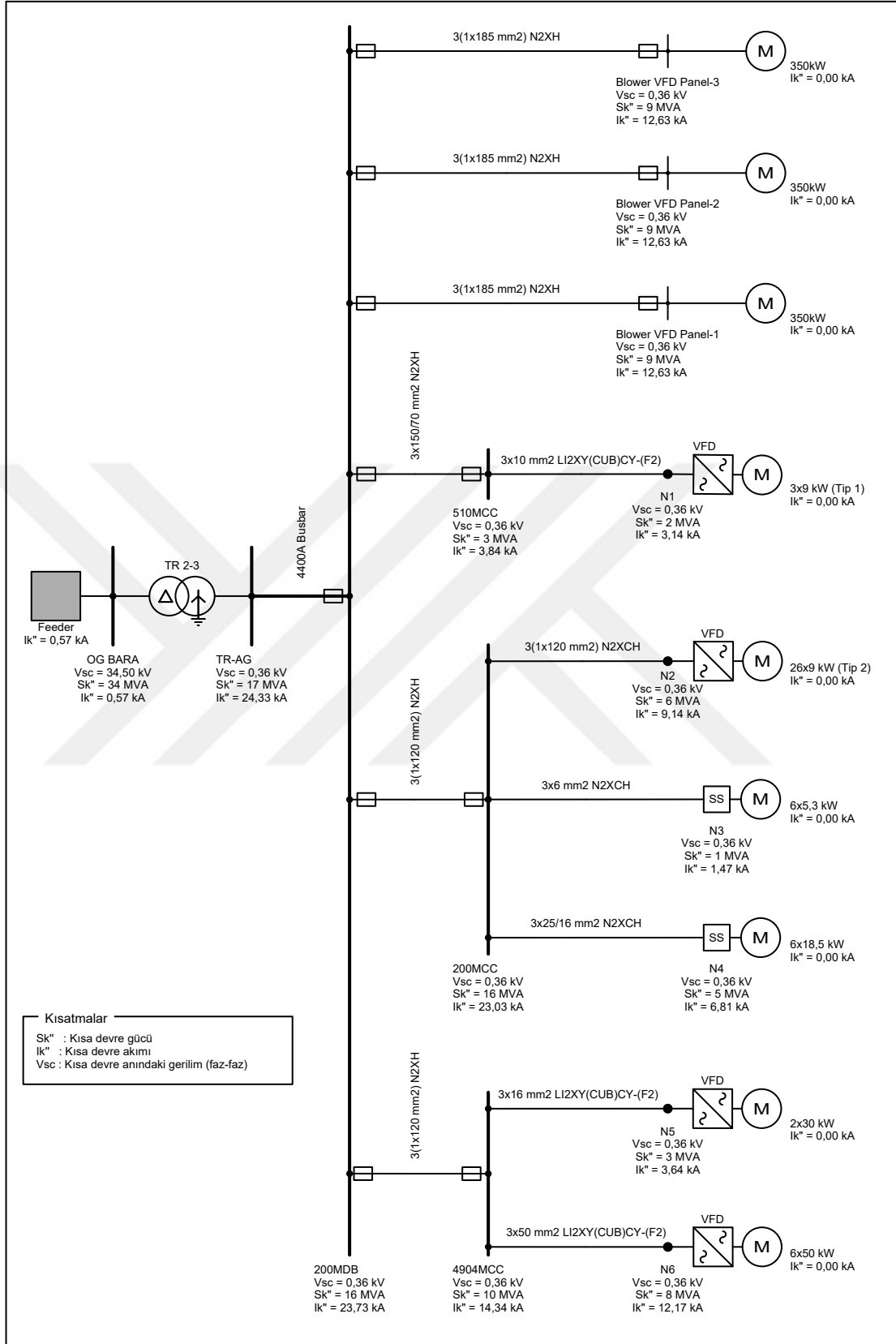
Minimum kısa devre durumu;

- IEC 60909 standardının minimum kısa devre koşullarına göre gerçekleştirilmiştir.
- OG bara kısa devre gücü için Tablo 5.1’de belirtilen minimum kısa devre gücü dikkate alınmıştır.
- Motor kısa devre katkıları ihmal edilmiştir.

Buna göre maksimum ve minimum kısa devre durumları için kısa devre analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de belirtilmiştir.



Şekil 5.2. Maksimum kısa devre analiz sonuçları



Şekil 5.3. Minimum kısa devre analiz sonuçları

### 5.3. Koruma Koordinasyon Çalışması

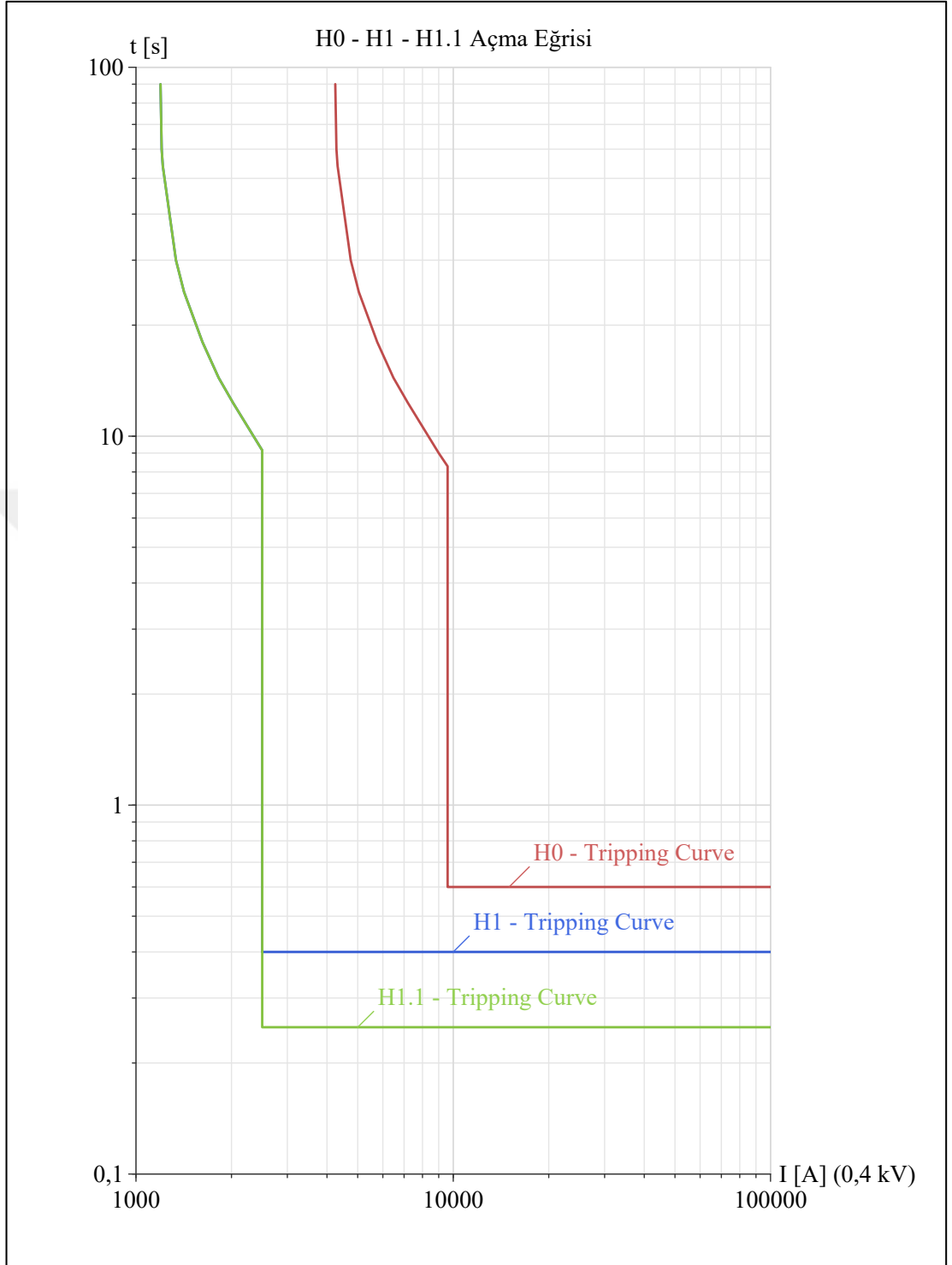
Ark flaş analizi için önemli verilerden birisi de arıza temizleme sürelerinin belirlenmesidir. Analiz çalışması bir paket programı ile gerçekleştiriliyor ise koruma ekipmanlarının ayar parametreleri veya hesaplanan kısa devre akımına karşılık gelen açma süresi paket programa girilmelidir. Analiz çalışması herhangi bir paket program ile yapılmıyor ise bu durumda hesaplanan kısa devre akımlarına karşılık gelen açma süreleri belirlenmelidir. Her durumda bir tesisin ark flaş analizi yapılabilmesi için öncelikle koruma ekipmanlarının (röle, şalter vs.) ayar parametreleri hesaplanmalı, açma eğrileri oluşturulmalı ve buna göre arıza temizleme süreleri belirlenmelidir.

