İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKSEL BOŞALMANIN BULANIK MANTIK İLE BENZETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kemal ARIKAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

KASIM 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKSEL BOŞALMANIN BULANIK MANTIK İLE BENZETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kemal ARIKAN
(504111024)

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ

KASIM 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Kemal ARIKAN,** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"ELEKTRİKSEL BOŞALMANIN BULANIK MANTIK İLE BENZETİMİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı:	**Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri:	**Doç. Dr. Emel ÖNAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi: **23 Eylül 2013**
Savunma Tarihi: **20 Kasım 2013**

ÖNSÖZ

Öncelikle, bana kendisiyle çalışma fırsatı veren, çalışmalarım boyunca beni sabırla takip eden ve sorunlarıma çözüm getiren sevgili hocam Prof. Dr. Özcan Kalenderli'ye çok teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimimi aldığım, bana iyi bir mühendislik eğitimi veren İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü akademik kadrosuna teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca tüm çalışmalarıma fırsat tanıyan maddi manevi yardımını esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler ederim.

Kasım 2013

Kemal Arıkan
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 1
1.3 Hipotez 4
2. ELEKTRİKSEL BOŞALMALAR **7**
2.1 Elektriksel Boşalmaların Sınıflandırılması 7
2.1.1 Delinme ve atlama 7
2.1.2 Kısmi boşalmalar 7
2.1.2.1 Korona 7
2.1.2.2 İç boşalmalar 8
2.1.2.3 Yüzeysel boşalmalar 8
2.2 Elektriksel Boşalmaların İncelenmesi 10
3. BULANIK MANTIK **11**
3.1 Bulanık Sistemlerin Gelişimi 13
3.2 Bulanık Mantık Denetleyicinin Üstünlük ve Sakıncaları 16
3.2.1 Üstünlükler 16
3.2.2 Sakıncalar 16
3.3 Bulanık Mantık Araç Çubuğu 17
3.4 Bulanık Mantık Araç Kutusu Grafiksel Kullanıcı Arayüzü 18
3.4.1 Bulanık çıkarım sistemi düzenleyici 18
3.4.2 Üyelik fonksiyon düzenleyici 18
3.4.3 Kural düzenleyici 20
3.4.4 Kural gösterici 20
3.4.5 Yüzey gösterici 20
4. İYONİZASYON SÜREÇLERİ ve MODELLEME **21**
4.1 İyonizasyon Süreçleri 21
4.1.1 Townsend birinci iyonizasyon katsayısı 21
4.1.2 Townsend'in ikinci iyonlaştırma katsayısı γ ve düzgün alanda delinme gerilimi 25
4.2 Modelleme 27
4.3 Bazı Elektrot Sistemleri İçin E_{max} ve α'nın Analitik İfadesi 28
4.3.1 Küre-düzlem elektrot sistemi 28

4.3.2 Küre-küre elektrot sistemi 29
4.4 Elektrot Sistemleri İçin η'nın Hesaplanması 29
4.4.1 Düzlem-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar analizi 29
4.4.2 Küre-küre elektrot sistemi için sonlu elemanlar analizi 32
4.4.3 Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar analizi 33
4.5 E_{ort}, E_{max} ve η'nın Hesaplanması 35
4.6 Düzlem-Düzlem Elektrot Sistemi İçin Farklı Açıklıklarda, Farklı Basınçlarda ve Farklı Gerilim Artış Hızları Durumunda Delinme Geriliminin Hesaplanması 36
4.7 Küre-Küre Elektrot Sistemi İçin Farklı Açıklıklarda, Farklı Basınçlarda ve Farklı Gerilim Artış Hızları Durumunda Delinme Geriliminin Hesaplanması 38
4.8 Küre-Düzlem Elektrot Sistemi İçin Farklı Elektrot Açıklıkları, Farklı Basınçlar ve Farklı Gerilim Artış Hızı için Delinme Gerilimleri 39
4.9 Bulanık Çıkarım Sistemleri İçin Giriş ve Çıkış Değerlerinin Hesaplanması ... 41
4.10 Bulanık Çıkarım Sistemleri 46
4.10.1 Düzlem-düzlem elektrot sistemi delinme gerilimi için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi 46
4.10.2 Küre-küre elektrot sistemi delinme gerilimi için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi 49
4.10.3 Küre-düzlem elektrot sistemi delinme gerilimi için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi 51
4.10.4 Düzlem-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi 52
4.10.5 Küre-küre elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi 55
4.10.6 Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi 57
4.11 Farklı Elektrot Sistemleri, Farklı Elektrot Açıklıkları, Farklı Basınç Değerleri ve Farklı Gerilim Artış Hızları için Delinme Gerilimini Gösteren Simulink Modeli 59
4.11.1 Modellemeden elde edilen delinme gerilimi değerleri 63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 65
KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ 71

KISALTMALAR

AC	**:** Alternative Current
ANFIS	**:** Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
ANSI	**:** American National Standards Institute
DC	**:** Direct Current
FEMM	**:** Finite Element Method Magnetics
FIS	**:** Fuzzy Inference System
GUI	**:** Graphical User Interface
IFSA	**:** International Fuzzy System Association
MATLAB	**:** Matrix Laboratory
RISC	**:** Reduced Instruction Set Computing

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Bulanık mantık yaklaşımının kullanıldığı örnekler 14
Çizelge 4.1 : A ve B iyonizasyon katsayıları (T = 20^{o}C) 24
Çizelge 4.2 : Elektrot şekli ve açıklıklarına göre alan düzgünlük faktörleri 35
Çizelge 4.3 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için farklı durumlardaki delinme gerilimleri 37
Çizelge 4.4 : Küre-küre elektrot sistemi için farklı durumlardaki delinme gerilimi . 39
Çizelge 4.5 : Küre-düzlem elektrot sistemi için farklı durumlardaki delinme gerilimleri 40
Çizelge 4.6 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 1 kV/s gerilim artış hızı durumunda farklı (*pd*) değerlerine karşılık düşen farklı delinme gerilimleri 41
Çizelge 4.7 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için 1 kV/s gerilim artış hızında (*pd*) ve delinme gerilimi arasında yapılan interpolasyon değerleri..... 42
Çizelge 4.8 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için interpolasyon hesabı yapılmış değerler 43
Çizelge 4.9 : Küre-küre elektrot sistemi için interpolasyon hesabı yapılmış değerler 44
Çizelge 4.10 : Küre-düzlem elektrot sistemi için interpolasyon değerleri 44
Çizelge 4.11 : Elektrot açıklığına bağlı olarak alan düzgünlük faktörü değerlerinin interpolasyon değerleri 46
Çizelge 4.12 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimleri 63
Çizelge 4.13 : Küre-küre elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimleri 63
Çizelge 4.14 : Küre-düzlem elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimleri 64
Çizelge 5.1 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarının bağıl hata değerleri 65
Çizelge 5.2 : Küre-küre elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarının bağıl hata değerleri 65
Çizelge 5.3 : Küre-düzlem elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarının bağıl hata değerleri 66

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İç kısmi boşalma analizi için oluşturulmuş bir model [17] 8
Şekil 2.2 : Yüzeysel boşalma analizi için kullanılan deney sistemi [18]..... 9
Şekil 2.3 : Aynı basınçta CO_2 için aynı uzunluğa sahip sürünen boşalma oluşturabilmek için gerekli olan pozitif ve negatif gerilimler [18] 9
Şekil 2.4 : Farklı iki katı yalıtkan yüzeyi arasında oluşan boşluklar [19] 9
Şekil 3.2 : Bulanık mantık araç kutusu fonksiyonları..... 18
Şekil 3.1 : MATLAB ortamının bütünleşik yapısı 17
Şekil 3.3 : Matlab fuzzy toolbox (bulanık mantık araç kutusu)'daki hazır üyelik fonksiyonlarının şekilleri [22]..... 19
Şekil 4.1 : Düzlemsel elektrot sisteminde akım gerilim arasındaki ilişki..... 22
Şekil 4.2 : Elektron çarpışmasının şematik olarak gösterimi (a) boşluk düzenlemesi (b) elektron çığı 23
Şekil 4.3 : Küre-düzlem elektrot sistemi için bazı büyüklüklerin tanımlanması..... 28
Şekil 4.4 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi (elektrot açıklığı 2 mm) 30
Şekil 4.5 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 2 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı 30
Şekil 4.6 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 4 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı 31
Şekil 4.7 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 6 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı 31
Şekil 4.8 : Küre-küre elektrot sistemi (elektrot açıklığı 2 mm)..... 32
Şekil 4.9 : Küre-küre elektrot sisteminde 2 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı. 32
Şekil 4.10 : Küre-küre elektrot sisteminde 4 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı33
Şekil 4.11 : Küre-küre elektrot sisteminde 6 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı33
Şekil 4.12 : Küre-düzlem elektrot sisteminde 2 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı..... 34
Şekil 4.13 : Küre-düzlem elektrot sisteminde 4 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı..... 34
Şekil 4.14 : Küre-düzlem elektrot sisteminde 6 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı..... 35
Şekil 4.15 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 1 kV/s artış hızı için (*pd*) ve delinme gerilimi arasında interpolasyon hesabı yapan M.file. 42
Şekil 4.16 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için giriş ve çıkış değişkenleri..... 46
Şekil 4.17 : Basınç ve açıklık çarpımı için üyelik fonksiyonları..... 47
Şekil 4.18 : Gerilim artış hızı için üyelik fonksiyonları 47
Şekil 4.19 : Delinme gerilimi için üyelik fonksiyonları 48
Şekil 4.20 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için kural tablosu..... 48
Şekil 4.21 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için sonuç gösterici 49
Şekil 4.22 : Küre-küre elektrot sistemi için delinme gerilimi üyelik fonksiyonları .. 50
Şekil 4.23 : Küre-küre elektrot sistemi için kural tablosu 50

