İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÇAK GERİLİM ARK MODELLERİ VE ARKIN ISIL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aytuğ FONT

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Haziran 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÇAK GERİLİM ARK MODELLERİ VE ARKIN ISIL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aytuğ FONT

504091039

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN

Haziran 2012

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana hep destek olan ve bana karşı anlayışlı olan tez danışmanım Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN'a; öğrencilik hayatımda ve tez çalışmamda bana sürekli yardımcı olan Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye ve Tez ve yayınlarımda bana yardımcı olan Araş. Gör. Alper KARA'ya; Bugüne kadar hep yanımda olup beni her zaman destekleyen aileme ve arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
2. ELEKTRİKSEL ARK **5**
2.1 Akımın Kesilmesi Prensipleri 5
2.2 Elektrik Arkı 5
2.2.1 Arkın oluşumu 7
2.2.2 Yüksek basınç arkı 8
2.2.3 Alçak basınç(vakum) arkı 9
2.2.4 Alternatif akımda ark 9
2.3 Elektrik Arkının Söndürülmesi 10
2.3.1 Arkın boyunu uzatmak 11
2.3.2 Arkın kesitini azaltmak 12
2.3.3 Arkı soğutmak 12
2.3.4 Arkı dilimlemek 12
3. ARK MODELLERİ **13**
3.1 Mayr Ark Modeli 14
3.2 Cassie Ark Modeli 15
3.3 Schwarz Ark modeli 18
3.4 KEMA Ark Modeli 19
4. ARK MODELLERİNİN MATLAB-SİMULİNK BENZETİMİ **23**
4.1 Cassie Ark Modeli Benzetim Sonuçları 24
4.2 Mayr Ark Modeli Benzetim Sonuçları 27
4.3 KEMA Ark Modeli Benzetim Sonuçları 30
4.4 Schwarz Ark Modeli Benzetim Sonuçları 33
4.5 Ark Modellerinin MATLAB-Simulink Kullanılarak Karşılaştırılması 36
4.5.1 Sıfır geçişlerinde oluşan ark 36
4.5.2 Sıfır geçişleri dışında oluşan ark 44
5. ELEKTRİK ARKININ SEY BENZETİMİ İLE ISIL ANALİZİ **49**
5.1 Isı Yayılım Denklemi 49
5.2 Silindirsel Koordinatlarda Yayılım Denkleminin Çözümü 51
5.3 Sonlu Elemanlar Analizi 55
5.3.1 Modelin oluşturulması 55
5.3.2 Malzemelerin, başlangıç ve sınır koşulların belirlenmesi 56
5.3.3 COMSOL ısıl analizleri 57
5.3.3.1 Çubuk-düzlem elektrot sistemi için analiz 57
5.3.3.2 Düzlem-düzlem elektrot sistemi için analiz 65

5.3.3.3 Küre-küre elektrot sistemi için analiz 71
5.3.4 Isıl Analiz Sonuçları 76
5.3.4.1 Elektrot şeklinin sıcaklık dağılımına etkisi..... 76
5.3.4.2 Elektrot açıklığının sıcaklık dağılımına etkisi 77
5.3.4.3 Plazma sütununun sıcaklığının, sıcaklık dağılımına etkisi 79
5.3.4.4 Ark süresinin sıcaklık dağılımına etkisi 83
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 85
KAYNAKLAR..... 89
ÖZGEÇMİŞ..... 91

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : 1000 C ve 2000 C lik ark için sayısal sıcaklık hesabı 56
Çizelge 5.2 : Malzemelerin ısıl özellikleri 58
Çizelge 5.3 : Çubuk düzlem elektrot (1000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 62
Çizelge 5.4 : Çubuk düzlem elektrot (2000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 64
Çizelge 5.5 : Çubuk düzlem elektrot (3000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 67
Çizelge 5.6 : Düzlem-düzlem elektrot (1000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 69
Çizelge 5.7 : Düzlem-düzlem elektrot (2000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 71
Çizelge 5.8 : Düzlem-düzlem elektrot (3000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 73
Çizelge 5.9 : Küre-küre elektrot (1000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 74
Çizelge 5.10: Küre-küre elektrot (2000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 76
Çizelge 5.11: Küre-küre elektrot (3000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu 78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Ark bölgeleri ve ark sütününun potansiyel dağılımı 6
Şekil 2.2 : Arkın şekli.....11
Şekil 2.3 : Farklı kesitlerdeki ark durumu 12
Şekil 4.1 : Cassie ark modeli için kullanılan devre modeli 24
Şekil 4.2 : Cassie ark modelinin açma anındaki akın ve gerilim eğrileri 24
Şekil 4.3 : Cassie modelinin bir periyottaki karakteristiği 25
Şekil 4.4 : Cassie modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi 25
Şekil 4.5 : Cassie modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi 26
Şekil 4.6 : Cassie modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi 26
Şekil 4.7 : Mayr ark modelinin açma anındaki akın ve gerilim eğrileri 27
Şekil 4.8 : Mayr modelinin bir periyottaki karakteristiği 27
Şekil 4.9 : Mayr modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi 28
Şekil 4.10 : Mayr modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi 29
Şekil 4.11 : Mayr modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi 29
Şekil 4.12 : KEMA ark modelinin açma anındaki akın ve gerilim eğrileri 30
Şekil 4.13 : KEMA modelinin bir periyottaki karakteristiği 30
Şekil 4.14 : KEMA modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi 31
Şekil 4.15 : KEMA modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi 32
Şekil 4.16 : KEMA modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi 32
Şekil 4.17 : Schwarz ark modelinin açma anındaki akın ve gerilim eğrileri 33
Şekil 4.18 : Schwarz modelinin bir periyottaki karakteristiği 34
Şekil 4.19 : Schwarz modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi 34
Şekil 4.20 : Schwarz modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi 35
Şekil 4.21 : Schwarz modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi 35
Şekil 4.22 : 0 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması 37
Şekil 4.23 : 0 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı) 37
Şekil 4.24 : 0 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması 38
Şekil 4.25 : 0 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması 38
Şekil 4.26 : 0 ms'de oluşan ark için akım karşılaştırması 39
Şekil 4.27 : 0 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması 39
Şekil 4.28 : 10 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması 40
Şekil 4.29 : 10 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı).....40
Şekil 4.30 : 10 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması 41
Şekil 4.31 : 10 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması 41
Şekil 4.32 : 10 ms'de oluşan ark için akım karşılaştırması 42
Şekil 4.33 : 10 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması 42

Şekil 4.34 : 20 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması 43
Şekil 4.35 : 20 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı) 43
Şekil 4.36 : 20 ms'de oluşan ark için akım karşılaştırması 44
Şekil 4.37 : 20 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması 44
Şekil 4.38 : 5 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması 45
Şekil 4.39 : 5 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı) 46
Şekil 4.40 : 5 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması 46
Şekil 4.41 : 5 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması 47
Şekil 4.42 : 15 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması 47
Şekil 1.43 : 15 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı) 48
Şekil 1.44 : 15 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması 48
Şekil 5.1 : Düzlem elektrot yüzeyindeki sıcaklık dağılımının sayısal hesabı 57
Şekil 5.2 : Elektrot modelleri (a):düzlem (b):çubuk düzlem(c):küre……. 58
Şekil 5.3 : Çubuk-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (1000 ^{o}C) 60
Şekil 5.4 : Çubuk elektrot sıcaklık dağılımı 60
Şekil 5.5 : Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı 61
Şekil 5.6 : Çubuk-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(1000 ^{o}C) 61
Şekil 5.7 : Çubuk-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (2000 ^{o}C) 62
Şekil 5.8 : Çubuk elektrot sıcaklık dağılımı 63
Şekil 5.9 : Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı 63
Şekil 5.10 : Çubuk-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(2000 ^{o}C) 64
Şekil 5.11 : Çubuk-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (3000 ^{o}C) 65
Şekil 5.12 : Çubuk elektrot sıcaklık dağılımı 65
Şekil 5.13 : Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı 66
Şekil 5.14 : Çubuk-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(3000 ^{o}C) 66
Şekil 5.15 : Düzlem-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (1000 ^{o}C) 67
Şekil 5.16 : Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı 68
Şekil 5.17 : Düzlem-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(1000 ^{o}C) 68
Şekil 5.18 : Düzlem-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (2000 ^{o}C) 69
Şekil 5.19 : Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı 70
Şekil 5.20 : Düzlem-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(2000 ^{o}C) 70
Şekil 5.21 : Düzlem-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (3000 ^{o}C) 71
Şekil 5.22 : Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı 72
Şekil 5.23 : Düzlem-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(3000 ^{o}C) 72
Şekil 5.24 : Küre-küre elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (1000 ^{o}C) 73
Şekil 5.25 : Küre elektrot sıcaklık dağılımı 74
Şekil 5.26 : Küre-küre elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (2000 ^{o}C) 75
Şekil 5.27 : Küre elektrot sıcaklık dağılımı 75
Şekil 5.28 : Küre-küre elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(2000 ^{o}C) 76
Şekil 5.29 : Küre-küre elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (3000 ^{o}C) 77
Şekil 5.30 : Küre elektrot sıcaklık dağılımı 77
Şekil 5.31 : Küre-küre elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(3000 ^{o}C) 78
Şekil 5.32 : Elektrot sistemlerinin sıcaklık dağılımı karşılaştırması 79
Şekil 5.33 : Düzlem elektrot farklı açıklıkları için sıcaklık dağılışı eğrileri 80

Şekil 5.34 : Çubuk elektrot farklı açıklıkları için sıcaklık dağılışı eğrileri 80
Şekil 5.35 : Küre elektrot farklı açıklıkları için sıcaklık dağılışı eğrileri 81
Şekil 5.36 : Düzlem elektrot farklı plazma sütunu sıcaklıkları için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri 82
Şekil 5.37 : Çubuk elektrot farklı plazma sütunu sıcaklıkları için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri 82
Şekil 5.38 : Küre elektrot farklı plazma sütunu sıcaklıkları için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri 83
Şekil 5.39 : Elektrot sistemlerinin farklı sıcaklıklar için yüzeysel ısı geçişleri 83
Şekil 5.40 : Elektrot sistemlerinin farklı sıcaklıklar için toplam ısı geçişleri 84
Şekil 5.41 : Elektrot sistemlerinin farklı sıcaklıklar için arka temas eden yüzey alanındaki ısı geçişleri 85
Şekil 5.42 : Düzlem elektrotlarda farklı ark süreleri için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri 85
Şekil 5.43 : Çubuk elektrotlarda farklı ark süreleri için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri 86
Şekil 5.44 : Küre elektrotlarda farklı ark süreleri için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri 86

ALÇAK GERİLİM ARK MODELLERİ VE ARKIN ISIL ANALİZİ

ÖZET

Bu tezin amacı yüksek ve orta gerilimde açma-kapama işlemi sırasında meydana gelen arkların modellenmesi ve bilgisayar simülasyonları ile arkın elektriksel ve ısıl analizinin yapılmasıdır.

Güç sistemlerinde kısa devre arızalarının meydana gelmesi durumunda enerjinin sorunsuz bir biçimde kesilmesi ve gerekli korumanın sağlanması büyük önem taşımaktadır. Güç sistemlerinde kısa devre olaylarının büyük bir bölümü ark şeklinde meydana gelmektedir. Ayrıca kısa devre durumları veya normal şartlar altında kesici açma işlemini gerçekleştirdiğinde kontaklar arasında yine bir elektrik arkı oluşabilmektedir. Bu gibi durumlarda sistemden geçen akımın ve gerilim dalgasının biçiminde meydana gelen değişimin bilinmesi gerek koruma açısından, gerekse devre kesicilerinin tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Elektrik arkı sabit bir direnç olarak modellenmekle birlikte, doğru bir analiz için daha detaylı modellere gerek bulunmaktadır. Bu amaç için, sabit direnç yerine karakteristiği zamanla değişkenlik gösteren dinamik ark modelleri kullanılmaktadır. Ancak bu gibi detaylı modellerin simülasyonunda zorluklar çekilmektedir. MATLAB-Simulink kullanılarak oluşturulan modeller yardımıyla arkın bu dinamik karaktersitiği kolaylıkla incelenebilmektedir.

Yapılan çalışmada dört farklı ark modeli için simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellerde bir periyot içinde farklı zamanlarda (sıfır geçişlerinde ve sıfır geçişleri dışında) ark oluşturulmuş ve davranışları incelenmiştir. Ayrıca bu dört modelin akım ve gerilim karakteristikleri birbirleri ile karşılaştırılmış ve modellerin farkları ortaya konulmuştur.

Arkın ısıl etkilerini görebilmek adına üç farklı elektrot tipinden(düzlem-düzlem, çubuk düzlem ve küre düzlem) oluşturulan sistemlerde arkın elektrot yüzeyinde oluşturduğu zamana bağlı ısı geçişi ve sıcaklık dağılımları sonlu elemanlar destekli bir analiz programı olan COMSOL 3.4 ile simule edilmiştir. Ayrıca düzlem elektrot

sistemi için sıcaklık dağılımı elle hesaplanıp benzetim verileri ile karşılaştırılmıştır. Elektrot açıklığının sıcaklık dağılımına etkisini görebilmek için simülasyonlar sırasıyla 1mm, 2mm ve 3mm elektrot açıklıkları için de yapılmıştır. Ark sütununun sıcaklığının ve arkın süresinin sıcaklık dağılışını nasıl değiştirdiği simülasyonlarla incelenmiştir.

LOW VOLTAGE ARC MODELS AND THERMAL ANALYSİS OF ELECTRİCAL ARC

SUMMARY

Current interruption is the core technology in low voltage circuit breakers and it is characterized by the presence of an electrical arc. The electrical arc is a luminous, noisy and hot electrical discharge that leads to large scale of temperature. Also arc flash is a common issue for electrical insulation due to its hazardous effects on high voltage equipments. High voltage circuit breaker is the key element for power systems. Line faults lead flowing fault currents through the lines. When the current reaches critical level circuit breakers protect the system with interrupting the current. Arc occurs when the current is interrupted in the circuit-breaker. Electrode types affect the interrupting ability of the arc in the circuit-breaker. The main effect of the arc is causing large scale of temperature due to joule heating. This over-temperature causes heavily damage on system equipments especially the circuit-breakers. For this reason, arc flash tests play an important role on system safety. The purpose of this thesis is to investigate the dynamic models of the electric arcs occurs during the switcing operatrions in high voltage and thermal analysis of arc.

In power systems, it is very important to switch the load and source without any problem and to provide a reliable protection in the case of short circuit faults. Most of the short circuit faults are in the form of electrical arcs. Also, electrical arcs occur between the contacts of the circuit breakers. Determination of current flowing in the system and changes in the voltage under these conditions is important for the protection process and for the design of the circuit breakers. Although an electrical arc can be modeled as a constant resistor, more accurate models are needed for a detailed analysis. To achieve this, dynamic arc models whose characteristics varying with time are used instead of constant resistance models. However, there are some difficulties in simulation of these models. By using MATLAB-Simulink programme the dynamic characteristics of arc can be easily analyze.

Simulation models for four different arc models are composed in the study. In composed models, arcs are simulated in different instants in one period (current zero points and non current zero points), and their behaviour is investigated. Furthermore, voltage and current characteristics of these four models are compared with one another and differences between the models are set for the experiments.

In order to observe the thermal effects of the arc, time dependent heat transfer which occur on electrode surface because of arc, and temperature distributions are simulated by COMSOL 3.4 which is a Finite Element Method based analysis software, on the systems that are composed of three different electrode types (plane-plane, rod-plane, sphere-sphere). In addition to that, temperature distribution in plane electrode type is calculated analytically and compared with simulation results. Besides simulations are performed for 1mm, 2mm and 3mm electrode gaps respectively, to see the effect of electrode gap on temperature distribution. It is analysed by simulations, how the temperature of the arc column and arc period is changing the temperature distribution.

The effect of electrode types on arc flash testing are investigated experimentally. In experiments, three different electrode systems such as plane-plane, rod-plane and sphere-sphere electrodes are used to observe the electrical field effect on arc flash testing. 50 Hz AC voltage is applied to the electrodes in short air gap as 5 mm. In the test setup, voltage and current amplitudes are measured for all three electrode systems respectively. The measurement process is repeated for different gap spacing among 1-5 mm between the electrodes. Voltage and current characteristics with respect to the electrode type and air gap are obtained graphically by using the data acquired from experiments. The experimental results are compared with the theoretical results obtained from the formulation mentioned in IEEE 1584 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. In conclusion, both of the experimental and theoretical results seem to satisfy each other.

In this study, influence of using electrode shape on heat dissipation of the electrical arc is investigated experimentally and the test results are presented. Besides, the paper describes the laboratory work including formation of electrical arc and measurements of arc properties such those arc temperature, arc voltage and current.

Different shapes of the electrodes such as sphere, plane, and rod electrodes are used for the experiment setup. Different voltage levels are applied to the electrodes to obtain arc**.** Temperature of the arc plasma column and the electrode surface are

measured by infrared thermometer for each electrode shape and configuration to obtain the characteristics of both column temperature and surface temperature with respect to arcing voltage and current. Also the tests are repeated for the electrodes having different surface areas under fixed voltages to obtain relation between the electrode surface and the heat dissipation.

After the experiments, heat analysis of the system is performed by using the finite element method. The system having different electrodes is simulated with program Finite Element Method Magnetics (FEMM).

All the results are given graphically. Consecutively, from studies on heat dissipation of the arc it is found that area of electrode surface is dominant on this effect.

This experimental study was intended to investigate the electrode type effect on arc flash for AC systems. According to experiments, it is clear that different electrode types have different arc characteristics. However, the nonlinearity of the arc resistance can be seen easily by the graphics. The tests show the biggest breakdown voltage occurs in between the plane-plane electrodes among the others. Unlikely the current characteristics for bigger gap spacings are different than the voltage characteristics. For bigger gap spacings, rod-plane system has lowest current values. The reason is that its capacitance is relatively small than the others and small capacitance yields big reactance. Due to the high level of the current for plane-plane system it is certain that the arcing energy of the plane-plane electrode system has higher energy values than the others.

1. GİRİŞ

Güç sistemlerinde herhangi bir nedenle oluşabilecek bir arıza durumunda sistemin güvenliği için arızanın olduğu yerin en kısa sürede devreden çıkartılıp sistemden yalıtılması gerekir. Büyük bir bölümü ark şeklinde meydana gelen bu arızalar devre kesicileri tarafından kesilir. Oluşan ark sırasında gerek sistemin davranışı gerekse kesicilerin davranışlarının incelenebilmesi için oluşan arkın davranışının bilinmesi gerekir. Bu da uygun bir ark modeli oluşturularak ve bu model kullanılarak elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri yardımı ile belirlenir.

Kesicilerin devreyi açmaları sırasında oluşan ark ile ilgili çalışmalar 1930'lu yıllarda yapılmaya başlanmıştır. O. Mayr ve A. M. Cassie yaptıkları deneyler ile elektrik arkının dinamik karakteristiğini incelemişleridir **[1].**

U. Habedank kısa devre sırasında oluşan arkı modelleyebilmek için çalışmalar yapmış ve sabit dört parametreli bir model tanımlamıştır **[2]**. Ölçüm verileri ile tanımladığı modelden hesapladığı verileri karşılaştırdığında önerdiği modelin ölçüm verilerine daha yakın olduğunu görmüştür. Bu da gerçeğe daha yakın sonuç veren bir model geliştirdiğini göstermektedir. Habedank'ın modeli ile anahtarlama deneylerinden devre kesicilerin ark söndürme yetenekleri hakkında çok fazla bilgi elde edilmiştir.

L. Van der Sluis ve M. R. Rutgers ise ark modelleri kullanarak deney devrelerini karşılaştırmışlardır. Ark-devre etkileşimi, yüksek gerilim güç kesicilerinin akım kesmede oynadığı rolü ve bu kesicilerin tasarlanıp geliştirilebilmesi için yüksek gerilim laboratuarlarının önemini konu alan çalışmalar yapmışlardır **[3]**. Ayrıca yeni deney devrelerinin geliştirilmesi için bilgisayar simülasyonları önemli olduğundan bu tür çalışmalar yapmışlardır. Bunlardan başka 7,2 kV'lık iki adet SF_6 gazlı kesici için ark gerilimi ve ark akımlarına ilişkin ölçümler yapmışlardır.

Lionel R. Orama-Exclusa ve Bienvenido Rodriguez-Medina ise devre kesici simülasyonlarında kullanacağı ark modeli parametrelerini sayısal olarak çıkaran çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarında MATLAB ve EMTP(Electro magnetic

transient program) kullanmışlardır. Cassie ve Mayr modelleri üzerinde çalışıp modifiye edilmiş Cassie-Mayr modelini gerçeklemişlerdir **[4]**. Kullandıkları bilgisayar programları ile arkın gerilim ve akım dalga şekillerini elde etmişlerdir. Bu çıktılar sayesinde MATLAB'da optimizasyon yaparak parametreleri elde etmişlerdir. Modifiye edilmiş Cassie-Mayr modeli özellikle yüksek basınçlı gazlı devre kesicilerinin ark kesme karakteristikleri için doğru sonuç veren bir modeldir.

P. H. Schavemaker ve Lou van der Sluis düzeltilmiş Mayr ark modeli ile ark davranışını incelemişlerdir. Bu modeli sıfır akım ölçümlerine dayalı olarak geliştirmişlerdir. Ayrıca bu ölçümlere dayalı farklı tiplerde Mayr ark modelleri modifiye etmişlerdir **[5]**. Elektriksel giriş gücüne bağlı bir soğutma gücünü tanımlayan ve zaman parametresi sabit olan düzeltilmiş Mayr ark modeli ile sıfır akım ölçümlerini elde etmiştir.

J. L. Guardado, S. G. Maximov, E. Melgoza, J. L. Naredo ve P. Moreno önerdikleri bir modelde sıfır akımı öncesi durumu için farklı bölgelerde (alçak ve yüksek akım bölgeleri) arkın dinamik davranışını tanımlamışlardır. Bu model birleştirilmiş Cassie-Mayr ark modeline dayanmaktadır **[6]**. Ortaya koydukları modelde dalga şekilleri yüksek ve alçak akım bölgeleri için ayrı ayrı verilmiştir. Bu bölgeler için genelleştirilmiş bir fonksiyon ile akım ve gerilimin türevlerini birleştiren bir diferansiyel denklem elde etmişlerdir. Bilgisayar da elde edilen sonuçların ölçüm verileri ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Grigore A. Cividjian, Natalia G. Silvis–Cividjian KEMA ark modeli için parametre hesaplamasında kullanılacak bir yöntem ortaya atmıştır **[7]**. Bunun için maksimum ark gerilimi öncesi gerilimi için analitik bir ifadeden ve akımın lineer olarak azalması durumundan yararlanmıştır. Elde ettikleri dalga şekillerini kullanarak ark parametrelerini hesaplamışlardır. Deneysel çalışma ile karşılaştırdıklarında tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir.

Yapılan teorik çalışmaların yanında elektrik arkı ile ilgili çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. R. Wilkins, M. Allison ve M. Lang, elektrik arkını düşey ve yatay elektrot konumları için incelemişler ve yatay düzende oluşan arkın enerjisinin daha büyük olduğunu göstermişlerdir **[8].** Ayrıca deneylerini metal bir kutu içerisinde tekrarlayarak manyetik etkilerin ark enerjisini nasıl etkilediğini incelemişlerdir.

Wilkins, M. Allison ve M. Lang başka bir çalışmalarında ark deneylerini elektrotların uçlarını bir yalıtkan malzeme ile kaplayarak yapmışlardır. Yalıtkan bariyer kullanmadan yaptıkları sonuçlar ile karşılaştırıldığında bariyerin arkın sönmesini kolaylaştırdığını görmüşlerdir **[9].** Bunların yanında ark esnasında oluşan elektrot aşınmasını bariyerin azalttığını kanıtlayan deneyler yapmışlardır.

L. Piqueras, D. Henry, D. Jeandel, J. Scot, J. Wild ise alçak gerilim devre kesicilerinde kontakların açıldığı ilk birkaç milisaniyede oluşan arkın sayısal benzetimini incelemişlerdir **[10].** Bunun için sonlu elemanlar analizinden yararlanmışlardır. Ayrıca ark esnasında oluşan sıcaklık dağılımını bilgisayar simülasyonu kullanarak elde etmişlerdir.

2. ELEKTRİKSEL ARK

2.1 Akımın Kesme Yöntemleri

Bütün yüksek gerilim sistemlerinde akım kesme yöntemleri yalıtılmış bir aralık ve iletken kontaklar ile başlar. Akım kesme, kontakların mekanik olarak açılması ile gerçekleşir. Bu sırada oluşan kontak aralığında bir sıvı, bir gaz veya vakum olabilir. Ancak yalıtkan ortam elektriksel yalıtımı sağlayamayabilir ve elektriksel boşalmalar devam edebilir **[11]**.

Akımın kesilmesi işlemi sırasında sistem ile bu fiziksel olayların sıkı bir etkileşimi vardır. Kesilecek akımın saf dirençsel akım olması durumunda herhangi bir sorun olmaz. Akım kesildiği zaman gerilim yavaş yavaş tepe değerine yükselir. Kontaklardaki gerilim yükselmesi çalışma gerilimine göre orta seviyededir. Fakat çoğu zaman kesilecek olan akım endüktif karakterdedir. Kontaklar açılıp akım kesildiği sırada gerilim tepe değerine ulaşma eğilimi gösterir. Bu durum kontaklar arasında sistem geriliminden daha yüksek ve toparlanma gerilimine ulaşmayı hedefleyen gerilim yükselmesi ile sonuçlanır **[11].** Böyle bir durumda kontaklar açık olmasına rağmen ark yeniden ateşlenebilir.

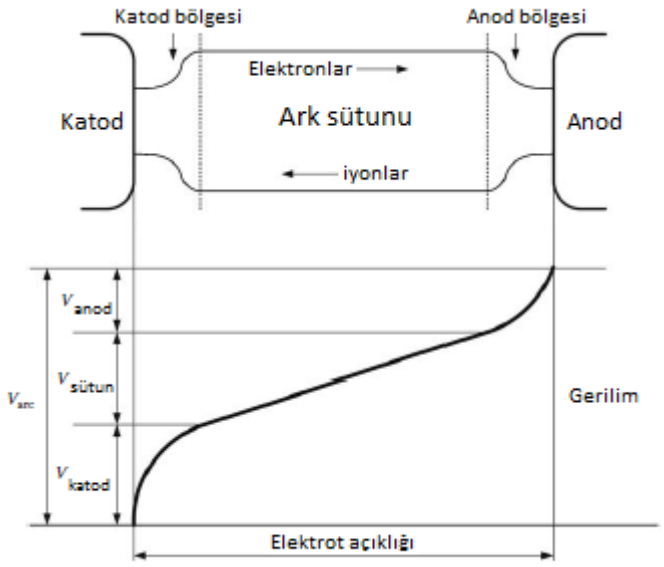
2.2 Elektrik Arkı

Endüktif bir akım devresinin kesilmesi esnasında çok yüksek aşırı gerilimler meydana gelebilir. Devreyi kesen kontaklar arasında meydana gelen ark, bu aşırı gerilimi engeller.

Ark, akımın kesildiği elektrotlar arasındaki ortamdaki gaz boşalması sonrası oluşan plazma kanalıdır. Arktaki sıcaklık artışı ile ortamdaki moleküllerin enerjileri de yükselir. Belli bir seviyeden sonra moleküller bu enerji artışı ile atomlarına ayrışır. Sıcaklık dolayısıyla enerji artışı devam ederse atomlara bağlı elektronlar ayrışarak serbest elektron olarak atomdan uzaklaşırlar **[12].**

Plazma kanalının iletkenliği çok yüksek olduğu için kontakların açılmasından sonra bile akım akmaya devam eder. Yüksek sıcaklıklarda plazma kanalının iletkenliği

hızla yükselir. Arkın yüksek sıcaklığı sonucu oluşan ısıl (termal) iyonizasyon, hızlı hareket eden elektron ve fotonların, daha yavaş hareket eden pozitif yüklü iyonlar ve nötr atomlar ile çarpışmaları sonucunda oluşur. Aynı zamanda bu çarpışmalar sırasında elektronlar ile pozitif iyonlar arasında yeniden birleşmesi (rekombinasyon) sonucu nötr atomlar meydana gelir. Sistemde ısıl denge oluştuğunda iyonizasyon oranı ile rekombinasyon oranı birbirine eşit olur ve bu durumda ark kararlı duruma geçmiş olur **[12]**.



Şekil 2.1: Ark bölgeleri ve ark sütununun potansiyel dağılımı

Elektrik arkı temel olarak üç bölgeye ayrılır. Bunlar ark plazma sütunu, katot bölgesi ve anot bölgesidir. Elektrot bölgeleri katı iletken kontaklar ile gaz-plazma bulutu arasındaki bölgedir. Bu bölgelerin kalınlıkları birkaç milimetreye kadar çıkabilir. Ark plazma sütunu ise elektrot bölgeleri arasında kalan sıcaklığı çok yüksek olan bölgedir. Şekil 2.1'de kontaklar arasında oluşan arkın bölgeleri ve ark sütunu boyunca potansiyel dağılımı görülmektedir. Gerilim düşümünün büyük bir bölümü ark sütunu üzerindedir. Elektrot bölgelerindeki gerilim düşümleri ise elektrot malzemesinden bağımsız olarak yapılan deneyler sonucunda pratikte sabit olarak kabul edilebilir. Bu amaçla yapılan bir deneyde **[13]** 5 ile 150 kA arası ark akımları ve 0,5 ile 20 cm arası değişen açıklıklarda farklı kontak malzemeleri kullanılarak oluşturulan arkın elektrot bölgelerinin toplam gerilim düşümleri ölçülmüştür. Bu ölçümlere göre bakır elektrotlarda ark sırasında oluşan toplam elektrot gerilim

düşümü 23,5 V'tur. Bu değer çelik elektrotlar için 26 V ve tungsten elektrotlar için 36 V olarak ölçülmüştür. Ölçümler deney koşullarına bağlı olmakla beraber elektrot bölgelerindeki gerilim düşümünün ark sütunun gerilim düşümü yanında çok küçüktür.

Bakır için V_E = 23,5 V

Çelik için V_E = 26 V

Tungsten için V_E = 36 V

2.2.1 Arkın Oluşumu

Gazlarda elektrik akımı iletimi ancak içlerinde elektronlar ve iyonlar varsa mümkündür. Gaz deşarjı için katottan elektron kopar. Bu elektronun kopması içinde iletim elektronlarının enerjileşmesi gerekmektedir. Arkın şiddeti, diğer faktörlerin yanı sıra yükleme türü ve yüksekliğine, güç faktörüne ve anahtarların açılma anına bağlıdır. Bir arkın içinde 10000 ^{o}C' den 15000 ^{o}C' ye kadar ulaşan sıcaklıklar ortaya çıkabilir. Bu durumda kontak malzemesinde buharlaşma olabilir. Ark, şalt bağlantılarının ömrünü doğrudan doğruya etkilediğinden, arkı kısa tutmak veya mümkün olduğunca hızlı bir şekilde söndürmek (deiyonizasyon) gibi önlemlerin alınması zorunludur **[14].**

Birbirine temas eden kontaklar üzerindeki kuvvet kalkmaya başladığında kontak yüzeyleri de birbirinden yavaş yavaş ayrılmaya başlarlar. Kontak yüzeyinden akan akım sabit kalmak koşuluyla kuvvet ortadan kalktıkça akımın akacağı yüzey alanı azalmaya ve dolayısıyla "J" akım yoğunluğu artmaya başlar. Kontağın açılmasında temasın mevcut olduğu son anda temas yüzeyi çok küçüktür.

$$J = \frac{I}{A} = \frac{AKIM}{ALAN} \rightarrow \text{Akım yoğunluğu} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Akım yoğunluğu formülden de görüldüğü üzere minimum kontak teması sırasında çok büyük değerlere ulaşır. Temas noktasında yükselen sıcaklık burada yanan bir leke (arc spot) meydana getirir, bu olayda bu noktada elektron emisyonuna yol açar. Katodun ısınması o kadar çok artar ki katottan metal parçacıklar buharlaşmaya başlar. Ark önce bu metal buharı içinde yanmaya başlar. Bu sırada henüz plazma oluşmamıştır. Artan sıcaklık ile elektron emisyonu artar ve kanal oluşur ve akım bu kanal sayesinde katoddan anoda doğru yol alır ve ark oluşur.

Elektrik arkı yüksek basınç arkı ve alçak basınç (vakum) arkı olmak üzere iki grupta incelenir.

2.2.2 Yüksek Basınç Arkı

Atmosfer ve atmosfer basıncının üzerindeki basınçlarda yanmakta olan arklara yüksek basınç arkı adı verilir. Böyle bir ark elektrik akımını konveksiyon yoluyla taşıyan iyonize gazlardan oluşan ve yanmakta olan parlak bir çekirdek ile parlak bir sütun şeklinde belirir. Arkın çekirdek sıcaklığı 6000 °K ile 20000 °K arasında değişebilir. Arkın katot kısmındaki gerilim düşümü yaklaşık olarak 10 V olup akım yoğunluğu çok büyüktür ve arktan yayılan ışığın spektrumu katot malzemesiyle ilgilidir. Akım kesme işlemine pozitif etkisi olan ark karakteristiklerinden bazıları şunlardır: bir manyetik alan veya yüksek basınçlı bir akışkan, elektrik arkını kolayca kontrol ederek soğumasını dolayısıyla sönmesini sağlayabilir. Bir diğer husus da elektrik arkının lineer olmayan bir direnç gibi davranmasıdır [14]. Dolayısıyla elektrik arkında yutulan enerjinin, arktaki gerilim düşümü ile arkın taşıdığı akımın çarpımına eşit olduğu söylenebilir. Akımın sabit olması halinde yani kararlı rejimde ark ısıl dengede iken, ark sütunundaki güç kaybı arka verilen güçle dengelenmektedir. Bunun sonucu olarak arkın iletken sütununa, kütle, momentum ve enerji sakınımı denklemlerinin geçerli olduğu ve tüm termodinamik yasalarla Maxwell denklemlerinin uygulanabileceği, sıcak bir gaz gözüyle bakılabilir. Dolayısıyla gazın ısıl ve elektriksel iletkenliğinin esas itibarıyla sıcaklığın belirlediği faktörler olduğu söylenebilir. Ark boyunca gerilim düşümü üç farklı bölgeden oluşur. Katodun hemen yakınındaki bölgedeki gerilim düşümü katot malzemesine bağlı olup 10 ila 25 V arasında değişir. Anot bölgesindeki gerilim düşümü ise genellikle 5 ila 10 V arasındadır. Pozitif sütun boyunca gerilim düşümü ise esas itibarıyla gazın cinsi, gaz basıncı, ark akımının şiddeti ve sütunun uzunluğu ile ilgilidir. Bu bölgede santimetre başına birkaç volt ile santimetre başına birkaç yüz voltluk potansiyel gradyanları ölçülmüştür. Nispeten küçük akım-gerilim değerleri için ilk deneysel çalışmalar **Hertha Ayrton** tarafından yapılmıştır [15]:

Katot bölgesindeki akım yoğunluğu pratik olarak ark akımına bağlı olmayıp elektrot malzemesinin bir fonksiyonudur. Karbon, tungsten veya molibden gibi kaynama derecesi yüksek refrakter malzemeler kullanılması halinde katotta termoiyonik

emisyon söz konusu olup bu bölgede akım yoğunluğu 10^3 A/cm^2 mertebesindedir. Kaynama derecesi nispeten düşük malzemeler kullanıldığında ise elektrotlardan hatırı sayılır miktarda malzeme eriyip kaybolurken refrakter malzemelerdeki azalma sadece buharlaşma şeklinde olur. Aynı koşullarda refrakter malzemelerdeki kayıplar kaynama derecesi düşük malzemelerdeki kayıplardan hatırı sayılır miktarda küçük olup bu özellik kesici kontakları için malzeme seçiminde daima göz önünde tutulmalıdır [15].