İncelenen modelin hali hazırda bir koruma koordinasyon çalışması mevcut olduğundan çalışma kapsamında ayrıca bir koordinasyon hesabı gerçekleştirilmemiştir. Şalter ayarları mevcut koruma koordinasyon çalışmasından [41] temin edilmiştir. Ayarlar Tablo 5.6'da belirtilmiştir.

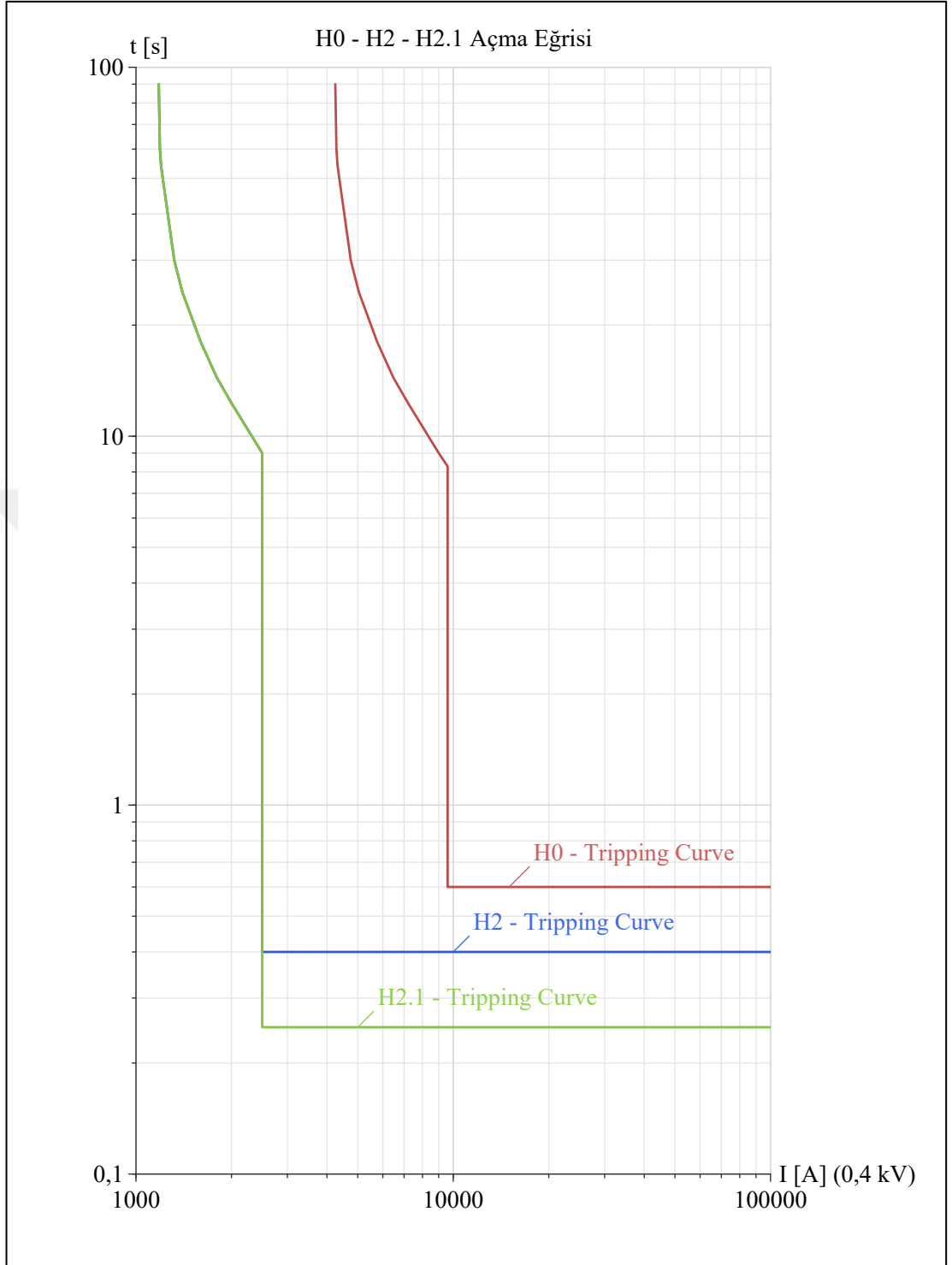
Tablo 5.6. Şalter ayar değerleri

No	Açıklama	Hücre Verileri				Şalter Ayar Değerleri			
		V <sub>n</sub> [kV]	P [kW]	Nominal Akım [A]	Şalter Nominal Akımı I <sub>n</sub> [A]	Aşırı Akım Koruma (L)		Kısa Devre Koruma (S)	
						Açma Akımı I <sub>1</sub>	Açma Süresi t <sub>1</sub>	Açma Akımı I <sub>2</sub>	Açma Süresi t <sub>2</sub>
H0	200MDB Giriş	0,4	2055	3373	4000	0,90xI <sub>n</sub> 3600 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	2,40xI <sub>n</sub> 9600 A	0,60 s
H1	4904MCC ÇIKIŞI	0,4	444	843	1250	0,81xI <sub>n</sub> 1013 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	2,00xI <sub>n</sub> 2500 A	0,40 s
H2	200MCC ÇIKIŞI	0,4	506	913	1000	1,00xI <sub>n</sub> 1000 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	2,50xI <sub>n</sub> 2500 A	0,40 s
H3	510MCC ÇIKIŞ	0,4	55	99	160	1,00xI <sub>n</sub> 160 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	3,00xI <sub>n</sub> 480 A	0,40 s
H4	BLOWER ÇIKIŞ	0,4	350	506	630	0,96xI <sub>n</sub> 605 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	2,40xI <sub>n</sub> 1512 A	0,25 s
H1.1	4904MCC GİRİŞ	0,4	444	843	1250	0,81xI <sub>n</sub> 1013 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	2,00xI <sub>n</sub> 2500 A	0,25 s
H2.1	200MCC GİRİŞ	0,4	506	913	1250	0,80xI <sub>n</sub> 1000 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	2,00xI <sub>n</sub> 2500 A	0,25 s
H3.1	510MCC GİRİŞ	0,4	55	99	160	1,00xI <sub>n</sub> 160 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	3,00xI <sub>n</sub> 480 A	0,20 s
H4.1	BLOWER GİRİŞ	0,4	350	506	630	0,96xI <sub>n</sub> 605 A	3 s (3xI <sub>1</sub> )	2,40xI <sub>n</sub> 1512 A	0,10 s