Şekil 4.24 : Küre-düzlem elektrot sistemi için delinme gerilimi üyelik fonksiyonları 51
Şekil 4.25 : Küre-düzlem elektrot sistemi bulanık çıkarım sistemi için kural tablosu 51
Şekil 4.26 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi. 52
Şekil 4.27 : Açıklık değişkeni için üyelik fonksiyonları 53
Şekil 4.28 : Düzgünlük faktörü çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonu 53
Şekil 4.29 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü bulanık çıkarım sistemi için kural tablosu. 54
Şekil 4.30 : Kural görüntüleyici 54
Şekil 4.31 : Küre-küre elektrot sistemi düzgünlük faktörü değişkeni için üyelik fonksiyonları 55
Şekil 4.32 : Küre-küre elektrot sistemi düzgünlük faktörü için kural tablosu 56
Şekil 4.33 : Küre-küre elektrot sistemi kural gösterici 56
Şekil 4.34 : Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü değişkeni için üyelik fonksiyonları 57
Şekil 4.35 : Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için kural tablosu 58
Şekil 4.36 : Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü kural görüntüleyici 58
Şekil 4.37 : Farklı elektrot sistemleri delinme gerilimi karşılaştırması yapan simulink modeli 59
Şekil 4.38 : Aynı elektrot açıklığına sahip elektrot sistemleri için düzgünlük faktörünün karşılaştırılması 61
Şekil 4.39 : Aynı giriş değerlerine sahip elektrot sistemleri için delinme geriliminin karşılaştırılması 62

SEMBOL LİSTESİ

η : Alan düzgünlük faktörü
E_{ort} : Ortalama elektrik alan şiddeti
E_{max} : Maksimum elektrik alan şiddeti
∇V : Potansiyel gradyenti
d : Elektrotlar arası uzaklık
R : Çubuk elektrot eğrilik yarıçapı
$\overline{\lambda_e}$: Elektronun ortalama serbest yolu
$\bar{\lambda}$: Ortalama serbest yol
ΔW : Enerji değişimi
p : Basınç
E : Elektrik alan şiddeti
e : Elektron yükü
V_i : İyonizasyon potansiyeli
V : Potansiyel
P_i : İyonizasyon olasılığı
σ : Moleküler veya atomik kesit alanı
σ_i : İyonizasyon kesiti
i_0 : Başlangıç akımı
α : Townsend'in birinci iyonizasyon katsayısı
n : Elektron sayısı
k : Boltzman sabiti
N : Gaz yoğunluğu
R : Genel gaz sabiti
$A_{(T)}$: İyonizasyon katsayısı
$B_{(T)}$: İyonizasyon katsayısı
λ : Serbest yol
λ_i : İyonizasyona neden olan serbest yol
$\overline{\lambda_E}$: Elektrik alan doğrultusundaki ortalama serbest yol
ν : Elektron kayma hızı
n_E : Elektrik alan doğrultusundaki parçacık sayısı
γ : Townsend'in ikinci iyonlaştırma katsayısı
U_d : Delinme gerilimi
T : Sıcaklık (^{o}K)
T_0 : Mutlak sıcaklık (273 °K)
δ : Bağıl hava yoğunluğu
a : Elektrotlar arası gerçek açıklık
α : Elektrotlar arası eşdeğer açıklık
h : Yükseklik
r : Yarıçap
ε_r : Bağıl dielektrik katsayısı

μ : Ortalama değer
σ^2 : Yayılım değeri

ELEKTRİKSEL BOŞALMANIN BULANIK MANTIK İLE BENZETİMİ

ÖZET

Elektriksel boşalmalar geçmişte ve günümüzde bilim insanlarının merak ettiği bir fiziksel süreç olmuş üzerinde bir çok araştırma ve kuramsal inceleme yapılmıştır. Hatta elektriksel boşalmaların yıldırıma çok benzerlik gösteren bir fiziksel olay olması sebebiyle Isaac Newton, elektriksel boşalmaları gözlemlerken, "Kıvılcımları gözlemem beni çok küçük ölçekte bir yıldırımı gözlediğimi düşünmeme neden oldu" demiştir.

Elektriksel boşalmalar yalıtkan cinsine bağlı olarak gazlarda, sıvılarda ve katılarda boşalma olmak üzere üçe ayrılır. Gazlarda düzgün alanda elektriksel boşalmayı ilk kez Townsend incelemiştir. İki düzlem elektrot arasındaki akım gerilim grafiğini gözlemleyen Townsend akımın belirli bir gerilim seviyesinden sonra üstel olarak arttığını görmüş ve elektron çığını keşfetmiştir. Townsend yoğunlaştığı araştırmaları sırasında boşalmanın kendi kendini besleme koşuluna karşı düşen delinme gerilimi bağıntısını keşfetmiştir. Ayrıca gazlarda delinme geriliminin elektrot açıklığı ve basıncın bir fonksiyonu olduğunu ilk kez Paschen keşfetmiştir. Paschen farklı gazlar için farklı basınç ve elektrot açıklığı çarpım durumlarına göre eğriler oluşturmuştur. Paschen eğrilerinin bir minimum noktası mevcuttur.

Bu tez kapsamında düzgün, az düzgün ve düzgün olmayan alanlı elektrot sistemleri için havanın farklı basınç değerleri, farklı elektrot açıklıkları ve farklı gerilim artış hızlarında delinme gerilimleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan delinme gerilimi değerleri bulanık mantık yaklaşımı ile birlikte modelleme yapmak için kullanılmıştır.

Üç farklı elektrot sistemi düşünülmüştür. Bunlar karşılıklı küre-küre elektrot sistemi, düzlem-düzlem elektrot sistemi ve küre-düzlem elektrot sistemidir. Elektrotlar arası yalıtkan malzeme olarak hava düşünülmüş ve havanın basıncı için üç farklı basınç değeri olarak 760 mmHg, 660 mmHg ve 560 mmHg değerleri göz önüne alınmıştır. Elektrot açıklık değerleri ise 2 mm, 4 mm ve 6 mm olarak değiştirilmiştir. Gerilim artış hızı olarak da Townsend'in kendi kendini besleme denkleminin paydasında bulunan ikinci iyonizasyon katsayısı için üç farklı değer alınmıştır. Üç farklı elektrot sistemi, üç farklı gaz basıncı, üç farklı elektrot açıklığı ve üç farklı iyonizasyon katsayısı ile seksenbir farklı durum için seksenbir farklı delinme gerilimi etkin değer cinsinden hesapla bulunmuştur.

Elektrot sistemlerini birbirinden ayırt etmek için gereken alan düzgünlük faktörü değerleri, sonlu elemanlar yöntemini esas alan FEMM adlı bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Sayısal olarak hesaplanmayan ara değerler ise birinci dereceden interpolasyon ile programlanarak hesaplanmıştır.

Tezde altı farklı bulanık çıkarım sistemi tasarlanmış olup, üç tanesi delinme geriliminin tespiti için, diğer üç tanesi elektrot açıklığına ve elektrot sistemine bağlı olarak alan düzgünlük faktörlerinin değişimini göstermektedir.

Tasarlanan bulanık çıkarım sistemleri, tek bir model üzerinden kullanılabilmesi amacıyla Matlab/Simulink modeline entegre edilmiştir.

Sayısal olarak elde edilen delinme gerilim değerleri ile bulanık mantık değerlerinden elde edilen delinme gerilimleri arasında hata oranı hesaplanmıştır.

THE SIMULATION OF ELECTRICAL DISCHARGES VIA FUZZY LOGIC

SUMMARY

Electrical discharge phenomena have been an important physical process from past to present so the scientists have done the many researches and theoretical examination upon it. Moreover, because of the similarity between lightning and electrical discharges, Isaac Newton who is important physicist when he was observing electrical discharges he said that observing sparks caused to think me about small scale lightning.

If a voltage which is applied on an insulator exceeds a certain threshold voltage value, the whole part of the insulator or specific areas becomes conductive path; this process is called electrical discharge. Electrical discharges divided into three depending on the type of insulating material these are discharge in gases, liquids and solids. Electrical discharges in gases in the uniform field configuration have examined by Townsend for the first time. Townsend observed the change of the current and voltage levels in a parallel two plane electrodes. He discovered an exponential increase in the current graph beyond a certain voltage level, so he thought that the reason of this non-linearity is electron avalanche process in the discharge phenomenon. According to the ionisation process in gases, an electron releases from cathode follows the path to anode. Each electron releases from the cathode have possibility to ionise the neutral atoms or molecules. The atoms or molecules being ionised may releases different electrons and this process seems like an avalanche. Townsend found a coefficient called Townsend's first coefficient (α). On the other hand, if applied source between two points is removed, discharge cannot be self-sustaining. For this reason, Townsend thought that an electron releases from cathode must creates a reverse until it reaches to anode. Townsend second coefficient γ defines number of electrons releases from cathode by a positive ion. By this way, discharge will be self-sustaining the surveys that Townsend concentrated on caused discovering the self-sustaining breakdown voltage equation for uniform electrode systems.

On the other hand, Paschen the first time discovered the production of the electrode gap and gas pressure is a function of the breakdown voltage. Paschen did lots of experiments on different gases. He discovered a curve called Paschen curve, has a minimum. The curve parameters are breakdown voltage and production of the pressure and electrode gap spacing.

In this thesis, for the uniform, weakly non-uniform and non-uniform electrode systems, as an insulating material air breakdown voltage for different pressure levels, different electrode spacing gaps and different voltage rise rates calculated analytically. The analytically calculated breakdown voltages were used modeling using fuzzy logic approach.