2.2.3 Alçak Basınç (Vakum) Arkı

Alçak basınç veya vakum arkı da, atmosfer ve atmosfer üzeri basınçlarda meydana gelen arklarla aynı temel özelliklere sahip olmakla birlikte bir takım farklılıklar gösterir [16]. Ark gerilimi vakum arkında yüksek basınçlarda ölçülenlerden oldukça düşük ve 40 V civarlarındadır. Vakum arkındaki pozitif sütun sadece elektrot malzemesinden etkilenir çünkü pozitif sütunu oluşturacak herhangi başka bir gaz söz konusu değildir, sadece metal buharlarından oluşur. Yüksek basınç arkında pozitif sütun ortamdaki gazların iyonize olması ile oluşur. Vakum arkı farklı modlarda oluşabilir. Bunlar yayılmış mod ve büzülmüş moddur. Yayılmış modda birbirine paralel çok sayıda ark izlenimi veren ve hızla hareket eden çok sayıda katot spotları söz konusudur. Spotların her birinin taşıdığı akım kontak malzemesine bağlı olup yaklaşık 100 A civarındadır. Tungsten veya grafit gibi refrakter malzemelerle yüksek akım yoğunlukları elde edilmekle birlikte bakır gibi kaynama derecesi düşük malzemelerle elde edilen değerler nispeten küçüktür. Akım şiddeti belirli bir değeri geçtiğinde ark yayılmış moddan büzülmüş moda geçiş yapar. Arkın bir moddan diğerine geçtiği bu eşik değeri elektrotların boyutu ile elektrot malzemesine bağlıdır [17]. Günümüz piyasasında mevcut vakum kesicileri söz konusu olduğunda yayılmış arklar genelde 15 kA'in altındaki akım şiddetlerinde meydana geldiği dolayısıyla da bazı alternatif akım kesicilerinde akım maksimum değerden geçerken yayılmış moddan büzülmüş moda geçmek sonra da akım doğal sıfırdan geçerken tekrar yayılmış moda dönmek mümkündür.

2.2.4 Alternatif Akımda Ark

Elektrik güç sistemlerinde sinüzoidal alternatif akımın seçilmesi birçok bakımdan uygun bir tercihtir. Kararlı bir ark durumunda, akım yükseldiğinde sıcaklık artışına bağlı olarak ark direnci azalır; böylece her yarı-dalga sonunda akımın sıfırdan

geçişinden az önce ark kendiliğinden sönmüş olur. Fakat elektrotlar arasındaki ortamın uygun olması halinde, bir sonraki yarı-dalgada akım ters yönde aktığında ark yeniden tutuşabilir. Birbirini izleyen iki yarı-dalga arasındaki geçiş süresi büyük ölçüde arkın meydana geldiği ortam ve dış devrenin karakteristiklerine bağlıdır. Ark akımı sıfıra yaklaşırken sinüs dalgasında ark geriliminin etkisine bağlı hafif bir bozulma olur. Bunun sonucunda anma akımının sıfırdan geçişini sırasında ark sönmüş olur. Akım sıfırdan geçerken ark gerilimindeki büyük eğimli artış ve gerilimin tepe değeri maksimum sönme gerilimi adını alır. Sönme geriliminin tepe değeri devre tarafından arka uygulanan gerilimin ani değerine ulaştığında, ark akımı artık söndürülemeyeceğinden, ters yöndeki akım hemen uygulanmaz, böylece akımın her sıfırdan geçişinde akımın akamayacağı sonlu bir zaman periyodu mevcuttur. Bu periyoda genellikle sıfır akımı denmektedir. Akımın sıfırdan geçtiği periyotta boşalma yolu kısmen deziyonize olup akım yön değiştirdikten sonra arkın yeniden oluşması için gerekli elektrik alanı arkı söndürmek için gerekli olan elektrik alanından büyük olur [18]. Bunun anlamı tekrar tutuşma geriliminin arkı söndürmek için gerekli gerilimden büyük olması dolayısıyla yeniden tutuşma gerilimine ulaşılana kadar akımın sıfırda kalmasıdır. Şayet ark yeniden tutuşursa akım yükselmeye başlar ve gerilim minimum değerine düşerek pratik olarak sabit kalır. Birbirini izleyen yarı periyotlarda elektrotların simetrik olduğu varsayılırsa yukarıdaki olaylar aynen tekrar eder fakat çoğu kez arkın davranışında sapmalar olup bunlar elektrot malzemesi, soğutma özellikleri, gaz akışı, v.b. faktörlerden kaynaklanır. Bu asimetrik koşullar özellikle elektrotların malzemesi farklı olduğu zaman kuvvetle kendilerini hissettirirler. Arkın yeniden tutuştuğu ve akımın sıfırdan geçişini izleyen zaman penceresi yarım periyodun başlangıcındaki gerilim artış hızı ve elektrotlar arasındaki ortamın deziyonizasyon hızına bağlıdır. Diğer bir deyimle, yeniden tutuşma işlemi, besleme geriliminin toparlanma hızıyla deziyonizasyon veya elektrotlar arasındaki ortamın dielektrik toparlanma hızı arasındaki bağıntıyı gösterir [18].

2.3 Arkın Söndürülmesi

Alternatif ve doğru akımda farklı ark söndürme yöntemleri vardır: Doğal olarak ark söndürme yönteminde yüksek dirençli kesme yöntemi kullanılır [19]. Bu yöntemde arkın direncinin arttırmak, dolayısıyla akımı küçültmek amaçlanmıştır. U gerilim, R arkın direnci ve I ark akımı olarak tanımlanırsa;

$$I = \frac{U}{R} \qquad \textbf{(2.2)}$$

olduğundan,

R↑ => I

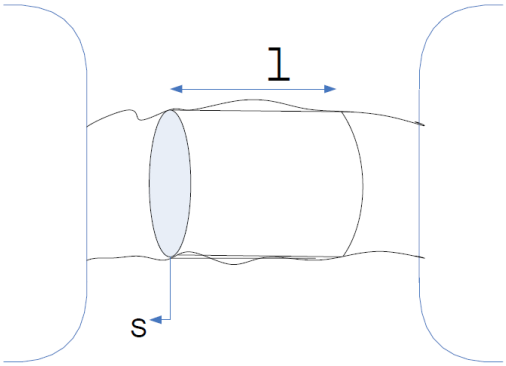
R → ∞ => I = 0

olur.

Ark, aralarındaki açıklık L olan kontaklar arasında oluşmuş, S yüzey alanına sahip olan bir silindir olarak düşünülebilir. Bu durumda bu silindirin yani ark sütununun direnci

$R=\frac{\rho.L}{S}$

ile hesaplanır.



Şekil 2.2: Arkın şekli

Silindir olarak da tanımlanabilen ark sütununun direncini arttırmak için dört yöntem kullanılır. Bunlar: arkın boyunu uzatma, kesitini küçültme, arkı soğutma ve arkı dilimlemektir [19].

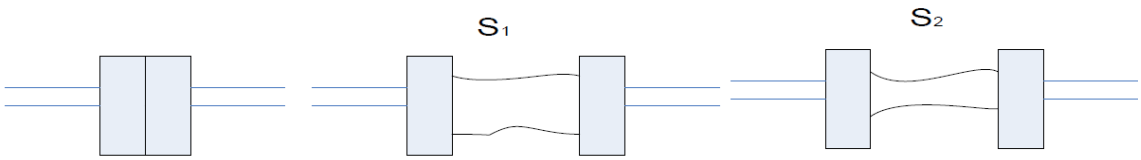
2.3.1 Arkın Boyunu Uzatmak

Arkın boyu uzarsa arkın sürmesi için gerilimin arttırılması gerekir. Gerilim artmadığı

için ark süremez ve kesilir. Bu arada arkın direnci akımı kesecek değere ulaşır [19].

2.3.2 Arkın Kesitini Azaltmak

Kesit küçüldükçe direnç büyür, büyüyen direnç ile beraber akım küçülür ve ark söner.



Şekil 2.3: Farklı kesitlerdeki ark durumu

Şekilde durumlarında farklı kesitlerdeki ark oluşumları görülmektedir. Burada $S_1 > S_2$ durumu için $R_2 > R_1$ olur ve böylece $I_2 < I_1$ şeklinde akım azalır. Kesit yeterince küçültüldüğünde ise ark tamamen sönmüş olur [19].

2.3.3 Arkı Soğutmak

Arkın ısısını almak enerjisini, gücünü azaltır. Aynı zamanda soğudukça akım azalır. Bu nedenle arkı soğutacak düzenekler söndürmek için kullanılabilir. Soğutucu levha kullanma, püskürtme ve üfleme düzeneklerinin kullanılması önde gelen ark soğutma yöntemlerindendir **[19].**

Q↑ => R↓

Q↓ => R↑

2.3.4 Arkı Dilimlemek

Ark 30 V'dan küçük gerilimlerde oluşmaz, sürmez. Deiyon odacığının geliştirilmesi bu gerçeğe dayanır. Toplam ark bakır kaplanmış demir sac levhalarla birçok parçalara bölünür. Her düşen gerilim 30 V'dan küçük olacak şekilde ayarlandığında ark yanmaya devam edemez ve söner [19].

3. ARK MODELLERİ

Ark modelleri, arkın elektriksel özelliklerinin matematiksel olarak tanımlanmasını ifade eder. Bu tip modeller devre kesicinin içerisinde meydana gelen karmaşık fiziksel olayları simüle etmekten çok devre kesicinin elektriksel davranışını tanımlamada kullanılırlar. Ölçülen akım ve gerilim değerleri daha özel ölçümler yapmak amacı ile elektriksel arkın lineer olmayan direncini tanımlayan diferansiyel denklemlere ait parametrelerin elde edilmesinde kullanılırlar [20].

Elektriksel ark için kullanılan klasik ark modeli enerjinin korunum ilkesi temel alınarak oluşturulmuştur. Buna göre ark joule kayıplarından oluşan bir iç kaynak ve değişken ısıya sahip, daha soğuk bir ortamdan (dış kaynak) oluşan elektro-termal bir sistem olarak yazılabilir. Eğer joule kaybı dışarıya yayılan ısıdan daha büyük ise ark enerjisi artar, aksi durumda dış ortama yayılan ısı miktarı joule ısısından fazla ise ark enerjisi azalır.

Isıl bir sistem olarak düşünülebilen ark için güç dengesi adi diferansiyel denklem şeklinde yazılabilir.

$$\frac{dQ}{dt} = P_{in} - P_{out} \tag{3.1}$$

Burada Q ark enerjisi, Q'nun türevi ise depo edilen enerjidir. **(3.1)** denkleminin sağ tarafı arka aktarılan net gücü gösterir. Bu güç sisteme verilen güç (P_{in}) ile sistemden çıkan güç veya bir başka deyişle soğutma gücünün (P_{out}) farkına eşittir. Ohm kanununa göre giriş gücü veya kaynak gücü tamamıyla joule kaybına eşittir.

$$P_{in} = u.i \tag{3.2a}$$

$$P_{out} = g.u^2 \tag{3.2b}$$

Klasik ark modelleri bu noktadan sonra özgül soğutma gücü formülasyonlarına göre farklı şekillerde geliştirilir. Adi diferansiyel denklem olarak yazılabilen klasik ark modelleri temel olarak şu biçimdedir.

$$\frac{1}{g}\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau(g)}.\left(\frac{g.u^2}{P_{out}(g)} - 1\right) \quad \textbf{(3.3)}$$

3.1 Mayr Ark Modeli

En bilinen ve en çok kullanılan ark modeli 1943'de Otto Mayr tarafından geliştirilmiştir [20]. Mayr modelini oluştururken bazı basitleştirmeler ve kabuller yapmıştır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

1) Akım görece küçüktür (I ≤ 500 A). Bu kabul akımın sıfırın civarında olduğu arkı modellemeye uygun kılar.

2) Ark, kesit alanı zamanla değişmeyen (sabit kesite sahip) silindir sütun şeklindedir.

3) Ark sıcaklığı, ark sütununda düzgün olarak dağılmıştır (ark sütununun kesitinin sabit olması kabulüne dayanır). Sıcaklık arkın enerjisine bağlıdır ve zamanla değişir.

4) Ark iletkenliği g ark sütununda düzgün bir dağılıma sahiptir ve ark enerjisine bağlıdır. Ark iletkenliğinin ifadesi şu şekildedir:

$$g = k.e^{\left(Q/Q_0\right)} \quad \textbf{(3.4)}$$

Burada k ve Q_0 sabit parametrelerdir.

5) Soğutma gücü (P_{out}) zamanla değişmez ve değeri sürekli haldeki değerine eşittir.

Bu kabuller yardımıyla denklem **(3.4)'**den ark enerjisi Q çekilir

$$Q = Q_0.ln\left(\frac{g}{k}\right) \quad \textbf{(3.5)}$$

Enerji ifadesi **(3.1)** adi diferansiyel denkleminde yerine konulur

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}\left[Q_0.ln\left(\frac{g}{k}\right)\right] \quad \textbf{(3.6a)}$$

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0.\frac{d(\ln g - \ln k)}{dt} \quad \textbf{(3.6b)}$$

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0.\frac{d(\ln g)}{dt} = Q_0.\frac{1}{g}\frac{dg}{dt} \quad \textbf{(3.6c)}$$

Q_0 ve P_{out} sabit olduğu için $\tau=\frac{Q_0}{P_{out}}$ ifadesi de sabit olur ve bu ifade dışarı çıkartılırsa

$$Q_0 . \frac{1}{g} . \frac{dg}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad \textbf{(3.7a)}$$

$$\frac{1}{g} . \frac{dg}{dt} = \frac{P_{out}}{Q_0} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} - \underbrace{\frac{P_{out}}{P_{out}}}_{1} \right) \quad \textbf{(3.7b)}$$

$$\frac{1}{g} . \frac{dg}{dt} = \frac{P_{out}}{Q_0} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} - 1 \right) \quad \textbf{(3.7c)}$$

Kaynak gücü denklemde yerine konursa Mayr modelinin son hali elde edilir.

$$\frac{1}{g} . \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{g . u^2}{P_{out}} - 1 \right) \quad \textbf{(3.8)}$$

Mayr ark modeli temel olarak iki parametreye sahiptir:

τ: ark zaman sabiti

P_{out}: ark soğutma gücü

τ'nun fiziksel anlamını açıklamak için kesiciden akan akımın sıfır olduğu andan hemen sonraya bakmak gerekir. Ark sonrası akımının (post-arc current) oluşturduğu ısınma ihmal edilirse P_{in} değeri sıfır olur ve denklem şu hale gelir

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{g}{\tau} \quad \textbf{(3.9)}$$

Sabit katsayılı lineer diferansiyel denklem çözümünden iletkenlik

$$g(t) = g_0 . e^{-t/\tau} \quad \textbf{(3.10)}$$

fonksiyonu şeklinde çözülür. Burada g_0 akımın sıfır olduğu andaki arkın iletkenliğidir. t akımın sıfır değerinden sonra kesicinin elektriksel yalıtkanlığını geri kazanabilme davranışının bir ölçütü olmuş olur. Giriş gücü P_{in} olmadığı takdirde arkın iletkenliği üstel olarak azalır.

3.2 Cassie Ark Modeli

1939 yılında A. M. Cassie farklı bir dereceye kadar tamamlayıcı bir ark modeli geliştirmiştir **[20].** Mayr modeline benzemesine rağmen modeli oluştururken yaptığı kabuller ve hipotezler Mayr modelinden farklılık gösterir.

Cassie ark modeli için yapılmış kabuller şöyledir.

1) Akım görece büyüktür (I ≥ 500 A) ve bu yüzden model, akımın sıfıra yakın olduğu yerlerde oluşan arkı modellemek için uygun değildir.

2) Ark gerilimi zamanla değişmez.

3) Arkın sıcaklığı zamanla değişmez.

4) Arkı tanımlayan fiziksel nicelikler (elektriksel öziletkenlik σ, ısı, birim yüzeyde depo edilen enerji) zamanla değişmez. Bu büyüklüklerin basınçla değişimleri ihmal edilmiştir.

5) Ark, kesiti A(t) olan ark enerjisine bağlı olarak zamanla değişen silindir bir sütun şeklindedir. Bu silindirin boyu elektrot açıklığı (L) kadardır.

6) Birim hacimdeki soğutma gücü (soğutma gücü yoğunluğu) p_{out} [w/m^3] zamanla değişmez.

Sabit ark geriliminde değişen ark kesit alanı; ark direncinin ayarlanabilmesine olanak tanır.

Cassie ark modelini elde edebilmek için Mayr modelinde olduğu gibi depo edilen enerji ifadesinin ark iletkenliği cinsinden yazılması gerekir. q enerji yoğunluğu olmak üzere ark enerjisi yazılırsa

$$Q(t) = q.A(t).L \tag{3.11}$$

A ark sütununun kesit alanı ve L ark sütununun boyudur.

σ öziletkenlik olmak üzere ark iletkenliği ark sütununun kesiti ve uzunluğu cinsinden

$$g(t) = \frac{\sigma.A(t)}{L} \tag{3.12}$$

olarak yazılır. İletkenlik ark enerjisi denkleminde yerine konursa

$$Q(t) = q.A(t).L \tag{3.13a}$$

$$Q(t) = \frac{q.g(t).L^2}{\sigma} \tag{3.13b}$$

Denklem **(3.4)** yazılırsa

$$\frac{dg}{dt} = P_{in} - P_{out} \tag{3.14}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{q.g(t).L^2}{\sigma}\right) \quad \textbf{(3.15)}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{q.L^2}{\sigma}.\frac{dg}{dt} \quad \textbf{(3.16a)}$$

$$Q(t) = \frac{q.g(t).L^2}{\sigma} \quad \textbf{(3.16b)}$$

$$Q.\frac{1}{g} = \frac{q.L^2}{\sigma} \quad \textbf{(3.16c)}$$

olduğundan

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{q.L^2}{\sigma}.\frac{dg}{dt} = Q.\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} \quad \textbf{(3.17)}$$

haline gelir. Ark enerjisi ifadesinden

$$\frac{q}{\sigma} = \frac{Q}{g.L^2} \quad \textbf{(3.18)}$$

yazılabilir. Enerji denklemine geri dönüldüğünde $\tau = Q/P_{out}$ yazıldığında Cassie modeli elde edilmiş olunur.

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(\frac{P_{in}}{P_{out}} - 1\right) \quad \textbf{(3.19a)}$$

$$\frac{1}{g}.\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(\frac{g.u^2}{P_{out}} - 1\right) \quad \textbf{(3.19b)}$$

Bu haliyle model Mayr modeline benzemektedir. Zaman sabiti $\tau = Q/P_{out} = q/p_{out}$ olmasına ve q ve p_{out} sabit olmasına rağmen Q ve P_{out} sabit değildir. Ayrıca p_{out} sabit olduğu için soğutma gücünün joule kaybına eşit olduğu geçici kararlı durum hesaplanabilir. Bu denge durumundaki büyüklükler "o" alt indisi ile gösterilirse $P_{out,0}$ şöyle yazılabilir:

$$P_{out} = p_{out}.A_0.L = g_0.u_0^2 \quad \textbf{(3.20)}$$

Burada

$P_{out,0}$: geçici kararlı durumdaki soğutma gücü

A_0: geçici kararlı durumdaki ark sütununun kesiti

g_0: geçici kararlı durumdaki ark iletkenliği

u_0: geçici kararlı durumdaki ark gerilimi

olarak tanımlanır. Soğutma gücü yoğunluğu **(3.20)** denkleminden yazılmak istenirse

$$p_{out} = \frac{g_0 . u_0^2}{A_0 . L} \tag{3.21}$$

(3.19b) denklemi Mayr denklemine benzemesine rağmen soğutma gücü ark iletkenliği ifadesini içinde barındırmaktadır. Bu nedenle P_{out} sabit değildir. **(3.12)** denkleminden

$$\frac{g(t)}{A(t)} = \frac{\sigma}{L} \tag{3.22}$$

yazılabilir. Bu nedenle g(t)/A(t) sabittir ve geçici kararlı durum koşulu için

$$\frac{g(t)}{A(t)} = \frac{g_0}{A_0} \tag{3.23}$$

yazılabilir. **(3.21)** denklemi yeniden düzenlendiğinde;

$$P_{out}(t) = p_{out} . A(t) . L = g . u_0^2 \tag{3.24}$$

olur. Bu denklem **(3.19b)** denkleminde yerine konarak Cassie ark modeli elde edilir.

$$\frac{1}{g} . \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(\frac{u^2}{u_0^2} - 1\right) \tag{3.25}$$

Cassie modeli iki önemli parametreye sahiptir.

τ: ark zaman sabiti

u_0: geçici kararlı durum için ark gerilimi.

3.3 Schwarz Ark Modeli

Mayr ve Cassie ark modelleri arkın dinamik davranışını incelemede önemli bir yere sahip olsa da deneysel verilerle veya osiloskop dalga şekilleri ile karşılaştırıldıklarında yeterli kesinliğe ve hassasiyete sahip olmadıkları görülmektedir. Bu yüzden bu modelleri referans alarak birçok farklı model geliştirilmiştir. Bunlardan biri 1971 yılında J. Schwarz tarafından ortaya konmuştur [21]. Schwarz, zaman sabiti τ ve soğutma gücü P_{out} un ark iletkenliğinin bir

fonksiyonu olduğu bir model üzerinde çalışmıştır. Schwarz'a göre τ ve P_{out} iletkenliğin fonksiyonu olarak şu şekilde yazılabilir;

$$\tau = \tau_0 . g^{\alpha} \quad \textbf{(3.26a)}$$

$$P_{out} = P_0 . g^{\beta} \quad \textbf{(3.27b)}$$

Model bu tanımlamalardan sonra yazıldığında

$$\frac{1}{g} . \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0 . g^{\alpha}} \left(\frac{g . u^2}{P_0 . g^{\beta}} - 1 \right) \quad \textbf{(3.28)}$$

halini alır. Böylece model deneysel verilere uyarlanabilir hale gelir.

Schwarz modeli dört parametreden oluşur:

1. τ_0, zaman sabiti ifadesinin sabit kısmı
2. α, zaman sabiti ifadesinin üstel katsayısı
3. P_0, soğutma gücü ifadesinin sabit kısmı
4. β,soğutma gücü ifadesinin üstel katsayısı

τ sabit olmamasına rağmen pratikte zaman sabiti olarak kabul edilir. Denklem **(3.26a) ve (3.27b)**'nin fiziksel bir kanıtı (veya ispatı) yoktur. Bu tür matematiksel bağıntılar ark modelinin deneysel verilerle (osiloskop görüntüleri ile) uyuşması için tanımlanır. Bunun doğal bir sonucu modeldeki dört parametrenin de uygun parametre uydurma süreçleri ile tanımlanmış olmalarıdır.

Mayr ve Cassie ark modelleri Schwarz modelinin özel durumlarından türetilebilirler. Mayr modeli zaman sabiti ve soğutma gücü ifadelerindeki iletkenliğin matematiksel bağlılığı yok edilerek elde edilir. Bu durum α = β = 0 durumu için geçerlidir. Bu durumda τ_0 ve P_0, τ ve P_{out} olarak tanımlanır. Diğer taraftan α = 0 ve β = 1 durumu ise τ_0 ve P_0'ı, τ ve u_0^2 olarak tanımlar ve Cassie ark modeli elde edilir.

3.4 KEMA Ark Modeli

Ark üzerinde yapılan çalışmalarda daha gerçekçi sonuçlar almak ve hesaplamaları geliştirmek için daha ileri bir ark modeli olan KEMA ark modeli geliştirilmiştir [21]. KEMA modeli klasik Mayr ve Cassie modeli denklemlerini temel alır. Arkın iç kısmını temsil edecek şekilde seri haldeki üç Mayr modeli olarak tanımlanabilir. Her alt modelin kendine ait bir zaman sabiti (T_i), $\Pi_i[I^{\lambda-1}.U^{3-\lambda}]$ şeklinde ifade edilebilen kayıp güç ile ilgili bir büyüklük ve boyutsuz model parametresi (λ_i) vardır.

Bu parametreler ile KEMA modeli şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{dG_i}{dt} = \frac{1}{\Pi_i . T_i} . G_i^{\lambda_i} U_i^2 - \frac{1}{T_i} . G_i \qquad i = 1,2,3 \tag{3.29}$$

G_i ve U_i, i. Alt modelin iletkenliği ve gerilimidir. Burada iki özel durum söz konusu olabilir. $\lambda = 2$ olması durumunda $\Pi = I.U = P_{out}$ [W] a eşit olur ve model Mayr modeli halini alır. $\lambda = 1$ olması durumunda ise $\Pi = U_0^2$ [V] olur ve model bu durumda Cassie modeline dönüşmüş olur. Bu iki duruma bakarak KEMA modeli için Mayr ve Cassie ark modellerinin genişletilmiş bir hali olduğunu söyleyebiliriz.

Tüm model üç alt modelden oluştuğu için modeldeki iletkenlik, akım ve gerilim ifadeleri şöyle yazılabilir:

$$\frac{1}{G} = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{G_i} \tag{3.30a}$$

$$U = \sum_{i=1}^{3} U_i \tag{3.30b}$$

$$I = G.U \tag{3.30c}$$

KEMA modeli her alt modelde üç parametre olmak üzere (T_i, Π_i ve λ_i) toplamda dokuz parametreye sahiptir. Bunlardan üç tanesi(λ_1, λ_2, λ_3) sabittir. Üç tanesi(T_2, T_3, Π_3) ampirik bir formüle göre hesaplanır. Bu altı parametrenin değerleri şu şekildedir:

$\lambda_1 = 1{,}4375$

$\lambda_2 = 1{,}9$

$\lambda_3 = 2{,}0$

$T_2 = \frac{T_1}{k_1}$

$T_3 = \frac{T_2}{k_2}$

$\Pi_3 = k_3 . \Pi_2$

İlk alt model Cassie-Mayr modeli, ikincisi Mayr modeli ve sonuncu alt model de Cassie modeli olarak seçilir. λ_i değerleri tersler boyunca değişmemesine rağmen kesici parametreleri olan k_1, k_2 ve k_3 kesicinin tasarımına bağlı olarak değişebilir. Geri kalan parametreler T_1, Π_1, Π_3 serbest parametreler olarak adlandırılır. Bunlar

kesicinin durumunu gösterir. Bu parametrelerin değişim aralıkları çok geniş olduğu için deney koşullarına göre farklılıklar gösterirler.

KEMA modeli ile herhangi bir giriş parametresine bağlı olmaksızın ark gerilimini hesaplanabilir. Bu durum hesaplanan gerilimin gerçeğe daha yakın ve laboratuarda ölçülen gerilimlerle uyuştuğu anlamına da gelir. Ayrıca KEMA modeli deneysel verilere çok daha yakın sonuçlar vermektedir [21].

4. ARK MODELLERİNİN MATLAB-SİMULİNK BENZETİMİ

Bu uygulamanın yapılış amacı parametreleri değiştirmeksizin modellerin farklılıklarını ortaya koyabilmektir. Bunu yapabilmek için endüktif bir devre modeli MATLAB simulinkte oluşturulmuştur. Devre 50 Hz alternatif gerilim kaynağı, endüktif karakteristik için seri endüktans ve çıkış dalga şekillerini düzeltmek için bir filtreden oluşmaktadır.

Arkı oluşturmak için simulink içindeki ark modelleri araç kutusu (toolbox) kullanılmıştır. Buradaki çeşitli ark modelleri devreye eklenerek her bir ark modeli için farklı bir sistem oluşturulmuştur. Farklı ark modelleri için araç kutusunda farklı parametre değerleri ve elektriksel büyüklükler tanımlanmıştır. Simülasyon parametreleri olan başlangıç zamanı, bitiş zamanı, adım büyüklüğü, tolerans değerleri şu şekilde verilmiştir:

Simülasyonun başlangıç zamanı: 0.0 ms

Simülasyonun bitiş zamanı: 40 ms

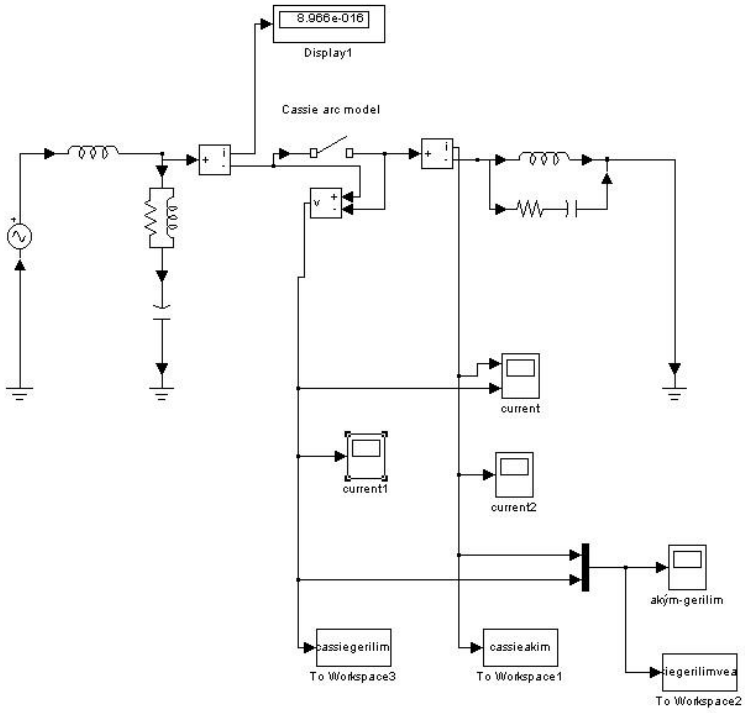
Adım büyüklüğü (step size): 1.10^{-6}

Tolerans: 1.10^{-3}

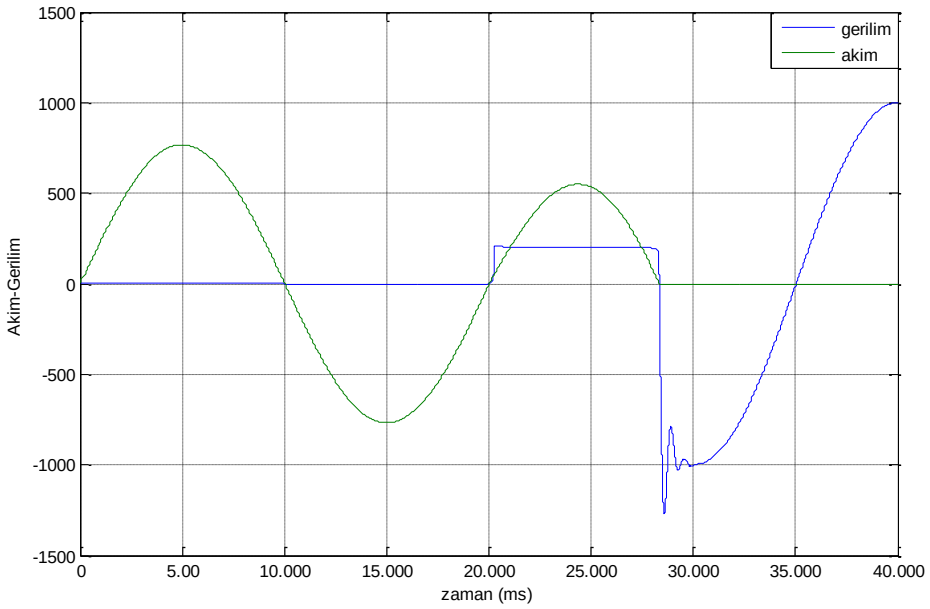
Simülasyonlarda 1 tam periyot (20 ms) sonunda kontakların açıldığı durum incelenmiştir.

4.1 Cassie ark modeli için simülasyon sonuçları

Şekil 4.1'de Cassie ark modeline ilişkin simulink modeli görülmektedir. Bu sistemin simülasyonu sonucunda elde edilen akım ve gerilimin dalga şekilleri Şekil 4.2'de verilmiştir.

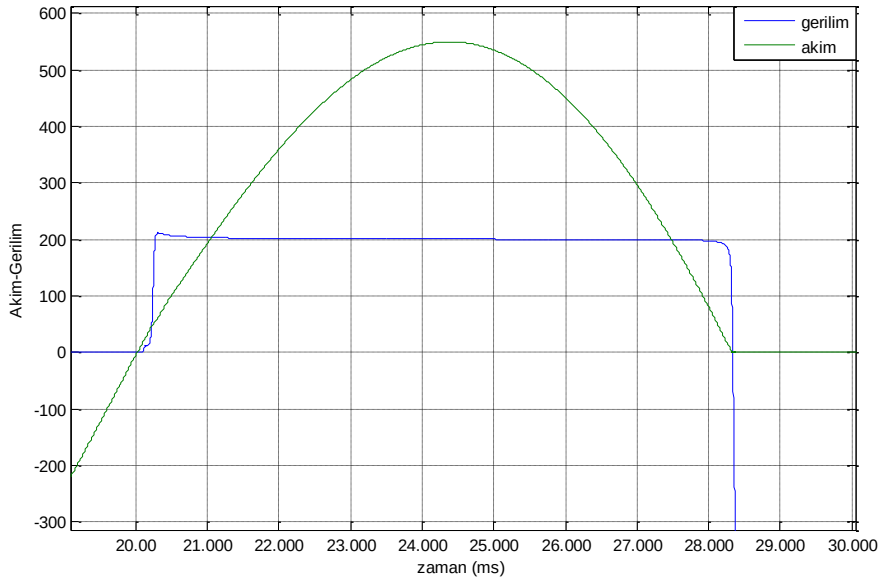


Şekil 4.1: Cassie ark modeli için kullanılan devre modeli



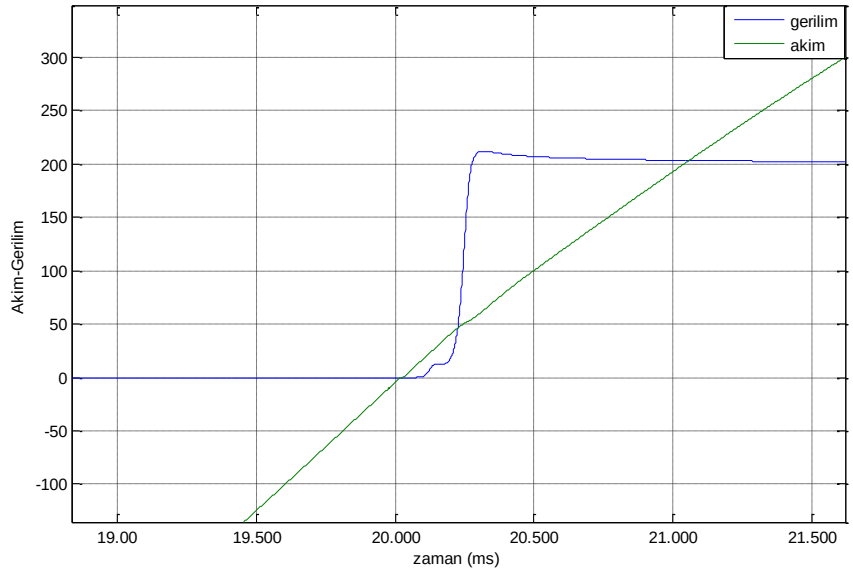
Şekil 4.2: Cassie ark modelinin açma anındaki akın ve gerilim eğrileri

Şekil 4.2'den görüldüğü gibi kontaklar kapalı iken kontaklar arası gerilimin sıfır olduğu görülmektedir. Kontaklar açıldıktan sonra ise akımın sıfıra düşüp gerilimin şebeke gerilimine yükseldiği görülmektedir.