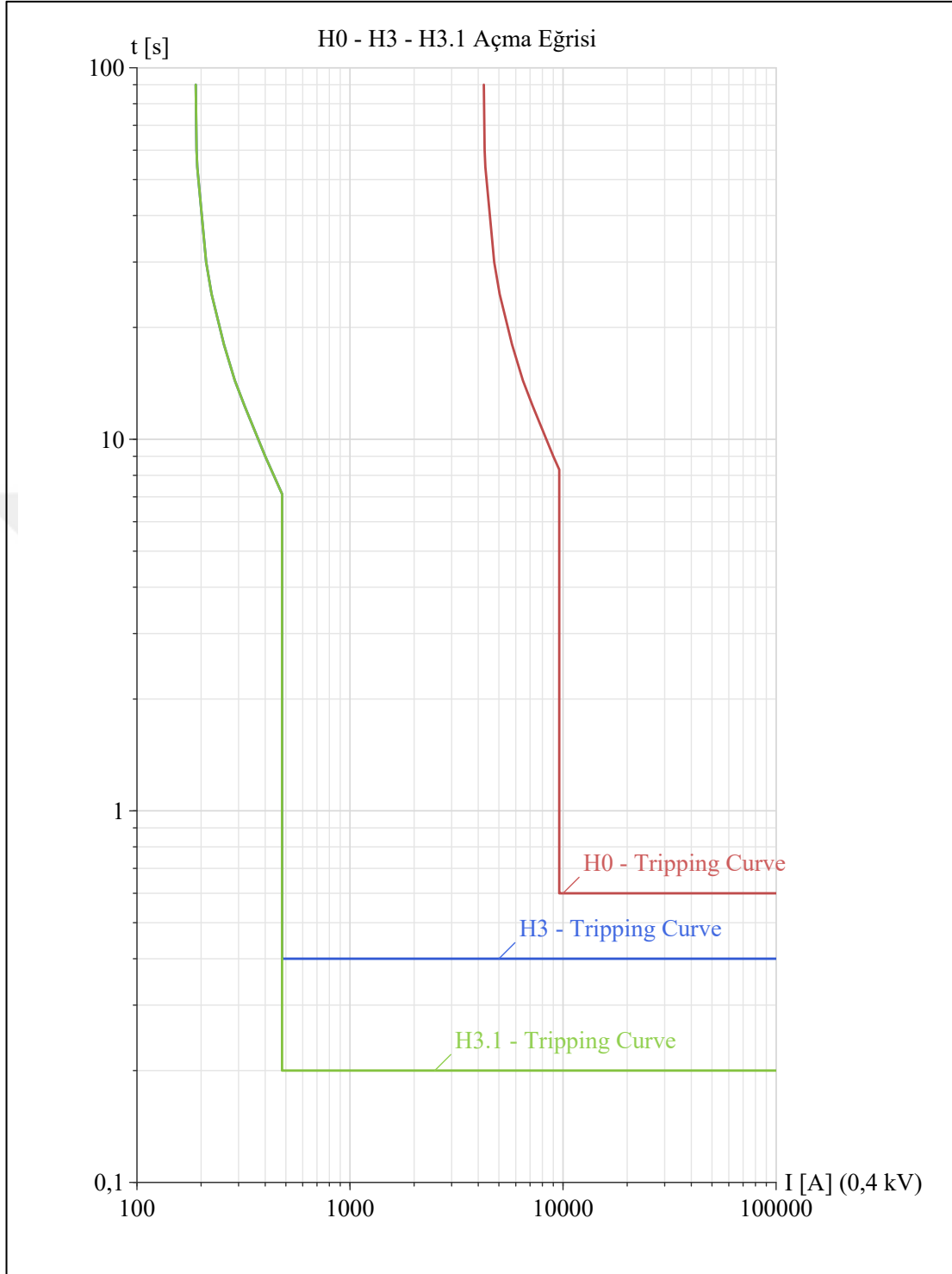
Tablo 5.6'da belirtilen şalter ayarlarına göre açma eğrileri aşağıdaki şekillerde belirtilmiştir.



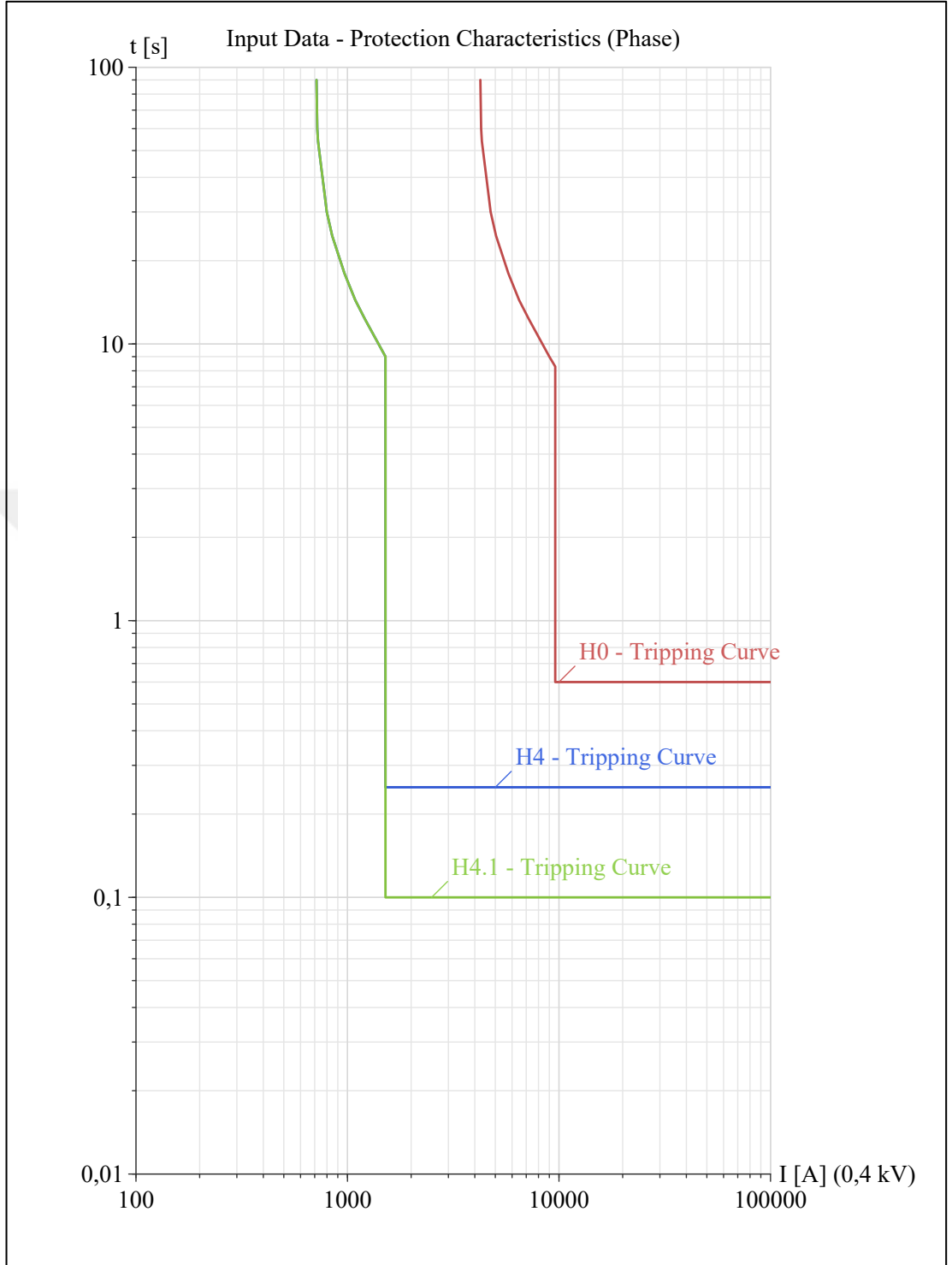
Şekil 5.4. H0, H1 ve H1.1 şalter açma eğrileri



Şekil 5.5. H0, H2 ve H2.1 şalter açma eğrileri



Şekil 5.6. H0, H3 ve H3.1 şalter açma eğrileri



Şekil 5.7. H0, H4 ve H4.1 şalter açma eğrileri



#### 5.4. Mevcut Durum Ark Flaş Analizi

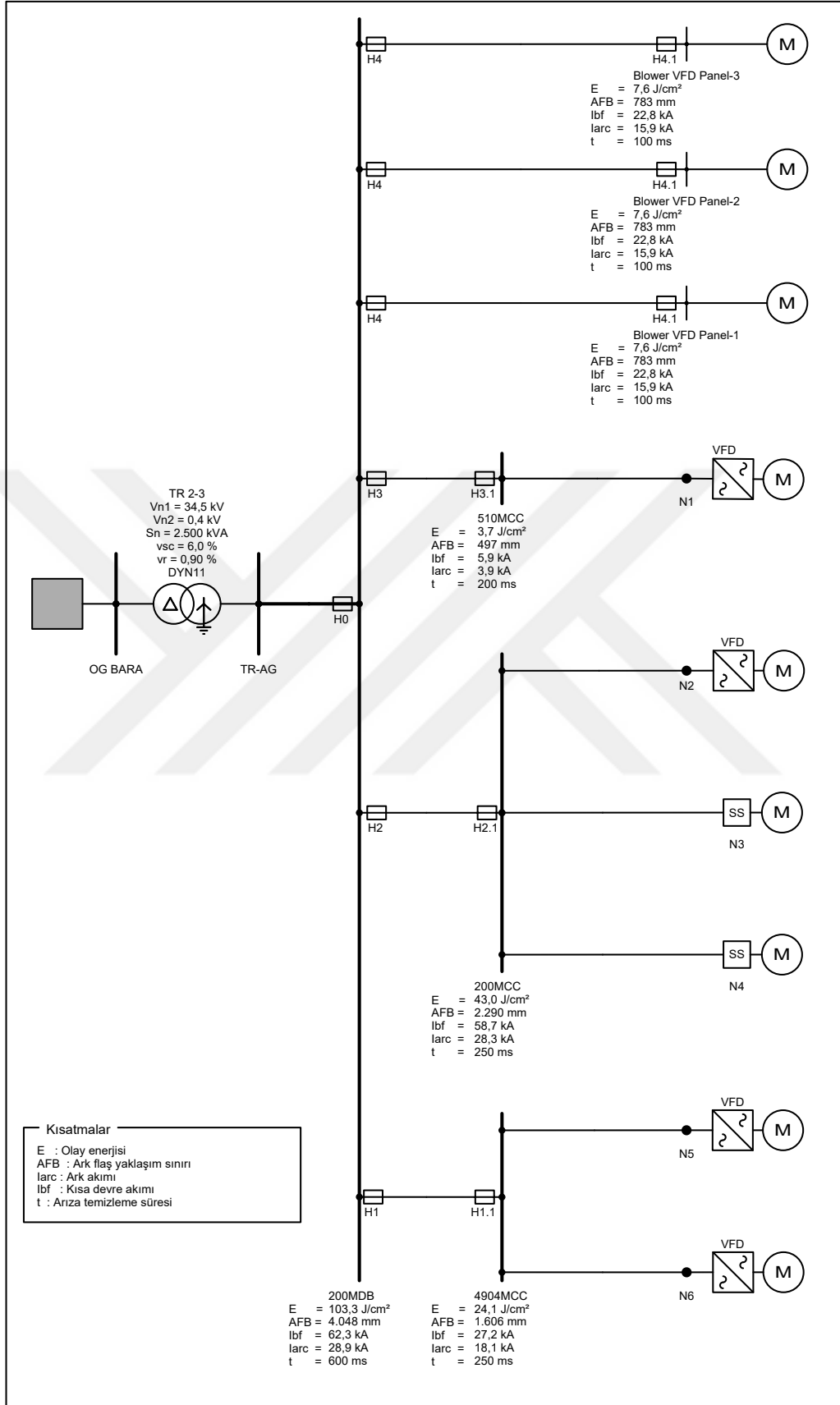
Bu kısımda sistemin mevcut durumu için ark flaş analizi gerçekleştirilmiştir. Bir nokta için ark flaş analizi yapılırken bu noktanın hem yük tarafındaki hem de hat tarafındaki koruyucu ekipmanın açma sürelerine göre değerlendirme yapılması ark flaş analizinde kabul görmüş bir yaklaşımdır. Örneğin bu sistemde 200MCC için ark flaş hesabı yapılırken arıza temizleme süresi H2.1 şalterinin açma süresine göre 0,25 s, H2 şalterine göre 0,4 saniyedir. Buna göre her iki durum içinde ayrı ayrı ark flaş analizi yapılarak sonuçlar değerlendirilebilir. Çalışmanın sonucunda hangi duruma göre KKD seçileceği ve ark flaş etiketlerinin oluşturulacağı işletmeciler ve iş güvenlikçiler tarafından belirlenir.