In recent years especially in Japan, America and Germany approximately more than one thousands fuzzy logic application performed successfully. Washing machines,

microwave ovens, cameras, refrigerators, credit cards are some of the applications in consumer products. Other applications of fuzzy logic are industrial process control, medical instrumentation, decision support systems and portfolio selection.

In an industrial process control, structure and the dynamic properties of the systems should be known very well and their mathematical models are need to known. But, the parameters of the systems sometimes can not to be understood easily and be unknown. In such cases usually the problem is solved by an expert person. The expert uses daily expressions using by human beings such as little, very little, too much. These linguistic expressions can be translated to machine language. Thus, fuzzy logic is founded on such relations. For fuzzy logic, it can be said adapting math to real world. The term “fuzzy logic” first introduced by Lotfi A. Zadeh in 1965 with his proposal of fuzzy set theory.

The general properties of fuzzy logic are explained by Zadeh as follows. In fuzzy logic approximate thinking is used instead of thinking based on precise value. In fuzzy logic everything can be shown with a precise degree in interval [0, 1] In fuzzy logic, knowledge is using linguistic expressions such as big, small, very little. Fuzzy inference process is done by rules defined between linguistic expressions. Every logical system can be expressed as fuzzy. Fuzzy logic is very useful for systems which their mathematical modeling is very difficult.

The first application of fuzzy logic is applied by Mamdani in 1974. Mamdani controlled a steam engine by fuzzy logic.

Mamdani’s method is the most commonly used fuzzy inference process and it’s operation is as follows. Firstly the raw input data from the external world may be required pre-processing such as normalizing or scaling. After that, fuzzification of the inputs is next step. It is essential to associate each input with a fuzzy set group. These fuzzy sets should span the entire range of values associated with its input. System designer determines how many fuzzy sets per input. The degree of membership in each of an input’s fuzzy set is defined by the membership functions. These functions are also designed by system designer. There are some simple shapes such as triangle, trapezoids, Gaussian curves to define the membership functions.

To produce the fuzzy outputs (called consequent sets) fuzzy rules combines the fuzzy inputs. Description of the action of the fuzzy systems can be decided by these rules. Each rule has the form of IF/THEN statement and the input sets can be combined by logical operators such as AND (fuzzy intersection), OR (fuzzy union) and NOT (fuzzy complement). The result for each rule has a single number changes between 0 and 1. This indicates the degree of support for the rule. Implication process is the following process. After that by aggregation process all the outputs of each rule unified into a single fuzzy set with three methods: maximum, probabilistic OR and union. Finally, the fuzzy set which includes a range of output values is converted into a single number which can be useful for the external world. The most common defuzzification method is centre of gravity calculation.

In the model, three different electrode configurations were considered these are parallel plane electrodes, sphere-sphere electrodes, and sphere-plane electrodes. The electrodes are considered to be positioned in a cylindrical container its height 50 cm and bottom diameter 10 cm. Plane electrodes are solid model with its bottom diameter 5 cm, top diameter 3.5 cm and 0.75 cm height. Diameters of the sphere electrodes are 5 cm. As an insulating material air was used, and air pressure changes from 760 mmHg to 560 mmHg decreasing 100 mmHg steps. Three different

electrode gap spacings were considered. These are 2 mm, 4 mm and 6 mms. The self-sustaining breakdown voltage equation for uniform electrode systems (Townsend breakdown equation) can only be applied for plane-plane electrode system. So it is essential to transform the equation for quasi uniform (sphere-plane) and non-uniform (sphere-sphere) electrode configurations. For this reason, the electrode gap spacing being in the equation can be rewritten. It is useful to know some analytical expressions like field utilisation factor (η), maximum electric field (E_{max}), mean electric field (E_{mean}), equivalent gap spacing (α) for each electrode configuration. The mean electric field for all electrode configurations is the ratio of voltage applied between electrodes to electrode gap spacing which is the nearest distance between electrodes. $E_{mean} = V/a$. Maximum electric field for non-uniform electrode configurations is $E_{max} = V/\alpha$. The electrode utilization factor is the ratio of mean electric field to maximum electric field, $\eta = E_{mean} / E_{max} = (V/a)/(V/\alpha) = \alpha/a$. The uniformity factors of electrode systems were calculated by a computer programme called FEMM based on finite element method. Equivalent gap spacing for non-uniform electrode configurations are calculated analytically. Thus the replacement of the electrode gap spacing with α/η provides to calculate analytical breakdown voltages for sphere-sphere and sphere-plane electrode configurations. The voltage rise rate has three different combinations. It changes 1 kV/s, 2 kV/s, 3 kV/s. For this purpose Townsend second coefficient (γ) in the denominator of the Townsend equation took three different values. Normally γ can take value between 1/50 and 1/5000. γ refers to number of electrons released from cathode by a positive ion. The breakdown voltage of same electrode configuration only voltage rise rates are different, takes different values, for example for the same configuration when voltage rise rate is slowest (1 kV/s) it takes the minimum value. When voltage rise rate is fastest (3 kV/s), value of the breakdown voltage is maximum. From this explanation, in the thesis when voltage rise rate is 1 kV/s, γ took maximum value 1/50; when voltage rise rate is 2 kV/s, γ took 1/500; when voltage rise rate is 3 kV/s, γ took 1/5000. Finally, from eighty-one different combinations, eighty-one different breakdown voltages were calculated analytically as effective value.

In the thesis, six different fuzzy inference systems were designed. Three of them were used to find breakdown values, others were used to find the uniformity of electrode systems depending of the electrode configuration and electrode gap spacing. In order to find breakdown voltage, input parameters in fuzzy inference systems are chosen product of pressure and gap spacing, and voltage rise rate. On the other hand input parameters are chosen electrode gap spacing to find electrode utilization factors in other three fuzzy inference systems. In order to estimate breakdown voltages with Townsend breakdown equation as data for input parameters, these estimated values corresponding to product of pressure and electrode gap spacing are interpolated with first order interpolation using programming with MATLAB for linearity.

Designed fuzzy inference systems were integrated in Matlab/Simulink model to be used on a single model for comparison between different electrode configurations with each other. In the conclusion part of the thesis, the errors between the breakdown voltage values obtained from the analytical calculation and fuzzy logic approach were calculated with obtained Simulink model and listed. The error values are not exceeded 3%, so fuzzy logic modeling is resulted successfully. Moreover, how the errors can be reduced is mentioned in the conclusion section.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı gazlarda delinme gerilimi bağıntısını kullanarak farklı elektrot sistemlerinde bir yalıtkan olan havanın basınç seviyesinin farklı basınçlarda farklı elektrot açıklıklarında ve boşalmaya neden olan farklı potansiyel artış hızında delinme geriliminin analitik olarak ifadelerinin bulunması sonrasında ise bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak bulunan analitik değerlerinin yakınsaması olacak şekilde bir bilgisayar modeli oluşturmaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Gazlarda elektriksel boşalma kuramı tarihsel bir gelişim göstermiş bu gelişimde kuramın daha iyi açıklanması ve incelenmesi için farklı bilim insanlarının katkıları olmuştur. Kunhardt yaptığı çalışmasında gaz yalıtkanlarda elektriksel boşalma sürecinin anlaşılabilmesi için var olan belirli teori ve deneyleri özetlemiştir. Gazlarda boşalma olayını açıklamaya çalışan teorileri kronolojik olarak anlatmıştır. Klasik Townsend ve kanal (streamer) teorilerini tartışmış Townsend modelinin hangi koşullarda uygulanamayacağını ve nedenlerini incelemiştir, ayrıca boşalma sürecinde kanal oluşumu sonrasını açıklamıştır. Çok şiddetli elektrik alan kaynağı durumundaki modelleri açıklamıştır. Boşalmanın kendi kendini besleme geriliminin yüzde yirmi fazlası gerilim kaynağı durumu için modeller sunmuştur [1].

Bir yalıtkanın delinme karakteristiğine, delinme gerilimi ve delinme süresi arasındaki ilişki gözlenerek karar verilebilir. Gazlarda delinme süresi ve delinme gerilimi gerilim kaynağının dalga şekline, gerilimin frekansına, elektrotlar arası mesafeye ve elektrotların şekline bağlı olduğundan, elektriksel yalıtkan olarak kullanılan hava için delinme gerilimi-delinme süresi (v-t) karakteristiği incelenmiştir. Yapılan çalışmada kapalı bir kap içerisinde bulunan hava için basınç değeri 30 mbar ile 400 mbar arasında farklı değerler verilmiş, gerilim türü olarak darbe gerilimi kullanılmıştır. Üç farklı darbe gerilimi (0,064/50 μs, 0,4/50 μs, 1,2/50 μs), üç farklı elektrot sistemi

(düzlem-düzlem, küre-küre, çubuk-çubuk sistemleri) ile deneyler yapılmış ve parametreler değiştirilerek delinme gerilimi ve delinme süresine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elektrot sistemleri için faydalanma faktörü sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Deney devresinde 140 kV'luk Marx darbe gerilimi üreteci ve vakum kabı kullanılmıştır. Delinme gerilimi ve delinme süresi arasındaki matematiksel ilişki gösterilmiştir [2].

Bir diğer çalışmada çok düşük basınçlı (10^{-4} Pa'dan 10^{5} Pa'a kadar) ve çok küçük elektrot açıklıklarında (0,1 mm'den 1 mm'ye kadar) gazlar için elektriksel delinme mekanizması incelenmiştir. Deneysel ve analitik olarak bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Delinmeye elektrot kenar etkisi incelenmiş ve vakum için çığ oluşum süreci deneysel olarak kanıtlanmıştır [3].