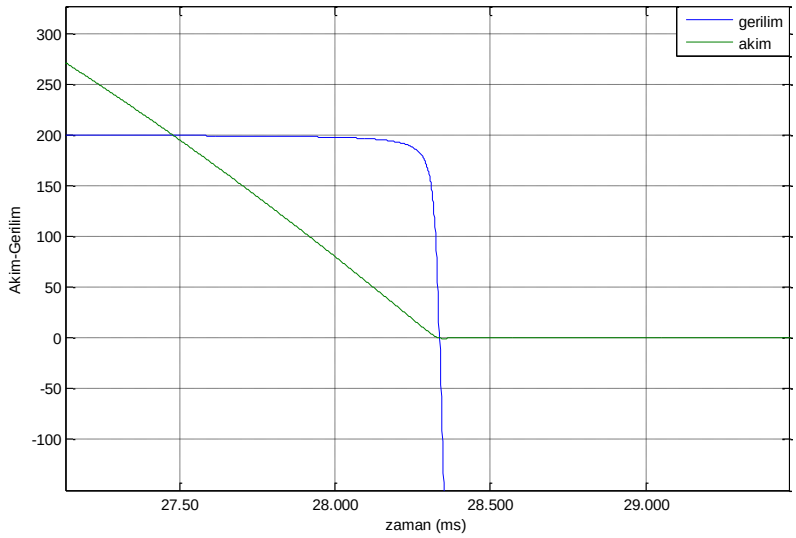
Şekil 4.3: Cassie modelinin bir periyottaki karakteristiği

Şekil 4.3'te ise kontakların açıldığı andaki akım ve gerilim dalga şekilleri daha detaylı olarak görülmektedir. 20 ms'de kontaklar açıldığında gerilimin birden 200 V civarına yükseldiği ve burada ark sönene kadar kaldığı görülmektedir.



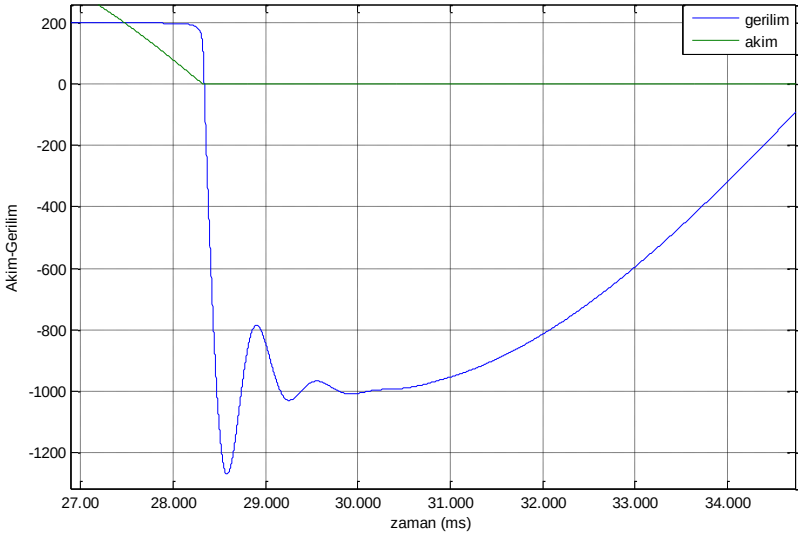
Şekil 4.4: Cassie modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi

Şekil 4.4'te arkın oluştuğu 20 ms civarı ayrıntılı olarak görülmektedir. Gerilimin yükselişi yani arkın oluşumu 20 ms anında olmamaktadır. Kontaklar arasındaki havanın iyonize olması için geçen süre arkın 20 ms'den biraz daha geç oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum Şekil 4.5'de görülmektedir.



Şekil 4.5: Cassie modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi

20. ms'de kontaklar açılıp ark oluştuktan sonra yarım periyot geçmeden akımın tamamen kesildiği ve arkın söndüğü görülmüştür. Akımın tamamen kesildiği ana gelmeden yaklaşık 0,4 ms önce, gerilim azalma periyoduna girmiştir. 0,4 ms içerisinde ise ani olarak sıfıra indikten sonra -1250 V'a kadar düşüp daha sonra şebeke gerilimine doğru salınım yaparak yükselmeye başlamıştır. Bu durum Şekil 4.6'da açıkça görülmektedir.



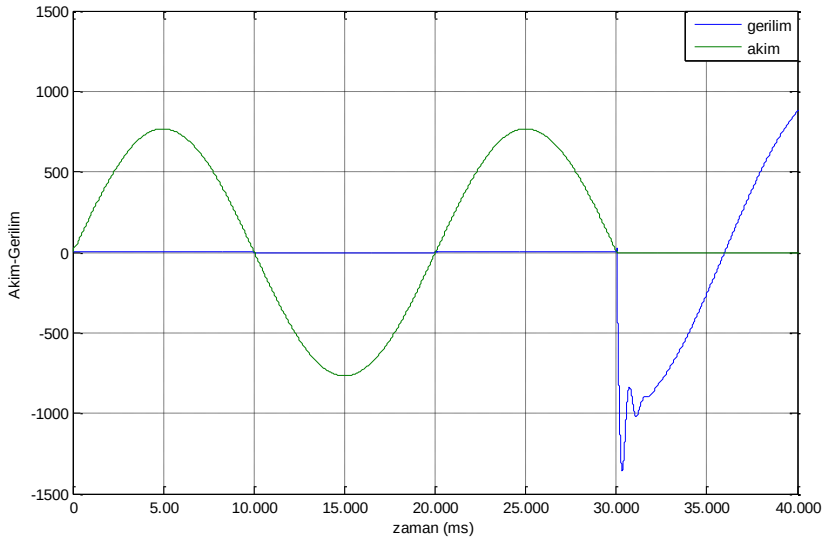
Şekil 4.6: Cassie modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi

Akım kontaklar açılmaya başladıktan yarım periyot sonra sıfıra ulaştığı grafiklerden görülmektedir. Ark başlangıcında akım herhangi bir salımın yapmadan yükselmiştir.

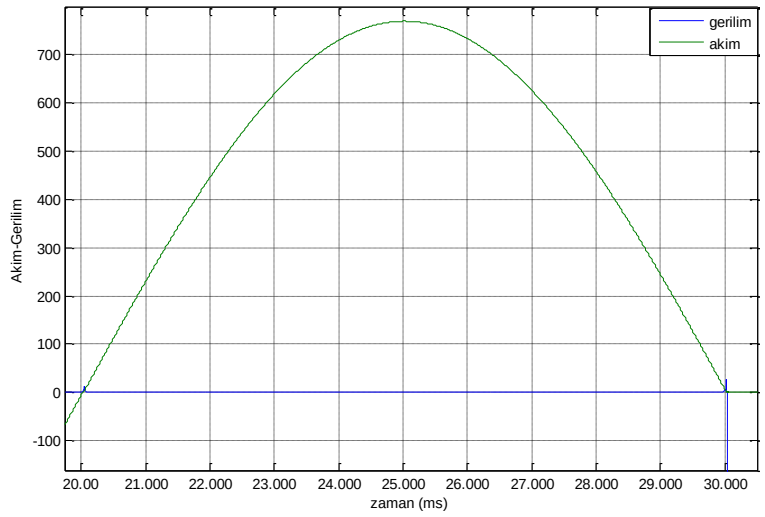
Akım aynı zamanda ark kesildikten sonra sıfır noktasına hiçbir salınım yapmadan hemen sıfıra oturduğu belirlenmiştir.

4.2 Mayr ark modeli için simülasyon sonuçları

Cassie modelinde kullanılan simulink modeli ve devre elemanları, karşılaştırma yapılabilmesi için aynı kalmak koşuluyla sisteme Mayr ark modeli uygulanmıştır. Şekil 4.7'de t = 20 ms anında kontakların ayrılmasından sonra gerilimin ve akımın dalga şekilleri görülmektedir.

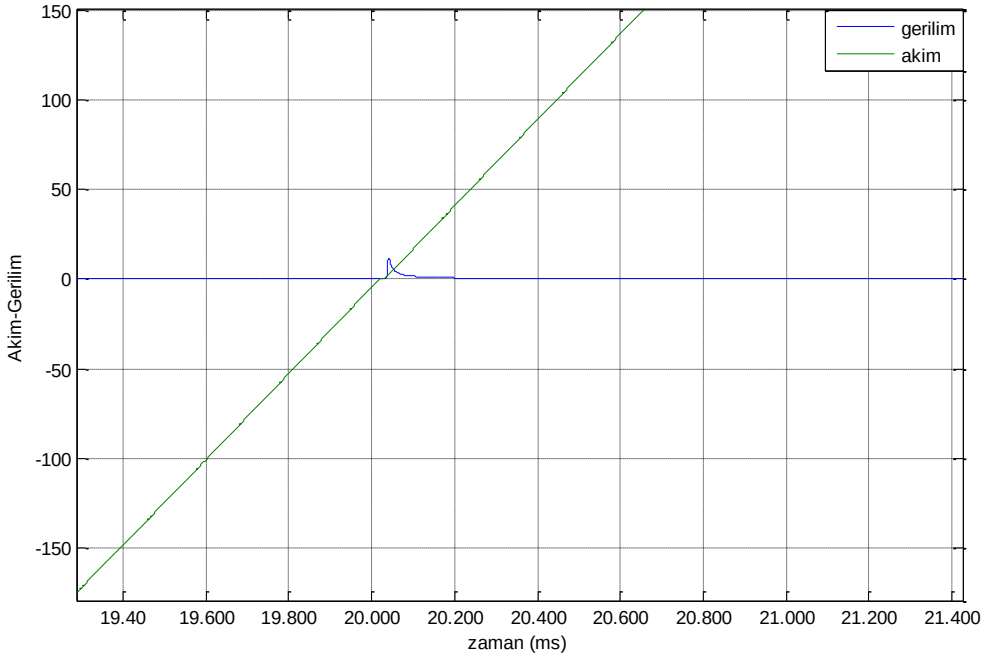


Şekil 4.7: Mayr ark modelinin açma anındaki akın ve gerilim eğrileri



Şekil 4.8: Mayr modelinin bir periyottaki karakteristiği

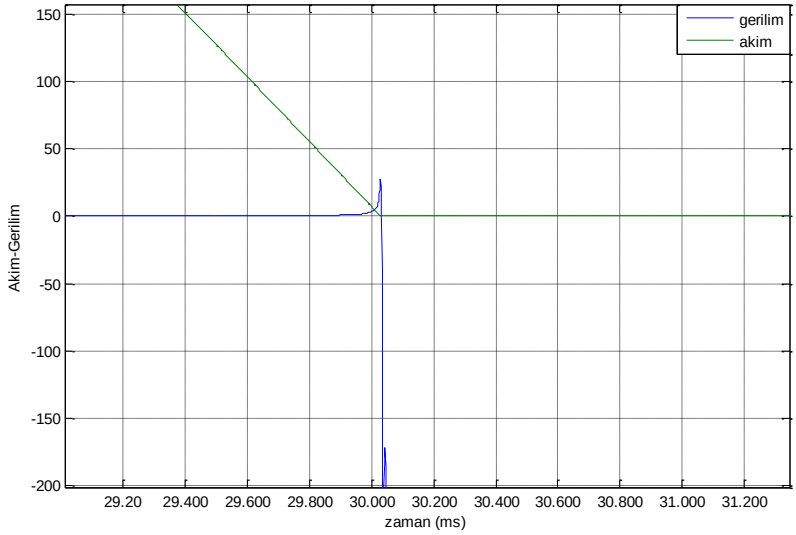
Dalga şekilleri genel olarak Cassie modeli ile benzerlik göstermesine rağmen kontakların açıldığı an daha yakından incelendiğinde Şekil 4.8'de gerilimin Cassie modelindeki kadar yükselemediği görülmüştür. Gerilim seviyesine bakıldığında, kontaklar açıldığı anda gerilim 10 V'a kadar yükselmiş ve ark oluşumu ile beraber sönümlenerek çok çabuk sıfıra a kadar inmiştir. Daha sonra arkın sönmeye başlaması ile beraber gerilim tekrardan yükselmeye başlamış ve 25-30V seviyelerine geldikten sonra arkın tam olarak sönmesi sonrası ani olarak -1350 V'a kadar geldikten sonra şebeke geriliminde sinüzoidal dalga şekline ulaşmıştır.



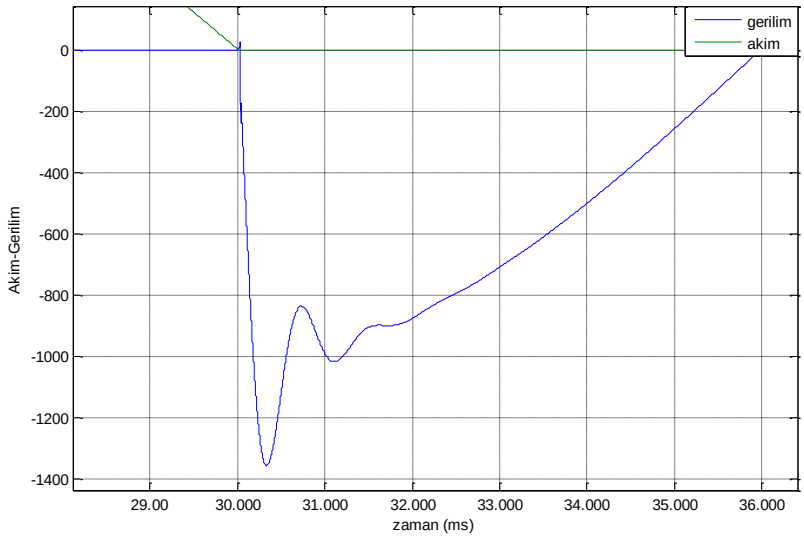
Şekil 4.9: Mayr modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi

Cassie modelindeki gibi Mayr modelinde de kontakların açılması ile arkın oluşumu arasında küçük de olsa bir süre geçmektedir. Şekil 4.9'da arkın kontaklar açıldıktan 0,04 ms'de oluştuğu görülmektedir. Akımın kesildiği an ise Şekil 4.10'da görülmektedir. Bu modelde arkın tamamen sönüp gerilimin şebeke gerilimi halini alması yarım periyottan biraz uzun sürmüştür.

Toparlanma gerilimi de modellerin diferansiyel denklemlerinin birbirlerine benzemelerinden dolayı benzer gerilim seviyelerinde çıkmıştır. Cassie modelinden farkı ise toparlanma gerilimine düşüşün başlama zamanının daha geç olmasıdır. Bu da bu modelin kontakların ayrılmasına daha geç tepki verdiğini gösterir.



Şekil 4.10: Mayr modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi



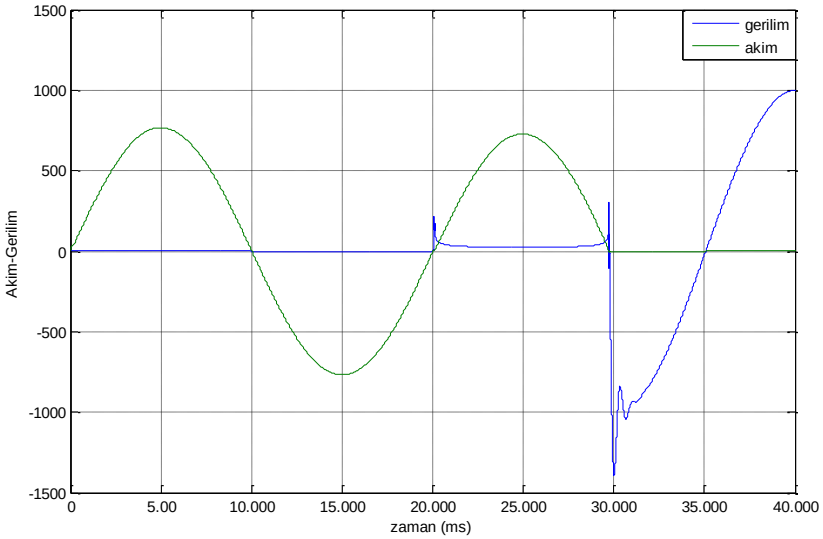
Şekil 4.11: Mayr modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi

Akımın davranışına bakıldığında ise arkın oluşumu sırasında hiçbir bozulma olmadan yükseldiği ve aynı şekilde bozulmadan kesildiği görülmektedir (Şekil 4.11).

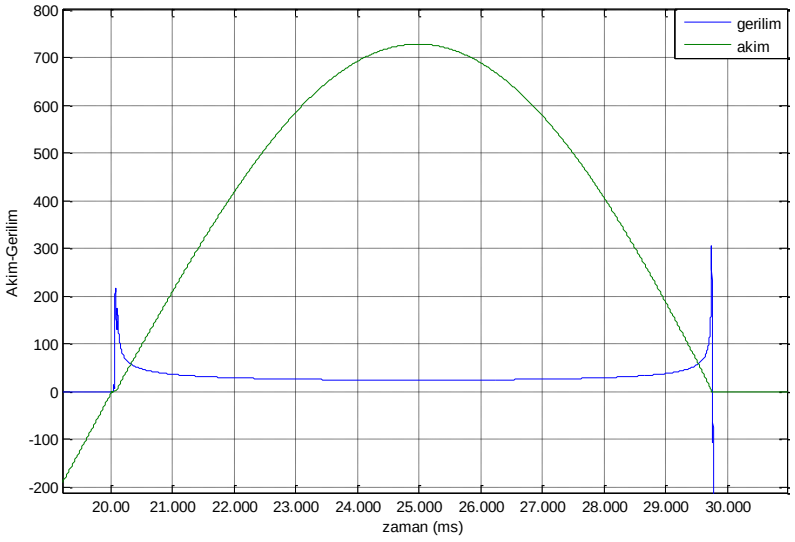
4.3 KEMA ark modeli için simülasyon sonuçları

Şekil 4.12'de KEMA modeline ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri görülmektedir. t = 20 ms anında başlayan kontakların ayrılmasından çok kısa bir süre sonra gerilim 210 V'a yükselmiş, sonra bir azalma periyoduna girmiş ve oluşmasından itibaren ilk 1 ms içerisinde 25 V'a oturmuştur. Daha sonra akımın kesilme durumunda ise gerilim tekrardan yükselmeye başlayarak 300 V'u geçtikten sonra ani olarak

azalmıştır. Diğer modellerde olduğu gibi kontaklar arasındaki ark söndükten sonra gerilimin kaynak ile aynı sinüzoidal hareketi yaptığı görülmüştür.



Şekil 4.12: KEMA ark modelinin açma anındaki akım ve gerilim eğrileri

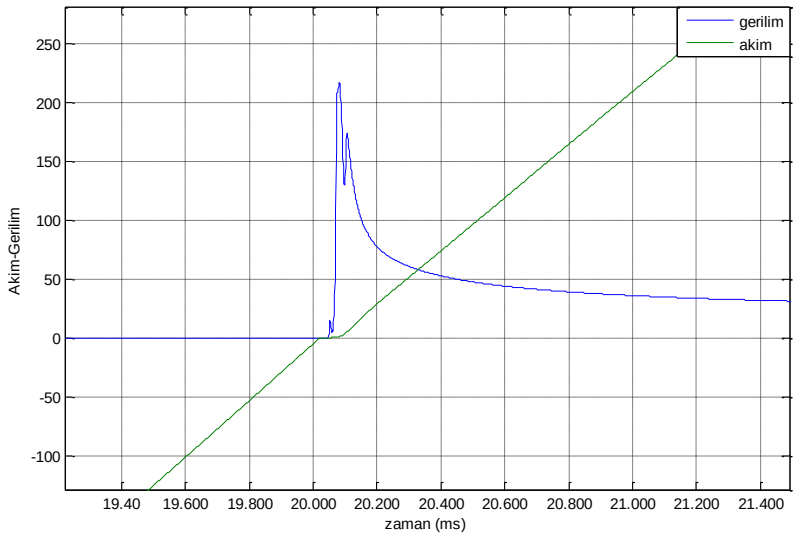


Şekil 4.13: KEMA modelinin bir periyottaki karakteristiği

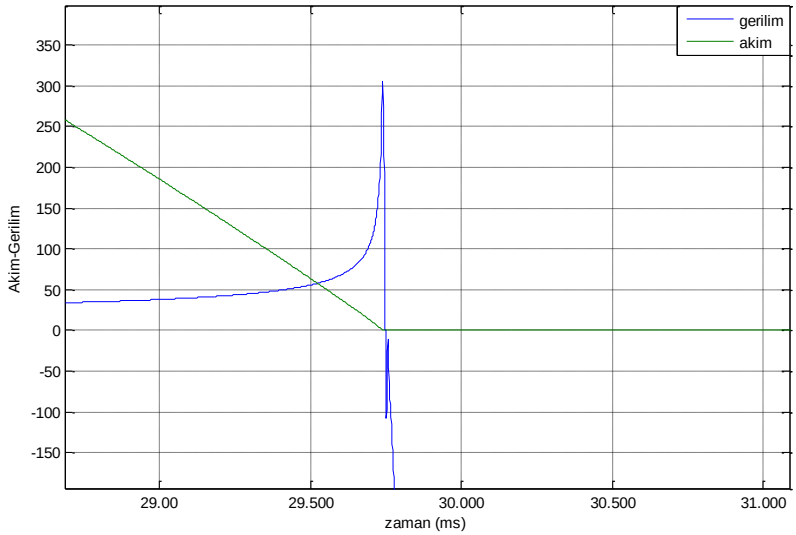
Gerilimin dalga şeklini daha detaylı incelediğimizde Mayr ve Cassie modellerinden daha farklı bir davranış sergilediği rahatça görülebilir. Diğer modellerde gerilim kontaklar açıldığı anda ani olarak bir yükseliş gösterdikten sonra daha düşük bir gerilim seviyesine gene ani olarak iner ve arkın sönmesine yakın tekrardan ani olarak bir gerilim değerine yükselir. KEMA modelinde ise bu yükseliş ve düşüşüler bu

kadar ani ve keskin olmaz. Kontaklar açıldıktan sonraki zamanda gerilim ilk önce çok küçük bir yükseliş-azalış gösterir. Hemen sonrasında büyük bir artış gösterdikten sonra çok kısa süreli bir salımın yapar ve azalarak belirli bir değere oturur.

Ark oluştuktan sonra gerilimin ani olarak yükselip sıfıra düştüğü diğer modellerden farklı olarak ilk andaki değerinden zamanla azalarak 25V civarlarında oturduğu belirlenmiştir.



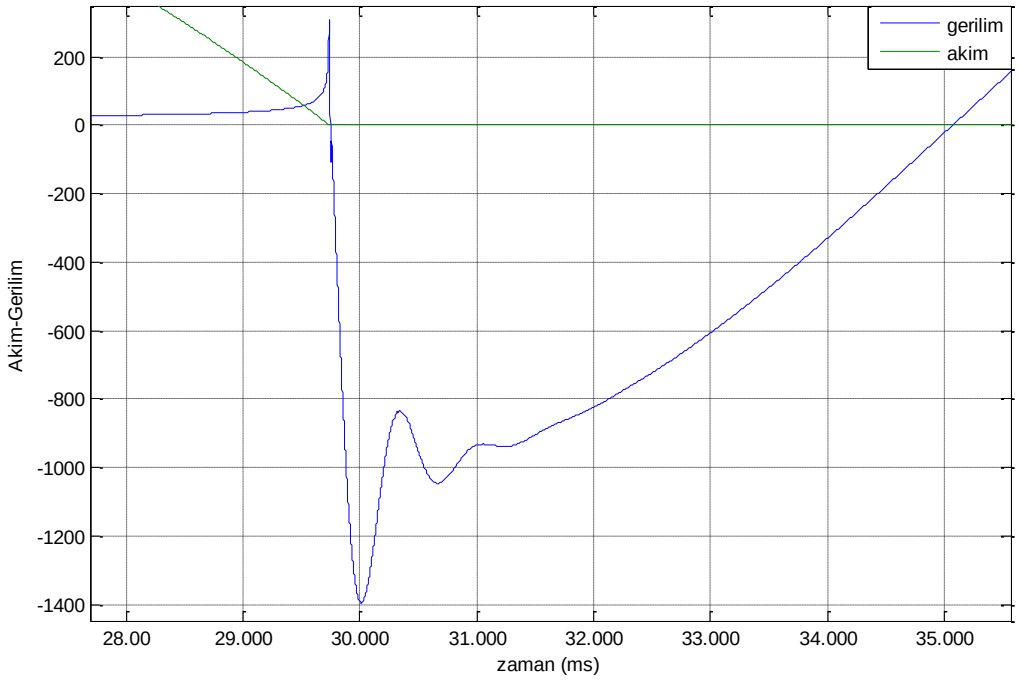
Şekil 4.14: KEMA modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi



Şekil 4.15: KEMA modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi

Geçici toparlanma gerilimi de diğer modellerden farklı olarak daha yüksek bir değerdedir. Gerilim toparlanma gerilimine doğru negatif tarafta yükselirken -1400 V

etrafında -800 V'a doğru bir yükseliş yapmış ve daha sonra şebeke gerilimi olarak devam etmiştir.



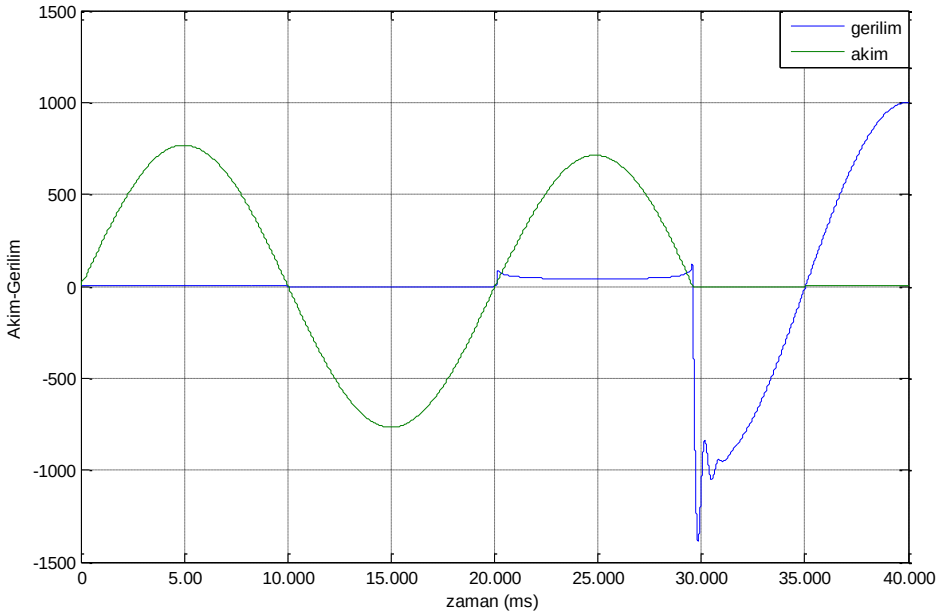
Şekil 4.16: KEMA modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi

Akım ise kontaklar ayrıldıktan sonra çok kısa süreliğine sıfırda sabit kaldıktan sonra gerilimin artması ile beraber yükselmeye başlamıştır. Akım herhangi bir değişikliğe uğramadan yükselişine devam etmiş ve yarım periyot bitmeden ark sönüp akım sıfır değerine ulaşmıştır.

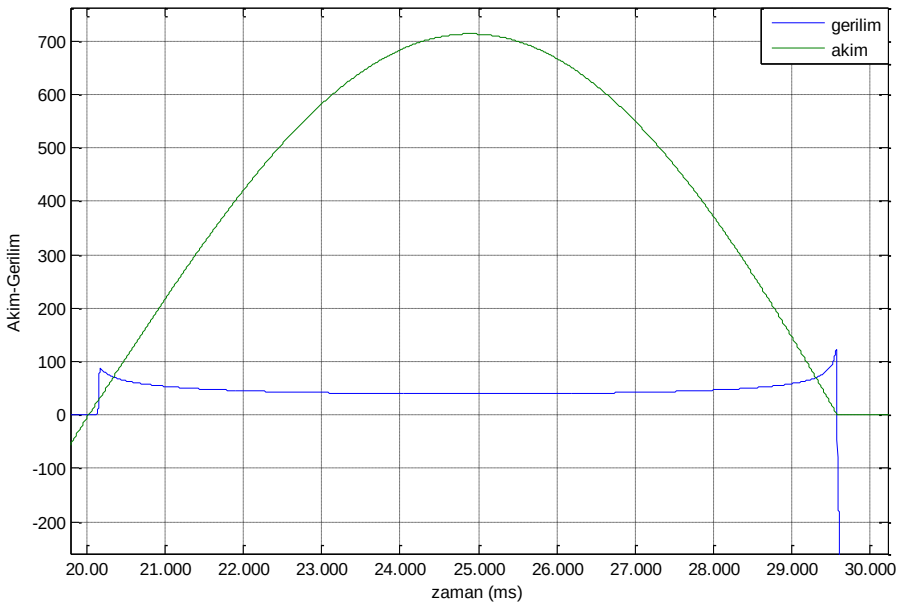
4.4 Schwarz ark modeli için simülasyon sonuçları

Mayr ve Cassie modeli nasıl birbirlerine hem matematiksel model olarak benzemelerinden ötürü simülasyon sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Aynı durum model olarak birbirlerine benzemeseler de KEMA ve Schwarz modelleri için de geçerlidir.

20.ms'de kontaklar açılmaya başladığında gerilim 4800 V civarlarına yükseldikten sonra 2250 V'a kadar azaldıktan sonra tekrardan bir yükselişe geçiyor ve 6600 V'a ulaştıktan sonra arkın sönmesi ile düşmeye başlar ve sonunda şebeke gerilimi dalga şekli ile hareketine devam eder.

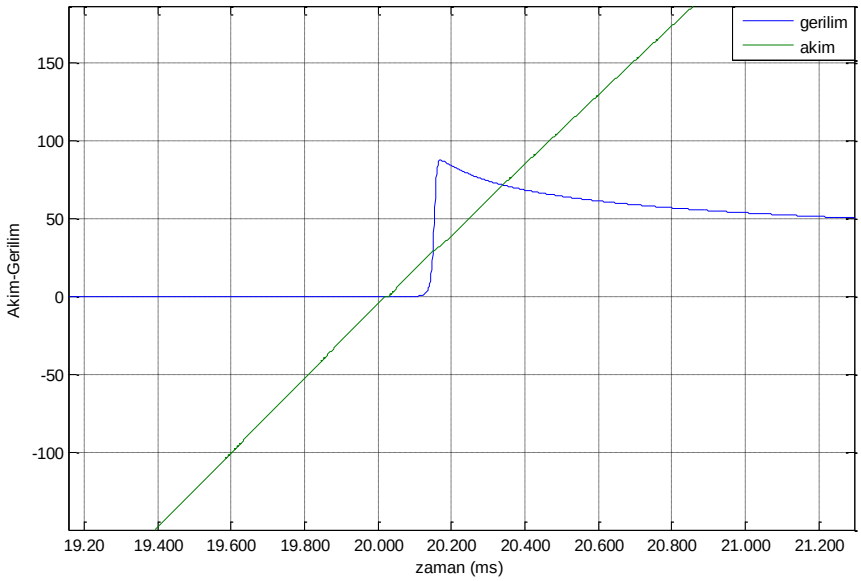


Şekil 4.17: Schwarz ark modelinin açma anındaki akın ve gerilim eğrileri



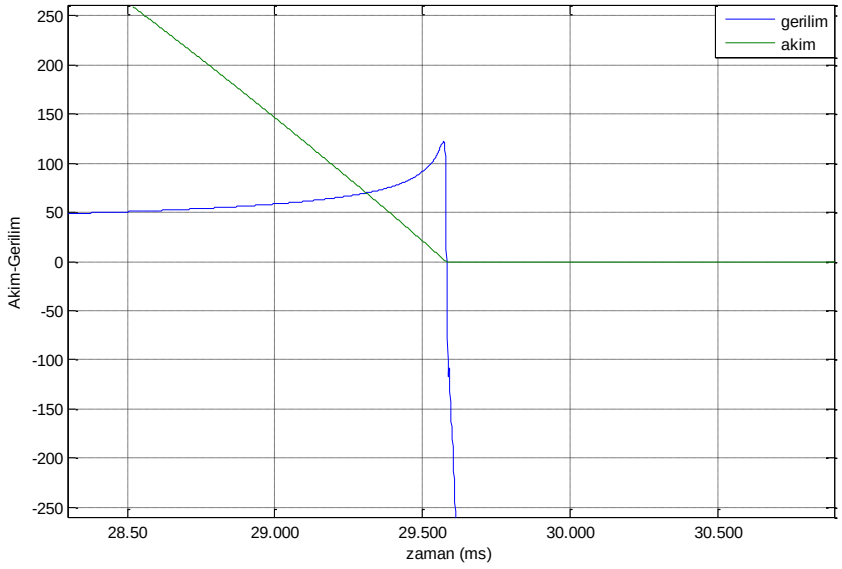
Şekil 4.18: Schwarz modelinin bir periyottaki karakteristiği

Ark oluşumu sırasında gerilimin dalga şeklini daha yakından incelendiğinde kontaklar açıldıktan sonra bir süre gerilimde herhangi bir yükseliş olmamış 0.2 ms geçtiksen sonra ise ani bir yükseliş gözlemlenmiştir. Fakat bu yükselme KEMA ark modelindeki kadar yüksek değildir. Ayrıca diğer modellerden farklı olarak gerilimin yükselişi doğrudan ve kesintisiz olmuştur.