Çalışmanın bu bölümünde her iki durum için de ark flaş analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre;

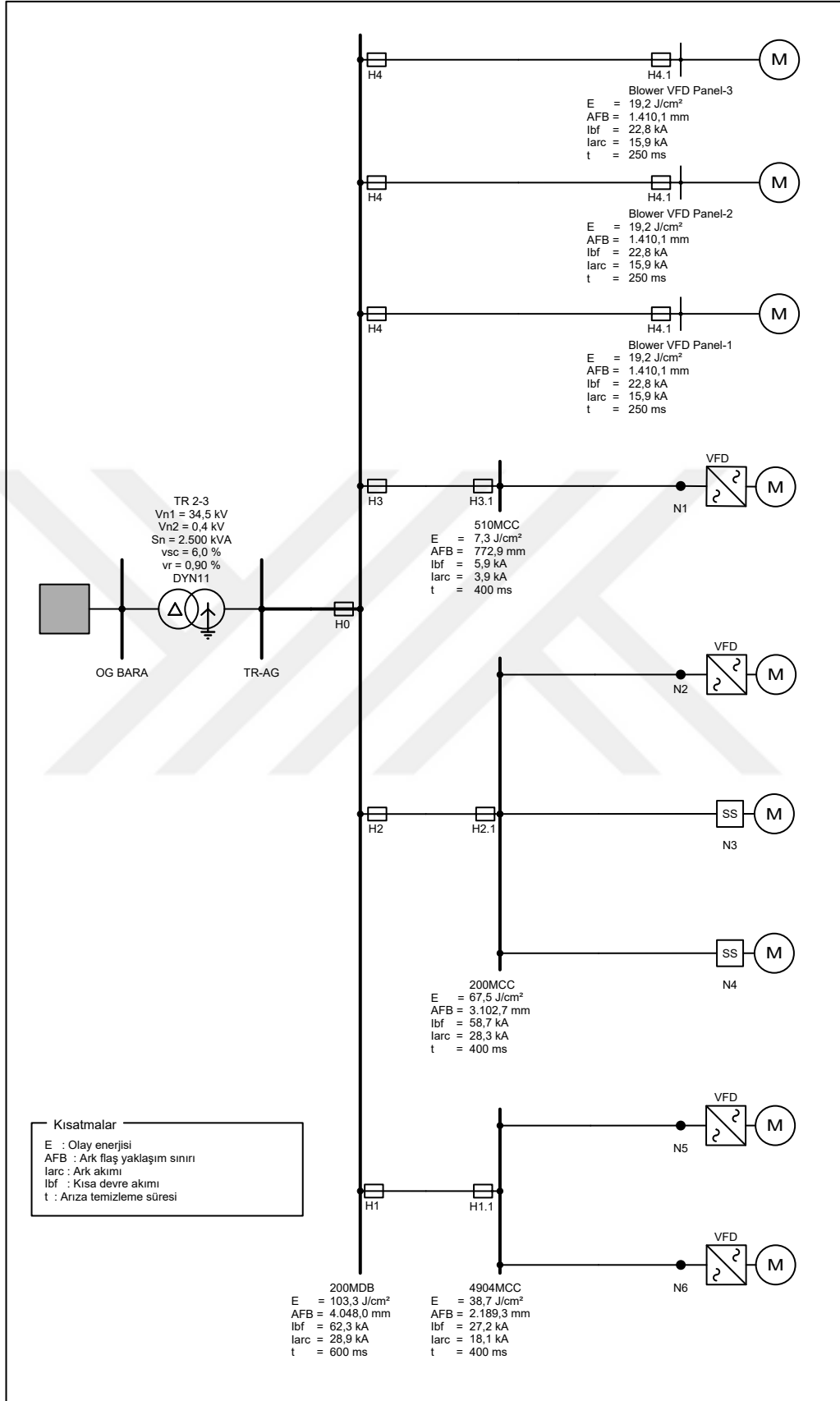
Senaryo 1: Arızanın, arızaya en yakın şalteri tarafından temizlendiği durum.

Senaryo 2: Arızanın, arızadan bir sonraki şalter tarafından temizlendiği durum.

Buna göre senaryo 1 ve 2 için ark flaş analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da belirtilmiştir.



Şekil 5.8. Mevcut durum ark flaş analiz sonuçları senaryo 1



Şekil 5.9. Mevcut durum ark flaş analiz sonuçları senaryo 2

## 5.5. Ark Flaş Olay Enerjisini Azaltma Senaryoları

Çalışma kapsamında Bölüm 0’de incelenen ark flaş olay enerjisini azaltma yöntemleri için benzetim uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda analiz senaryoları açıklanmıştır. Bunlar;

Mevcut durum: Bölüm 5.1’de belirtilen sistemdir. Diğer senaryolarda bu sistem referans alınmıştır. Değişiklikler bu sistem üzerinde uygulanmıştır.

Senaryo 1: Bu senaryoda kısa devre akımının azaltılmasına yönelik bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda mevcut sistemde %uk değeri 6 olan transformatör yerine %uk değeri 8 olan bir transformatör kullanılması durumu değerlendirilmiştir. Burada transformatör gücünde ve sistemdeki diğer parametrelerde herhangi bir değişiklik yapılmayıp sadece transformatörün %uk değeri değiştirilmiştir.

Senaryo 2: Bu senaryoda da kısa devre akımının azaltılmasına yönelik bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda mevcut sistemdeki bir adet 2500 kVA transformatör yerine iki adet 1250 kVA transformatör kullanılması durumu değerlendirilmiştir. Burada mevcut yükler iki transformatöre paylaştırılmıştır ve transformatörlerin paralel işletilmediği dikkate alınmıştır. Ayrıca mevcut transformatör yerine tercih edilecek iki adet 1250 kVA transformatörün %uk değeri mevcut trafodaki gibi %6 olduğu kabul edilmiştir.

Senaryo 3: Bu senaryoda arıza temizleme süresinin azaltılmasına yönelik bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda paneller içerisinde optik algılama sisteminin kullanıldığı kabul edilmiştir. (Örnek şema için bakınız Şekil 4.7) Bu tip bir optik algılama sistemi kullanıldığında panel içerisinde bir ark algılandığında direkt olarak arkın algılandığı panelin kesicisi/şalteri açtırılmaktadır. Bu durumda aşırı akım-kısa devre korumasında olduğu gibi ardışık şalterler arasında bir koordinasyon zaman gecikmesi olmadan arıza çok kısa bir sürede temizlenebilmektedir. Fiber haberleşme sisteminin tepki süresi, şalter açma kontaklarının ayrılması gibi gecikmelerle birlikte tipik olarak 50-60 ms içerisinde arıza temizlenebilmektedir.