Bir diğer çalışmada hava, SF_6 ve N_2 için Townsend delinme eşitliği kullanılarak Paschen eğrisinin sağlaması yapılmıştır. Çalışma Townsend delinme kriterinin geçerliliğini genişletmek için Paschen eğrisinin basınç ve elektrot açıklığı çarpımı (*pd*) değişkeninin geçerli olduğu tüm değerler değiştirilerek yapılmıştır. Hava için delinme geriliminin değerlendirilmesinde (*pd*) aralığı 0,0133 kPa.cm'den 1400 kPa.cm'ye kadar, N_2 için 0,0133 kPa.cm'den 1400 kPa.cm'ye, SF_6 için 0,3000 kPa.cm'den 1200 kPa.cm'ye kadar değiştirilmiştir. Analitik olarak hesaplanan değerler %3 hata payı ile ölçülen değerlerden farklılık göstermiştir. Hesaplamalar aynı zamanda Townsend'in ikinci iyonizasyon katsayısı γ'nın da yukarıdaki basınç ile elektrot açıklığı çarpımı olan *pd* aralıkları için değerlendirilebileceğini mümkün kılmıştır [4].

Düzgün olmayan elektrik alan dağılımına sahip elektrot sistemlerinin faydalanma faktörü, η'nın ifadesi $\eta = E_{ort}/E_{max}$'tır. E_{ort} (ortalama elektrik alan şiddeti), elektrot sisteminde elektrotlar arası uzaklık göz önünde bulundurularak hesaplanır. E_{max} (maksimum elektrik alan şiddeti) ise elektrik alan dağılımı bölgesinde en yüksek alan şiddetidir. Faydalanma faktörü 0 ve 1 arasında ($1 > \eta > 0$) değişir. Düzgün alan dağılımı için η 1'e eşittir. Düzgün olmayan alan dağılımı durumda η 1'den küçüktür. Aynı elektrot açıklığı ve aynı gerilim değerine sahip elektrot sistemleri için η elektrotların geometrik boyutları bakımından kıyaslanır. Faydalanma faktörü bir diğer deyişle alan düzgünlük faktörü, alan dağılımının düzgünsüzlüğü durumunda 1'den küçük olur. Faydalanma faktörünün hesaplanmasında birçok değişik yöntem kullanılabilir. Yapılan bir çalışmada çubuk-düzlem elektrot sistemi için yük benzetim

yöntemi kullanılarak η hesaplanmıştır. Aynı zamanda çubuk-düzlem elektrot sistemi için korona başlangıç seviyesi hesaplanmıştır [5].

Literatürde disiplinler arası bir yöntem olan bulanık mantık yaklaşımı, elektriksel boşalmalar açısından delinmeye kıyasla kısmi boşalmaların dalga şekillerinin incelenmesi, tanınması, kısmi boşalma türünün (iç kısmi, korona, yüzeysel boşalmalar) sınıflandırılması, kısmi boşalmaların tanınması bakımından daha geniş bir yer kaplamaktadır.

Yapılan bir çalışmada katı yalıtkan malzeme içinde yapay olarak oluşturulmuş bir boşluk için kısmi boşalma başlama ve sönme geriliminin uyarlanabilir sinirsel bulanık mantık (ANFIS) ile modellenmesi yapılmıştır. ANFIS yapısı otomatik olarak oluşturulmuş, ölçülen kısmi boşalma başlama ve sönme gerilimi ile örtüşmesi açısından ayarlanmıştır. Uyarlanabilir sinir ağı giriş büyüklükleri olarak, katı yalıtkanın kalınlığı, boşluğun derinliği ve boşluğun çapı alınmıştır. Daha sonra modelleme verileri ile ölçüm verileri arasındaki hata yüzdesel olarak verilmiştir [6, 7].

Farklı nedenlerden dolayı oluşan kısmi boşalmaların tanınmasına yönelik olarak bulanık mantık yönteminin kullanıldığı bir çalışmada bulanık mantık kuralları kısmi boşalma darbe işaret faz ve genliğine göre oluşturulmuştur. Üç tip kısmi boşalma türü için iç kısmi boşalmalar, yüzeysel boşalmalar ve korona boşalmaların tanınması için kısmi boşalma işaretlerine göre bir sınıflandırma yapılmıştır. İşaretlerin faz açıları, faz dağılımları, basıklık, eğiklik, kısmi boşalma darbesi yüksekliği, görünür yük, darbe sayısı gibi istatistiksel ve rastlantısal değişkenler göz önünde bulundurulmuştur [8, 9, 10].

Bir diğer çalışmada bulanık mantık yaklaşımı ile kısmi boşalma darbe şekilleri boşluk boyutu ve hacmi bakımından sınıflandırılmıştır. Giriş değişkenleri için görünür yük (pC), darbe yükselme süresi (ns), darbe düşüş süresi (ns), darbe genişliği ve darbe altında kalan alan; çıkış değişkeni olarak ise boşluk boyutu küçük (1,0 mm), orta (1,5 mm) ve geniş (2,0 mm) olarak sınıflandırma yapılmıştır [11].

Gazların delinme olasılığının tahmini için bulanık mantık uygulaması da mevcuttur. Çalışmada giriş değişkenleri gazların delinmesinde en önemli karakteristik olan potansiyel gradyen, (∇V), potansiyel gradyeninin zamanla değişimi $\left(\frac{\nabla V}{dt}\right)$, gaz basıncı, bağıl nem kullanılmıştır [12].

Bir diğer çalışmada çubuk - düzlem elektrot sistemi için havanın delinme süreci bulanık mantık yaklaşımıyla incelenmiştir. Çalışmada çubuk elektrot yüksek gerilimde, düzlem elektrot ise topraklanmış olarak düşünülmüştür. Bilindiği gibi delinme sürecinde öncelikle bir elektron çığı oluşmakta bu çığ anoda doğru yönelmekte anot civarında çığ içinde bulunan pozitif iyonlar ve elektronlar birleşerek anodu katot uca doğru biraz yaklaştırmaktadır. Bu aşama kanal (streamer) diye bilinen teoridir. Anodun katoda yaklaşmasıyla elektrik alanın artmasıyla birlikte birden fazla elektron çığı anoda doğru yönelerek ikinci çığ oluşum etkisini oluştururak, kanalın hızlı bir biçimde anottan katota doğru ilerlemesine olanak verir ve yalıtkan tam olarak iletken duruma geçerek delinir. Elektrot sisteminde akım ölçümüne göre ve akım integrali hesabıyla hangi akım seviyesinde hangi boşalma evresinin gerçekleştirildiğine karar verilmiştir. Akım integral aralığı $5 \leq I \leq 18$ ise Townsend çığ oluşumu, $18 \leq I \leq 20$ ise kanal oluşumu, $20 < I < 24$ ise korona oluşum aşaması $I > 24$ delinme aşaması olarak hesaplanmıştır. Buna göre bulanık mantık giriş değişkenleri gerilim (V), elektrotlar arası uzaklık (d) ve çubuk elektrot eğrilik yarıçapı (R) olarak ele alınıp çıkış değişkeni ise akım integrali (I)'dir. Giriş değişkenlerine ve çıkış değişkenine üyelik fonksiyonları ve aralıkları atanmış, kurallar oluşturulmuştur. Giriş değişkenlerine bağlı olarak boşalma sürecinin hangi aşamada olduğunun tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Bulanık mantık yaklaşım değerleri, analitik değerler ve deneysel veriler karşılaştırılarak bulanık çıkarım sisteminde iyileştirmeler yapılmıştır [13].

1.3 Hipotez

Düzgün alanda delinme gerilimi bağıntısı Townsend tarafından ortaya konulmuş olup Paschen tarafından deneysel incelemesi yapılmıştır. İlk defa delinme geriliminin elektrot açıklığı ve basınç çarpımının bir fonksiyonu olduğu Paschen tarafından gözlenmiştir. Bu tezde düzgün alanlı elektrot sistemi yanısıra az düzgün ve düzgün olmayan elektrot sistemleri göz önünde bulundurulmuştur. Düzgün alan delinme gerilimi bağıntısı az düzgün ve düzgün olmayan alanlar için genişletilmiş olup, farklı elektrot sistemleri (küre-küre, küre-düzlem, düzlem-düzlem) için farklı basınçlarda ve farklı elektrot açıklıklarında ayrıca delinme gerilimi bağıntısında bulunan Townsend ikinci iyonizasyon katsayısının modellerde gerilim artış hızı parametresi olarak ele alınmış ve hava için değişik biçimlerde delinme gerilimleri hesaplanmıştır.

Çalışmada elektrot sistemleri için alan düzgünlük faktörleri sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla bulunmuş ve elektrotlar arası eşdeğer açıklık değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır.

Üç farklı elektrot sistemi, üç farklı elektrot açıklığı, üç farklı basınç değeri ve üç farklı gerilim artış hızı için analitik olarak seksenbir farklı delinme gerilimi değeri elde edilmiştir. Analitik olarak bulunan değerler bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak modelleme yapılmıştır.

Bulanık mantık değişkenlerinin aralık değerleri elde edilen analitik değerler göz önünde bulundurularak ayarlanmıştır. Altı farklı bulanık çıkarım sistemi geliştirilmiş olup bunların üç tanesi alan düzgünlük faktörünü hesaplamaya yönelik olup, diğer üç tanesi de farklı elektrot sistemlerinin farklı basınç değerleri farklı elektrot açıklık değerleri ve farklı gerilim artış hızına göre delinme geriliminin değişiminin bulunmasına yönelik olmuştur.