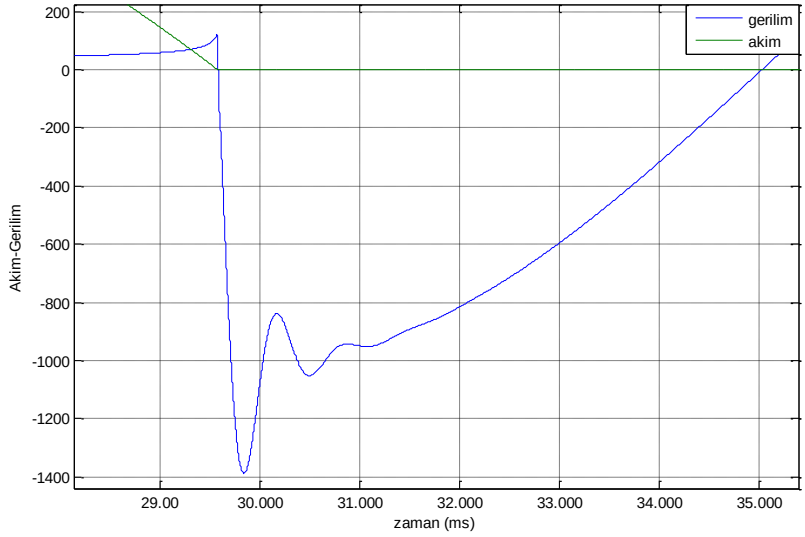
Şekil 4.19: Schwarz modelinin ark oluşumu anındaki gerilim yükselişi

Ark söndükten sonra gerilimin azalışı ise yükselme sırasında gösterdiği davranışa benzerdir. Ark söndükten sonra gerilim belli bir tepe değer yaptıktan sonra ani olarak geçici toparlanma gerilimine kadar düzgün bir şekilde azalmaya başlar.



Şekil 4.20: Schwarz modelinin ark sönerken oluşan gerilim değişimi

Schwarz modelinin geçici toparlanma gerilimi KEMA modeli ile benzerlik göstermektedir. Farklı olarak toparlanma geriliminden sonraki düşüş bölümü daha düzgündür (sinüzoidale daha yakın).



Şekil 4.21: Schwarz modelinin ark söndükten sonra gerilim değişimi

Akım ark oluştuğu zaman da söndüğü anda da herhangi bir salımın göstermez. sıfır noktasına oturur ve herhangi bir ark sonrası akım oluşmadan sıfırda kalır.

4.5 Ark modellerinin matlab-simulink kullanarak karşılaştırılması

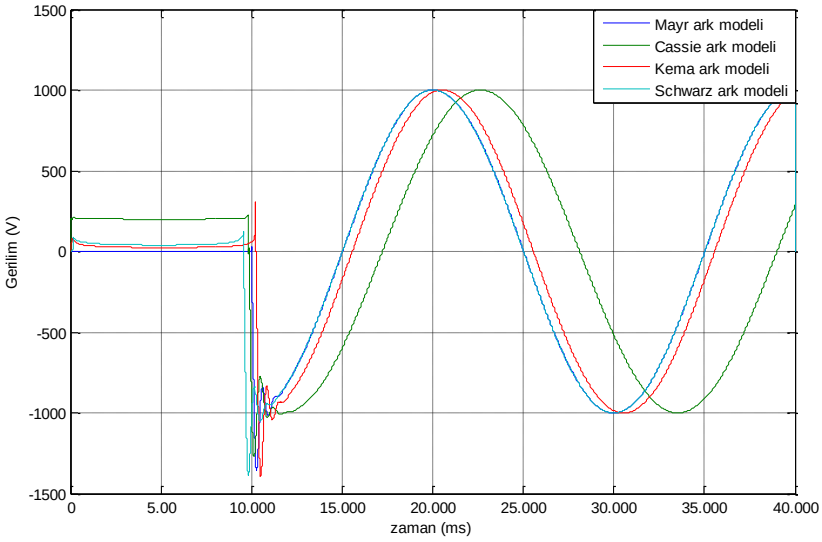
Bu bölümde bir önceki bölümde detaylı şekilde incelenen ark modellerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Bunun için incelenen dört modele ait simulink modellerinden bir karşılaştırma devresi oluşturulmuştur. Kontakların açma süreleri ayarlanabildiği için farklı zaman dilimleri için ark oluşturularak modeller arasındaki farklar gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bunu yaparken modellerin ve devrelerin parametreleri üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmayarak daha doğru karşılaştırma sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır.

50Hz frekanslı şebeke geriliminin uygulandığı sistem için ilk önce periyot sonu (20 ms) ve periyot başında (0 ms) kontakların açılması sağlanarak gerilimin sıfır geçişlerinde oluşan ark durumu için karşılaştırmalar verilmiştir. Daha sonra gerilimin sıfırdan farklı olduğu zaman dilimlerinde kontaklar açılarak bu durumda oluşan arkın farklı modeller için grafikleri birlikte verilerek karşılaştırılmıştır.

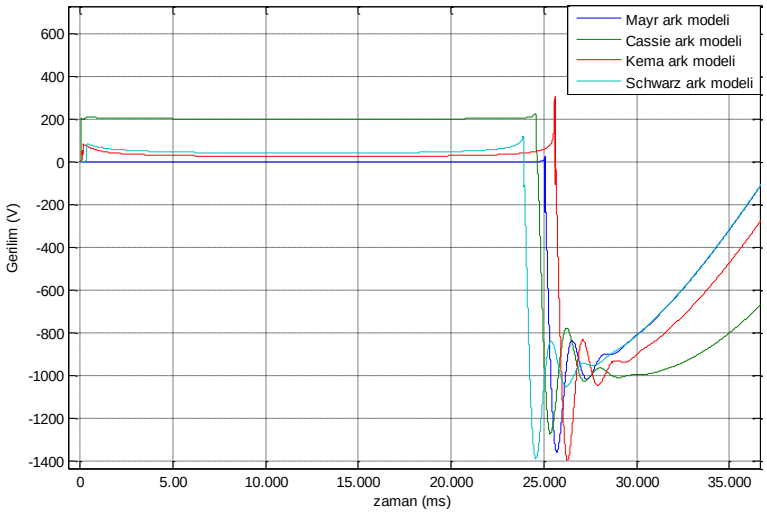
4.5.1 Sıfır geçişlerinde oluşan ark için:

Periyot başlangıcında (0 ms) kontakların açılması durumunda oluşan arkın gerilim dalga şekilleri farklı modeller için şekil 4.22'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği

gibi modellerde ark meydana gelmiş ve yarım periyot (10 ms) içerisinde sönmüştür. Modellerde sıfır geçişinde oluşan ark sönüp gerilim şebeke gerilimine ulaştığında dalga şekillerinin çakışmadığı görülmektedir. Bunu nedeni modellerin zaman sabitlerinin farklı olması ve bu nedenle arkın oluşması ve sönmesinin modellerde aynı zamanda meydana gelmemesidir.



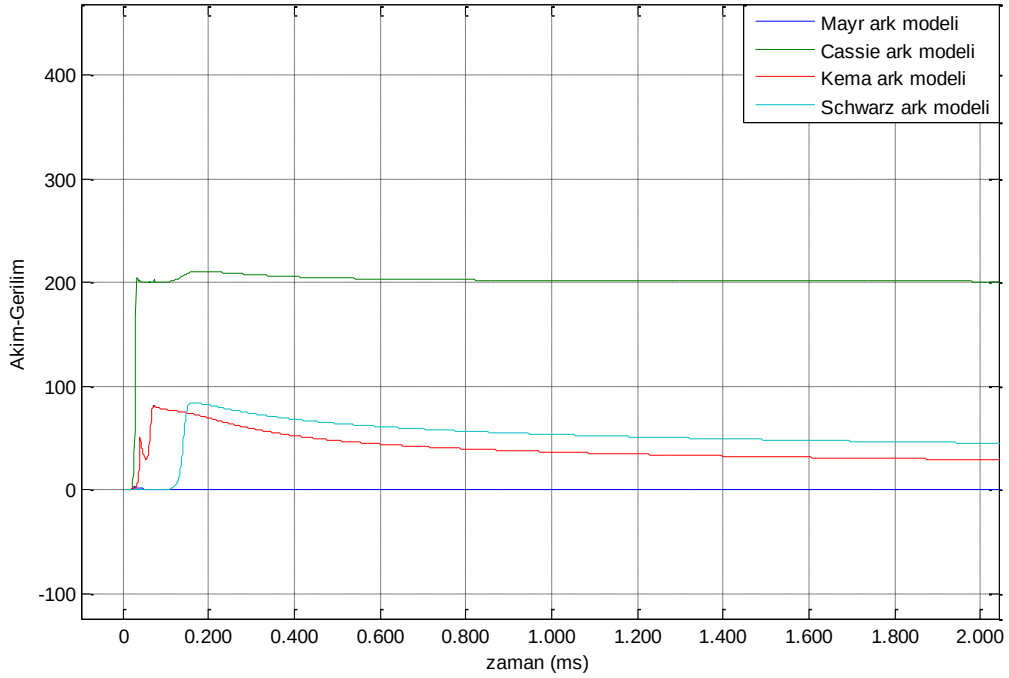
Şekil 4.22: 0 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması



Şekil 4.23: 0 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı)

Arkın oluştuğu zamandaki gerilimin yükselişine bakıldığında en büyük yükseliş Cassie modelinde oluşmuştur. Onu sırasıyla Schwarz, KEMA ve Mayr modelleri izlemiştir. Ayrıca kontakların açılmasına en erken reaksiyon veren model şekil

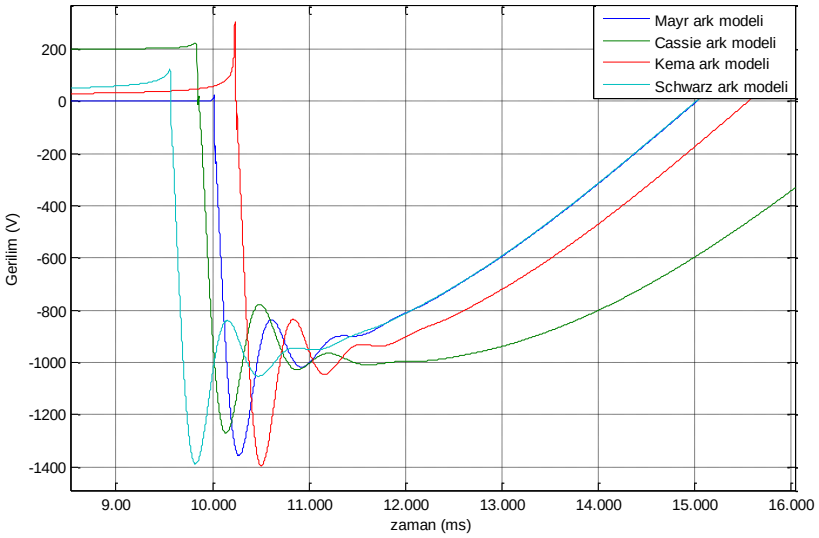
4.24'de görüldüğü gibi Cassie modelidir. En yavaş cevap veren ise Schwarz modelidir.



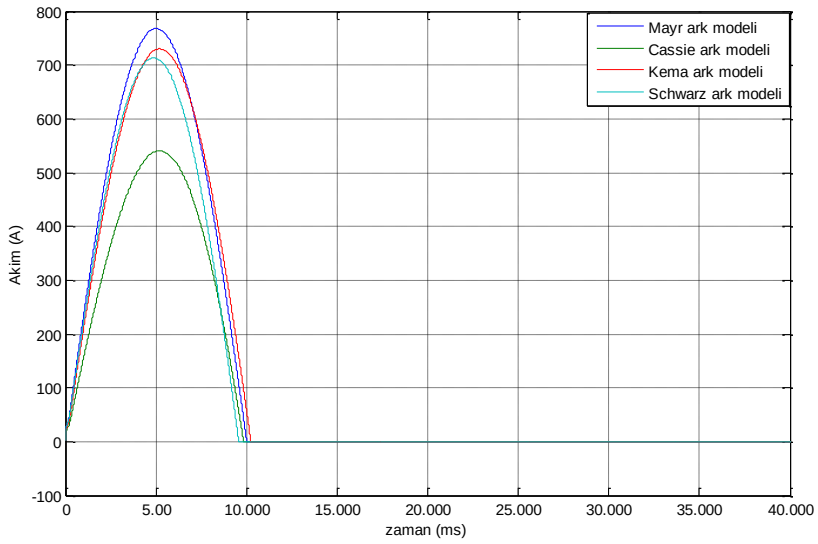
Şekil 4.24: 0 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması

Arkın sönme periyoduna girmesi ile gerilimde oluşan yükseliş arkın oluştuğu sıradaki gerilim yükselişinden farklı olarak KEMA modelinde en büyük değerine ulaşmıştır. Sönme zamanları göz önüne alındığında ise Schwarz modelinde arkın en erken söndüğü görülmektedir. KEMA modelinde ise ark en son sönmüştür. Oluşma ve sönme süreleri göz önüne alındığında ise Schwarz modelindeki ark en kısa süreli olmuş, KEMA modelindeki ark ise en uzun süreli olmuştur. Ayrıca modellerin geçici toparlanma gerilimleri karşılaştırıldığında aralarında belirleyici bir fark olmadığı, çok dikkatli incelendiğinde ise KEMA modeli için geçici toparlanma geriliminin en yüksek olduğu, Cassie modeli içinse en düşük olduğu görülür.

Akımlar karşılaştırıldığında ise ark sırasında en büyük akım değeri Mayr modelinde oluşur. En küçük akım ise Cassie modelinde meydana gelir. Ayrıca ilk önce sönen ark Schwarz modelinde oluşan ark olduğu için akım değeri ilk önce bu modelde sıfıra ulaşmış ve bu halde kalmıştır. En son sönen KEMA modeli olduğu için akım bu modelde en son sıfıra ulaşmıştır.



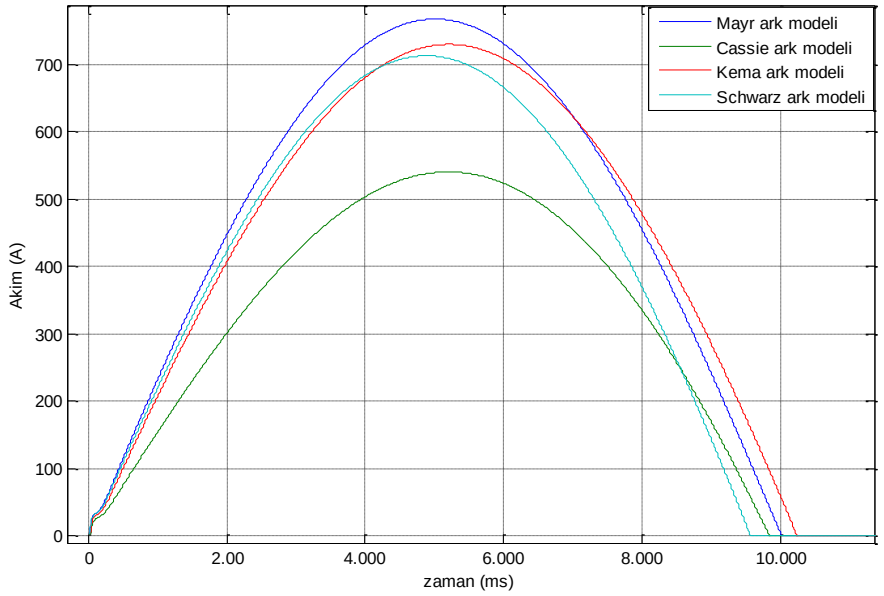
Şekil 4.25: 0 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması



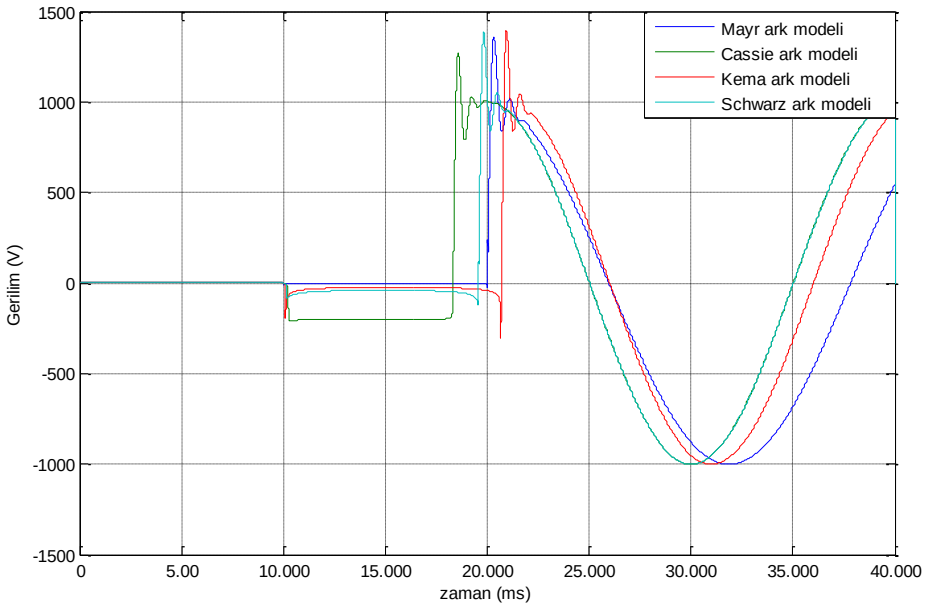
Şekil 4.26: 0 ms'de oluşan ark için akım karşılaştırması

Şekilde akım karakteristikleri ayrıntılı olarak görülmektedir. Arkın en geç oluştuğu Schwarz modelinde akım KEMA modelinden daha sonra tepe değerine ulaşsa da bu modelden çok daha önce sıfıra inmiştir.

Kontakların yarım periyotta açıldığı (10 ms) durumda sıfır anında oluşan arkta olduğu gibi yaklaşık yarım periyot sonunda bütün modellerde ark sönmüştür. Ark gerilimi şebeke gerilimini takip ettiği ve 10 ms ile beraber şebeke gerilimi negatif yarı-dalgaya geçtiği için ark gerilimi negatif tarafta oluşmuştur. Bunun sonucunda geçici toparlanma gerilimi pozitif yarı-dalgada oluşur.

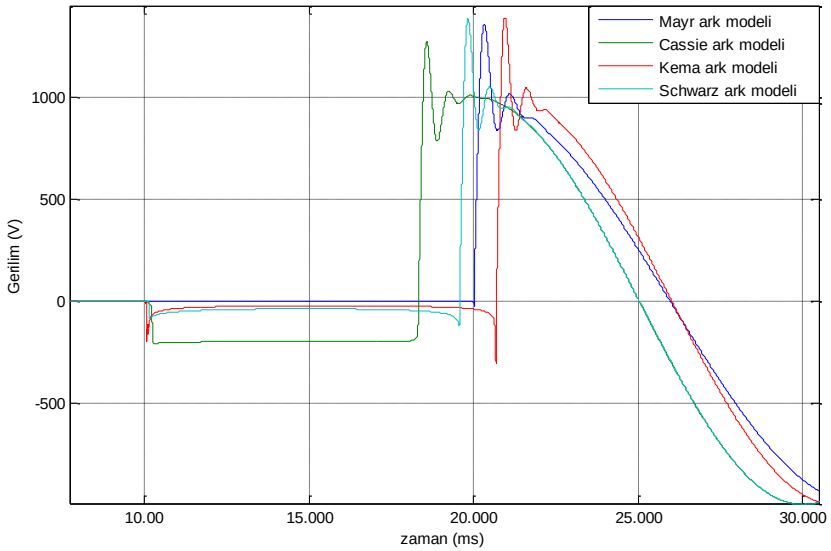


Şekil 4.27: 0 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması

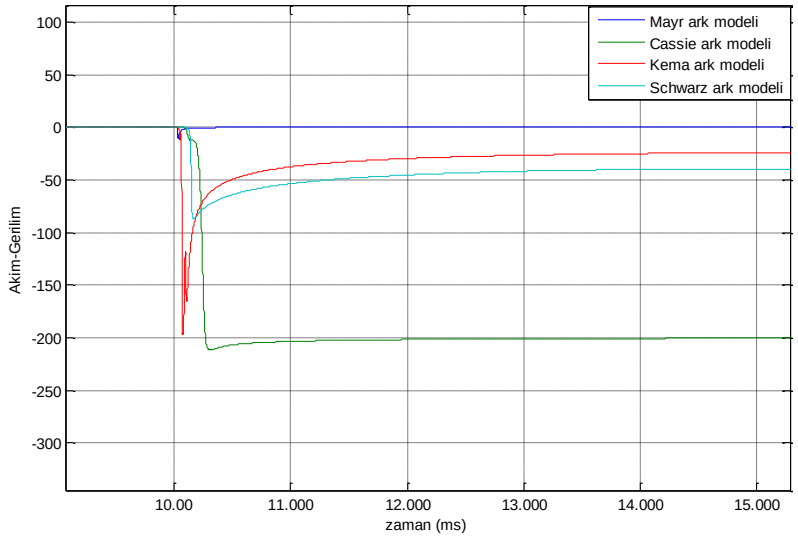


Şekil 4.28: 10 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması

Ark başlangıç gerilimleri incelendiğinde; 0 ms'de açılmadan farklı olarak 10 ms'de kontaklar açıldığında Cassie ve KEMA modellerinde en yüksek gerilim artışı gözlenmiştir. Arkın oluşma süreleri bakımından modeller arasında fark olmazken arkın sönme süreleri arasında belirgin bir fark vardır. Bu durum için Cassie modelindeki ark en erken sönerken, KEMA modelindeki ark en geç sönmüştür.



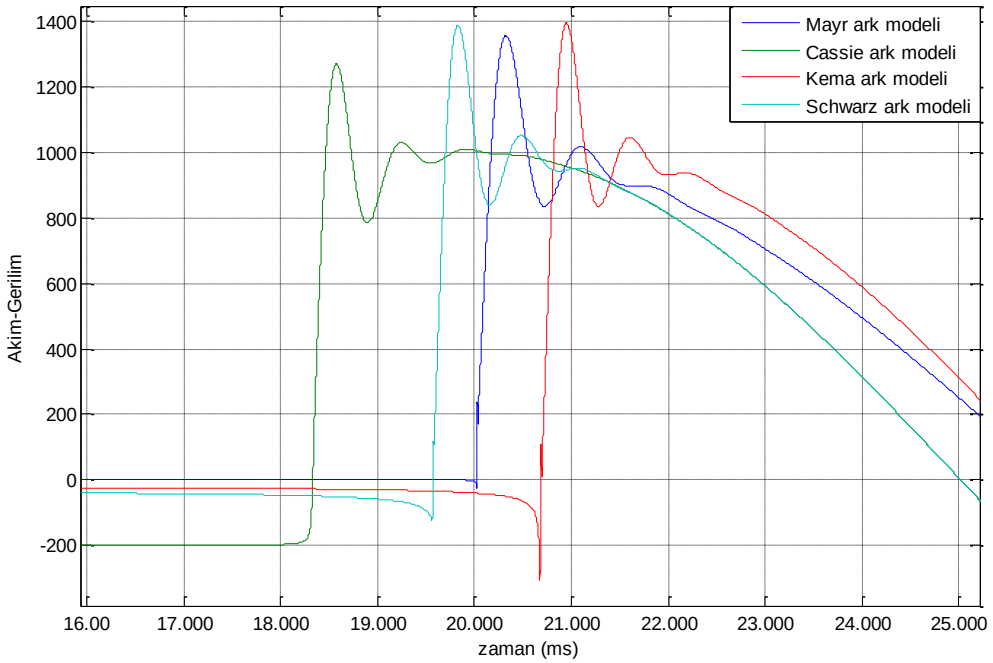
Şekil 4.29: 10 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı)



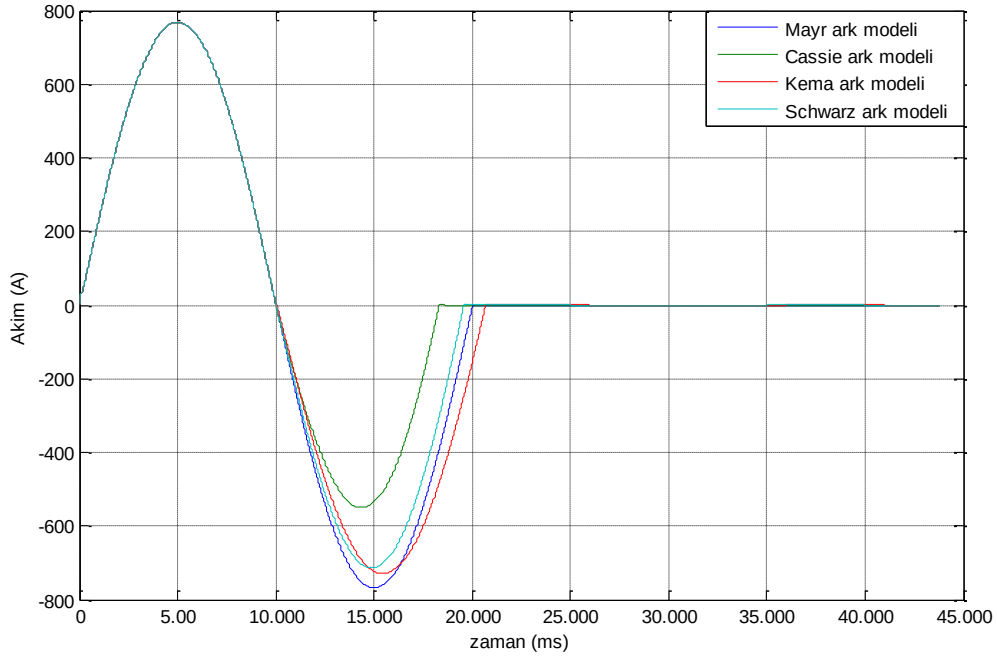
Şekil 4.30: 10 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması

Şekil 4.32 ve 4.33'de 10 ms'de açılan kontaklar için arkın akım karakteristikleri görülmektedir. Mayr ark modelinin en yüksek akım değerine ulaştığı grafikte en düşük akım değerinde kalan model Cassie modelidir.

Kontakların periyot sonunda açılmaya başladığı durumda dört modelde de ark oluşumu görülmektedir. Diğer sıfır noktası arklarından farklı olarak periyot sonunda açılan kontaklarda Cassie modelinde de ark oluşmuş ve yarım periyot sonra sönmüştür.

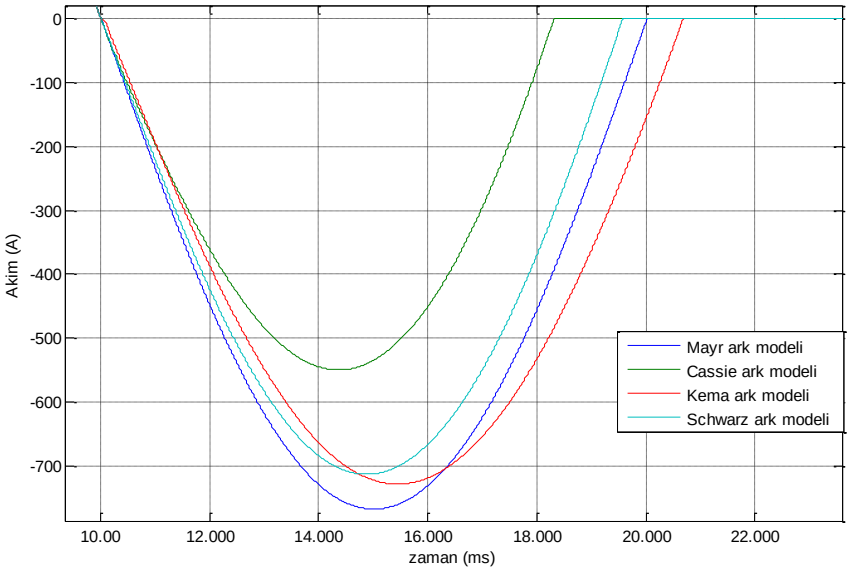


Şekil 4.31: 10 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması

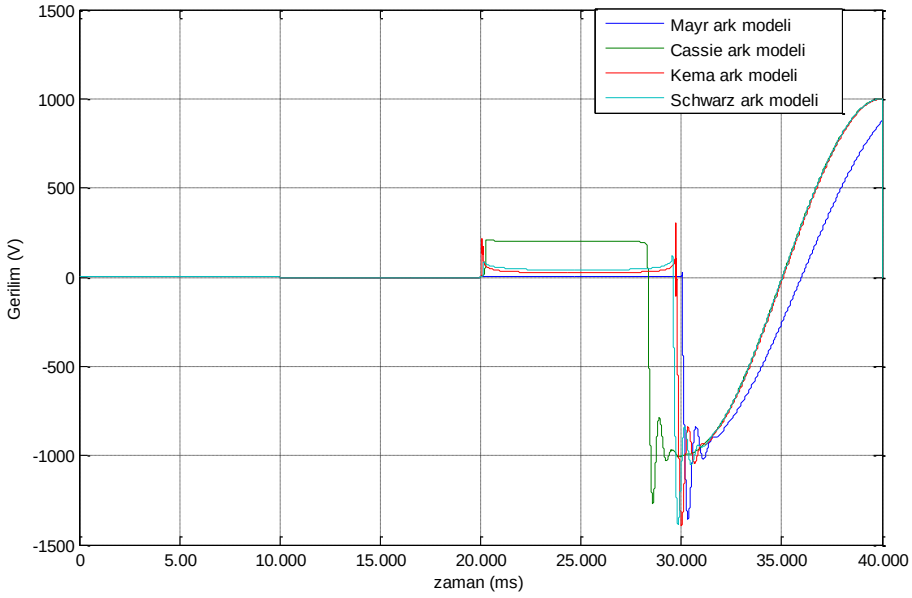


Şekil 4.32: 10 ms'de oluşan ark için akım karşılaştırması

Özet olarak kontakların sıfır farklı geçişlerinde açılmasının, gerilim ve akım karakteristikleri üzerine çok fazla bir etkisi olmadığı grafiklerden görülmektedir. En dikkat çekici fark alternatif gerilimin doğal sonucu olarak (her yarı dalgada kutbun değişmesi) ark geriliminin negatif veya pozitif yarı-dalgada oluşmasıdır.

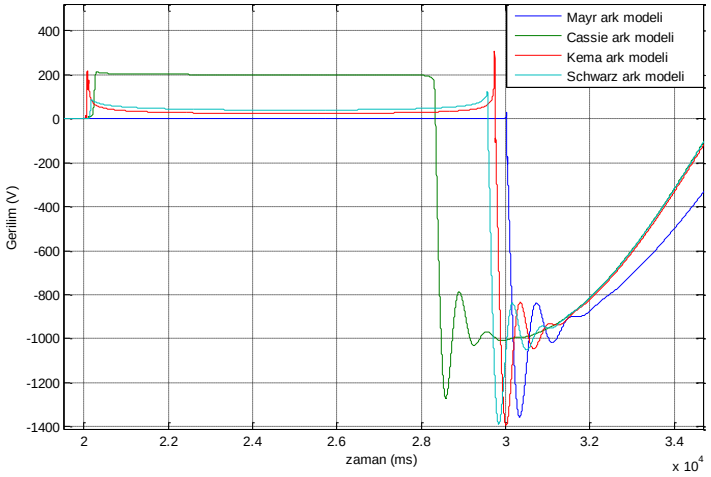


Şekil 4.33: 10 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması

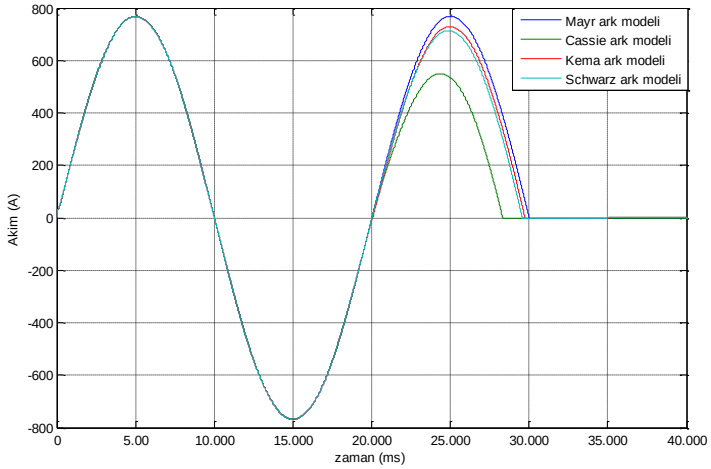


Şekil 4.34: 20 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması

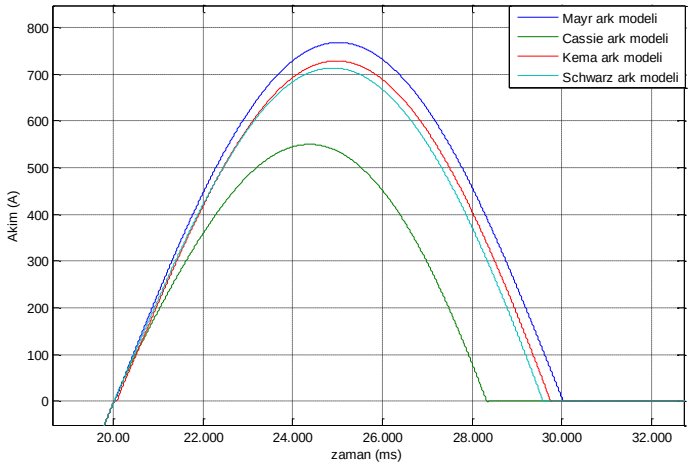
Akımlar ise diğerlerinde olduğu gibi bir sonraki sıfır geçişi olmadan sonlanmıştır. Burada Cassie ve Mayr modellerinin akımlarının sıfır civarları detaylı incelendiğinde hemen sıfıra oturmadıkları görülür. Mayr modelinde akım negatif tarafa doğru bir artış gösterdikten sonra sıfır noktasına oturmuştur. Cassie modelinde ise akım dalgalanması daha fazladır. Akım sıfır noktasına ulaştıktan sonra hem pozitif tarafa doğru hem de negatif tarafa doğru akım darbeleri meydana gelmiştir. Zamanla azalan genlikli bu darbeler bir süre sonra sönüp akım tamamen sıfır olur.



Şekil 4.35: 20 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı)



Şekil 4.36: 20 ms'de oluşan ark için akım karşılaştırması

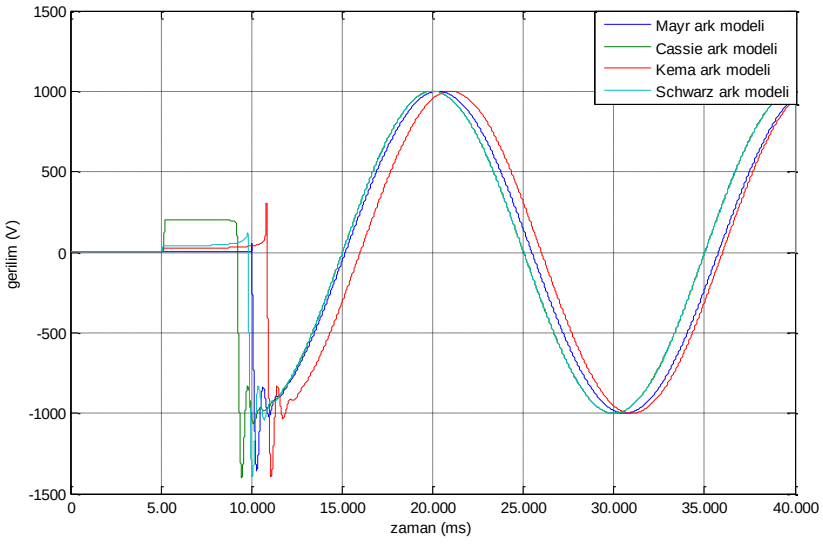


Şekil 4.37: 20 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması

4.5.2 Sıfır geçişleri dışında oluşan ark için:

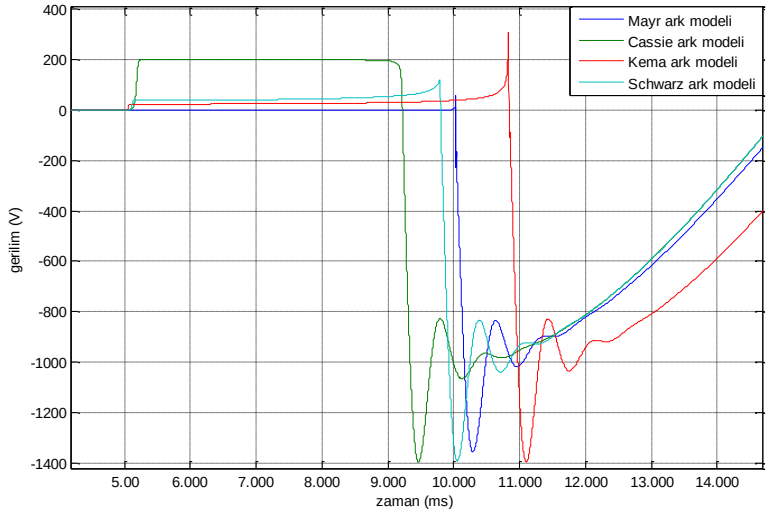
Ark, her zaman kontakların sıfır geçişlerinde açılmasında oluşmaz. Diğer durumlar için de oluşan arkı incelemek gerekir. Bunun için gerilimin bir periyot içindeki tepe değerlerinde (5 ve 15 ms) ve arada kalan değerleri için aynı model üzerinde simülasyonlar yapılmış ve karşılaştırmalar verilmiştir.