Ayrıca optik algılama sisteminin koruma için tek başına yeterli olmayacağı, aşırı akım-kısa devre korumasına ilave bir sistem olacağı dikkate göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sistem sadece panel içerisindeki ark kaynaklanan ışığın algılanmasına göre koruma sağlayacaktır. Panel dışındaki arızalarda herhangi bir koruma sağlamayacaktır.

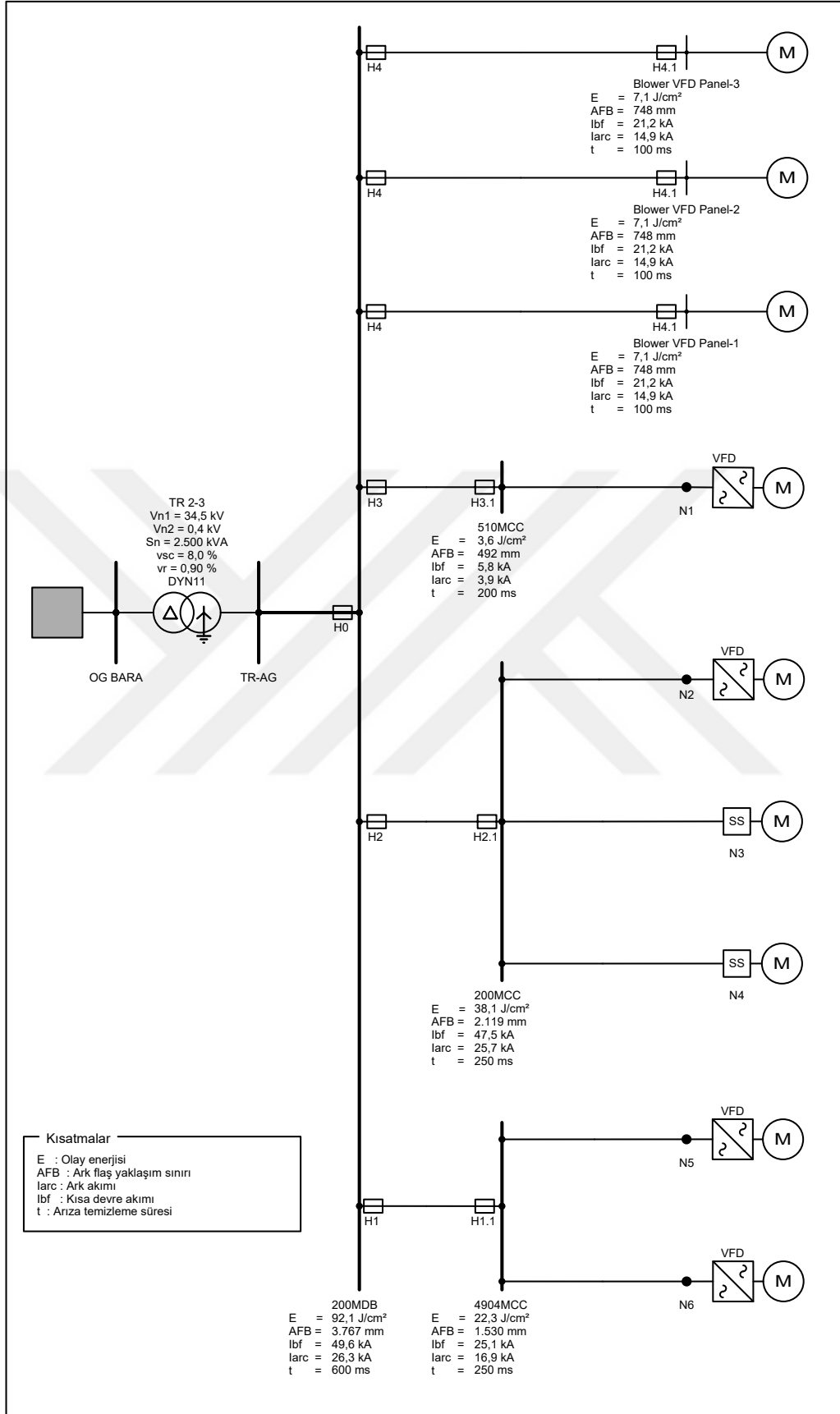
Arıza temizleme süresinin azaltma yöntemlerinden birisi de bakım-onarım ve manevra sırasında röle/şalter ayarlarının geçici olarak değiştirilmesidir. Enerji altında çalışma veya açma-kapama manevraları yapılacak panelde çalışma öncesinde şalter ayarları değiştirilerek arıza temizleme süresi azaltılabilir. AG devre kesicilerde açma süresi teorik olarak sıfır değerine ayarlanabilse de pratikte algılama ve açma gecikmeleri ile birlikte tipik olarak minimum 30-50 ms içerisinde temizlenebilmektedir.

Özet olarak bu senaryoda optik algılama sisteminin kullanıldığı veya şalter ayarlarının geçici olarak değiştirildiği kabul edilerek tüm panellerde ark flaş arıza temizleme süresinin 50 ms olduğu dikkate alınmıştır.

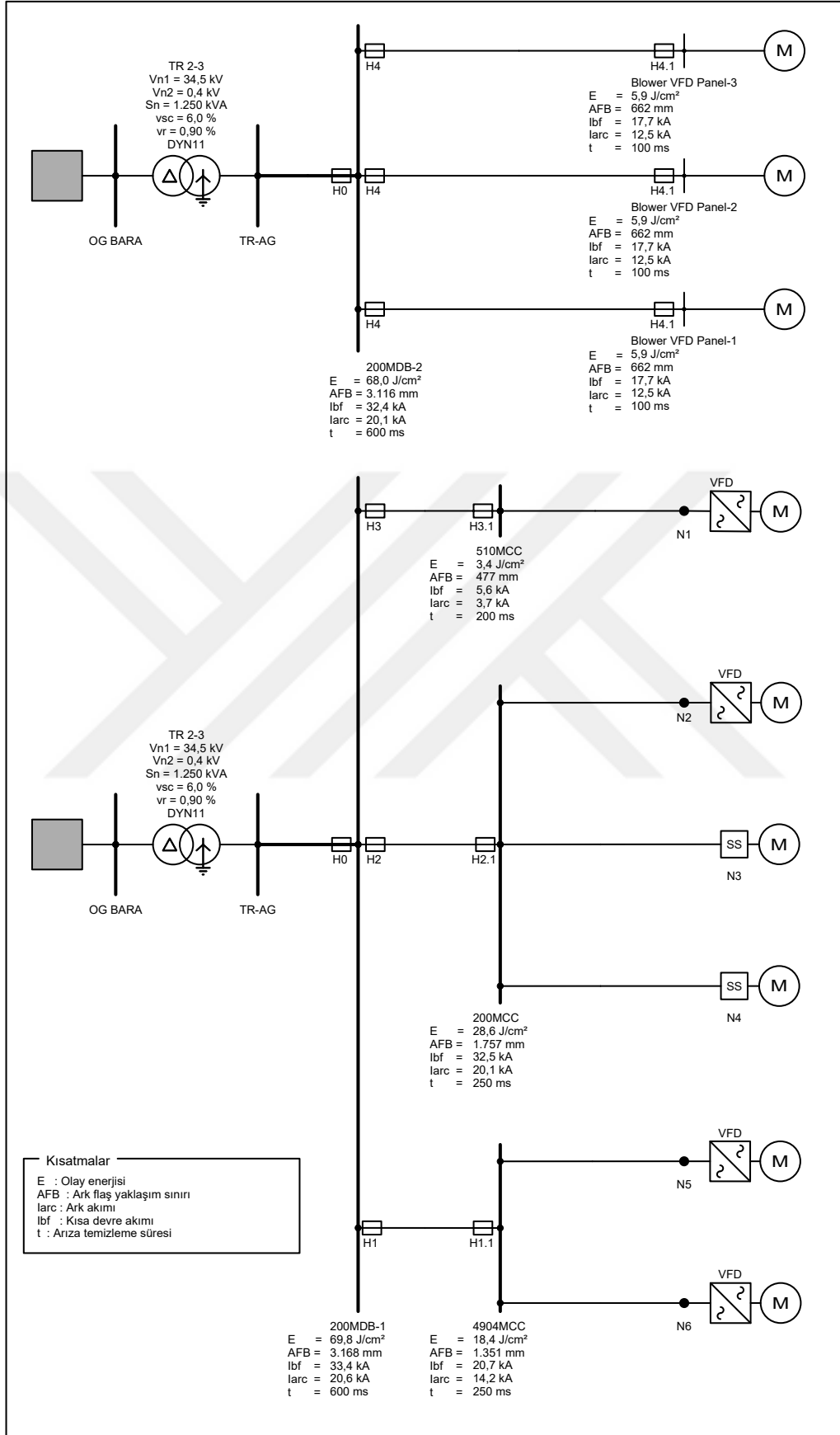
Bu senaryolara göre ark flaş analiz sonuçları çalışmanın devamında belirtilmiştir.