Bulanık mantık modellemesi yapabilmek için analitik olarak hesaplanan değerlerin ara değerleri birinci dereceden interpolasyon hesabı yapılarak elde edilmiştir. Oluşturulan altı farklı bulanık çıkarım sisteminin bütüncül olarak birbirlerine etkilerinin görülebilmesi için Matlab / Simulink modeline yerleştirilmiştir.

2. ELEKTRİKSEL BOŞALMALAR

Elektriksel boşalmalar kullanılan yalıtkan türüne göre üçe ayrılır. Gazlarda, sıvılarda ve katı yalıtkanlarda olan elektriksel boşalmalar birbirlerine göre farklılıklar göstermektedir. Gazların dielektrik dayanımları katılara ve sıvılara göre daha düşük olması gazların yalıtkan olarak kullanılmasında bir dezavantaj oluşturmaktadır. Diğer taraftan gazlar, bulundukları kabın her yanına dağıldıklarından ve yalıtkan içinde boşlukların olmaması nedeniyle sıvı ve katı yalıtkanlara göre avantajlıdır. Yalıtkan olan hava bol miktarda bulunduğundan ve maliyetinin olmaması nedeniyle yüksek gerilim araştırmacıları tarafından üzerinde en çok yoğunlaşılan yalıtkandır.

Eğer iki nokta arasına belirli bir eşik değeri geçecek şekilde bir gerilim uygulanırsa, iki nokta arasında bulunan yalıtkanın tamamında (atlama, delinme) veya belirli bölgesinde (kısmi boşalma) yalıtkan, yalıtkan özelliğini kaybeder ve iletken hale geçer. Bu sürece elektriksel boşalma denir. Elektriksel boşalmalar genel olarak tam boşalma (delinme, atlama) ve kısmi boşalmalar olmak üzere iki ana başlıkta toplanır.

2.1 Elektriksel Boşalmaların Sınıflandırılması

2.1.1 Delinme ve atlama

İki nokta arasında bulunan yalıtkanın tamamında iki noktayı köprüleyecek şekilde bir iletken oluşması durumunda meydana geleyen boşalma türü delinme veya atlamadır.

2.1.2 Kısmi boşalmalar

Kısmi boşalmalar ise farklı potansiyellere sahip iki elektrot arasını tamamen köprülemeyen boşalmalardır. Kısmi boşalmalar boşalmayı meydana getiren sebepler açısından türlere ayrılırlar.

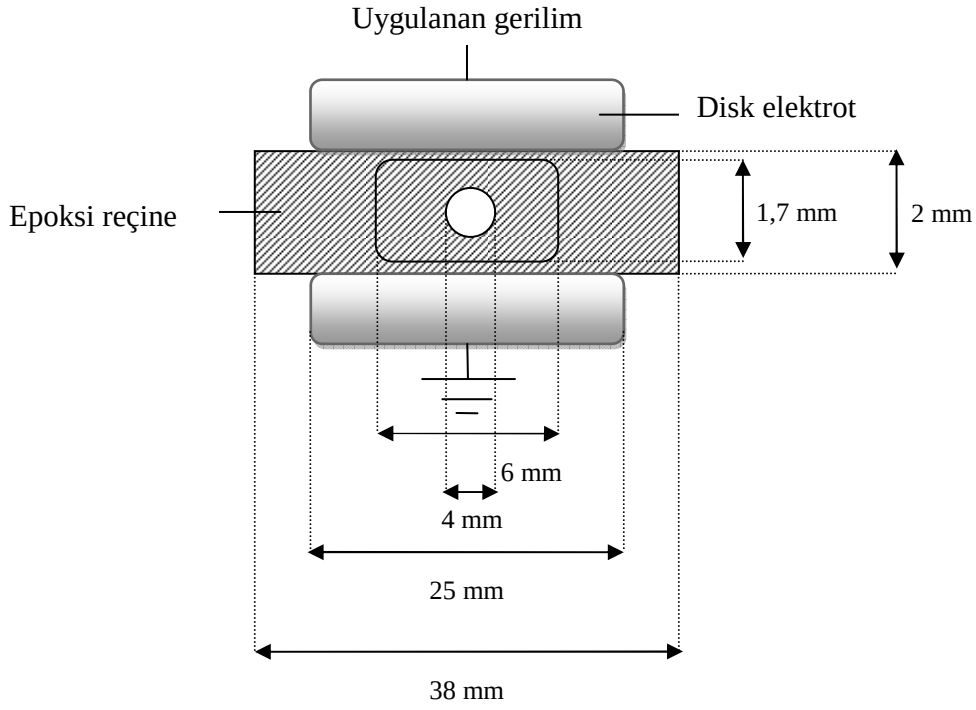
2.1.2.1 Korona

Korona boşalmaları genellikle elektrik alan şiddetinin yoğunlaştığı sivri noktalarda veya kenarlarda, ince iletkenlerde oluşur. Korona kendi kendini besleyen bir boşalma türüdür. Çok çok yüksek ve çok yüksek, yüksek gerilim hava hatlarındaki hızlı

gelişmelerle birlikte, hava da oluşan korona boşalmaları yüksek gerilim hatları için çok büyük bir problem oluşturmaktadır. Bu boşalmalar yalıtım sisteminde bozulmalara yol açabildiği gibi, güç kayıplarına ve radyo parazitlerine neden olur [14, 15].

2.1.2.2 İç boşalmalar

Katı yalıtkanlarda bulunan çok küçük boşluklar yüksek gerilim için kullanılan elektriksel malzemeler için olumsuz etkiye sahiptirler. Çok küçük boşlukların bulunması katı yalıtkan içinde bulunan elektrik alan dağılımını değiştirebilir ve iç boşalmalara neden olur, aynı zamanda katı yalıtkan içinde elektriksel dallanmalar meydana getirir. Sonuçta katı yalıtkanın ömründe azalma ve delinme görülür [16]. Şekil 2.1'de iç kısmi boşalma analizi için oluşturulmuş bir model görülmektedir.

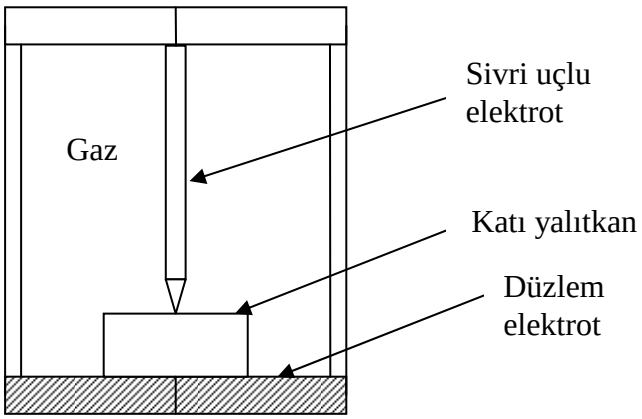


Şekil 2.1: İç kısmi boşalma analizi için oluşturulmuş bir model [17].

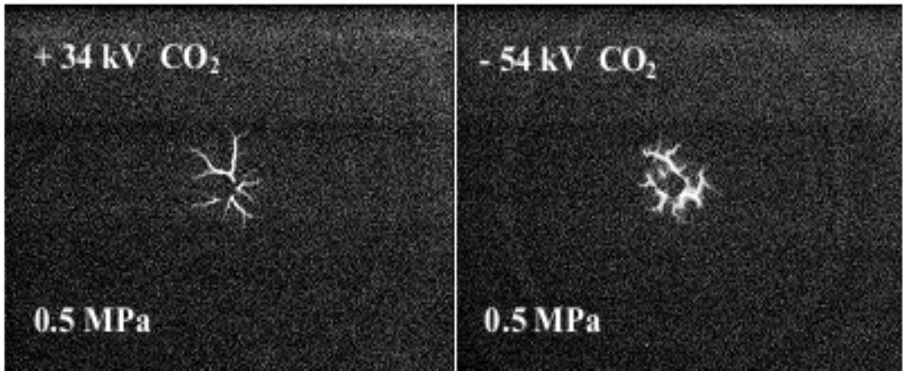
2.1.2.3 Yüzeysel boşalmalar

Yüzeysel boşalmalar genellikle bir katı yalıtkana komşu olan gaz veya sıvı, diğer bir şekli ise gaz veya sıvı yalıtkanın birbirine komşu olduğu yüzeylerde görülür. Katı yalıtkan, gaz yalıtkan ara yüzeyinde oluşan yüzeysel boşalmaların incelenmesi ve araştırılması yüksek gerilim bileşenlerinin (geçit izolatörleri, izolatör, hücreler, gaz yalıtımlı hatlar, gaz yalıtımlı kesiciler…) boyutlandırılması ve tasarımında önemlidir.

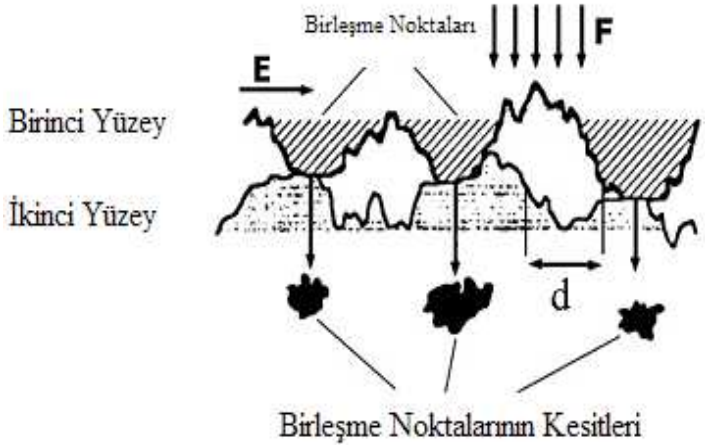
Şekil 2.2'de yüzeysel boşalma analizi yapabilmek için kullanılan bir deney kabı ve Şekil 2.3'de aynı basınçta CO_2 gazı için aynı uzunlukta yüzeysel boşalma oluşturabilmek için gerekli olan pozitif ve negatif kutuplu gerilimlerin görünümleri gösterilmiştir [18].