Kontakların 5 ms'de açılması durumu için yapılmış olan simülasyon sonucunda akım ve gerilim dalga şekilleri için elde edilen grafikler şekillerde görülmektedir (4.38, 4.39 ve 4.40). Sıfır geçişinde oluşan arktan çok farklı gözükmemesine rağmen grafikler detaylı incelendiğinde bir takım farklar ortaya çıkmaktadır. En önemli fark arkın oluştuğu sırada sıfır geçişlerinde oluşan gerilim artışımın ara geçişlerde oluşmamasıdır. Gerilimin tepe noktalarında kesilen ark için grafiklerde-Cassie modeli dışında, gerilimin ark süresince oluşan sabit gerilim kısmına kadar yükseldiği ve sıfır geçişinde olduğu gibi sönme periyoduna girene kadar burada sabit kaldığı görülmektedir. Ark sönerken gerilim biraz yükselmeye başladıktan sonra ark sönüp gerilim şebeke gerilimine oturmadan önce -1400 V'a kadar indikleri gözlemlenmektedir.

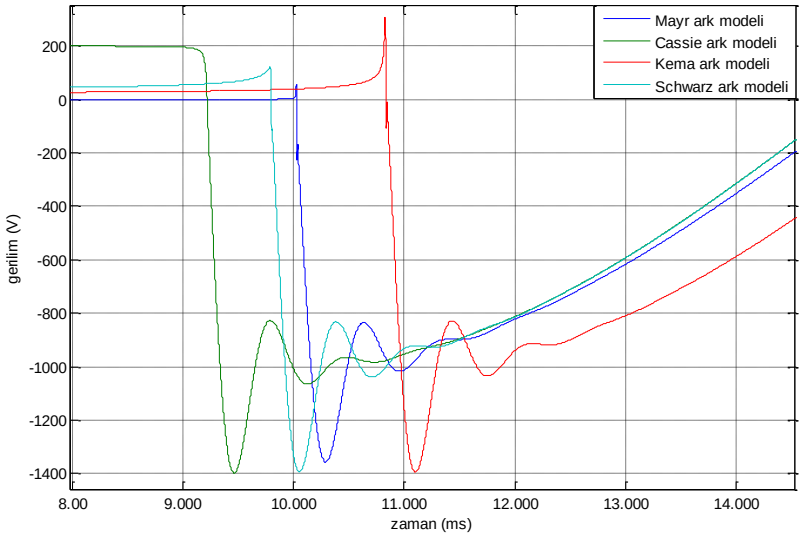


Şekil 4.38: 5 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması

Şekilde ark süresince gerilimin dalga şekli detaylı olarak görülmektedir. bu durum için KEMA modelinde gerilim daha önce yükselmeye başlamış, yani ark daha önce oluşmuştur ve en son sönmüştür. En son oluşan Cassie modelindeki ark ise ilk önce sönmüştür.

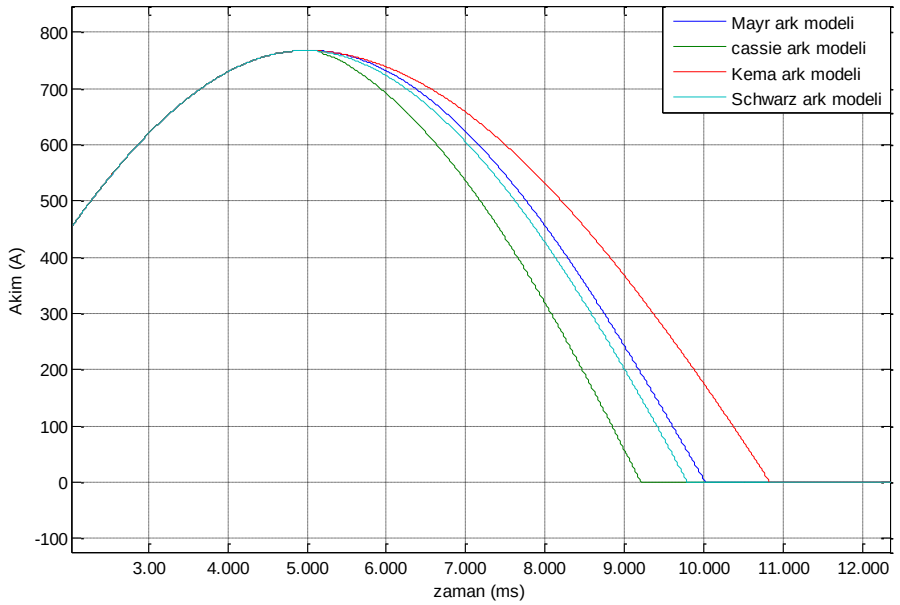


Şekil 4.39: 5 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı)



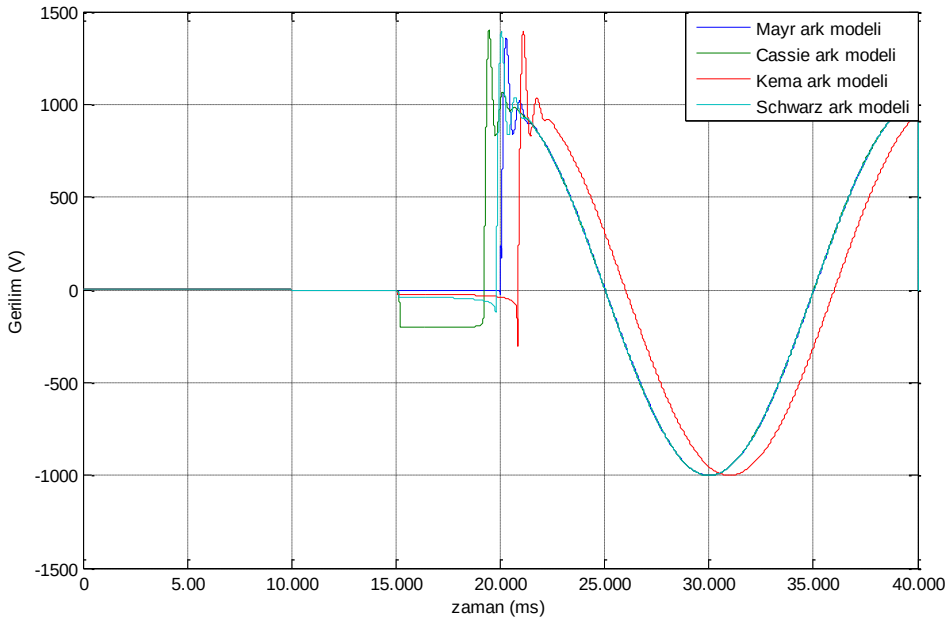
Şekil 4.40: 5 ms'de oluşan ark için gerilim yükselişlerinin karşılaştırması

5 ms'de açılan kontaklar için akım karakteristiği Şekil 4.41'de görülmektedir. Kontaklar açılana kadar bütün modellerde akım aynı yolu izleyerek tepe noktasına kadar ulaşır. Modellerde arkın oluşma ve sönme zamanları bir olmadığı için tepe akım noktasından sonra sıfıra inerken farklı yolları izler. Buradaki koşul arkın süresidir. Daha uzun süre yana arkta akım daha sonra sıfıra oturur. Bu yüzden akımın en önce söndüğü Cassie modelinde akımın ilk olarak sıfıra ulaştığı, arkın en geç söndüğü KEMA modelinde ise akımın en son kesildiği görülmektedir. Akım karakteristikleri birbiri ile kesişmemektedir.

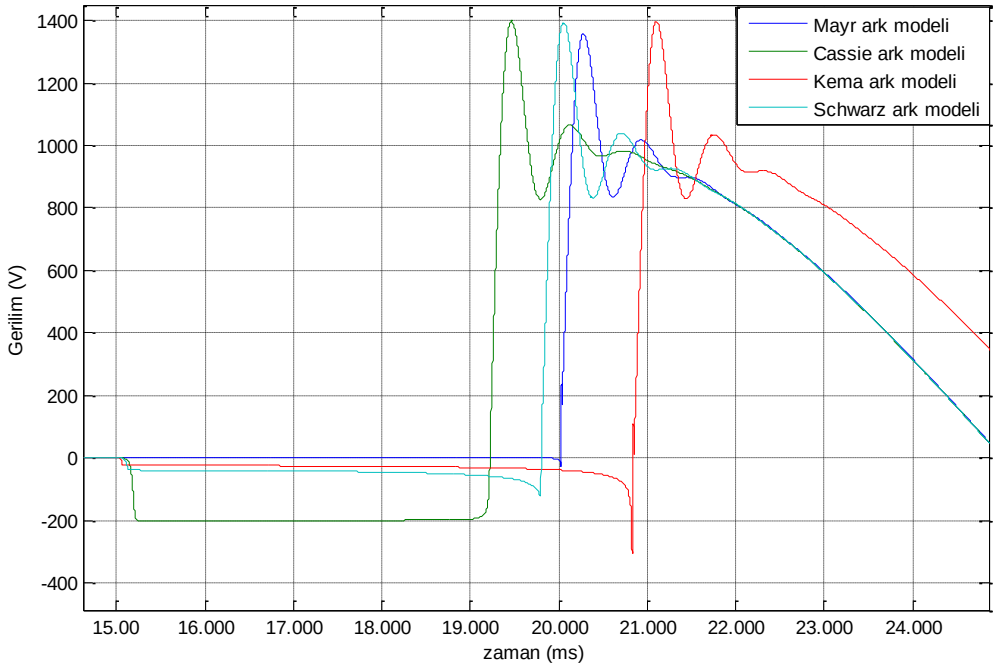


Şekil 4.41: 5 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması

15 ms'de açılan kontaklar için verilen grafiklere bakıldığında gerilimin tepe noktasında kesildiği için 5 ms'de açılan kontaklarda oluşan ark karakteristiklerinden bir farkı olmadığı şekillerde görülmektedir (4.42 ve 4.43). Tek fark kesilme anında gerilim negatifte olduğu için ark sırasında oluşan gerilim dalga şeklinin negatif tarafta olmasıdır.

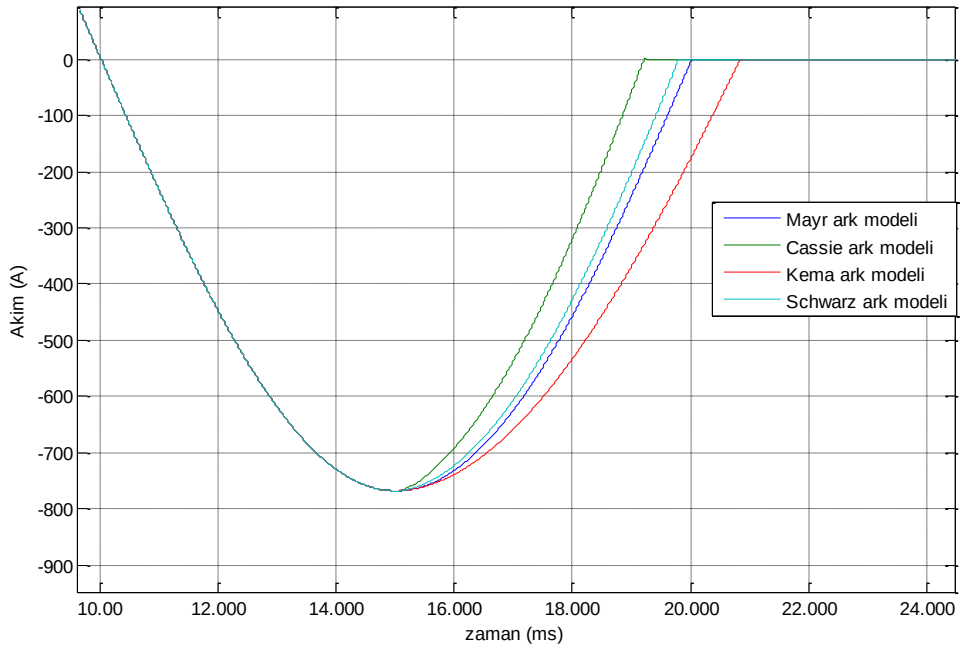


Şekil 4.42: 15 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması



Şekil 4.43: 15 ms'de oluşan ark için gerilim karşılaştırması (detaylı)

Akım karakteristikleri de gerilim karakteristiklerine paralel olarak gerilimin tepe noktasında açılan kontaklarda olduğu gibi, akımın tepe değerine ulaştıktan sonra arkın erken veya daha geç sönmesine bağlı olarak farklı zamanlarda sıfıra ulaşır.



Şekil 4.44: 15 ms'de oluşan ark için akım tepe değerlerinin karşılaştırması

5. ELEKTRİK ARKININ SEY BENZETİMİ İLE ISIL ANALİZİ

5.1 Isı Yayılım Denklemi

Sıcaklık, üç boyutta, konum ve zamana bağlı bir alan olarak ifade edilebilir [22];

$$T(x,y,z) = T(\vec{r},t) \tag{6.1}$$

Fourier yasasına göre ısı geçişi ifadesi şöyledir:

$$\vec{q} = -k\nabla T \tag{6.2}$$

q ısı akısı üç boyutta üç bileşenin vektörel toplamı şeklindedir.

$$q_x = -k\frac{\partial T}{\partial x} \tag{6.3a}$$

$$q_y = -k\frac{\partial T}{\partial y} \tag{6.3b}$$

$$q_z = -k\frac{\partial T}{\partial z} \tag{6.3c}$$

formüldeki k ısı iletim katsayısı aynı zamanda konuma ve sıcaklığa bağlı bir büyüklüktür.

$$K = k[\vec{r}, \mathrm{T}(\vec{r},t)] \tag{6.4}$$

Malzemelerin çoğu homojen olduğu için bu katsayı sadece sıcaklığa bağlı olarak ifade edilebilir [k = k(T)]. Gazlarda bu katsayı düşük basınç altında sıcaklıkla artar, fakat metallerde ve sıvılarda sıcaklık ile değişkenlik gösterir.

S yüzeyine sahip bir R bölgesinde üç boyutta ısı ifadesi yazılmak istenirse;

$$Q = \frac{dU}{dt} \tag{6.5a}$$

$$Q = -\int_S (-\mathrm{k}\nabla T).(\vec{n}ds) + \int_R \dot{q}dr \tag{6.5b}$$

şeklinde integral ifadesi yazılabilir. Burada $\dot{q}$ hacimsel ısı yayılımı veya ısı akısı olarak tanımlanır [W/m^3]. Bu durumda R bölgesindeki enerji artışı;

$$\frac{dU}{dt} = \int_R (\rho c \frac{\partial T}{\partial t}) dR \qquad \textbf{(6.6)}$$

T, $\vec{r}\ ve\ t$'nin bir fonksiyonu olduğu için kısmi türev şeklinde verilmiştir. Denklem **(6.5b) ve (6.6)**'nın birleştirilmesi ve yeniden düzenlenmesi halinde

$$\int_S (-\mathrm{k}\nabla T).(\vec{n} ds) = \int_R [\rho . c . \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{q}] dR \qquad \textbf{(6.7)}$$

Haline gelir. A herhangi bir fonksiyon olmaz üzere Gauss teoremine göre

$$\int_S A.(\vec{n} ds) = \int_R \nabla . A . dR \qquad \textbf{(6.8)}$$

Yazılabilir. Gauss teoremi **(6.7)** denklemine uygulandığında

$$\int_S \mathrm{k}\nabla T . \vec{n} ds = \int_R \nabla . \mathrm{k}\nabla T . dR \qquad \textbf{(6.9)}$$

Olur. **(6.9)** denklemi **(6.7)** denkleminde yerine konursa

$$\int_R \underbrace{[\nabla . \mathrm{k}\nabla T - \rho . c . \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q}]}_{0} dR = 0 \qquad \textbf{(6.10a)}$$

$$\nabla . \mathrm{k}\nabla T - \rho . c . \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q} = 0 \qquad \textbf{(6.10b)}$$

ve sonuç olarak ısı yayılım denklemi elde edilmiş olur:

$$\nabla . \mathrm{k}\nabla T + \dot{q} = \rho . c . \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \textbf{(6.11)}$$

Eğer k ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi çok küçükse, k sabit olarak düşünülebilir ve denklemin her iki tarafı k ya bölünerek

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho . c}{\underbrace{k}_{1/\alpha}} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{6.12a}$$

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{6.13b}$$

"$\nabla^2 T$" laplacian olarak adlandırılır. Kartezyen, silindirsel ve küresel koordinatlarda üç boyutlu olarak yazılabilir.

Kartezyen koordinatlar için;

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{6.14}$$

Silindirsel koordinatlar için;

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{6.15}$$

Küresel koordinatlar için;

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \tag{6.16}$$

5.2 Silindirsel Koordinatlarda Yayılım Denkleminin Çözümü

Sisteme ait ısı yayılım denkleminin çözümü uygun koordinat seçimi ile başlar. Ark sütunu önceki bölümlerde yapılan kabuller çerçevesinde kesit alanı değişmeyen bir silindir olarak tanımlanmıştı. Ayrıca düzlem elektrotun yüzeyindeki sıcaklık ve ısı dağılımı inceleneceğinden bu düzlemsel alan bir silindirin tabanı olarak kabul edildiğinde ark sütunu ile birlikte eş eksenli bir silindir sistemi oluşturur. Bu nedenle yayılım denklemi için silindirsel koordinatlar seçilebilir [23]. Bu şekilde bir kabul yapıldığında yüzey sıcaklığı yarıçapın bir fonksiyonu olarak yazılabilir:

$$T = t(r) \tag{6.17}$$

Silindirsel koordinatlarda yayılım denklemi yazılırsa;

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\underbrace{\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi \varphi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}_{T\neq T(\varphi,z)=0}+\underbrace{\frac{\dot{q}}{k}}_{0}=\underbrace{\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}}_{0} \qquad \textbf{(6.18)}$$

Sıcaklık dağılımı sadece yarıçapın bir fonksiyonu olduğu için denklemdeki "φ" ve "z" değişkenlerine ilişkin ifadeler sıfır olur. Elektrot yüzeyinde herhangi bir ısı üretimi olmadığı için ve kararlı durum için çözüm aradığımız için denklem basitleşir ve şu şekle gelir;

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)=0 \qquad \textbf{(6.19)}$$

Bu adi diferansiyel in genel çözümü denklem **(6.19)**'un iki kere integre edilmesi ile

$$C_1 \ln(r)+C_2 \qquad \textbf{(6.20)}$$

Olarak bulunur. C_1 ve C_2 sabitlerinin bulunması için sisteme ait ilk koşullar ve sınır koşullarının belirlenmesi gereklidir.

$$T(r=r_i)=T_i \qquad \textbf{(6.21a)}$$

$$T(r=r_0)=T_0 \qquad \textbf{(6.21b)}$$

Olarak bu sınır koşulları yazılır. r_i ve r_0 sırası ile ark sütununun yarıçapı ve silindir tabanı olarak kabul edilmiş düzlemsel elektrotun yarıçapıdır. r_i durumunda sıcaklık ark sütununun sıcaklığına, r_0 durumunda ise ortam sıcaklığına eşit olarak alınmıştır. Bu koşullar yerlerine konarak C_1 ve C_2 sabitlerinin hesaplanabileceği denklemler elde edilir:

$$T_i=C_1 \ln(r_i)+C_2 \qquad \textbf{(6.22a)}$$

$$T_0=C_1 \ln(r_0)+C_2 \qquad \textbf{(6.22b)}$$

Denklem sistemi çözülerek sabitler hesaplanır.

$$C_1=\frac{T_i-T_0}{\ln\left({}^{r_i}/_{r_0}\right)}=-\frac{\Delta t}{\ln\left({}^{r_0}/_{r_i}\right)} \qquad \textbf{(6.23a)}$$

$$C_2=T_i+\frac{\Delta t}{\ln\left({}^{r_0}/_{r_i}\right)}\ln(r_i) \qquad \textbf{(6.23b)}$$

Hesaplanan sabitler yerlerine konarak tam çözüm elde edilir.

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2 \quad \textbf{(6.24a)}$$

$$T(r) = -\frac{\Delta t}{\ln\left({}^{r_0}/_{r_i}\right)} \ln(\mathrm{r}) + \mathrm{T_i} + \frac{\Delta t}{\ln\left({}^{r_0}/_{r_i}\right)} \ln\left(r_i\right) \quad \textbf{(6.24b)}$$

$$T(r) = \mathrm{T_i} - \frac{\Delta t}{\ln\left({}^{r_0}/_{r_i}\right)} (\ln(\mathrm{r}) - \ln\left(r_i\right)) \quad \textbf{(6.24c)}$$

veya

$$T(r) = \frac{T_i - T_0}{\ln\left({}^{r_i}/_{r_0}\right)} ln\left(\frac{r}{r_0}\right) + T_0 \quad \textbf{(6.25)}$$

şeklinde silindirsel koordinatlarda ısı yayılım denklemi bulunmuş olunur. Bu dağılım logaritmik olarak değişir. Isı geçişi için kullanılacak bağıntı ise Fourier denkleminde sıcaklık denkleminin yerine konması ile elde edilir:

$$q = -k\frac{dT}{dr} \quad \textbf{(6.26a)}$$

$$q(r) = \frac{2\Pi Lk(T_i - T_0)}{\ln\left({}^{r_0}/_{r_i}\right)} \quad \textbf{(6.26b)}$$

görüldüğü gibi ısı geçiş denklemi yarıçaptan bağımsızdır [24]. Sadece ilk koşullara ve k ısıl iletim katsayısına bağlıdır.

Ark sütunu kesiti değişmeyen bir silindir olarak modellendiği için düzlemsel sistem için yayılım denklemi silindirsel koordinatlarda yazılmış ve bu şekilde çözülerek sıcaklık ve ısı geçişi için yarıçapa bağlı fonksiyonlar elde edilmiştir.

Bu bölümde bu fonksiyonlar kullanılarak düzlem elektrot sistemi yüzeyindeki farklı noktaların sıcaklık değerleri bulunarak yüzeysel bir dağılım ortaya çıkartılmıştır.

Denklemi çözmek için r_i ve r_0, T_i ve T_0 parametrelerinin bilinmesi gereklidir. r_i ark sütununun yarıçapıdır. r_0 ise elektrot yüzeyini ifade eder. Merkezinde ark sütunu olmak üzere var olduğu kabul edilen silindir elektrot yüzeyindeki noktalar, bu silindirin yarıçap fonksiyonu olmuş olur. T_i ve T_0 sınır koşulları ile belirlenir. T_i sıcaklık kaynağının yani ark sütununun sıcaklığıdır. T_0 ise elektrot yüzeyinin sıcaklığıdır.

Sayısal analiz için sıcaklık fonksiyonundaki parametreler şu şekilde seçilmiştir:

$r_i = 0.5$ mm

$r_0 = 3.5 \ldots 37.5$ mm

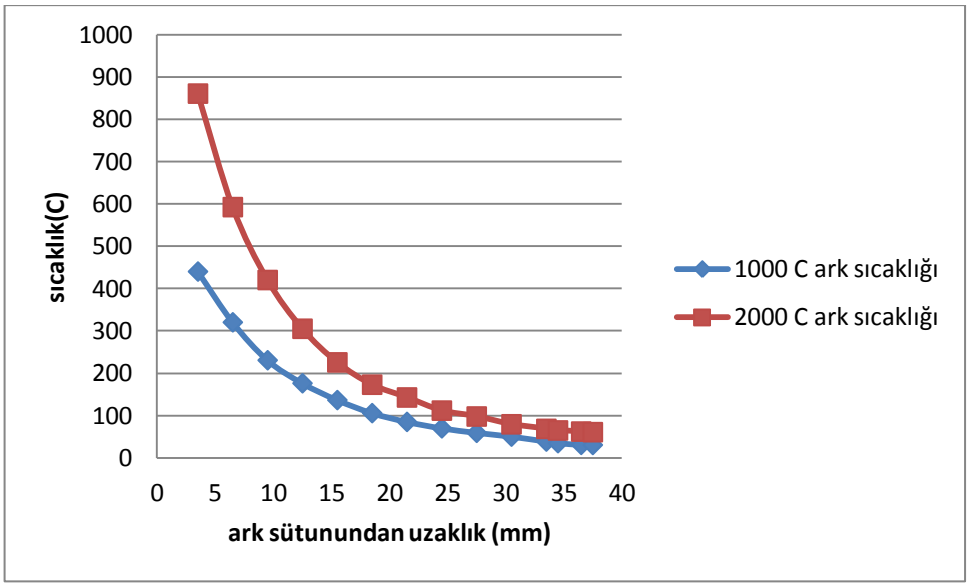
$T_i = 1000^oC, 2000^oC$

$T_0 = 22\ ^oC$

Formül **(6.25)** kullanıldığı tablolarda 1000^oC ve 2000^oC ark sütunu sıcaklıkları için elektrot yüzeyindeki sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. r_0 değeri ark sütununun merkezinden 3.5 mm uzaklıktan başlamak üzere elektrotun ucu olan 37.5 mm'ye kadar aralıklarla alınan noktaların değerleridir. Daha iyi bir dağılım bulunabilmesi için 37.5 mm'lik yarı çap üzerinde 14 noktada sıcaklık değerleri bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1: 1000 C ve 2000 C lik ark için sayısal sıcaklık hesabı

Eksenden uzaklık (mm)	**Sıcaklık (^oC)**	**Eksenden uzaklık (mm)**	**Sıcaklık (^oC)**
3.5	440,53	3.5	860,95
6.5	320,54	6.5	592,76
9.5	230,89	9.5	420,48
12.5	176,50	12.5	305,27
15.5	136,81	15.5	225,78
18.5	105,94	18.5	173,13
21.5	85,23	21.5	142,92
24.5	70,06	24.5	111,90
27.5	59,38	27.5	97,94
30.5	50,46	30.5	79,57
33.5	38,79	33.5	68,74
34.5	35,00	34.5	65,00
36.5	30,98	36.5	62,32
37.5	30,74	37.5	60,95



Şekil 5.1: düzlem elektrot yüzeyindeki sıcaklık dağılımının sayısal hesabı

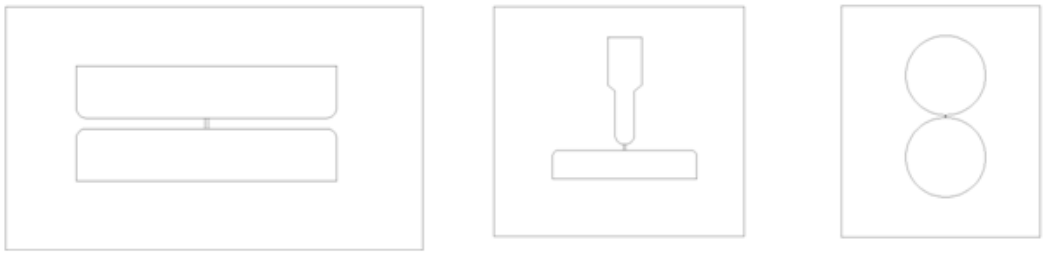
Şekil 5.1'de farklı ark sıcaklıkları için düzlem elektrot yüzeyindeki sıcaklık dağılışı görülmektedir. Farklı ark sıcaklıkları için plazma sütununa yakın olan kısımlarda sıcaklık farkı büyük olmakla beraber, sütundan uzaklaştıkça sıcaklık hızla azalmakta ve sabit bir değere yaklaşmaktadır. Elektrotun en ucunda ise bu sıcaklık farkı minimum olmaktadır.

5.3 Sonlu Elemanlar Analizi

Bu bölümde üç farklı elektrot tipinden (düzlem-düzlem, çubuk düzlem ve küre düzlem) oluşturulan elektrot sistemlerinde arkın elektrot yüzeyinde oluşturduğu zamana bağlı ısı geçişi ve sıcaklık dağılımı sonlu elemanlar destekli bir analiz programı olan COMSOL 3.4 ile simule edilmiştir. Ayrıca düzlem elektrot sistemi için sıcaklık dağılımı elle hesaplanıp benzetim verileri ile karşılaştırılmıştır.

5.3.1 Modelin Oluşturulması

Simülasyona başlamak için ilk yapılacak olan incelenecek sistemin çizilmesidir. Bunu için deneyde kullanılacak olan elektrotların birebir ölçekli çizimleri kullanılmıştır. Düzlem elektrotlar 10 mm kalınlığa, 75 mm çapa ve kenarlardan 3 mm eğrilik yarıçapına sahiptir. Küresel elektrotlar 10 cm çapa sahiptir. Çubuk elektrot ise 120° tepe açılı 10 mm çapında ve 50 mm uzunluğundadır. Kullanılan elektrotların hepsi pirinç malzemeden yapılmıştır. Şekil 5.2'de birebir ölçekte çizilmiş elektrot sistemleri görülmektedir.



Şekil 5.2: Elektrot modelleri (a): düzlem-düzlem (b): çubuk-düzlem (c): küre-küre

Ark sütunu ark modeli oluşturulurken yapılan kabuller doğrultusunda modellenmiştir. Yapılan kabullerde ark sütunu, kesit alanı zamanla değişmeyen küçük çaplı bir silindir olarak kabul edildiği için bilgisayar benzetiminde de elektrotlar arasında oluşan ark, elektrotlar arasındaki çapı 1 mm olan bir silindir ile modellenmiştir.

Programın çalışabilmesi için sonlu sayıda elemana ihtiyaç olduğundan elektrotlar çizildikten sonra elektrotları da kapsayacak bir kapalı alan çizilerek sınırlı bir bölgede programın çalışması sağlanmıştır.

5.3.2 Malzemelerin, Başlangıç ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Model çizildikten sonra elektrotların, ark sütununun ve sistemi çevreleyen dış ortamın ısıl parametreleri girilmelidir. Bunum için sistemde kullanılacak malzemeler belirlenir. Deneyde pirinç elektrotlar kullanıldığı için simülasyonlarda elektrot malzemesi pirinç olarak seçilmiştir. Ark sütunu ısıl iletkenliği en yüksek metal olan gümüş olarak seçilmiştir. Dış ortam olarak ise hava alınmıştır. Kullanılan bu malzemelerin ısıl özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Malzemelerin ısıl özellikleri

	Birim	**Hava**	**Ark sütunu**	**Pirinç elektrotlar**
Termal iletkenlik (k)	W/(m·K)	0.0257	429	116
Yoğunluk (rho)	kg/m^3	1.205	10500	7140
Sabit basınçta ısıl kapasite (C)	J/(kg·K)	1006	235	390

Malzemeler seçildikten sonra sisteme ait başlangıç ve sınır koşullarının girilmesi gereklidir. Başlangıç koşulları olarak deney yapılmadan önce kızılötesi termometre ile alınan sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Buna göre başlangıçtaki elektrot sıcaklığı 22^oC, ortam sıcaklığı 24^oC olarak alınmıştır. Farklı sıcaklıklarda karşılaştırma

yapabilmek için ark sütununun sıcaklığı 1000°C, 2000°C ve 3000°C olarak alınmıştır.

Silindirsel koordinatlarda yayılım denklemi çözülürken kullanılan sınır koşulları yapılacak olan simülasyonda kullanılacak olan sınır değerler olarak seçilmiştir.

$T(r = r_i) = 1000^oC, 2000^oC, 3000^oC$

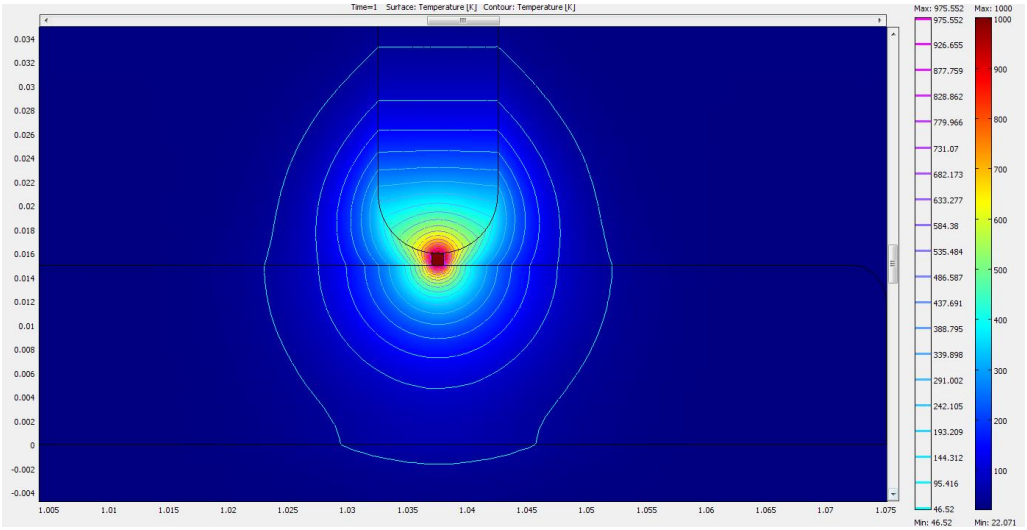
$T(r = r_0) = 24^oC$

Burada r_i ark sütununun dış yüzeyini ve r_0 ise elektrotların yüzeyini ifade eder. Kapalı alan sınırları ise, sadece elektrot yüzeyindeki dağılım hesaplanması istendiğinden dış ortam ile bir ısı alış verişi olmadığı kabul edilerek termal yalıtkan olarak alınmıştır.

5.3.3 COMSOL Isıl Analizleri

Analizler üç farklı elektrot sistemi(düzlem-düzlem, çubuk-düzlem, küre-küre) için ayrı ayrı yapılmıştır. Elektrot açıklığının sıcaklık dağılımına etkisini görebilmek için simülasyonlar sırasıyla 1 mm, 2 mm ve 3 mm elektrot açıklıkları için de yapılmıştır. Ayrıca ark sütununun sıcaklığının ve arkın süresinin sıcaklık dağılışını nasıl değiştirdiği simülasyonlarla incelenmiştir. Arkın ısı yayılımı zamana bağlı olduğu için simülasyonlar transient analiz olarak yapılmıştır. Arkın tutuştuğu zaman sıfır kabul edilerek, ark oluşturtan sonra 0,01 s aralıklarla sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s'ye kadar çözüm yaptırılmıştır. Çözüm toleransı 0,0010 olacak şekilde ayarlanmıştır.