## **5.6. Ark Flaş Analizi Sonuçları**

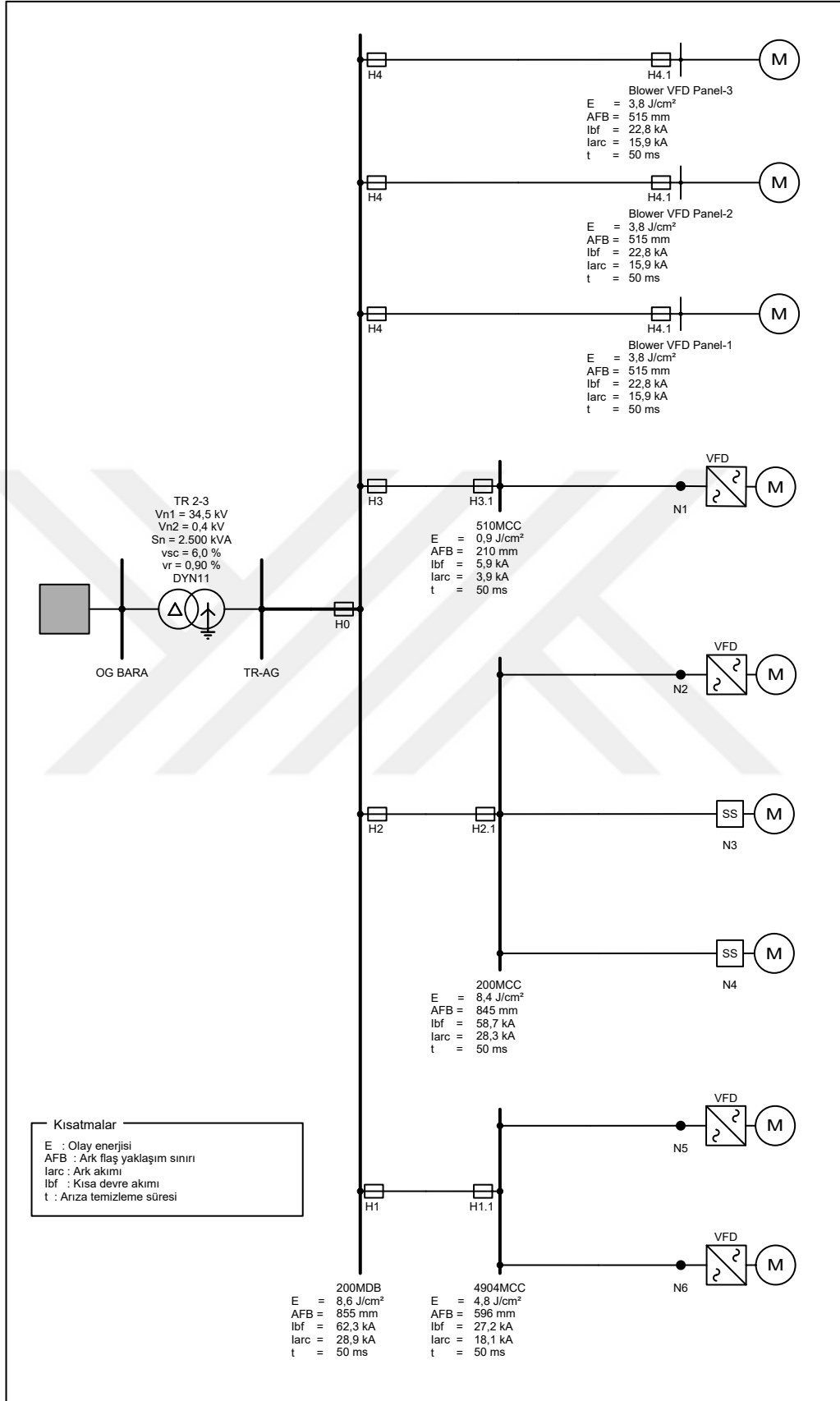
Bu kısımda Bölüm 5.5’de belirtilen senaryolar için ark flaş analiz sonuçları sunulmuştur. Senaryo 1, 2 ve 3 için ark flaş analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de belirtilmiştir.



Şekil 5.10. Senaryo 1 ark flaş analiz sonuçları



Şekil 5.11. Senaryo 2 ark flaş analiz sonuçları



Şekil 5.12. Senaryo 3 ark flaş analiz sonuçları



Yukarıdaki şekillerde belirtilen ark flaş analiz sonuçlarına ilişkin olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı değerleri sırasıyla Tablo 5.7 ve Tablo 5.8’de özetlenmiştir.

Tablo 5.7. Analiz senaryolarına göre olay enerjisi değerleri

Bara Adı	Mevcut Durum E [J/cm <sup>2</sup> ]	Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3	
		E [J/cm <sup>2</sup> ]	Mevcut Duruma Göre Azalma	E [J/cm <sup>2</sup> ]	Mevcut Duruma Göre Azalma	E [J/cm <sup>2</sup> ]	Mevcut Duruma Göre Azalma
4904MCC	24,1	22,3	%7,3	18,4	%23,6	4,8	%79,9
200MDB	103,3	92,1	%10,8	69,9	%32,4	8,6	%91,7
200MCC	43,0	38,1	%11,3	28,6	%33,4	8,4	%80,4
510MCC	3,7	3,6	%1,6	3,4	%6,3	0,9	%74,8
Blower Panel-1	7,6	7,1	%7,0	5,9	%23,2	3,8	%49,7
Blower Panel-2	7,6	7,1	%7,0	5,9	%23,2	3,8	%49,7
Blower Panel-3	7,6	7,1	%7,0	5,9	%23,2	3,8	%49,7

Tablo 5.8. Analiz senaryolarına göre ark flaş yaklaşım sınırı değerleri

Bara Adı	Mevcut Durum AFB [J/cm <sup>2</sup> ]	Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3	
		AFB [mm]	Mevcut Duruma Göre Azalma	AFB [mm]	Mevcut Duruma Göre Azalma	AFB [mm]	Mevcut Duruma Göre Azalma
4904MCC	1606	1530	%4,7	1351	%15,9	596	%62,9
200MDB	4048	3767	%6,9	3168	%21,7	855	%78,9
200MCC	2290	2119	%7,4	1757	%23,3	845	%63,1
510MCC	497	492	%1,1	477	%4,1	210	%57,7
Blower Panel-1	783	748	%4,5	662	%15,5	515	%34,3
Blower Panel-1	783	748	%4,5	662	%15,5	515	%34,3
Blower Panel-1	783	748	%4,5	662	%15,5	515	%34,3

Tablo 5.7’deki sonuçlarda belirtildiği üzere senaryo 1’de olay enerjisinin mevcut duruma göre yaklaşık %7-10 arasında azaldığı görülmüştür. Transformatör %ük değerinin artması olay enerjisini azaltmasının yanı sıra gerilim düşümü ve kayıpların artmasına neden olacaktır. Bunların yanı sıra olay enerjisindeki azalma miktarı da göz önüne alındığında olay enerjisinin azaltılması için transformatör %ük değerinin artırılmasının efektif bir çözüm olmayacağı öngörülmüştür.

Senaryo 2’de olay enerjisinin mevcut duruma göre yaklaşık %23-33 arasında azaldığı görülmüştür. Yüklerin tek transformatör yerine iki adet transformatör üzerinden beslenmesi olay enerjisini kayda değer oranda azaltmıştır ancak iki adet transformatör kullanımında kurulum maliyeti tek transformatöre göre farklı olacaktır.

Burada transformatör maliyetinin artmasına karşılık daha düşük kesme kapasiteli şalterler kullanılacağından şalter maliyeti azalacaktır. Buna göre, bu tip bir sistemde tek transformatör yerine iki adet transformatör kullanımının maliyet analizinin yapılması önerilir.