Şekil 2.2: Yüzeysel boşalma analizi için kullanılan deney sistemi [18].



Şekil 2.3 : Aynı basınçta CO_2 için aynı uzunluğa sahip yüzeysel boşalma oluşturabilmek için gerekli olan pozitif ve negatif gerilimler [18].



Şekil 2.4 : Farklı iki katı yalıtkan yüzeyi arasında oluşan boşluklar [19].

Ayrıca birçok yüksek gerilim yalıtım sistemi farklı katı yalıtkanlara ait ara yüzeyler içerir. Katı yalıtkanlar arası çok küçük boşluklar oluştuğundan bunlar genellikle boşalma bakımından zayıf bölgeler olup elektriksel zorlanma bu yüzeylere paralel olarak uygulanırsa kısmi boşalmalar oluşabilir. Şekil 2.4'te iki katı yalıtkan yüzey arasında oluşan boşluklar görülmektedir [19].

2.2 Elektriksel Boşalmaların İncelenmesi

Elektriksel boşalmalar oluştukları sisteme fiziksel olarak zararlar vermektedir. Yalıtkan ömrünü azaltmak, yalıtkanın tamamen yalıtkan özelliğini kaybedip sistemde kısa devreler oluşturmak gibi etkiler büyük maddi zararlar oluşturur. Ayrıca yüksek gerilim havai hatlarında oluşan korona kayıpları da maddi zarardır. Bu yüzden, elektriksel boşalmalar için önlemler alınır. Bunun için malzemelerin boyutlandırılması elektriksel boşalma eşik değerlerine göre yapılır. Elektriksel boşalmalar için önemli büyüklükler, boşalma akımı, yük ve gerilim dalgalarının büyükleridir. Bir elektriksel boşalmanın yerini tahmin edebilmek için bu tür büyüklüklere gereksinim duyulur. Elektriksel boşalmaların ölçülmesi için birçok yöntem mevcuttur.

3. BULANIK MANTIK

Endüstriyel bir süreç denetiminden; sistemin güvenliği ve kararlılığını sağlaması, kolay, anlaşılır, tamir edilebilir ve değiştirilebilir olması, sistemin performansını istenen seviyeye çıkarması, yatırım ve işletme açısından ucuz olması istenir. Bu koşulların gerçekleştirilmesi için denetlenecek sistemin yapısının ve dinamik özelliklerinin çok iyi bilinip matematiksel modellemesi gerekir. Bazı sistemlerin matematiksel modellemesi mümkün olmayabilir. Sistemin değişkenleri matematiksel modelleme yapılabilecek kadar kesin olarak bilinmeyebilir veya bu değişkenler zaman içinde değişiklik gösterebilir.

Bazı sistemlerde modelleme doğru şekilde yapılsa bile elde edilen modelin denetleyici tasarımında kullanımı karmaşık problemlere ve oldukça yüksek maliyete neden olabilir. Bu nedenle, bazı denetim algoritmalarının belirsiz, doğru olmayan, iyi tanımlanmamış, zamanla değişen ve karmaşık sistemlere uygulanması mümkün olmayabilir. Bu durumda ya hiç çözüm üretilememekte ya da elde edilen denetleyicinin performansı yeterince iyi olmamaktadır.

Bu gibi durumlarda genellikle bir uzman kişinin bilgi ve deneyimlerinden yararlanılma yoluna gidilir. Uzman kişi az, çok, pek az, pek çok, biraz az, biraz çok gibi günlük hayatta sıkça kullanılan dilsel niteleyiciler doğrultusunda bir denetim gerçekleştirir. Bu dilsel ifadeler doğru bir şekilde bilgisayara aktarılırsa hem uzman kişiye gereksinim kalmamakta hem de uzman kişiler arasındaki denetim farkı ortadan kalkmaktadır. Böylece denetim mekanizması esnek bir yapıya kavuşmaktadır. Temeli insanın herhangi bir sistemi denetlemedeki düşünce ve sezgilerine bağlı davranışının, benzetimine dayanmaktadır. Dolayısıyla bir insan bir sistemi, sistemin bulunduğu gerçek durumdan, istenilen duruma götürmek için sezgilerine ve deneyimlerine bağlı olarak bir denetim stratejisi uygulayarak amacına ulaşmaktadır.

İşte bulanık denetim bu tür mantık ilişkileri üzerine kurulmuştur. Bulanık mantık için, matematiğin gerçek dünyaya uygulanması denilebilir. Çünkü gerçek dünyada her an değişen durumlarda değişik sonuçlar çıkabilir.

Bulanık mantık yaklaşımı, makinelere insanların özel verilerini işleyebilme ve onların deneyimlerinden ve önsezilerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği verir. Bu yeteneği kazandırırken sayısal ifadeler yerine sembolik ifadeler kullanır. İşte bu sembolik ifadelerin makinelere aktarılması matematiksel bir temele dayanır. Bu matematiksel temel bulanık mantık kümeler kuramı ve buna dayanan bulanık mantıktır.

Bulanık mantık denetleyicinin temeli bu tür sözlü ifadeler ve bunların arasındaki mantıksal ilişkiler üzerine kurulmuştur. Bulanık mantık denetleyici uygulanırken sistemin matematiksel modellenmesi şart değildir.

Sözel ifadelerin bilgisayara aktarılması matematiksel bir temele dayanmaktadır. Bu matematiksel temel, bulanık kümeler kuramı ve bulanık mantık olarak adlandırılır. Bulanık mantık bilinen klasik mantık gibi (0, 1) olmak üzere iki seviyeli değil, [0, 1] aralığında çok seviyeli işlemleri ifade etmektedir.

Örneğin odadaki klimanın motoru otomatik olarak değil de, bir insan tarafından denetlendiği varsayılsın; eğer oda sıcaklığı biraz arttıysa işletmen motorun hızını biraz arttıracaktır, eğer oda sıcaklığı çok düştüyse motor hızını çok azaltacaktır. Burada kullanılan ‘biraz’, ‘çok’ terimleri dilsel terimler olup “bulanık değişkenler” olarak isimlendirilirler. Bulanık mantık denetimi dilsel olarak tanımlanmış denetim stratejisini uzman tabanlı otomatik denetim algoritmasına çevirir. Deneyimler bulanık mantık denetimi ile elde edilen çıkış performansının klasik yöntemlerle elde edilene göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Özellikle sistemin çok karmaşık olduğu ve analizinin klasik yöntemlerle yapılmasının mümkün olmadığı ve bilgilerin niteliklerinin belirsiz veya kesin olmadığı durumlarda bulanık mantık denetim yöntemi çok uygun olmaktadır.

Bu yaklaşım ilk defa Amerika Birleşik Devletlerin’de düzenlenen bir konferansta 1956 yılında duyurulmuştur. Ancak bu konudaki ilk ciddi adım 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından yayınlanan bir makalede bulanık mantık veya bulanık küme kuramı adı altında ortaya konulmuştur. Zadeh bu çalışmasında insan düşüncesinin büyük çoğunluğunun bulanık olduğunu, kesin olmadığını belirtmiştir. Bu yüzden 0 ve 1 ile temsil edilen Boolean mantık bu düşünce işlemini yeterli bir şekilde ifade edememektedir. İnsan mantığı, açık, kapalı, sıcak, soğuk, 0 ve 1 gibi değişkenlerden oluşan kesin ifadelerin yanı sıra, az açık, az kapalı, serin, ılık gibi ara değerleri de göz önüne almaktadır. Bulanık mantık klasik mantığın aksine iki seviyeli değil, çok

seviyeli işlemleri kullanmaktadır. Ayrıca Zadeh insanların denetim alanında, mevcut makinelerden daha iyi olduğunu ve kesin olmayan dilsel bilgilere bağlı olarak etkili kararlar alabildiklerini savunmuştur. Klasik denetim uygulamalarında karşılaşılan zorluklar nedeniyle, bulanık mantık denetimi alternatif yöntem olarak çok hızlı gelişmiş ve modern denetim alanında geniş uygulama alanı bulmuştur.

Bulanık mantığın genel özellikleri Zadeh tarafından şu şekilde ifade edilmiştir;

- Bulanık mantıkta, kesin değerlere dayanan düşünme yerine, yaklaşık düşünme kullanılır.
- Bulanık mantıkta her şey [0, 1] aralığında belirli bir derece ile gösterilir.
- Bulanık mantıkta bilgi büyük, küçük, çok az gibi dilsel ifadeler şeklindedir.
- Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- Her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilir.
- Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için çok uygundur.

Bulanık mantık tam olarak bilinmeyen veya eksik girilen bilgilere göre işlem yapma yeteneğine sahiptir.

3.1 Bulanık Sistemlerin Gelişimi

Geçmiş birkaç yıl içinde özellikle Japonya, Amerika ve Almanya'da yaklaşık 1000'den fazla ticari ve endüstriyel bulanık sistemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yakın gelecekte ticari ve endüstriyel uygulamalarda dünya çapında önemli oranda arttığı görülecektir.