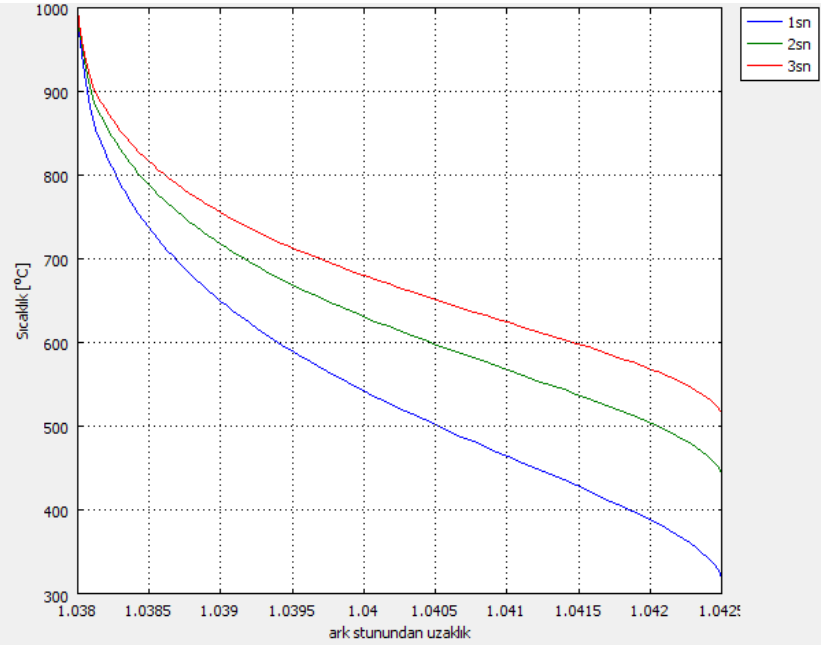
5.3.3.1 Çubuk-Düzlem Elektrot Sistemi için Analiz



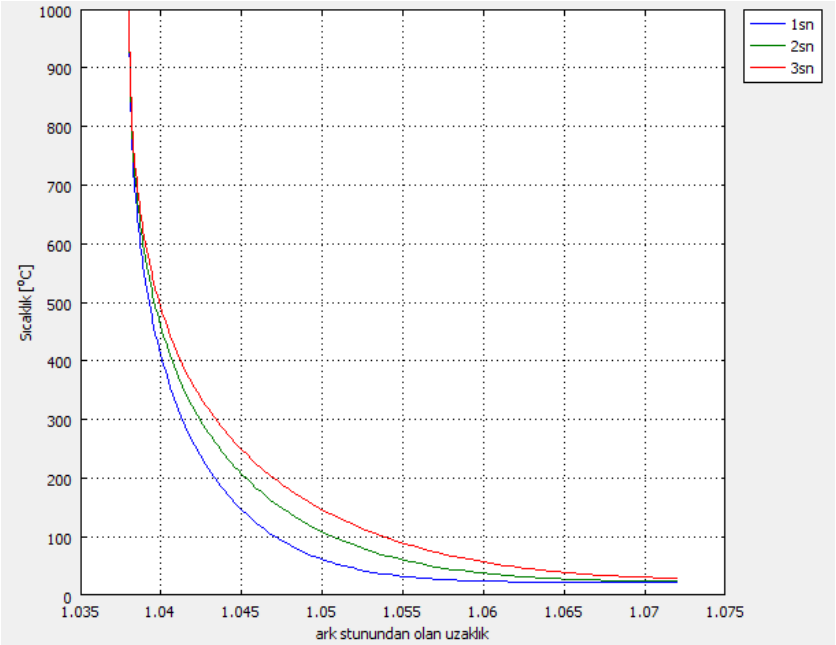
Şekil 5.3: Çubuk-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (1000 °C)

Çubuk düzlem elektrotlar 1 mm açık olduğu, yani ark sütununun boyunun 1mm olması durumu için sistem sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s ark süreleri için analiz edilmiştir. Ark sütununun sıcaklığı 1000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.3'de verilmiştir. Şekil 5.6'da ise ısı geçişi sonucu görülmektedir.

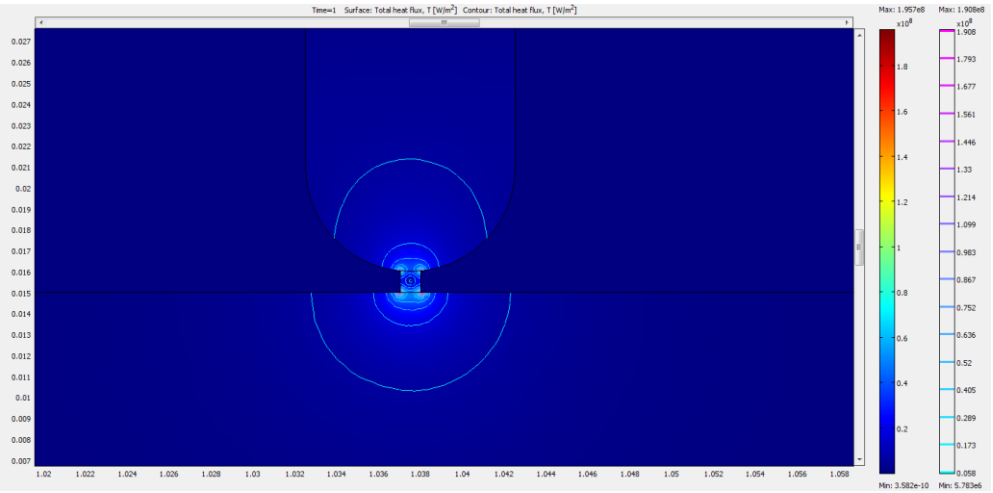
Şekil 5.4'de farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.



Şekil 5.4: Çubuk elektrot sıcaklık dağılımı



Şekil 5.5: Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı



Şekil 5.6: Çubuk-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(1000 ^{o}C)

Şekil 5.6'da de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi 6148.03 [W/m] ve çubuk elektrotun yuvarlatılmış ucundaki ısı geçişi ise 2741.65 [W/m] dir. Düzlem elektrotun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 1107.14 [W] ve çubuk elektrottaki toplam ısı geçişi 719.82 [W] dır. Ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 60977.89 [W/m] ve çubuk elektroda temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi ise 51190.07 [W/m]. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise Çizelge 5.3'te verilmiştir.

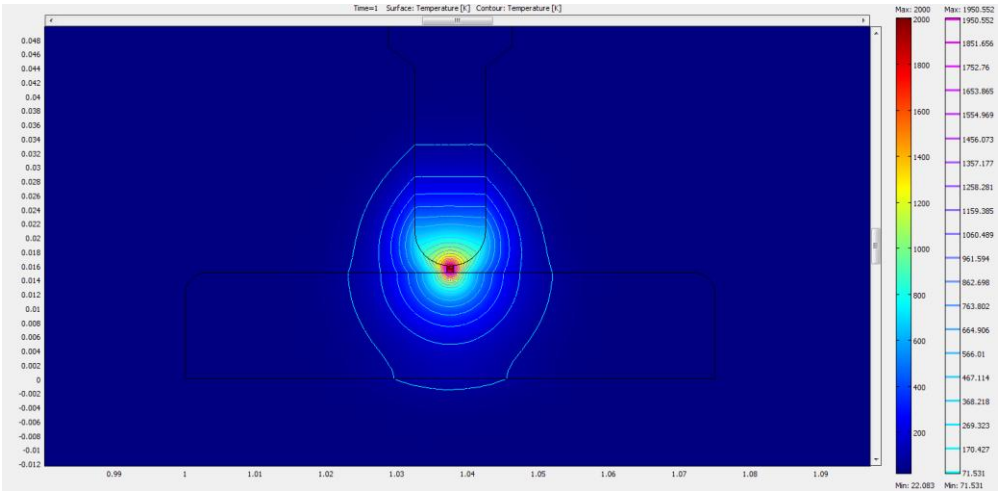
Çizelge 5.2: Çubuk düzlem elektrot (1000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

Isı Geçişi / **Zaman (s)**	**Çubuk Elektrot**	**Düzlem Elektrot**	**Çubuk Elek. Yüzeyinden**	**Düzlem Elek. Yüzeyinden**	**Çubuk elek. Temas Yüzeyinden**	**Düzlem elek. Temas Yüzeyinden**
1	719.82 [W]	1107.14 [W]	2741.65 [W/m]	6148.03 [W/m]	51190.07 [W/m]	60977.89 [W/m]
2	790.48 [W]	1261.10 [W]	2202.14 [W/m]	5617.59 [W/m]	41072.16 [W/m]	55661.95 [W/m]
3	848.89 [W]	1364.66 [W]	1908.82 [W/m]	5282.51 [W/m]	35589.10 [W/m]	52344.14 [W/m]

Arkın etki süresi (arc duration) arttıkça elektrotların yüzey sıcaklığı artmaktadır. Bunun nedeni etki süresindeki artışın elektrottaki toplam ısı geçişini arttırmasıdır. Elektrotlar ve sıcak ark sütunu arasındaki ısı alış verişi ile termal denge sağlanmaya çalışıldığında arkın yanma süresi arttıkça sıcaklığı artan elektrotların temas yüzeylerindeki birim ısı geçişleri azalmaktadır.

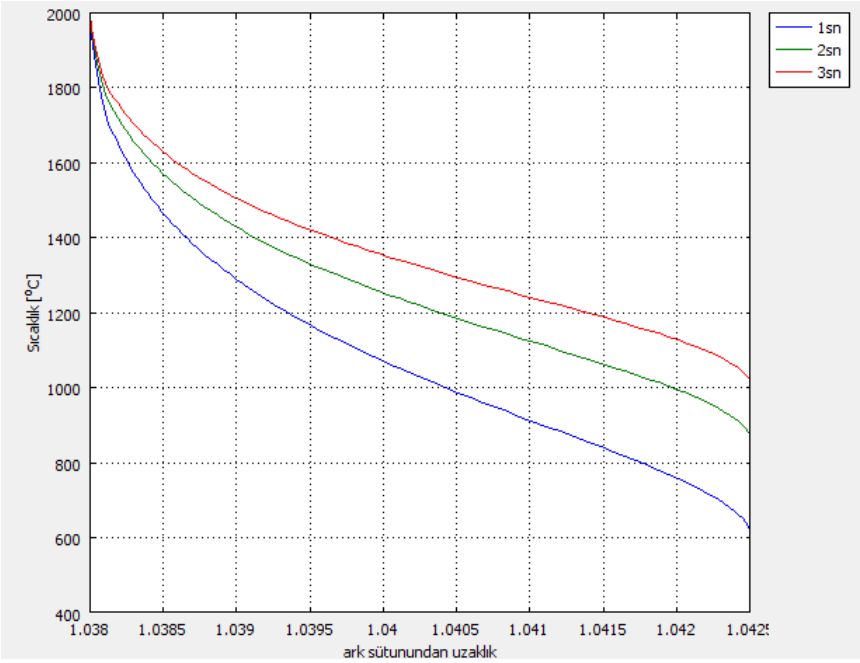
2 mm ve 3 mm aralıklı elektrotlar arasında oluşan ark için ısı ve sıcaklık dağılımları ve ısı geçişi tabloları EKTE verilmiştir.

Çubuk düzlem elektrotlar 1 mm açık olduğu, yani ark sütununun boyunun 1mm olması durumu için sistem sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s ark süreleri için analiz edilmiştir. Ark sütununun sıcaklığı 2000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.7'de verilmiştir.

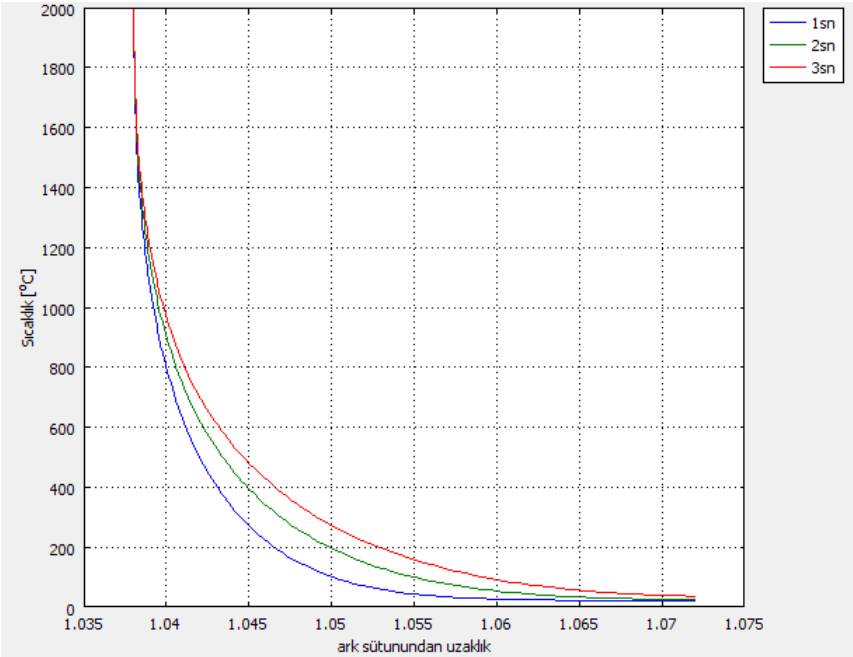


Şekil 5.7: Çubuk-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (2000 ^{o}C)

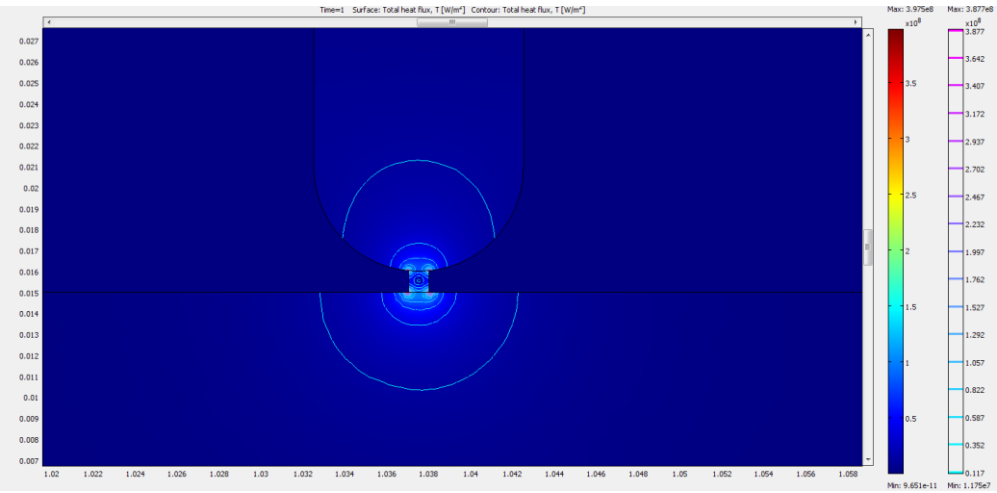
Şekil 5.8'de farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.



Şekil 5.8: Çubuk elektrot sıcaklık dağılımı



Şekil 5.9: Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı



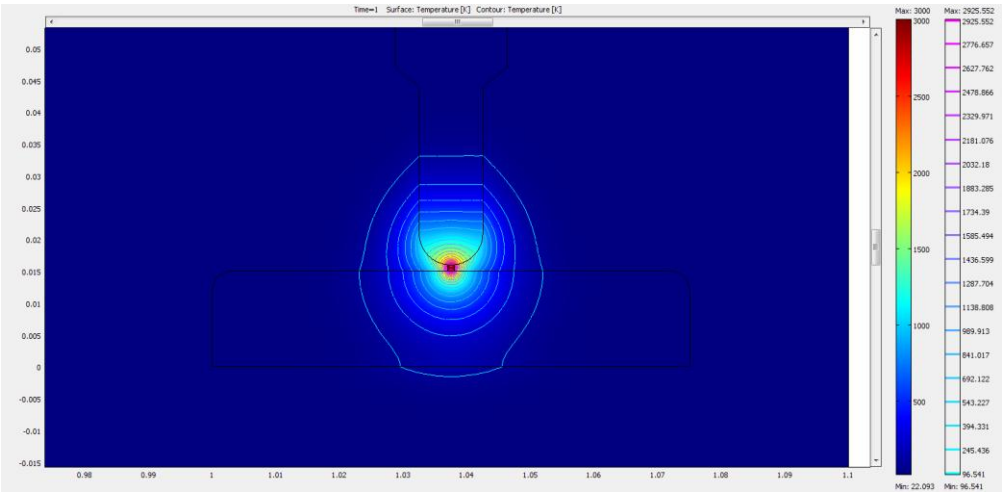
Şekil 5.10: Çubuk-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(2000 ^{o}C)

Şekil 5.10'da de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi 12446.52 [W/m] ve çubuk elektrotun yuvarlatılmış ucundaki ısı geçişi ise 5552.86 [W/m] dir. Düzlem elektrotun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 2173.15 [W] ve çubuk elektrottaki toplam ısı geçişi 1418.07 [W] dır. Ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 123446.7 [W/m] ve çubuk elektroda temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi ise 103683.5 [W/m]. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4: çubuk düzlem elektrot (2000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

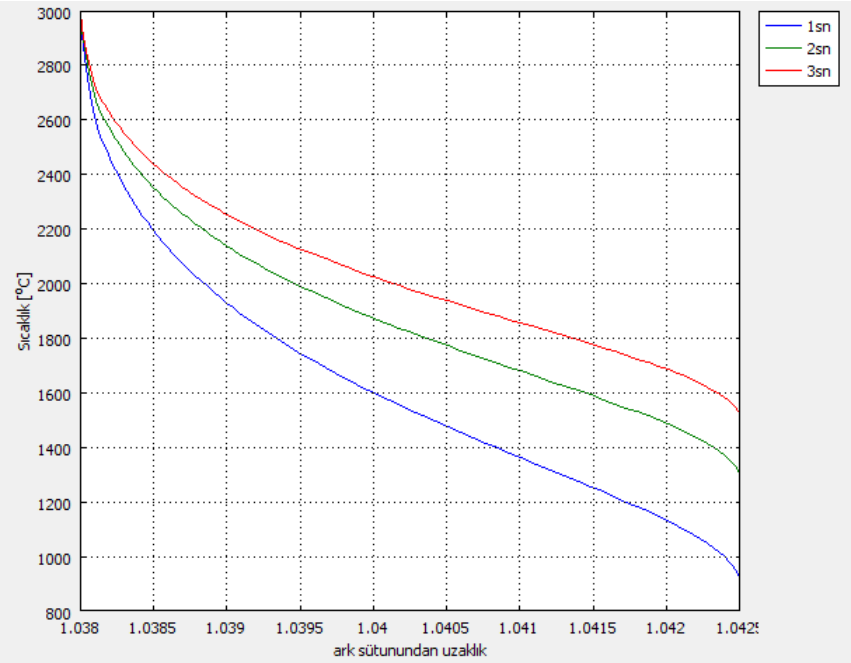
Isı Geçişi / Zaman (s)	Çubuk Elektrot	Düzlem Elektrot	Çubuk Elek. Yüzeyinden	Düzlem Elek. Yüzeyinden	Çubuk elek. Temas Yüzeyinden	Düzlem elek. Temas Yüzeyinden
1	1418.07 [W]	2173.15 [W]	5552.86 [W/m]	12446.52 [W/m]	103683.5 [W/m]	123446.7 [W/m]
2	1597.55 [W]	2547.54 [W]	4463.39 [W/m]	11371.34 [W/m]	83249.48 [W/m]	112676.9 [W/m]
3	1717.14 [W]	2760.00 [W]	3861.06 [W/m]	10684.17 [W/m]	71987.64 [W/m]	105869 [W/m]

Çubuk düzlem elektrotlar 1 mm açık olduğu, yani ark sütununun boyunun 1mm olması durumu için sistem sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s ark süreleri için analiz edilmiştir. Ark sütununun sıcaklığı 3000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.11'de verilmiştir.

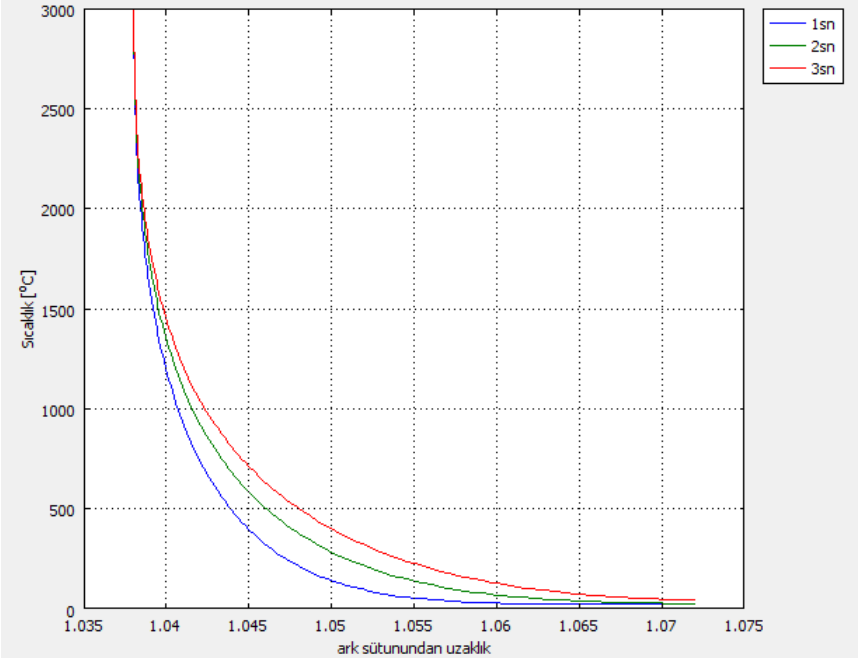


Şekil 5.11: Çubuk-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (3000 ^{o}C)

Şekil 5.12'de farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir. Bu grafiklerde görülebileceği gibi yüzeysel sıcaklık dağılımı kaynaktan (ark sütunundan) uzaklaştıkça logaritmik olarak azalmakta ve sonunda ortam sıcaklığında sabit kalmaktadır. Bu dağılım düzlem elektrotta daha belirgin olarak görülmektedir. çubuk elektrotta ise yüzey alanına bağlı olarak sıcaklıklar daha yüksek oluşmuştur ve zamanla sıcaklığın değişimi daha belirgindir.



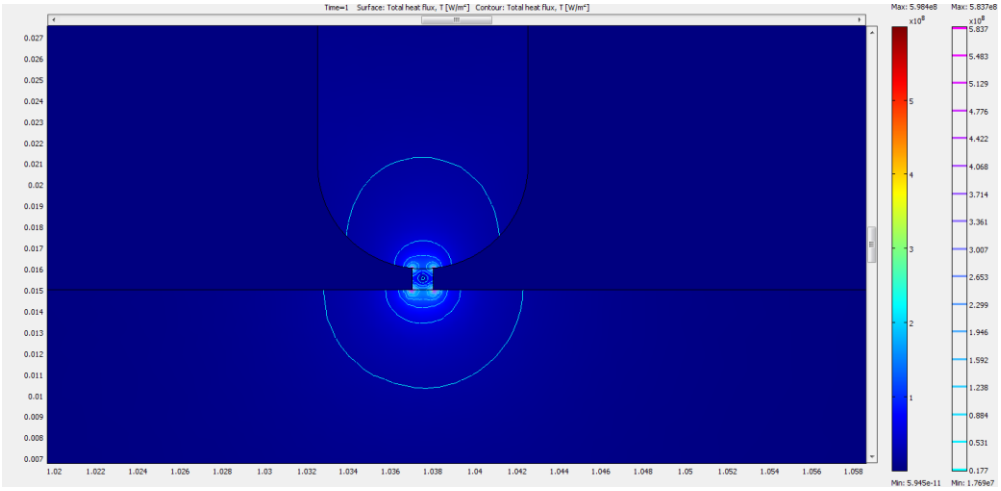
Şekil 5.12: Çubuk elektrot sıcaklık dağılımı



Şekil 5.13: Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı

Şekil 5.14'de de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için Düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi 18737.46 [W/m] ve çubuk elektrotun yuvarlatılmış ucundaki ısı geçişi ise 8359.30 [W/m] dir. Düzlem elektrotun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 3272.08 [W] ve çubuk elektrottaki toplam ısı geçişi 2135.07 [W] dır. Ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 1.560849e5 [W/m] ve çubuk elektroda temas ettiği yüzey

alanındaki ısı geçişi ise 1.858427e5 [W/m]. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise Çizelge 5.5'te verilmiştir.

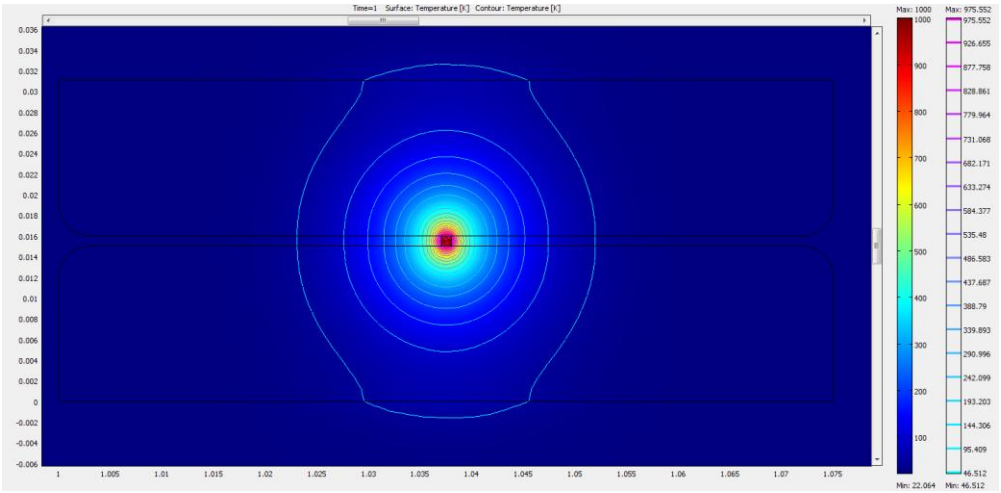


Şekil 5.14: Çubuk-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(3000 ^{o}C)

Çizelge 5.5: çubuk düzlem elektrot (3000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

Isı Geçişi / **Zaman (s)**	**Çubuk Elektrot**	**Düzlem Elektrot**	**Çubuk Elek. Yüzeyinden**	**Düzlem Elek. Yüzeyinden**	**Çubuk elek. Temas Yüzeyinden**	**Düzlem elek. Temas Yüzeyinden**
1	2135.07 [W]	3272.08 [W]	8359.30 [W/m]	18737.46 [W/m]	1.560849e5 [W/m]	1.858427e5 [W/m]
2	2405.52 [W]	3836.08 [W]	6718.76 [W/m]	17118.74 [W/m]	1.253155e5 [W/m]	1.696278e5 [W/m]
3	2585.18 [W]	4155.14 [W]	5814.22 [W/m]	16086.74 [W/m]	1.084037e5 [W/m]	1.594038e5 [W/m]

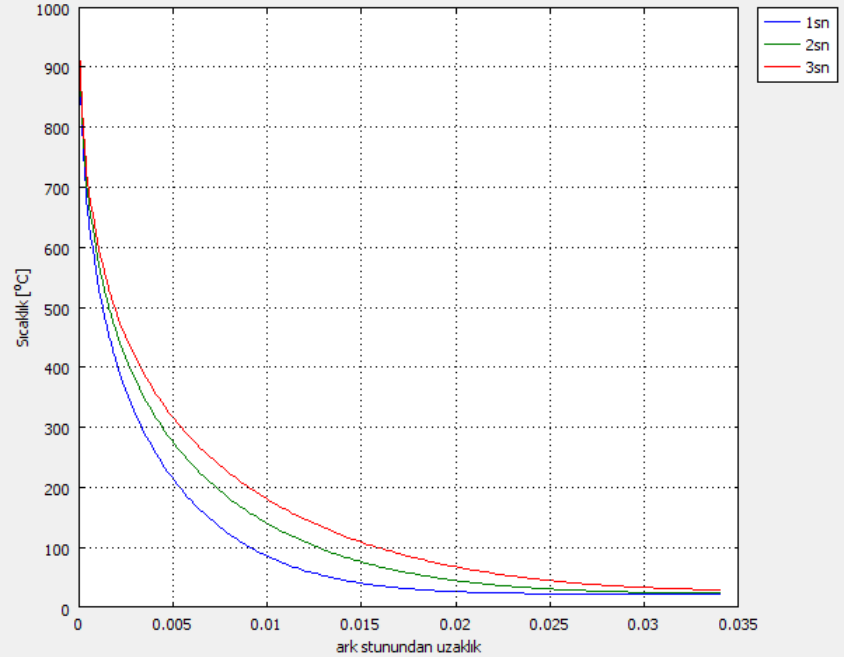
5.3.3.2 Düzlem-Düzlem Elektrot sistemi için Analiz



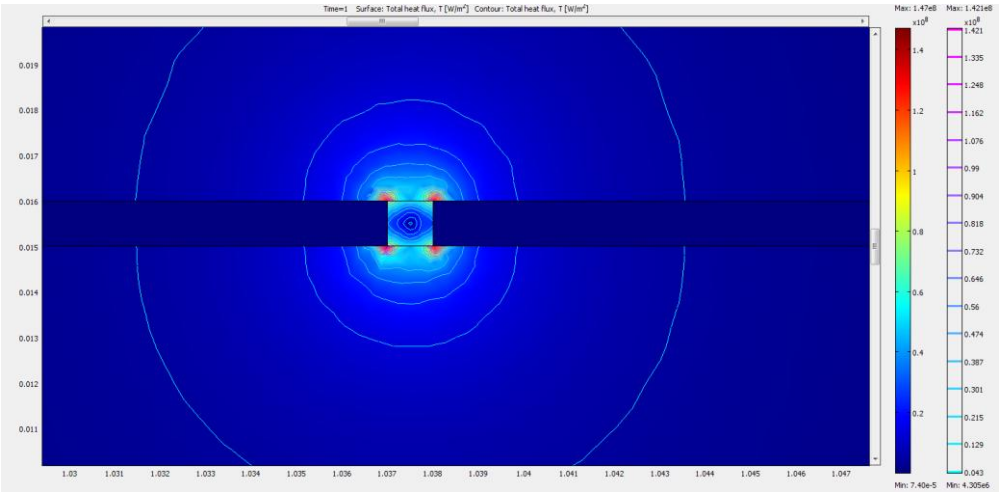
Şekil 5.15: Düzlem-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (1000 ^{o}C)

Düzlem elektrotlar arası açıklığın 1 mm olduğu sistemde sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s yanan arklar için analizler yapılmıştır. Ark sütununun sıcaklığı 1000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.15'de verilmiştir.

Şekil 5.16'da farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.



Şekil 5.16: Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı



Şekil 5.17: Düzlem-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(1000 ^{o}C)

Şekil 5.17'de de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi 5653.14 [W/m], düzlem

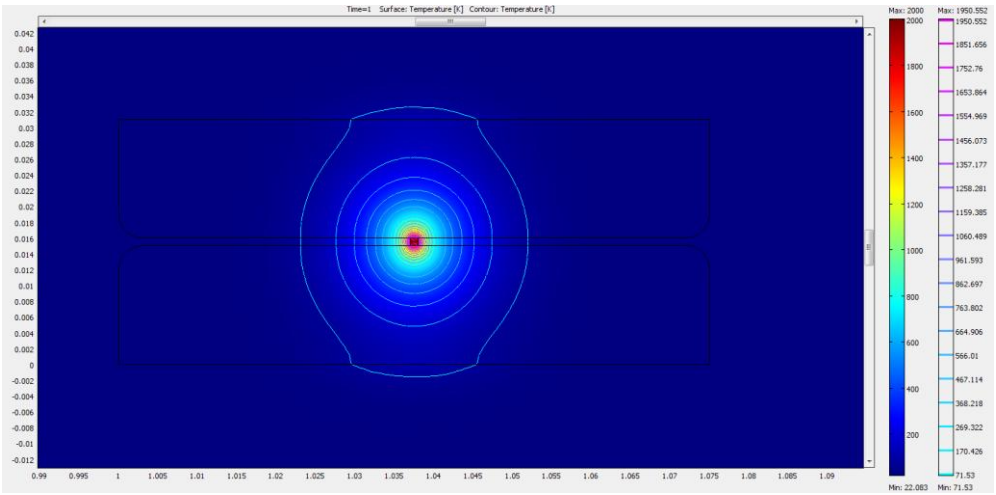
elektrodun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 1083.78 [W] ve ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 55251.33 [W/m] dir. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise çizelge 5.6 de verilmiştir. 2 ve 3 mm'lik hava aralıkları için analiz tekrarlanmıştır ve sonuçlar tablo halinde Ekte verilmiştir.

Çizelge 5.6: Düzlem-düzlem elektrot (1000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

Isı Geçişi / Zaman (s)	Düzlem Elektrot	Düzlem Elek. Yüzeyinden	Düzlem elek. Temas Yüzeyinden
1	1083.78 [W]	5653.13 [W/m]	55251.33 [W/m]
2	1266.85 [W]	5163.42 [W/m]	50455.81 [W/m]
3	1372.30 [W]	4847.37 [W/m]	47362.15 [W/m]

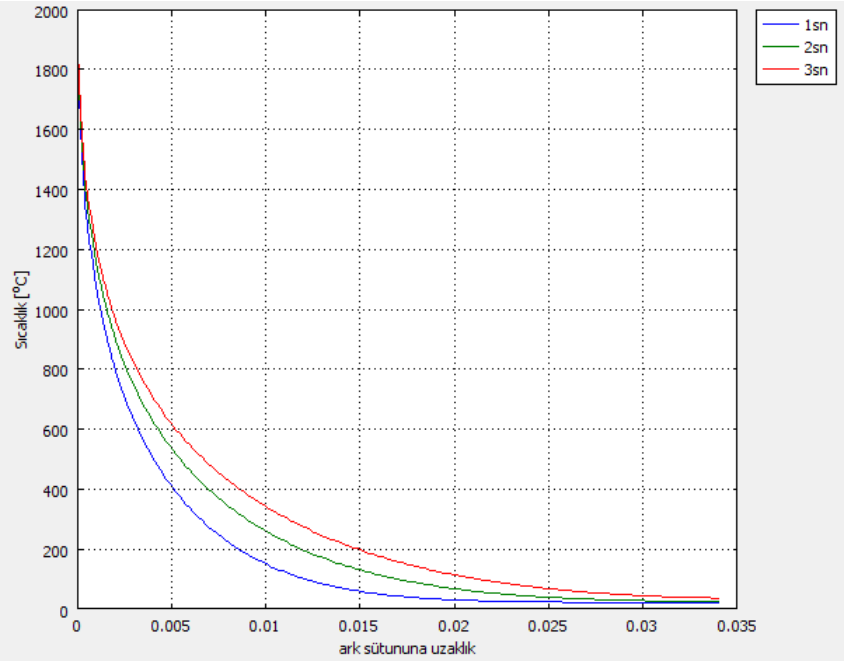
Hava aralığının artması ile ark yüzeyine temas eden hava miktarı artacağı için konveksiyon yolu ile ısı geçişi artar. Bu yüzden elektroda doğru olan ısı geçişi hava aralığı artışı ile birlikte azalır.