Senaryo 3’de olay enerjisinin mevcut duruma göre yaklaşık %50-90 arasında azaldığı görülmüştür. Bakım-onarım çalışması veya açma kapama manevraları sırasında koruyucu ekipmanların (röle, şalter vs.) ayar parametrelerinin değiştirilmesi tesise ilave bir maliyet getirmemesine karşılık olay enerjisinin azaltılması açısından büyük bir katkı sağlayacaktır. Ancak bakım sırasında koruyucu ekipman ayar parametrelerinin değiştirilmesi ve bakım sonrası ayarların tekrar normal duruma göre ayarlanması bu konuda yetkin bir personel tarafından yapılmalıdır. Ayarların doğru yapılmaması ciddi güvenlik riskleri oluştururken, çalışma sonrasında ayarların normal duruma göre ayarlanmaması herhangi bir kısa devrede işletme kayıplarına yol açacaktır. Tüm bu hususlar göz önünde bulundurulduğunda bakım ve manevra sırasında ayarların geçici olarak değiştirilmesine alternatif bir yöntem olarak optik algılama sensörleri kullanılabilir. Optik sensör kullanımı ayar parametrelerinin geçici olarak değiştirilmesi durumunda meydana gelecek güvenlik zafiyetlerini ortadan kaldıracaktır ancak sisteme ilave bir maliyet getirecektir. Buna göre optik algılama sistemi kullanımının maliyet analizi yapılarak tesis özelinde efektif bir çözüm olup olmadığı değerlendirilebilir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, IEEE 1584 standardının eski ve güncel versiyonuna göre farklı sistemlerde ark flaş analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmış, elektrot yapılandırmasının ark flaş sonuçlarına etkisi incelenmiş, örnek bir sistemde ark flaş analiz benzetim uygulaması gerçekleştirilmiş ve bu sistemde ark flaş tehlikesini azaltmaya yönelik önlemler çeşitli senaryolar oluşturularak değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında ark flaş hesabı için bir elektronik hesap tablosu geliştirilmiştir. Bu hesap tablosundan elde edilen sonuçlar ile PSS Sincal güç sistemleri analiz yazılımından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablo ile yazılımının aynı sonuçları verdiği görülmüştür.

VCB elektrot yapılandırmasına sahip farklı üç güç sistemi için IEEE 1584 standardının eski ve güncel versiyonuna göre yapılan ark flaş analizlerinde her üç sistemde de sonuçların eski ve güncel versiyonda kayda değer oranda birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, sistemin topraksız olması durumunda her üç güç sisteminde de IEEE 1584 2002'ye göre hesaplanan olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı değerlerinin IEEE 1584-2018'e göre hesaplanan değerlerden büyük olduğu belirlenmiştir. Sistemin topraklı olması durumunda ise ark flaş yaklaşım sınırı için topraksız sistemlerde olduğu gibi her üç sistem için de 2002'ye göre hesaplanan değerlerin 2018'e göre hesaplanan değerlerden büyük olduğu belirlenmiştir. Ancak olay enerjisinde, sistem 1 için 2002'ye göre hesaplanan değer 2018'e göre hesaplanan değerden az da olsa büyük olduğu, diğer iki sistem için ise 2002'ye göre hesaplanan değer büyük olduğu belirlenmiştir.

Buna göre dikey elektrot (VCB veya VOA) yapılandırmasına sahip bir sistemde, 2002'ye göre hesaplanan olay enerjisi ve ark flaş yaklaşım sınırı 2018'e göre hesaplanan değerden büyük olduğundan (veya yakın değerde olduğundan) güvenlik açısından risk oluşturmayacağı için sonuçların 2018'e göre güncellenmesi gerekmez. Ancak bu durumda kişisel koruyucu donanımlar gereğinde fazla boyutlandırılmış olacağından personelin hareket kabiliyetinin sınırlanacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Elektrot yapılandırmasının etkisinin incelenmesi için bu üç sistemde sadece elektrot yapılandırmaları değiştirilip diğer veriler sabit tutularak 2002 ve 2018'e göre ark flaş analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan analizlerde elektrot yapısının değişmesinin sonuçları çok büyük oranda değiştirdiği görülmüştür. Özellikle yatay elektrot yapılandırmasına sahip sistemlerde olay enerjisinin dikey elektrot yapılandırmasına göre oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. IEEE 1584-2002'de sadece dikey elektrot sistemlerinin olduğu, sistem yatay elektrot yapılandırmasına sahip olsa da 2002'ye göre yapılan hesaplarda sistemin dikey elektrot yapılandırmasında olduğu kabul edildiği göz önüne alındığında bunun büyük bir risk oluşturduğu görülmüştür. Bu nedenle, sistemin elektrot yapılandırması kontrol edilmeli, eğer sistem yatay elektrot yapılandırmasına sahip ise ark flaş hesabı mutlaka IEEE 1584-2018'e göre güncellenmelidir.

Ark flaş tehlikesini azaltıcı bazı yöntemler örnek bir sistemde benzetim çalışmaları ile incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan benzetim uygulamalarında incelenen sistem için transformatörün bağıl kısa devre gerilim (%uk) değerinin artırılmasının efektif bir çözüm olmadığı görülmüştür. Büyük güçlü tek transformatör yerine küçük güçlü iki transformatör kullanımının ark flaş tehlikesini kayda değer oranda azalttığı belirlenmiştir. Ancak bu uygulamanın getireceği ek maliyet dikkate alınarak efektif bir çözüm olup olmayacağı ayrıca değerlendirilmelidir. Bakım onarım çalışmaları sırasında koruyucu ekipmanların (röle, şalter vb.) ayar değerlerinin geçici olarak değiştirilmesinin ark flaş tehlikesini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.

Tüm bu hususlar ve çalışma kapsamında incelenmeyen ark flaş tehlikesini azaltıcı diğer yöntemlerde dikkate alındığında güç sistemlerinin tasarımı sırasında ark flaş tehlikesini azaltıcı yöntemlerin etkisi ve bunların tesise getireceği ek maliyetlerde dikkate alınarak en optimum çözümün tercih edilmelidir. Hâlihazırda kurulu bir tesis için ise ek maliyet, donanım vs. gerektirmemesi ve ark flaş tehlikesini önemli ölçüde azaltması nedeniyle bakım onarım çalışması esnasında ayar parametrelerinin geçici olarak değiştirilmesi efektif bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Ancak burada, ayar değerlerinin değiştirilmesi sırasında yaşanabilecek kazalar, ayar değerlerinin çalışma sonrasında normal değerlerine getirilmemesi durumunda oluşacak işletme kayıpları ve ayar parametrelerinin ancak uzman bir personel tarafından değiştirilmesi gerektiği hususları da göz önünde bulundurulmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] IEEE Std. 1584, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, *IEEE*, New York, 2018
- [2] Lang M., Neal T., Arc Flash Basics: Testing Update, *Proceedings of the 8th International Conference on Electric Fuses and their Applications*, France, September 2007.
- [3] Lang M., Jones K., Exposed to the Arc Flash Hazard, *IEEE IAS Electrical Safety Workshop*, 2014, ESW2014-18
- [4] Ammerman R.F., Gammon T., Sen P.K., Nelson J.P., Comparative Study Of Arc Modeling And Arc Flash Incident Energy Exposures, *55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, Cincinnati, 22-24 Sept. 2008
- [5] Bardet N., IEC and CENELEC Standards Used To Protect The Electrical Worker Against An Arc Flash, *12th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, Strasbourg, 26-28 April 2017
- [6] Neal T.E., Parry R.F., Specialized PPE Testing for Electric Arc Hazards Beyond Heat Exposure, *2004 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, Florida, 1-6 May 2004
- [7] Lee W., Gammon T., Zhang Z., Johson B., Vogel S., IEEE/NFPA Collaboration on Arc Flash Phenomena Research Project, *IEEE Power and Energy Magazine*, 2012, 10(2), 116-123
- [8] NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace, *National Fire Protection Association*, California, 2018
- [9] OSHA 29 CFR Part 1910, Occupational Safety and Health Standard, *Occupational Safety and Health Administration Standards*, Washington DC, 2020
- [10] Neal T.E., Bingham A.H., Doughty R.L., Protective Clothing Guidelines for Electric Arc Exposure, *IAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, Philadelphia, 23-25 Sept. 1996
- [11] Doughty R.L., Neal T.E., Bingham A.H., Dear T.A., Testing Update on Protective Clothing and Equipment For Electric Arc Exposure, *IEEE Industry Applications Society 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Banff, 15-17 Sept. 1997
- [12] PSS Sincal 16 Software, Siemens, 2020