Bulanık mantığın ilk uygulaması, Mamdani tarafından 1974 yılında bir buhar makinesinin bulanık denetiminin gerçekleştirilmesi olmuştur. 1980 yılında bir Hollanda şirketi çimento fırınlarının denetiminde bulanık mantık denetimi uygulamıştır. Üç yıl sonra Fuji Elektrik Şirketi su arıtma alanları için kimyasal püskürtme aleti üzerine çalışmalar yapmıştır. 1987'de ikinci IFSA kongresinde ilk bulanık mantık denetleyiciler sergilenmiştir. Bu denetleyiciler, 1984 yılında araştırmalara başlayan Omron şirketinin 700'den fazla yaptığı uygulamaları içermektedir. 1987 yılında ise Hitachi takımının tasarladığı Japon Sendai metrosu

denetleyicisi çalışmaya başlamıştır. Bu bulanık mantık denetim metroda daha rahat bir seyahat, düzgün bir yavaşlama ve hızlanma sağlamıştır. 1989 yılında Omron şirketi Japonya'nın Harumi şehrinde bulunan çalışma merkezinde yapmış olduğu bulanık sonuç-board'la yapılan depolama, tekrar etme ve bulanık sonuçları elde etmek için kullanılan (RISC) bilgisayara dayalı olan çalışmayı tanıtmıştır.

Bulanık kuramının uygulamalarının ürünleri Japonya'da 1990 yılında tüketicilere sunulmuştur. Örneğin, bulanık denetimli çamaşır makinesi, bu makine çamaşırın cinsine miktarına, kirliliğine göre en etkili çamaşır yıkama ve su kullanım programını seçebilmektedir.

Bulanık mantık uygulamalarına diğer bir örnek arabalarda yakıt püskürtme ve ateşleme sisteminin denetimidir. Ayrıca, elektrik süpürgesi, televizyon ve müzik setleri gibi aygıtlarda da bulanık mantık denetim kullanılmaktadır.

1993 yılında Sony, The Palm Top sistemini tanıtmıştır. Burada bulanık mantıkla elle yazılan kanji karakterlerinin makine tarafından tanınması sağlanmıştır. Örneğin eğer 253 yazılırsa, burada Sony Palmtop S harfinden 5 sayısını ayırt edebilmektedir.

Bugün elektronik pazarında, pek çok üretim bulanık mantık temeline dayanmaktadır. Bulanık mantık denetim sistemlerinin pek çoğu tüketiciler için SEA/Japonya'da üretilmektedir. Bulanık mantığa dayanan pek çok otomotiv ürünleri piyasaya sunulmuştur. Çizelge 3.1'de bulanık mantık yaklaşımının kullanıldığı bazı örnekler görülmektedir.

Çizelge 3.1 : Bulanık mantık yaklaşımının kullanıldığı örnekler.

ÜRÜN	ŞİRKET
Çamaşır makinesi	AEG, Sharp, Goldstar
Pirinç fırını	Goldstar
Fırın/Kızartıcı	Tefal
Mikrodalga fırın	Sharp
Elektrikli tıraş makinesi	Sharp
Buzdolabı	Whirlpool
Batarya şarj cihazı	Bosch
Elektrikli süpürge	Philips, Siemens
Kamera	Canon, Sanyo, JVC
Klima denetimi	Ford
Isı denetimi	NASA inspace shuttle
Kredi kartı	GE Corporation

Bulanık mantık uygulamaları, ısı, elektrik akımı, sıvı gaz akımı denetimi, kimyasal ve fiziksel süreç denetimlerinde kullanılmaktadır.

Bulanık mantık yaklaşımı uygulandığında öncelikle problemin özellikleri tanımlanır. Bulanık mantık yaklaşımının kullandığı sistemler klasik sistemlere göre daha etkin ısı ve hız denetimi yapabilmektedir. Ayrıca enerji tasarrufu sağlamakta ve aygıt ömrü uzamaktadır.

Bulanık sistemlerde denetim kurallarının tanıtımı genellikle daha kolay ve basittir. Genel olarak bulanık mantık denetleyiciler daha az kural gerektirmekle ve daha yüksek performans sağlamaktadırlar.

Bulanık mantık işlemleri problemin analiz edilmesi ve tanımlanması, kümelerin ve mantıksal ilişkilerin oluşturulması, mevcut bilgilerin bulanık kümelere dönüştürülmesi ve modelin yorumlanması aşamalarından oluşmaktadır. Birçok önkoşul kullanılarak bulanık mantığın problemi çözüme götürüp götüremeyeceğine karar verilebilir. Bu önkoşullara sonucun tutarlılık oranını ve verilerin belirlilik ölçüleri de dahildir.

Öncelikle çözülecek problem için bulanık mantık yaklaşımının doğru bir seçenek olup olmadığına karar verilir. Eğer uygulanacak sistemin davranışı kurallarla ifade edilebiliyorsa veya karmaşık bir matematiksel işlem gerektiriyorsa, bulanık mantık yaklaşımı uygulanabilir. Aksi takdirde bulanık mantık ile elde edilen sonuçlar büyük olasılıkla istenilen değeri vermeyecektir.

Sistemin her bir çıkış ve giriş değişkenleri için üyelik işlevi tanımlanmalıdır. Üyelik işlevinin sayısı sistemin davranışına bağlı olmakla birlikte, aynı zamanda tasarımcı seçimine de bağlıdır. Kaç tane kural gerektiğine tasarımcı karar verir.

Bulanık mantık çok değişkenli mantıktır. Yani bu mantıkla küme üyeleri derecelendirilebilir. Bu basit bir örnek ile açıklanacak olursa; bilgisayar dünyasında büyük önemi olan ikili sayılarda, sayı 0 ya da 1 olabilir, bilgisayar mantığına uygulanırsa ya doğru ya da yanlış olabilir.

Bulanık mantık kuramının en büyük özelliği ‘klasik’ bilgide olduğu gibi sayılardan çok sembolik bilgilerin kullanılmasıdır. Bu bilgi kavramları nesneleri düşünürken bir insanın göz önünde bulundurduğu olguların aynılarını temsil eder. Bu sayısal işlem yöntemlerinin kullanılmasını dışlamaz, ancak sonuçların incelenmesi genellikle sembole dayalı yapılır. Bulanık mantıkta bulunan ikinci bir kavramda klasik algoritma yöntemlerinin tersine ‘deneyime dayalı bilgi’ yöntemleri kavramıdır.

Bulanık mantığın bir başka özelliği de işlenen verilerin ve bilgilerin belirsiz, eksik, yanlış ve hatta çelişkili olduğu durumlarda yetinmesidir. Bulanık mantık çok karmaşık bir problemi tamamen çözmese de etkili yöntemler geliştirir.

Bulanık mantık ile tasarlanan ürünlerin kullanımı, tasarlanması, denenmesi daha kolay ve standart sistemlere göre daha iyi bir denetim sağlamaktadır. Ayrıca bulanık mantığın uygulamaya geçirilişi kolay, hızlı ve ekonomiktir.

3.2 Bulanık Mantık Denetleyicinin Üstünlük ve Sakıncaları

Bulanık mantık yaklaşımının klasik yaklaşımlara göre bir takım üstünlük ve sakıncaları bulunmaktadır.

3.2.1 Üstünlükler

Bulanık mantık kuramının insan düşünüş tarzına çok yakın olması en büyük üstünlüğünü oluşturmaktadır. Bilindiği gibi denetim işlemlerinin birçoğu dilsel niteleyicilerle yapılmaktadır.

Bulanık mantık yaklaşımı matematiksel modele gereksinim duymadığından, matematiksel modeli iyi tanımlanamamış, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemler en başarılı uygulama alanlarıdır.

Bulanık mantık yaklaşımında işaretlerin bir ön işlemeye tabi tutulmaları ve geniş bir alana yayılmış değerlerin az sayıda üyelik işlevlerine indirgenmeleri, uygulamaların daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmasını sağlar.

3.2.2 Sakıncalar

Bulanık mantık uygulamalarında mutlaka kuralların uzman deneyimlerine dayanarak tanımlanması gerekir. Üyelik işlevlerini ve bulanık mantık kurallarını tanımlamak her zaman kolay değildir.

Üyelik işlevlerinin değişkenlerinin belirlenmesinde kesin sonuç veren belirli bir yöntem ve öğrenme yeteneği yoktur. En uygun yöntem deneme-yanılma yöntemidir, bu da çok uzun zaman alabilir. Uzun testler yapmadan gerçekten ne kadar üyelik işlevi gerektiğini önceden kestirmek çok güçtür.

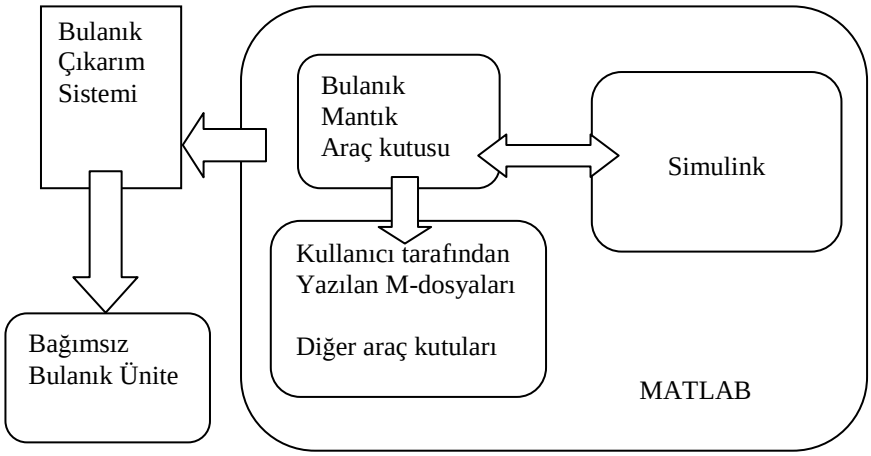
Sistemlerin kararlılık, gözlemlenebilirlik ve denetlenebilirlik analizlerinin yapılmasında ispatlanmış kesin bir yöntemin olmayışı bulanık mantığın temel

sorunudur. Günümüzde bu sadece pahalı deneyimlerle mümkün olmaktadır. Bulanık mantık yaklaşımında üyelik işlevlerinin değişkenleri incelenen sisteme özeldir, başka sistemlere uyarlanması çok zordur. Bunun yanı sıra en sık belirtilen dezavantajları ise üyelik işlevlerinin ayarlanmasının uzun zaman alması ve öğrenme yeteneğinin olmamasıdır [20].