Düzlem elektrotlar arası açıklığın 1mm olduğu sistemde sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s yanan arklar için analizler yapılmıştır. Ark sütununun sıcaklığı 2000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.18'de verilmiştir.



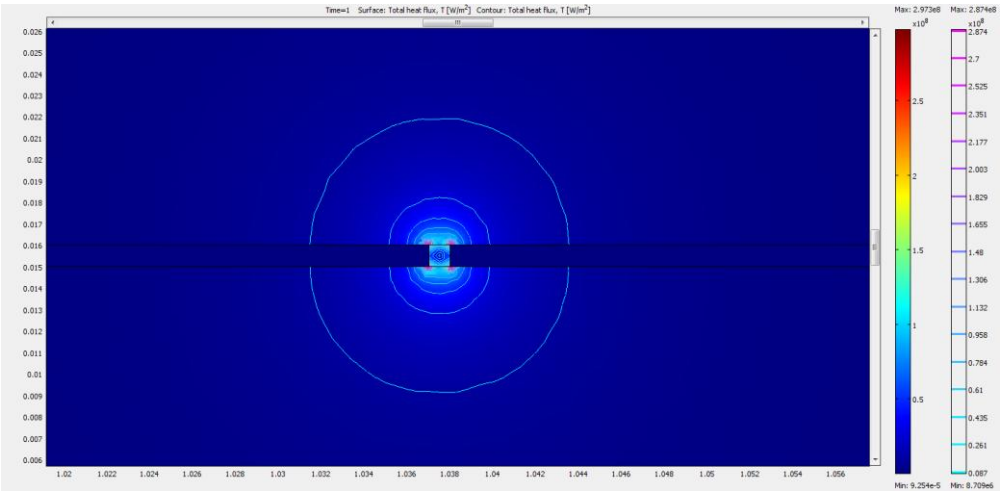
Şekil 5.18: Düzlem-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (2000 ^{o}C)

Şekil 5.19'da farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.



Şekil 5.19: Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı

Şekil 5.20'de de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi11439.87 [W/m]**,** düzlem elektrodun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 2190.70 [W] ve ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 1.11809e5 [W/m] dir. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise çizelge 5.7 de verilmiştir. 2 ve 3 mm'lik hava aralıkları için analiz tekrarlanmıştır ve sonuçlar tablo halinde ekte verilmiştir. Eş ısı ve sıcaklık çizgileri şekilde görülmektedir.

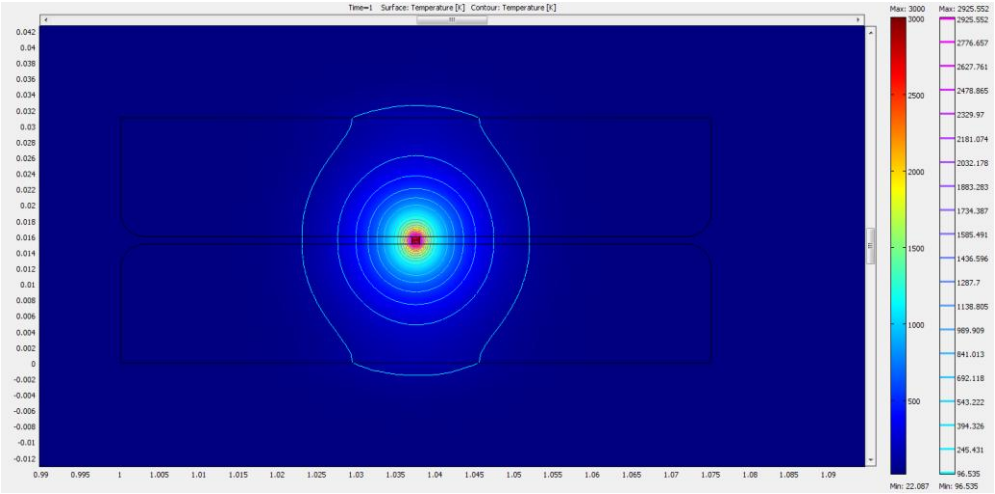


Şekil 5.20: Düzlem-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(2000 ^{o}C)

Çizelge 5.7: Düzlem-düzlem elektrot (2000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

Isı Geçişi / Zaman (s)	Düzlem Elektrot	Düzlem Elek. Yüzeyinden	Düzlem elek. Temas Yüzeyinden
1	2190.70 [W]	11439.87 [W/m]	1.11809e5 [W/m]
2	2564.26 [W]	10437.05 [W/m]	1.019886e5 [W/m]
3	2775.38 [W]	9804.50 [W/m]	95796.67 [W/m]

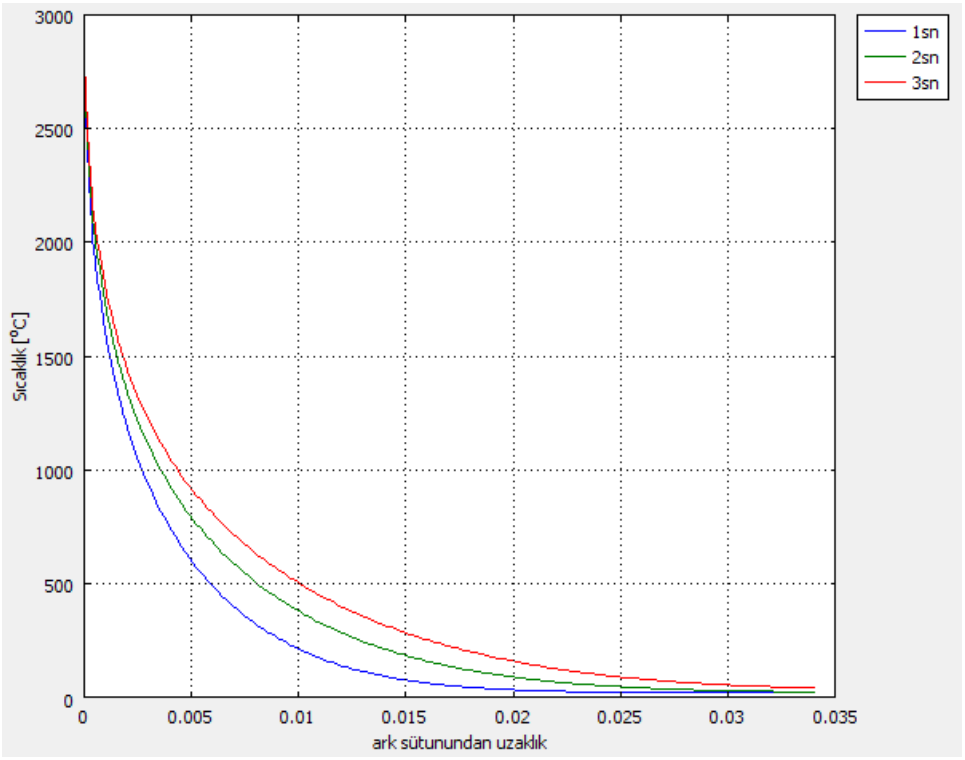
Düzlem elektrotlar arası açıklığın 1 mm olduğu sistemde sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s yanan arklar için analizler yapılmıştır. Ark sütununun sıcaklığı 3000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.21'de verilmiştir.



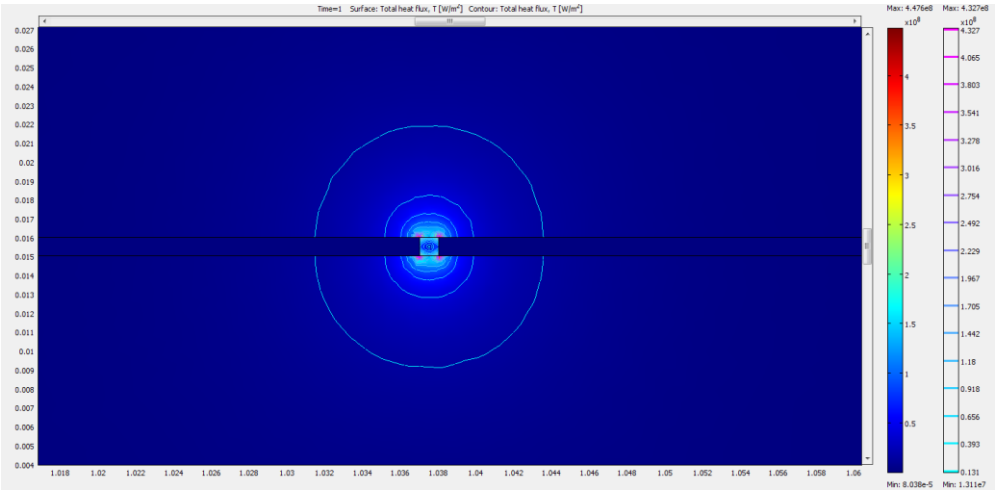
Şekil 5.21: Düzlem-düzlem elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (3000 ^{o}C)

Şekil 5.22'de farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.

Şekil 5.23'de de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi17226.31 [W/m], düzlem elektrodun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 3296.36 [W] ve ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 1.683631e5 [W/m] dir. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise çizelge 5.8 'de verilmiştir. 2 ve 3 mm'lik hava aralıkları için analiz tekrarlanmıştır ve sonuçlar tablo halinde ekte verilmiştir.



Şekil 5.22: Düzlem elektrot sıcaklık dağılımı



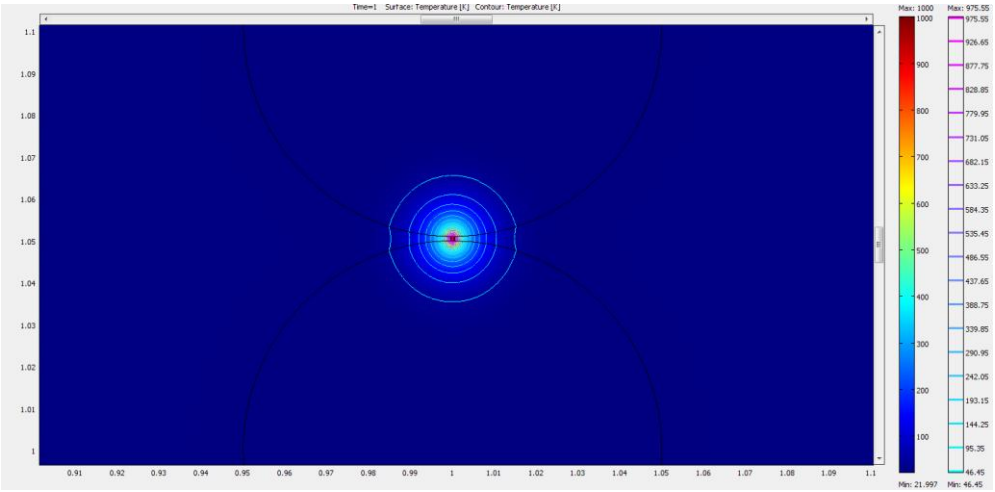
Şekil 5.23: Düzlem-düzlem elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(3000 °C)

Çizelge 5.8: Düzlem-düzlem elektrot (3000 °C) ısı geçişi tablosu

Isı Geçişi / Zaman (s)	Düzlem Elektrot	Düzlem Elek. Yüzeyinden	Düzlem elek. Temas Yüzeyinden
1	3296.36 [W]	17226.31 [W/m]	1.683631e5 [W/m]
2	3859.16 [W]	15718.18 [W/m]	1.535946e5 [W/m]
3	4178.14 [W]	14762.94 [W/m]	1.44244e5 [W/m]

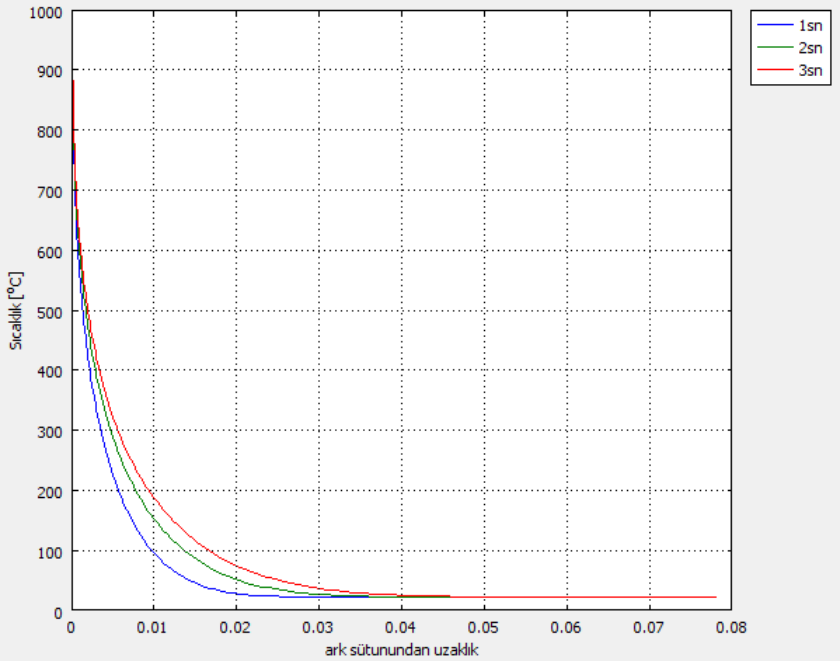
5.3.3.3 Küre-Küre Elektrot Sistemi İçin Analiz

Düzlem elektrotlar arası açıklığın 1 mm olduğu sistemde sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s yanan arklar için analizler yapılmıştır. Ark sütununun sıcaklığı 1000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.24'de verilmiştir.



Şekil 5.24: Küre-küre elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (1000 ^{o}C)

Şekil 5.25'de farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.



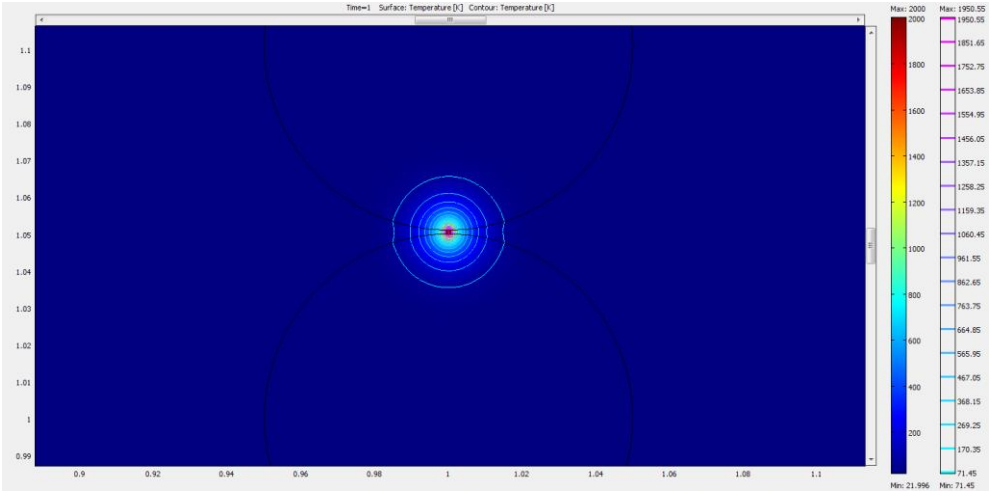
Şekil 5.25: Küre elektrot sıcaklık dağılımı

Şekil 5.26'da de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi 6369.91 [W/m], düzlem elektrodun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 1135.66 [W] ve ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 48577.00 [W/m]dir. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise çizelge 5.9'da verilmiştir. 2 ve 3 mm'lik hava aralıkları için analiz tekrarlanmıştır ve sonuçlar tablo halinde ekte verilmiştir.

Çizelge 5.9: küre-küre elektrot (1000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

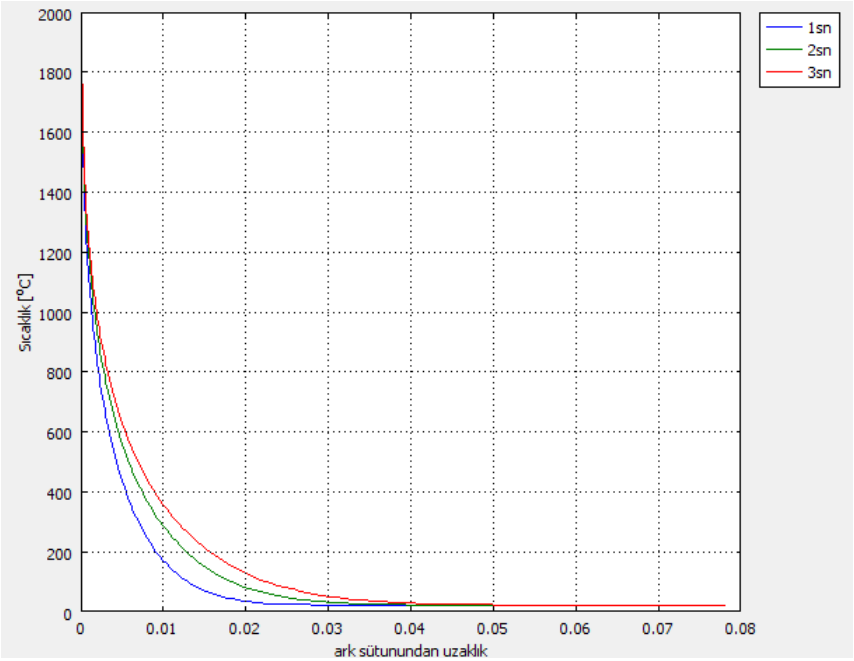
Isı Geçişi / **Zaman (s)**	**KÜRE Elektrot**	**KÜRE Elek. Yüzeyinden**	**KÜRE elek. Temas Yüzeyinden**
1	1135.66 [W]	6369.91 [W/m]	48577.00 [W/m]
2	1449.35 [W]	5794.23 [W/m]	44368.67 [W/m]
3	1672.28 [W]	5484.76 [W/m]	42147.23 [W/m]

Küre elektrotlar arası açıklığın 1 mm olduğu sistemde sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s yanan arklar için analizler yapılmıştır. Ark sütununun sıcaklığı 2000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.26'da verilmiştir.



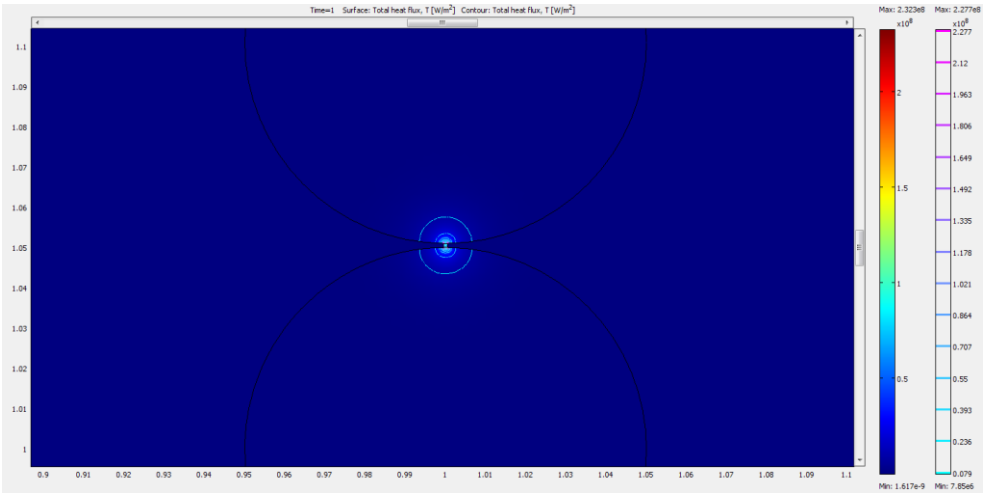
Şekil 5.26: Küre-küre elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (2000 ^{o}C)

Şekil 5.27'de farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.



Şekil 5.27: Küre elektrot sıcaklık dağılımı

Şekil 5.28'de de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi 12879.06 [W/m], düzlem elektrodun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 2294.02 [W] ve ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 98244.91 [W/m] dir. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise çizelge 5.10 da verilmiştir. 2 ve 3 mm'lik hava aralıkları için analiz tekrarlanmıştır ve sonuçlar tablo halinde ekte verilmiştir.

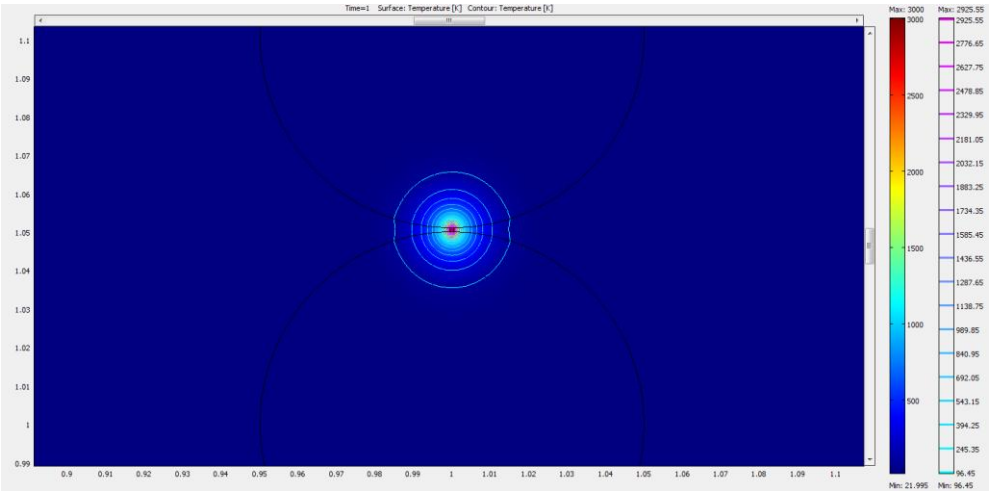


Şekil 5.28: Küre-küre elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(2000 ^{o}C)

Çizelge 5.10: Küre-küre elektrot (2000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

Isı Geçişi / Zaman (s)	KÜRE Elektrot	KÜRE Elek. Yüzeyinden	KÜRE Elek. Temas Yüzeyinden
1	2294.02 [W]	12879.06 [W/m]	98244.91 [W/m]
2	2929.88 [W]	11717.21 [W/m]	89730.62 [W/m]
3	3381.49 [W]	11092.55 [W/m]	85243.38 [W/m]

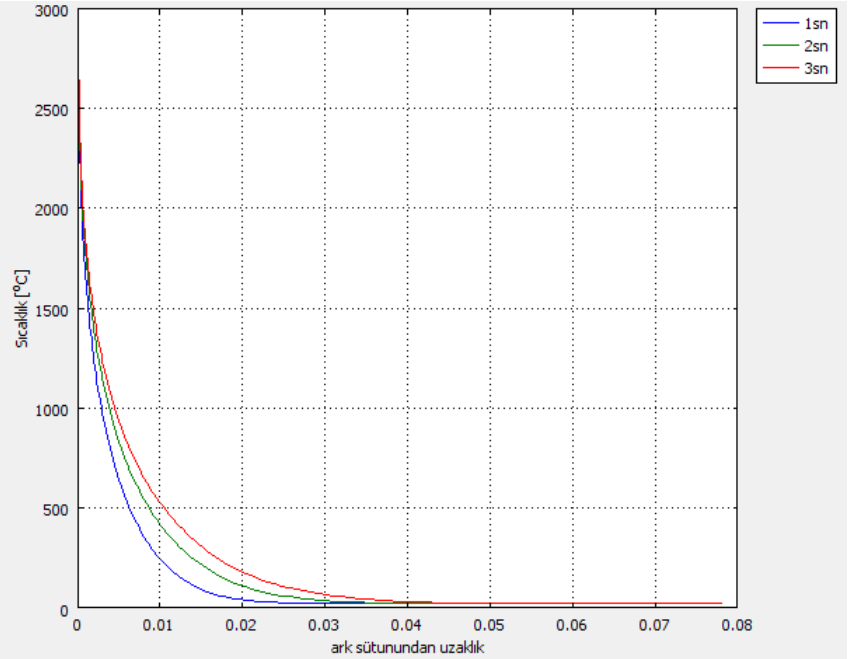
Küre elektrotlar arası açıklığın 1 mm olduğu sistemde sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s yanan arklar için analizler yapılmıştır. Ark sütununun sıcaklığı 3000 ^{o}C alınarak yapılan analizler sonucu sıcaklık dağılışı eş-sıcaklık eğrileri ile birlikte şekil 5.29'da verilmiştir.



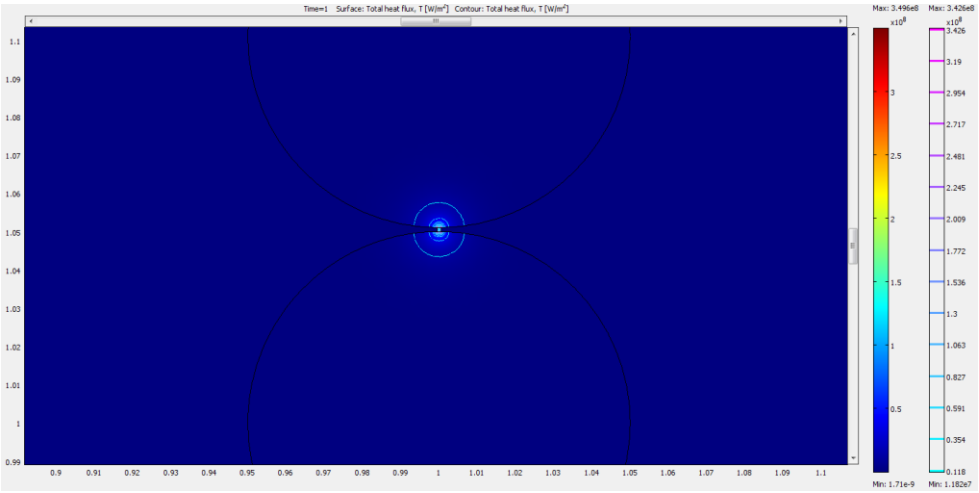
Şekil 5.29: Küre-küre elektrot sıcaklık dağılımı simülasyon sonucu (3000 ^{o}C)

Şekil 5.30'da farklı sürelerde oluşan ark için verilmiş sıcaklık dağılımı çubuk ve düzlem elektrot için farklı grafiklerdeki gösterimleri verilmiştir.

Şekil 5.31'de ise sisteme ilişkin ısı dağılışları görülmektedir. Arkın 1 s yandığı durum için düzlem elektrot yüzeyindeki toplam ısı geçişi 19382.31 [W/m]**,** düzlem elektrodun tamamındaki toplam ısı geçişi ise 3452.88 [W] ve ark sütununun düzlem elektrota temas ettiği yüzey alanındaki ısı geçişi 1.478685e5 [W/m] dir. 2 ve 3 saniyelik ark süreleri için ısı geçişi sonuçları ise çizelge 5.11'de verilmiştir. 2 ve 3 mm'lik hava aralıkları için analiz tekrarlanmıştır ve sonuçlar tablo halinde ekte verilmiştir.



Şekil 5.30: Küre elektrot sıcaklık dağılımı



Şekil 5.31: Küre-küre elektrot ısı geçişi simülasyon sonucu(3000 ^{o}C)

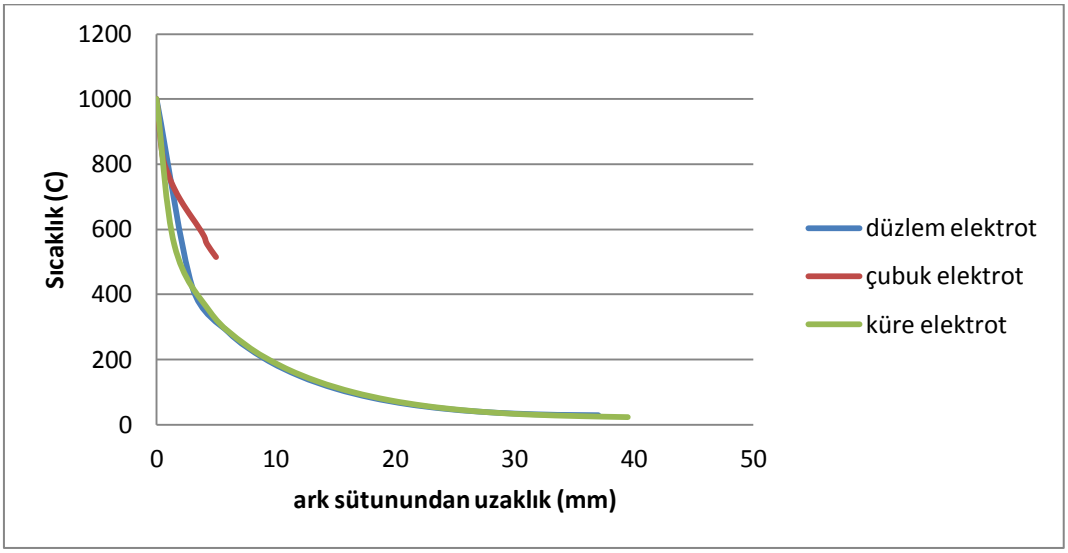
Çizelge 5.11: Küre-küre elektrot (3000 ^{o}C) ısı geçişi tablosu

Isı Geçişi / Zaman (s)	KÜRE Elektrot	KÜRE Elek. Yüzeyinden	KÜRE elek. Temas Yüzeyinden
1	3452.89 [W]	19382.31 [W/m]	1.478685e5 [W/m]
2	4411.79 [W]	17633.24 [W/m]	1.350394e5 [W/m]
3	5091.36 [W]	16698.08 [W/m]	1.28322e5 [W/m]

5.3.4 Isıl Analiz Sonuçları

5.3.4.1 Elektrot Şeklinin Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Sıcaklık dağılımı ve ısı akışı, yüzey alanına çok bağlıdır. Bu durumu görebilmek için farklı elektrot sistemlerine aynı sıcaklığa sahip ve plazma sütununun kesiti aynı olan ark aynı süreler için uygulanarak bir karşılaştırma verilmiştir. Bu üç sistemin aynı elektrot açıklığı ve ark sıcaklığına aynı süreler için maruz kaldığı durumu gösteren grafik Şekil 5.32'de görülmektedir.



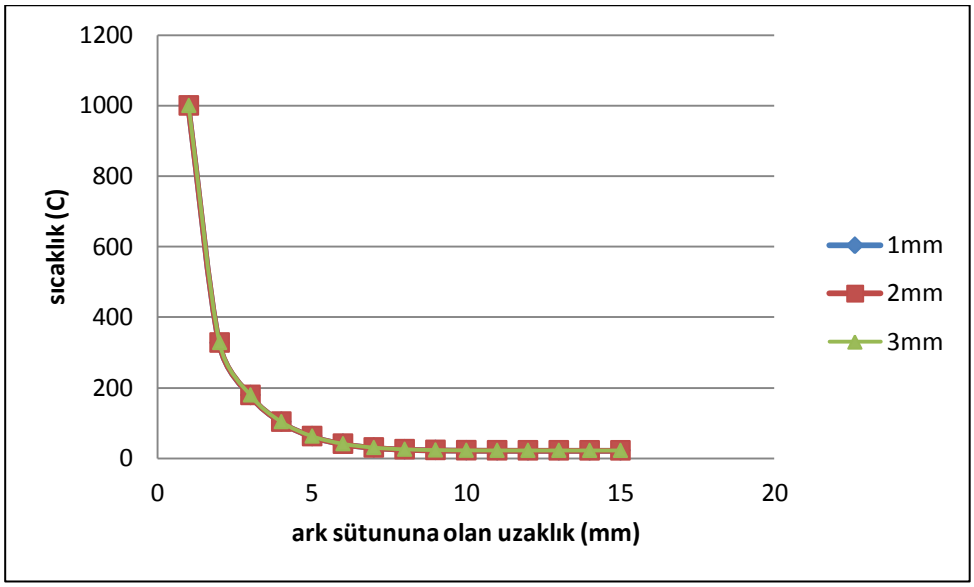
Şekil 5.32: Elektrot sistemlerinin sıcaklık dağılımı karşılaştırması

Grafikten de görülebileceği gibi düzlem ve küre elektrotlarda oluşan sıcaklık dağılımı birbirine çok benzemektedir. Sıcaklık dağılımı kaynaktan (ark sütunundan) uzaklaştıkça logaritmik olarak azalmakta ve belirli bir uzaklıktan sonra sabit bir değere oturmaktadır. Bunun ana nedeni iki sistemde de daha soğuk olan yüzeyin (elektrot yüzeyinin) geniş olmasıdır. Çubuk elektrotta ise alan daha küçük olduğu için aynı miktarda ısı daha az bir yere yayıldığından aynı uzaklıklar için diğer iki elektrota göre daha sıcaktır.

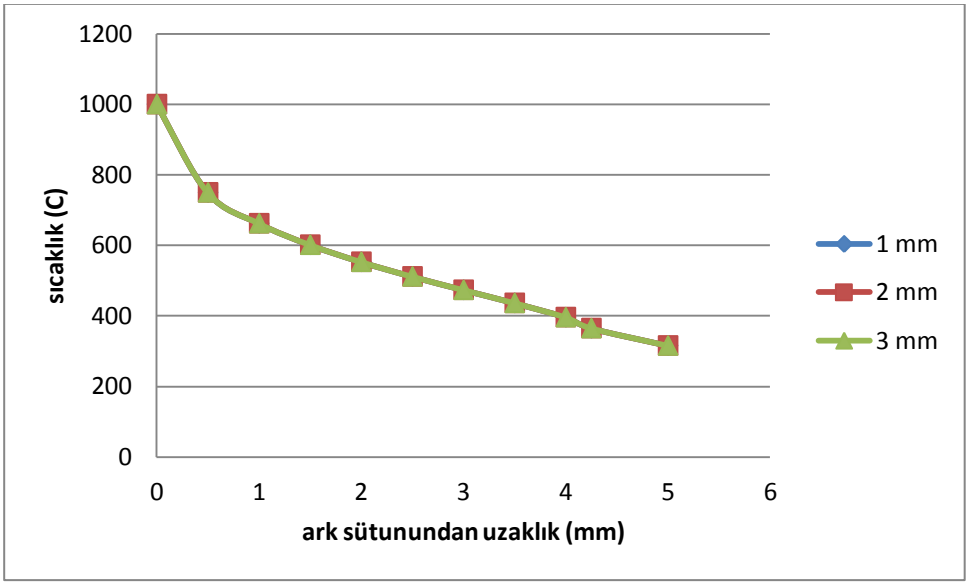
5.3.4.2 Elektrot Açıklığının Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Aynı elektrot sisteminde elektrot açıklığının etkisini görebilmek için elektrotlar farklı aralıklara ayarlandıktan sonra aynı sıcaklıktaki ark sütununa eşit süreler için maruz kaldıkları durum için simülasyonlar yapılmıştır. Elektrot açıklıklarının 1 mm, 2 mm ve 3 mm değerleri için her üç elektrot sistemi için de simülasyonlar tekrarlanmış ve

aynı eksene sıcaklık dağılımları çizdirilerek elektrot açıklığına nasıl tepki verdikleri gözlemlenmiştir.