- [13] <https://www.kinectrics.com/Solutions/Pages/ARCPRO.aspx>, (Ziyaret tarihi: 3 Mayıs 2020)
- [14] Duke Power Heat Calculator Guide,  
<https://arcadvisor.com/files/DukeHeatFluxCalculatorGuide.pdf>  
(Ziyaret tarihi: 3 Mayıs 2020)
- [15] Geem N.V., Comparison Of Arc Flash Calculation Methods, Associated Training Corporation.
- [16] Wilkins R., Allison M., Lang M., Calculating Hazards, *IEEE Industry Applications Magazine*, 2005, 11(3), 40-48
- [17] Stoll A.M., Greene L.C., Relationship Between Pain and Tissue Damage Due to Thermal Radiation, *American Physiological Society*, 1959, 14(3), 373-382
- [18] Lee R.H., The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1982, IA-18(3), 246-251
- [19] Lee R.H., Pressures Developed by Arcs, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1987, IA-23(4), 760-763
- [20] Doughty R.L., Neal T.E., Floyd H.L., Predicting Incident Energy To Better Manage The Electric Arc Hazard On 600-V Power Distribution Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(1), 257-269
- [21] Jones R.A., Liggett D.P., Staged Tests Increase Awareness of Arc-Flash Hazards in Electrical Equipment, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(2), 659-667
- [22] IEEE Std. 1584, IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, *IEEE*, New York, 2002
- [23] Wilkins R., Allison M., Lang M., Effect Of Electrode Orientation In Arc Flash Testing, *40<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, Hong Kong, 2-6 Oct. 2005
- [24] Stokes A.D., Sweeting D.K., Electric Arcing Burn Hazards, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, 42(1), 134-141
- [25] Wilkins R., Lang M., Allison M., Effect of Insulating Barriers in Arc Flash Testing, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44(5), 1354-1359
- [26] Golovkov M., Hoagland E., Schau H., Maurice C., Effect of Arc Electrode Geometry and Distance on Cotton Shirt Ignition, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 51(1), 36-44
- [27] Yılmaz B., Süper iletken Arıza Akımı Sınırlayıcıların İncelenmesi Ve Elektrik İletim Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2016,436473

- [28] Schmitt H., Filho J.A., Adapa R., Application and Feasibility of Fault Current Limiters in Power Systems, *CIGRE*, 497, 2012
- [29] Is-limiter The world fastest limiting and switching device, DEABB 2493 14 gb Printed in Germany (02.14-1000-AMC), ABB
- [30] Kay J.A., Arvola J., Kumpulainen L., Protection At The Speed Of Light: Arc-Flash Protection Combining Arc Flash Sensing And Arc-Resistant Technologies, *Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Anaheim*, 14-16 Sept. 2009
- [31] <http://www.abb.com/cawp/seitp202/f8e7a4a7e7496bdbc125792900742d15.aspx> (Ziyaret tarihi 14 Mart 2020)
- [32] <https://www.hallam-ics.com/blog/arc-flash-detection-relays-stopping-an-arc-flash-at-the-speed-of-light>, (Ziyaret tarihi 14 Mart 2020)
- [33] Littelfuse, Inc., PGR-8800 Arc-Flash Relay Application Guard, USA, 2016
- [34] Arefi M., Applying Optimization Methods To Reduce Arc Flash In Low Voltage Systems, Master Thesis, Northeastern University, The Department of Electrical and Computer Engineering, Boston, 2014, 1565401
- [35] İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Kısa Devre Analiz Raporu, ABB, 2018
- [36] İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi 200MDB Pano Projesi, ABB, 2017
- [37] İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi 200MCC Pano Projesi, ABB, 2017
- [38] İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi 4904MCC Pano Projesi, ABB, 2017
- [39] İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi 510MCC Pano Projesi, ABB, 2018
- [40] İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi Turbo Blower Sekonder Proje, HAUS, 2017
- [41] İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi TR2 Trafo Merkezi AG Şalter Ayar Parametreleri, YEO, 2018



**EKLER**



Ek-A: IEEE 1584-2018 ARK FLAŞ HESABINA İLİŞKİN KATSAYILAR

Tablo A.1. Ark akımı ara değer hesabı için katsayılar

Konfigürasyon	V <sub>oc</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>
VCB	600 V	-0,04287	1,035	-0,083	0	0	-4,78E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092
	2 700 V	0,0065	1,001	-0,024	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973
	14 300 V	0,005795	1,015	-0,011	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973
VCBB	600 V	-0,01743	0,98	-0,05	0	0	-5,77E-09	0,000002524	-0,00034	0,01187	1,013
	2 700 V	0,002823	0,995	-0,013	0	-9,20E-11	2,901E-08	-3,26E-06	0,0001569	-0,004	0,983
	14 300 V	0,014827	1,01	-0,01	0	-9,20E-11	2,901E-08	-3,26E-06	0,0001569	-0,004	0,983
HCB	600 V	0,054922	0,988	-0,11	0	0	-5,38E-09	0,000002316	-0,000302	0,0091	0,973
	2 700 V	0,001011	1,003	-0,025	0	0	4,859E-10	-1,81E-07	-9,13E-06	-0,0007	0,988
	14 300 V	0,008693	0,999	-0,02	0	-5,04E-11	2,233E-08	-3,05E-06	0,000116	-0,00115	0,984
VOA	600 V	0,043785	1,04	-0,18	0	0	-4,78E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092
	2 700 V	-0,02395	1,006	-0,019	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973
	14 300 V	0,005371	1,01	-0,029	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973
HOA	600 V	0,111147	1,008	-0,24	0	0	-3,90E-09	0,000001641	-0,000197	0,002615	1,1
	2 700 V	0,000435	1,006	-0,038	0	0	7,859E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-0,0007	0,998
	14 300 V	0,000904	0,999	-0,02	0	0	7,859E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-0,0007	0,998

Tablo A.2. Olay enerjisi ve AFB ara değer hesabı için katsayılar

V <sub>oc</sub>	Konfigürasyon	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>	k <sub>11</sub>	k <sub>12</sub>	k <sub>13</sub>
600 V	VCB	0,75336	0,57	1,752636	0	0	-4,78E-09	1,962E-06	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,6	0,957
	VCBB	3,06846	0,26	-0,09811	0	0	-5,77E-09	2,524E-06	-0,00034	0,01187	1,013	-0,06	-1,81	1,19
	HCB	4,07375	0,34	-0,37026	0	0	-5,38E-09	2,316E-06	-0,000302	0,0091	0,973	0	-2,03	1,036
	VOA	0,67929	0,75	1,222636	0	0	-4,78E-09	1,962E-06	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,6	0,997
	HOA	3,47042	0,47	-0,26186	0	0	-3,90E-09	1,641E-06	-0,000197	0,002615	1,1	0	-1,99	1,04
2700 V	VCB	2,40021	0,17	0,354202	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973	0	-1,57	0,978
	VCBB	3,87059	0,19	-0,73662	0	-9,20E-11	2,901E-08	-3,26E-06	0,0001569	-0,004	0,983	0	-1,74	1,09
	HCB	3,48639	0,18	-0,1931	0	0	4,859E-10	-1,81E-07	-9,13E-06	-0,0007	0,988	0,03	-1,72	1,055
	VOA	3,88072	0,11	-1,90603	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973	0	-1,52	1,115
	HOA	3,61627	0,15	-0,76156	0	0	7,859E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-0,0007	0,998	0	-1,64	1,078
14300 V	VCB	3,82592	0,11	-0,99975	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973	0	-1,57	0,999
	VCBB	3,64431	0,22	-0,58552	0	-9,20E-11	2,901E-08	-3,26E-06	0,0001569	-0,004	0,983	0	-1,68	1,06
	HCB	3,04452	0,13	0,245106	0	-5,04E-11	2,233E-08	-3,05E-06	0,000116	-0,00115	0,984	0	-1,66	1,084
	VOA	3,40545	0,12	-0,93245	-1,56E-12	4,556E-10	-4,19E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,973	0	-1,53	0,979
	HOA	2,04049	0,18	1,005092	0	0	7,859E-10	-1,91E-07	-9,13E-06	-0,0007	0,998	-0,05	-1,63	1,151

Tablo A.3. Ark akımı indirgeme faktörü hesabı için katsayılar

Konfigürasyon	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>
VCB	0	-0,0000014269	8,31E-05	-0,0019382	0,02237	-0,12645	0,3023
VCBB	1,138E-06	-6,0287E-05	0,001276	-0,013778	0,08022	-0,24066	0,3352
HCB	0	-3,097E-06	0,000164	-0,0033609	0,03331	-0,16182	0,3463
VOA	9,5606E-07	-5,1543E-05	0,001116	-0,01242	0,07513	-0,23584	0,337
HOA	0	-3,1555E-06	0,000168	-0,0034607	0,03412	-0,1599	0,3463

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Aydoğan V.**, Basa Arsoy A., IEEE 1584 Standardının Eski ve Güncel Versiyonuna Göre Karşılaştırmalı Ark Flaş Analizi, *III. Uluslararası Mühendislik Fen Bilimleri ve Mimarlık Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 16 Nisan 2020



## ÖZGEÇMİŞ

Vural AYDOĞAN,1990 yılında Sivas'ta doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Sivas'ta tamamladı. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde eğitimine başlayarak, 2013 yılında lisans derecesi ile mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Lisans mezuniyet tarihinden itibaren özel sektörde güç sistemleri analizi konusunda mesleğini icra etmeye devam etmektedir.