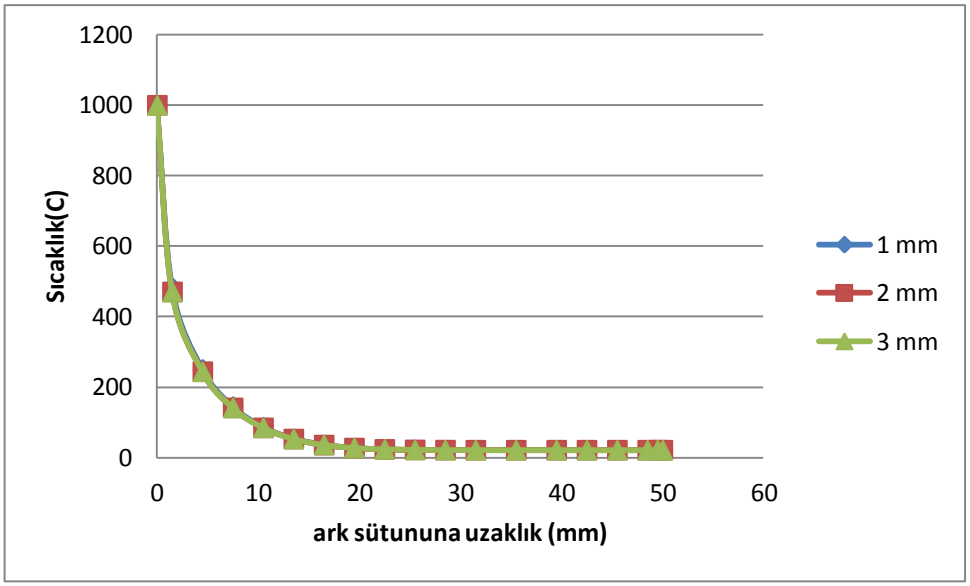


Şekil 5.33: Düzlem elektrot farklı açıklıkları için sıcaklık dağılışı eğrileri



Şekil 5.34: Çubuk elektrot farklı açıklıkları için sıcaklık dağılışı eğrileri

Şekil 5.33, 5.34 ve 5.35'de her üç elektrot için aynı açıklıklarda yapılan analiz sonuçları görünmektedir. Grafiklerde elektrot açıklığının bu modeller için sıcaklık dağılımına etki etmediği görülmektedir. Bunun nedeni modeller oluşturulurken yapılan kabullerdir. Elektriksel olarak ark sıcaklığı zamanla değişmeyen ve sabit kesite sahip olan bir silindir olarak tanımlandığı için elektrot açıklığının sıcaklık dağılışına etkisi burada görülmemektedir.

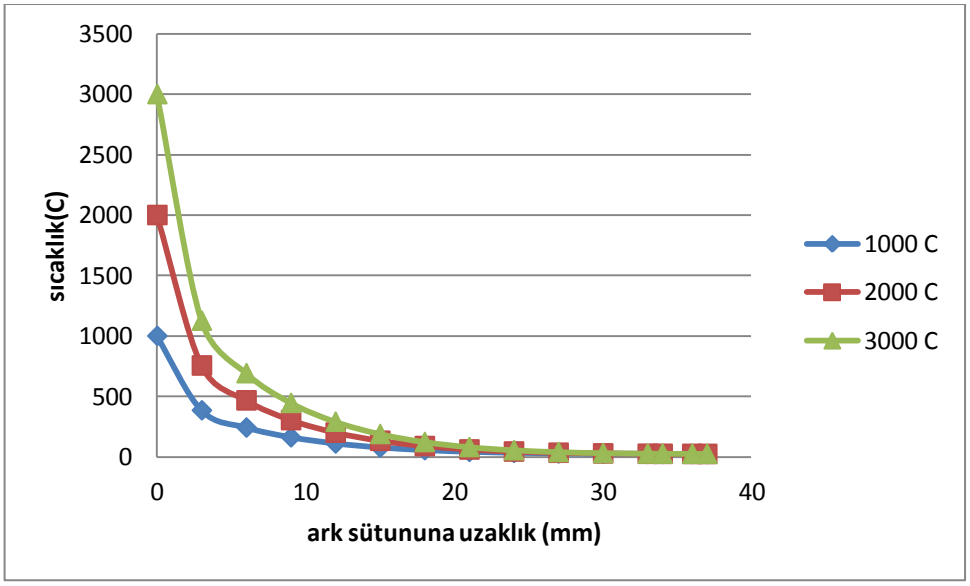


Şekil 5.35: Küre elektrot farklı açıklıkları için sıcaklık dağılışı eğrileri

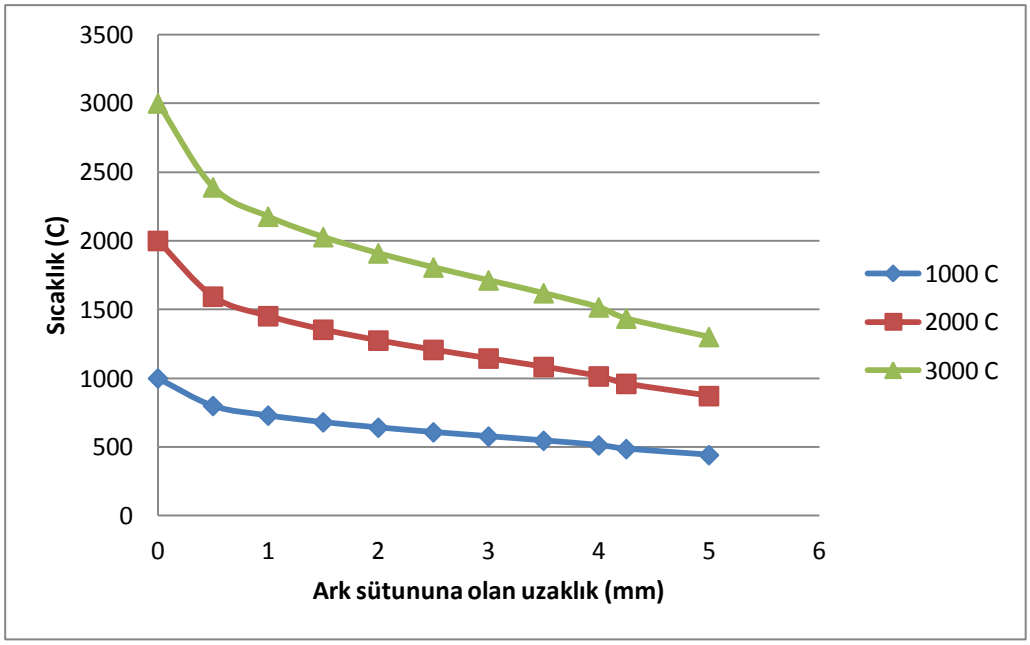
5.3.4.3 Plazma Sütununun Sıcaklığının Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Elektrik arkının sıcaklık dağılımını diğer bütün ısıl sistemlerde olduğu gibi kaynak sıcaklığına çok bağlıdır. Kaynak sıcaklığı ne kadar fazla olursa, temas ettiği daha soğuk yüzeye o kadar fazla ısı geçişi olur ve bu sıcaklığı aynı ölçüde arttırır.

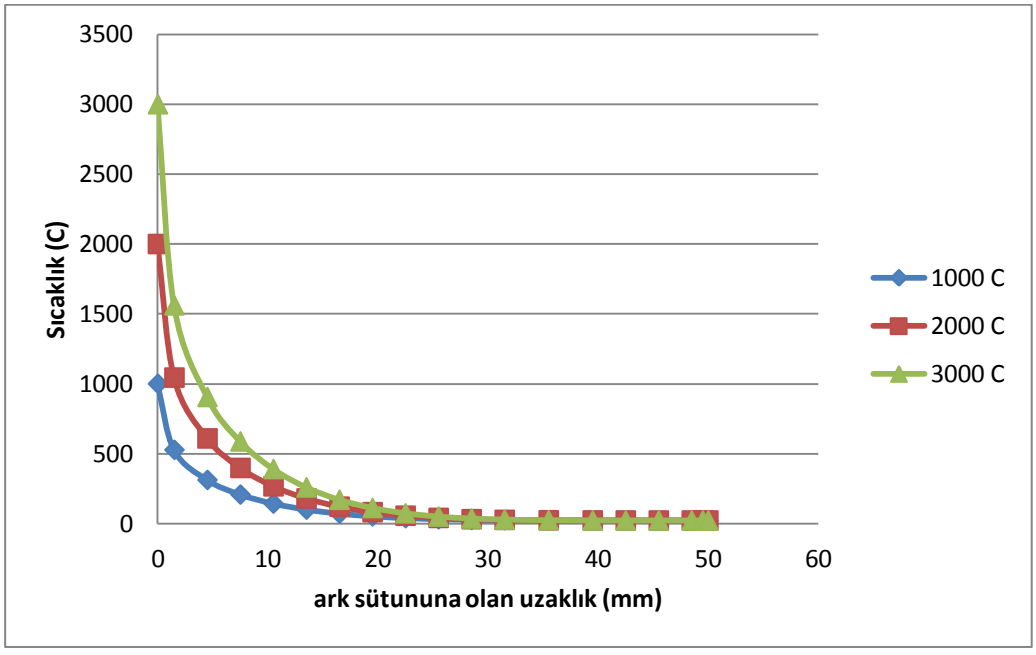
Aynı elektrot sisteminde elektrot açıklığının etkisini görebilmek için elektrotlar farklı aralıklara ayarlandıktan sonra aynı sıcaklıktaki ark sütununa eşit süreler için maruz kaldıkları durum için simülasyonlar yapılmıştır.



Şekil 5.36: Düzlem elektrot farklı plazma sütunu sıcaklıkları için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri

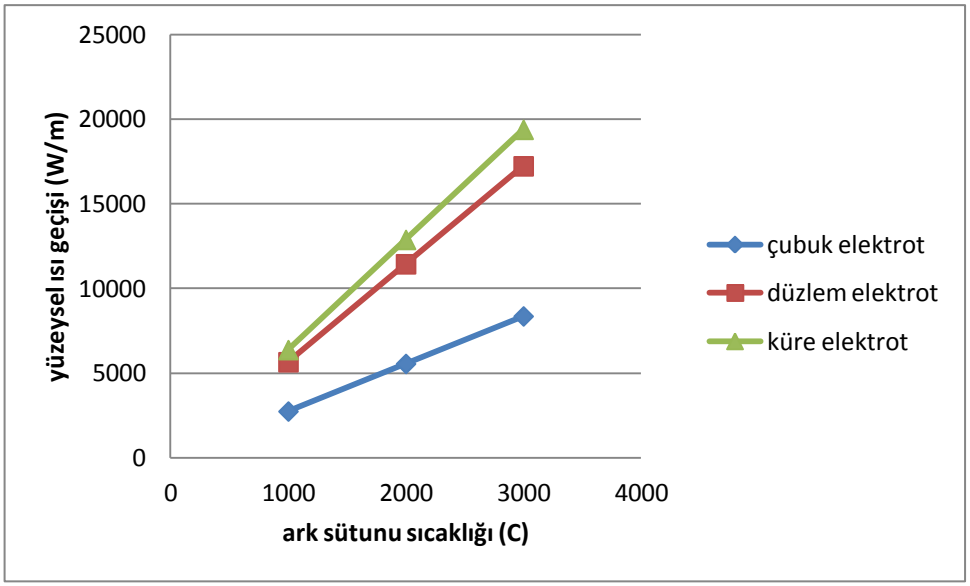


Şekil 5.37: Çubuk elektrot farklı plazma sütunu sıcaklıkları için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri



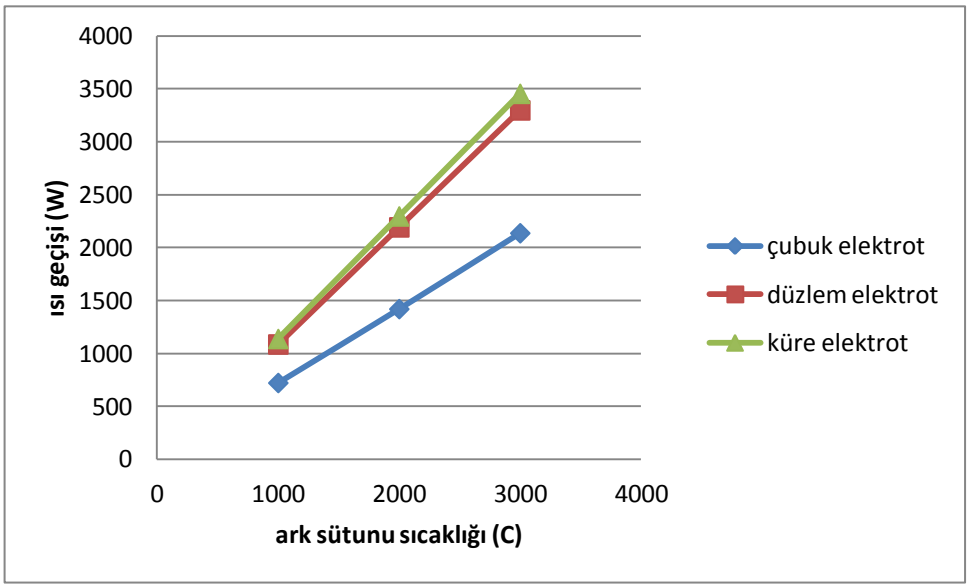
Şekil 5.38: Küre elektrot farklı plazma sütunu sıcaklıkları için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri

Şekil 5.39'da yüzeydeki ısı geçişinin farklı elektrotlar için ark sütunu sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Sıcaklık artışı ile paralel olarak artış gösteren ısı geçişi şekilde de görülebileceği gibi farklı yüzey alanına sahip elektrot yapıları için bu dağılım farklı oluşmaktadır. Yüzey alanı en küçük olan çubuk elektrotta yüzeydeki ısı geçişi en az olmaktadır.



Şekil 5.39: Elektrot sistemlerinin farklı sıcaklıklar için yüzeysel ısı geçişleri

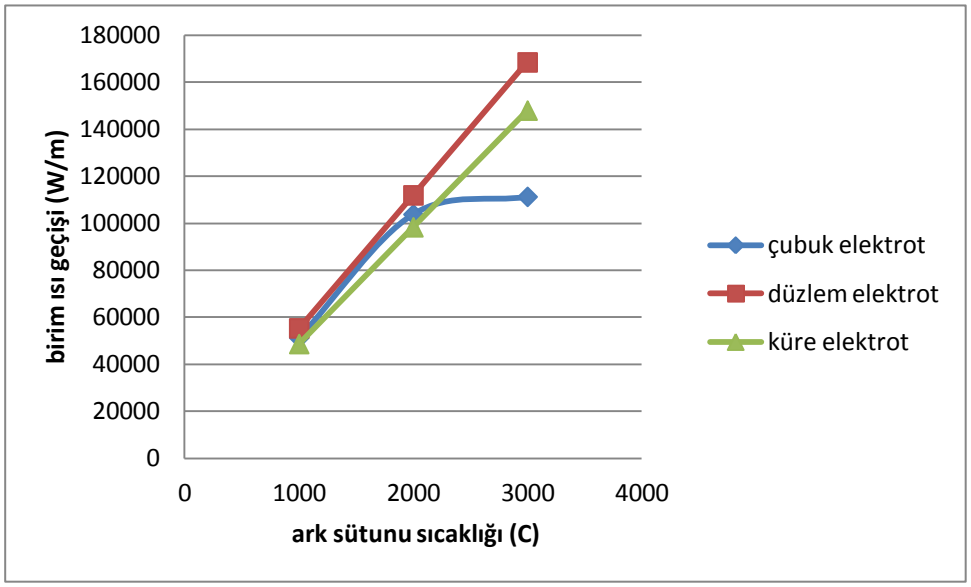
Şekil 5.41'de ise elektrotlardaki toplam ısı geçişleri verilmiştir. Yüzeysel ısı geçişi karakteristiklerine benzer olarak sıcaklık artışı ile ısı geçişi artmaktadır. Yüzey alanı ile orantılı olarak artan ısı geçişinin, yüzey alanları çubuk elektrottan çok daha fazla olan düzlem ve küre elektrotlarda çok daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.40: Elektrot sistemlerinin farklı sıcaklıklar için toplam ısı geçişleri

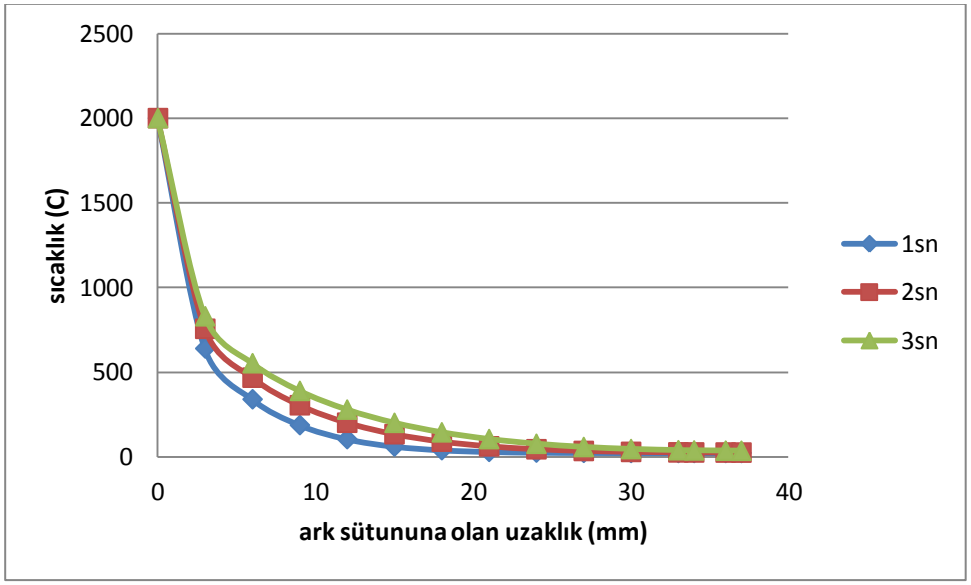
Isı geçişi, sıcak ark sütunundan elektrotlara temas noktasından yayılır ve bu nedenle temas bölgesindeki birim ısı geçişi miktarı çok büyüktür. Bu bölgedeki ısı geçişlerinin sıcaklık ile değişimine bakıldığında diğer grafiklerden farklı bir yapı ile karşılaşılır. Ark sütunu sıcaklığının 1000 ^{o}C ve 2000 ^{o}C durumları için temas noktasındaki birim ısı geçişleri elektrotlarda birbirine yakın çıkmıştır. Bunun nedeni

modellerdeki ark sütunu sıcaklıklarının ve kesitinin aynı olmasıdır. Fakat sıcaklık arttıkça toplam elektrot hacmine ve yüzey alanına bağlı olarak elektrot sıcaklığı çevre sıcaklığı ile denge noktasına gelmeye çalışır. Buna ulaştıktan sonra sıcaklıkları eşit olacağı için ark sütunundan elektrotlara bir ısı geçişi olmaz. Bu durum şekil 5.41'de açıkça görülmektedir. Yüzey alanı ve hacmi daha küçük olan çubuk elektrot ısıl dengeye geldikten sonra ısı geçişi olmamaktadır.

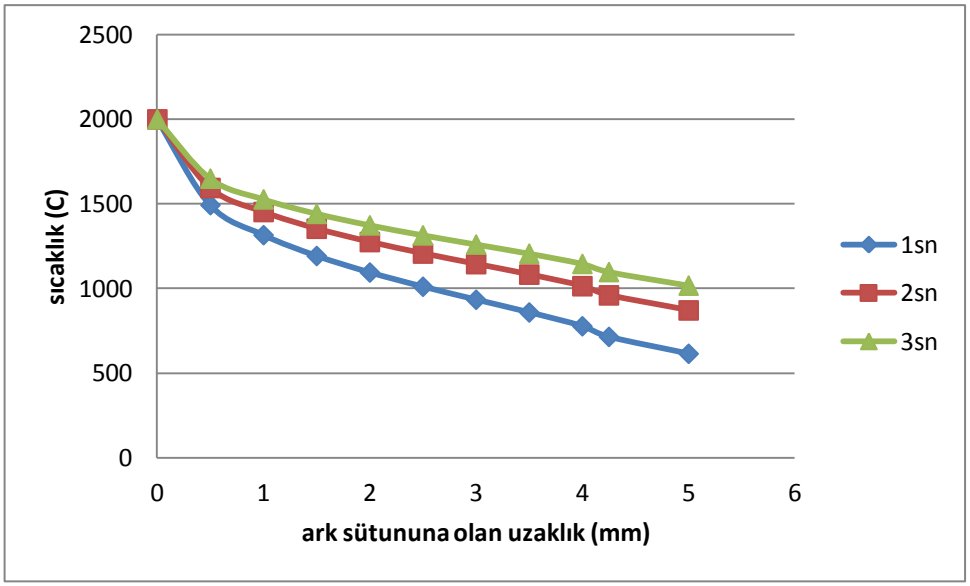


Şekil 5.41: Elektrot sistemlerinin farklı sıcaklıklar için arka temas eden yüzey alanındaki ısı geçişleri

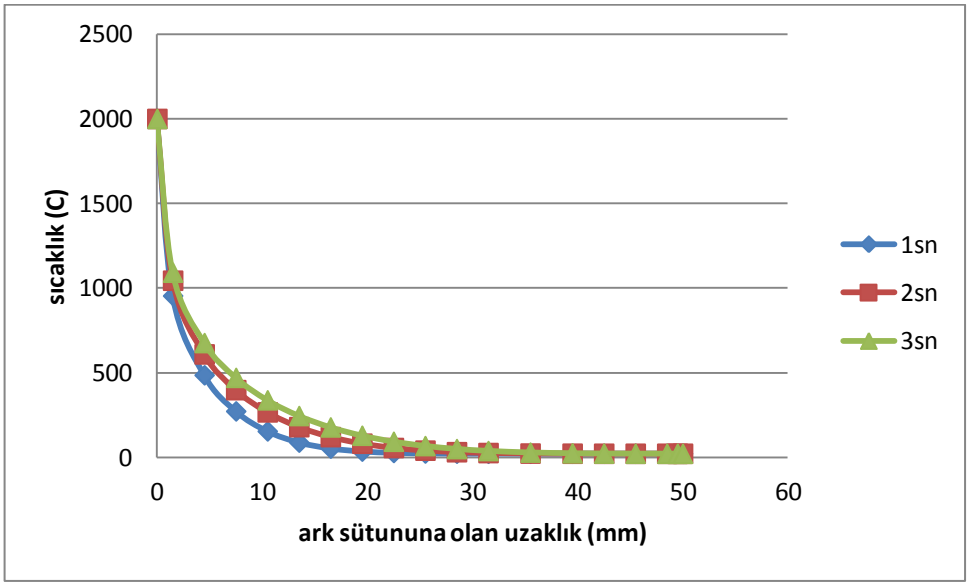
5.3.4.4 Ark Süresinin Sıcaklık Dağılımına Etkisi



Şekil 5.42: Düzlem elektrot farklı ark süreleri için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri



Şekil 5.43: Çubuk elektrot farklı ark süreleri için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri



Şekil 5.44: Küre elektrot farklı ark süreleri için yüzeysel sıcaklık dağılışı eğrileri

Her üç sistem için arkın yanma süresi arttıkça yüzey sıcaklıklarının arttığı görülmektedir.

Elektrik arkı oluştuktan sonra sönmesi belli bir süre alan bir olaydır. Sönene kadar temas ettiği yüzeyle ısı geçişi devam eder. Bu nedenle ark ne kadar uzun süre yanarsa arkı oluşturan elektrotlar o ölçüde ısınır. Bunu görebilmek için her üç sisteme de 2000 ^{o}C sıcaklıktaki ark sırasıyla 1 s, 2 s ve 3 s süreler için uygulanmıştır. Sonuçlar grafiklerde görülmektedir (5.42, 5.43, 5.44).

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üzerinden akım geçen kontakların açılması sırasında oluşan elektrik arkının elektriksel ve ısıl özellikleri incelenmiştir. MATLAB Simulink kullanılarak ark modelleri, bir periyot içinde farklı zamanlarda ark oluşturulacak şekilde analiz edilmiş ve bu farklı kontak açma zamanları için arkın akım ve gerilim karakteristikleri verilmiştir. Aynı zamanda dört farklı ark modeli için akım ve gerilim karakteristikleri eş eksenli olarak çizilmiş ve böylece ark modelleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bunun yanında elektrik arkının ısıl özelliklerini görebilmek amacı ile sonlu elemanlar tabanlı analiz programı olan COMSOL programı yardımı ile modellemesi yapılmış ve farklı elektrot sistemleri için arkın elektrot üzerindeki ısı ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir.

Ark modellerinin farklılıklarını ortaya koyabilmek ve karakteristiklerini karşılaştırabilmek için kurulan endüktif devrede parametreleri değiştirilmeden dört ark modelinin (Mayr, Cassie, KEMA ve Schwarz) de farklı zamanlarda açma yaparak ark oluşturmaları sağlanmış ve akım ve gerilim eğrileri eş eksenli çizdirilmiş ve yorumlanmıştır. Çıkan eğriler arasındaki farklardan en önemlisi ark gerilimleri arasındaki farklardır. Kema ve Schwarz modellerinde ark oluşurken gerilim biraz yükseldikten sonra üstel olarak azalarak belli bir değere oturduktan sonra, sönme periyodunda gerilim bir kere daha artarak şebeke gerilimine yönelmiştir. Cassie modelinde gerilim ark oluşumu ile birlikte sabit bir değerde ark sönene kadar kalmıştır. Mayr modelinde ise ark sırasında gerilim sıfır olarak seyretmektedir. Sıfır geçişi dışında açılan kontaklarda ise ark gerilimi, sıfır geçişinde gösterdiği karakteristikten farklı olarak gerilim artışı göstermeden kararlı duruma geçmiştir..

Modellerin kontakların açılmasına ve arkın sönmesine verdikleri tepki süreleri de farklılıklar göstermektedir. Yapılan analizlerde modellerdeki arkın başlangıç ve bitiş zamanları arasında farklar vardır. Bunlar modellerdeki "τ" zaman sabitlerinin farklı olmasıdır.

Elektrik arkının elektrotlar üzerindeki ısı ve sıcaklık dağılımını bulabilmek için yüksek gerilim laboratuarında bulunan üç çeşit elektrot (düzlem, çubuk ve küre) COMSOL programında gerçeğe daha yakın olması açısından bire bir ölçekli olarak çizilmiştir. ark sütunu ark modellerinde yapılan kabuller doğrultusunda sıcaklığı ve kesiti zamanla değişmeyen bir silindir olarak modellenmiş ve malzemelerin fiziksel özellikleri dikkate alınmıştır. modellenme yapıldıktan sonra farklı elektrot açıklığı, ark sütunu sıcaklığı ve ark süreleri için üç elektrot sistemi için ayrı ayrı analizler yapılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde farklı elektrot sistemleri için bu dağılımlar farklılık göstermiştir. Çubuk elektrottan daha fazla yüzey alanına sahip olan düzlem ve küre elektrotlarda sıcaklık dağılımı birbirine benzer çıkmış ve ark sütunundan uzaklaştıkça üstel olarak azalmıştır. Çubuk elektrot daha az yüzey alanına sahip olduğu için aynı sıcaklıktaki ark için birim yüzeyden geçen ısı geçişi fazla olduğu için daha fazla ısınmıştır.

Farklı elektrot açıklıklarında oluşan arkın ısıl dağılımları incelendiğinde ise bu modelleme için elektrot açıklığının bir etki yaratmadığı görülmektedir. Bunun nedeni ark sütununun sıcaklığı ve kesiti zamanla değişmeyen bir silindir olarak tanımlanmasıdır. Sıcaklık dağılımı ile ark sütununun sıcaklığı arasındaki ilişkiye bakıldığında ise sütunun sıcaklığının dağılıma doğrudan bir etkisi olduğu söylenebilir. Sistemdeki tek ısı kaynağı ark sütunu olduğu için arkın sıcaklığı arttıkça yüzeyin sıcaklığı da artmaktadır.Bu etki yüzey alanı küçük olan çubuk elektrotta çok daha net görülmektedir. Sütundan uzaklaştıkça özellikle düzlem ve küre elektrotlarda sıcaklık artışının bu etkisinin azaldığı görülmektedir. Sütundan belirli bir mesafeden sonra ise uygulanan farklı sıcaklıklar için dağılımların değişmediği görülmektedir. bunun neden de sütundan uzak noktalara olan ısı akışının azalması ve bu nedenle o noktaların sıcaklıklarının çok fazla değişmemesidir.

Ark enerji sistemlerinde istenmeyen bir durum olduğu için olabildiğince çabuk söndürülmesi gereklidir. Bu yüzden yapılan simülasyonlarda gerçeğe yakın olacak şekilde arkın etki süresi kısa tutulmuş ve maksimum üç saniye ile sınırlandırılmıştır. Üç saniyeye kadar yapılan bu analizler sonucunda ark süresinin artışının ısı geçişini arttırarak elektrotları daha fazla ısıttığı ortaya çıkmıştır. Çubuk elektrot sisteminde artan ark süresi ile elektrotlar daha fazla ısındığı görülmüştür.

Comsol programı ile elde edilen ısı ve sıcaklık dağılımlarının elektrot açıklığının az olması sebebiyle konveksiyon etkisinin çekirdek sıcaklığının yanında ihmal edilebilir durumda olmasından dolayı kabul edilebilir oldukları söylenebilir. Elektriksel arkın mikro parametrelere çok bağımlı doğası nedeniyle tam anlamıyla doğru bir dağılım çıkartabilmek için çevre v etkileri de kapsayacak bir deneysel çalışma yapılması gereklidir. Termal kamera kullanılarak, boşalma başlamadan, başlayıp kararlı hale geçtiği zaman ve ark sönmeye başladığı zamanki sıcaklık ve ısı değişimleri gözlenerek, arkın yanmaya başlamasında sönene kadar nasıl bir ısıl davranış sergilediği konusunda fikir sahibi olunabilir. Bu veriler analiz sonuçları ile karşılaştırılıp arkın modellenmesi yapılırken ne tür kabuller ve basitleştirmeler yapılabilineceği bulunabilir.

Ark çevreye sadece iletim yoluyla ısı yaymaz. Çevrede bulunan hava nedeniyle konveksiyon etkisi ile ve az da olsa ışıma ile de ısısını elektrotlara ve çevreye iletir. Bu nedenle konveksiyon ve ışıma etkilerini de içeren bir model kurulup veya bu etkileri de hesaplayabilen bir analiz programı kullanılması durumunda arkın farklı çevre ortamlarında elektrotlarla nasıl bir ısıl alışverişte olduğu bulunabilir. Çoklu-fizik analiz programları ile arkta oluşan sıcaklığın; akım ve gerilimle nasıl değiştiği incelenebilir.

Kullanılan sistemler simetrik geometriye sahip oldukları için üç boyutlu sistemler için hesap yapmak yerine iki boyutlu analiz ile sonuçlar doğru şekilde elde edilebilir. Simetrik geometriye olmayan sistemler için, simetriyi bozan bölgelerdeki ısı dağılımı ile simetrik olan yerlerdeki ısı dağılımı karşılaştırılarak normalde karşılaşabileceğimiz her durum için sonuca varılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Nitu, S., Nitu, C. ve Anghelita, P., (2005), Electric Arc Model, for High Power Interrupters, Eurocon, Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24.

[2] Habedank, U., (1993), Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short- Circuit Breaking Tests, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, 1921 – 1925.

[3] Sluis, L., Rutgers, W.R., (1995), The Comparison of Test Circuits with Arc Models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, 280-285.

[4] Lionel R., Medina, R. B., (2003), Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF6 Circuit Breaker Simulations, International Conference on Power Systems Transients-IPST, New Orleans, USA.

[5] Schawemaker , P. H.,ve Sluis, L., (2000), An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, April, 580 – 584.

[6] Guardado, J. L., Maximov, S. G., Melgoza, E., Naredo, J. L., (2005), An Improved Arc Model Before Current Zero Based on the Combined Mayr and Cassie Arc Models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January, 138 – 142.

[7] Cividjian, G. A., ve Silvis, N. G., (1998), Kema Arc Model Parameters Evaluation, University of Craiova, Romania, *IEEE*, 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments, OPTIM '98, Romania.

[8] Wilkins, R., Allison, M. and Lang, M., (2005), Effect of Electrode Orientation in Arc Flash Testing, *IEEE*, Industry Applications Conference, 40th IAS Annual Meeting, Hong Kong, 2-6 October, pp. 459-465.

[9] Wilkins, R., Lang, M., Allison, M., (2008), Effect of Insulating Barriers in Arc Flash Testing, *IEEE*, 54th Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference PPIC.

[10] Piqueras, L., Henry, D., Jeandel, D., Scot, J., ve Wild J., (2008), Three-Dimensional Modelling of Electric-Arc Development in a Low-Voltage Circuit-Breaker, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, No. 19–20, 4973–4984.

[11] Sluis, L., (2001), Transients in Power Systems, John Wiley & Sons, New York.

[12] Ragaller, K., (1978), Current Interruption in High-Voltage Networks, Plenum Press, New York.

[13] Browne, T.E., (1984), Circuit Interruption, Theory and Techniques, Marcel Dekker, New York.

[14] Pryor, B. M., (2001), Distribution Switchgear, Chapter 10 of High Voltage Engineering and Testing, H. M. Ryan, 2nd Ed., The Institution of Electrical Engineers, London, U.K.

[15] Ayrton, H., (1902), The Electric Arc, D. Van Norstrand, New York.

[16] Slade, P. G., (2008), The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application, CRC Press, Boca Raton, FL.

[17] Greenwood, A., (1994), Vacuum Switchgear, The Institution of Electrical Engineers, London, U.K.

[18] Garzon, R. D., (2002), High Voltage Circuit Breakers. Design and Applications, 2nd Ed., Marcel Dekker, New York.

[19] Özkan, F. Y., (1994), Yüksek Gerilim Güç Kesicileri Teori, Tasarım ve Deney, İTÜ yayınları, İstanbul.

[20] Gustavsson, N., (2004), Evaluation and Simulation of Black-box Arc Models for High Voltage Circuit- breakers, Yüksek Lisans Tezi, Avdelning Institution, İsveç.

[21] Schavemaker, P. H., (2001) Arc Model Blockset For Use with MATLAB Simulink and Power System Blockset, User's Guıde, Versiyon 2, Delf University of Technology, The Netherlands.

[22] Incropera, F., P., (2006), Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th Edition, Wiley.

[23] Eckert, E. R. G. ve Drake, R. M., (1972), Analysis of Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York.

[24] Myers, G. E., (1971), Analytical Methods in Conduction Heat Transfer, McGraw-Hill, New York.

[25] Wang, L., Zhou, X. ve Wei, X., (2008), Heat Conduction: Mathematical Models and Analytical Solutions, Springer, Berlin.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Aytuğ FONT

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 12.08.1986

Adres: Fatih mahallesi, Bilge sokak, Büyükçekmece Konakları, E-blok, No:9

E-Posta: font@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yayın ve Patent Listesi:

Font, A., Kara, A., Kalenderli, Ö., "Effect of electrode type on arc flash testing for ac systems", The Fifth IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems (AsianPES'2012), Phuket, Thailand, pp. 34-37, April 2–4, 2012.

Font, A., Kalenderli, Ö., "Influence of electrode shape on heat dissipation caused by electrical arc across the metal electrodes", CEEC-TAC1 1st Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry, Craiova, Romania, Book of Abstracts, p. 189, 7-10 September 2011.