3.3 Bulanık Mantık Araç Çubuğu

Bulanık çıkarım sistemleri oluşturmak ve düzenlemek için MATLAB yazılımının içinde bulunan Fuzzy Logic Toolbox kullanılabilir. Bu araç çubuğu sayesinde bulanık çıkarım sistemleri grafiksel arayüz vasıtasıyla veya komut-satırı fonksiyonları ile tasarlanabilir. Uyarlanabilir sinirsel bulanık mantık sayesinde otomatik olarak da tasarım yapılabilmektedir.

Simulink yazılımı ile tasarlanan bulanık sistemler blok diyagram modelleme ortamında test edilebilmektedir. Araç kutusu aynı zamanda kişiye kendi hazırladığı bağımsız (stand-alone) C programlarını doğrudan çalıştırabilmektedir. Bu bağımsız bulanık çıkarım ünitesi (Fuzzy Inference Engine) sayesinde mümkün olmaktadır. Bütün sağlanan komutlar ANSI standardı uyumludur.

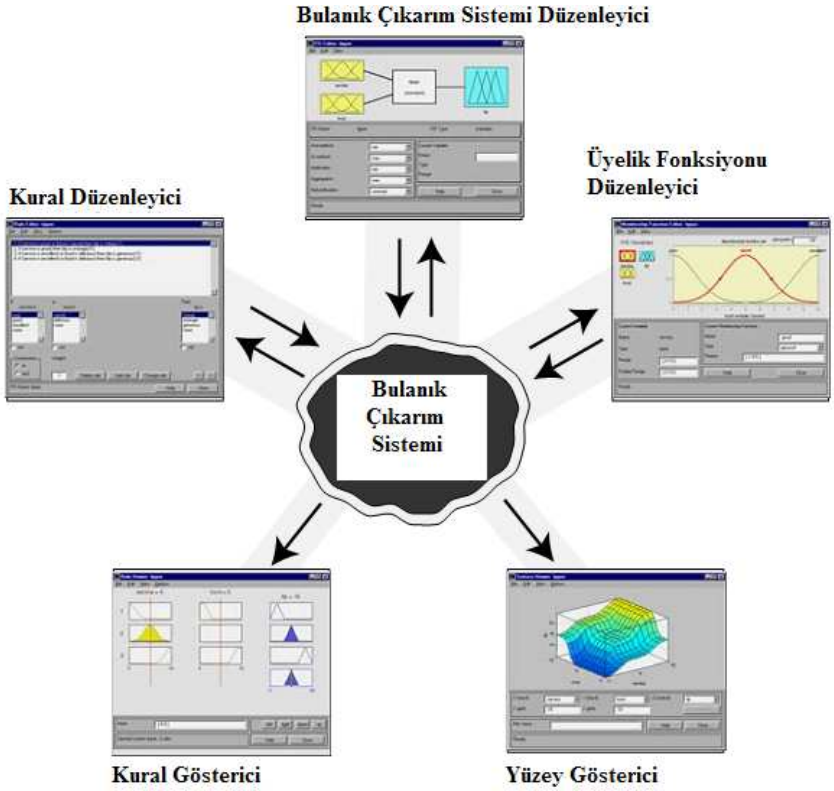


Şekil 3.1 : MATLAB ortamının bütünleşik yapısı.

MATLAB programlama ortamının birleşik olması özelliği ile kişi araç kutusunu özelleştirebilir ve onu başka bir araç kutusu ile kullanabilir, örnek olarak Kontrol Sistemleri, Yapay Sinir Ağları, Optimizasyon araç kutusu. Şekil 3.1'de MATLAB ortamının bütünleşik yapısı görülmektedir [21].

3.4 Bulanık Mantık Araç Kutusu Grafiksel Kullanıcı Arayüzü

Bulanık mantık grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) sayesinde bulanık çıkarım sistemlerinin tasarımı çok kolaydır. Şekil 3.2'de bulanık mantık araç kutusu fonksiyonları görülmektedir.



Şekil 3.2 : Bulanık mantık araç kutusu fonksiyonları.

3.4.1 Bulanık çıkarım sistemi düzenleyici

Bu bölüm, kaç tane giriş ve çıkış değişkeni olacağının girildiği ve değişkenlere isim verildiği bölümdür. Bu bölümde hangi çıkarım olacağı ve durulama biriminin nasıl olacağı kararlaştırılır. Bulanık mantık araç kutusu giriş değişkenlerinin sayısında bir kısıtlama oluşturmaz. Fakat giriş değişkenlerinin sayısı kullanıcı bilgisayarın uygun belleği ile kısıtlanabilir. Eğer girişler çok fazla ve üyelik fonksiyonlarının sayısı çok büyük olursa bulanık çıkarım sistemini diğer GUI araçları ile analiz etmek zorlaşabilir.

3.4.2 Üyelik fonksiyon düzenleyici

Her bir değişkene ait bütün üyelik fonksiyonları şekillerinin (üçgen, yamuk, çan eğrisi vb) belirlendiği bölümdür. Bulanık mantık araç kutusunda kullanabileceğimiz bazı üyelik fonksiyon şekilleri Şekil 3.3'de gösterilmektedir.

trimf(x, [1.8 3.2 4.3]);

zmf(x, [2 8]);

trapmf(x, [0.5 1 1.5 2]);

gbellmf(x, [1.5 5 2.5]);

smf(x, [8 10]);

dsigmf(x,[5 2 5 7]);

gaussmf(x, [4 6]);

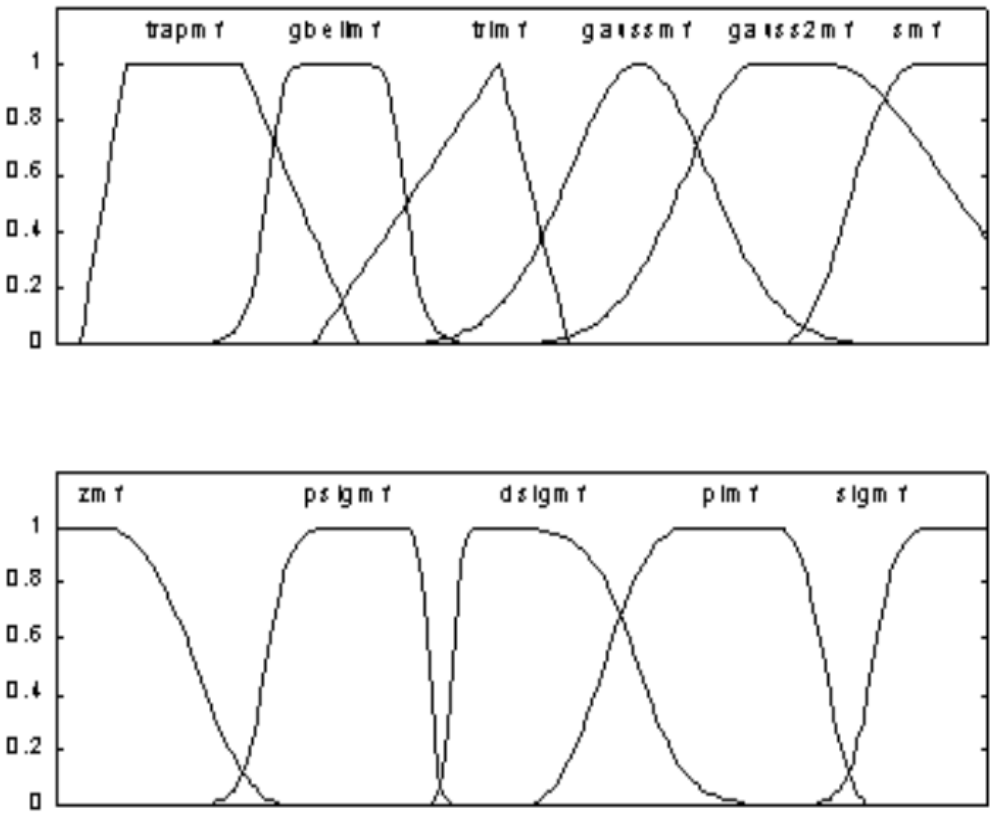
sigmf(x, [2 3]);

psigmf(x, [2 3 -5 8]);

pimf(x, [2 5 8 9]);

dsigmf(x,[5 2 5 7]);

gauss2mf(x, [2 8 1 4]);



Şekil 3.3: Matlab fuzzy toolbox (bulanık mantık araç kutusu)'daki hazır üyelik fonksiyonlarının şekilleri [22].

3.4.3 Kural düzenleyici

Sistemin davranışını tanımlayan kuralların (IF-THEN RULES) oluşturulduğu bölümdür.

3.4.4 Kural gösterici

Bu gösterici kullanılarak hangi kuralın aktif olduğu hangi üyelik fonksiyonların şeklinin sistemi nasıl etkilediği görülebilir.

3.4.5 Yüzey gösterici

Yüzey gösterici sayesinde giriş ve çıkış değişkenlerine göre üç boyutlu bir grafik oluşturulmaktadır [21].

4. İYONİZASYON SÜREÇLERİ ve MODELLEME

4.1 İyonizasyon Süreçleri

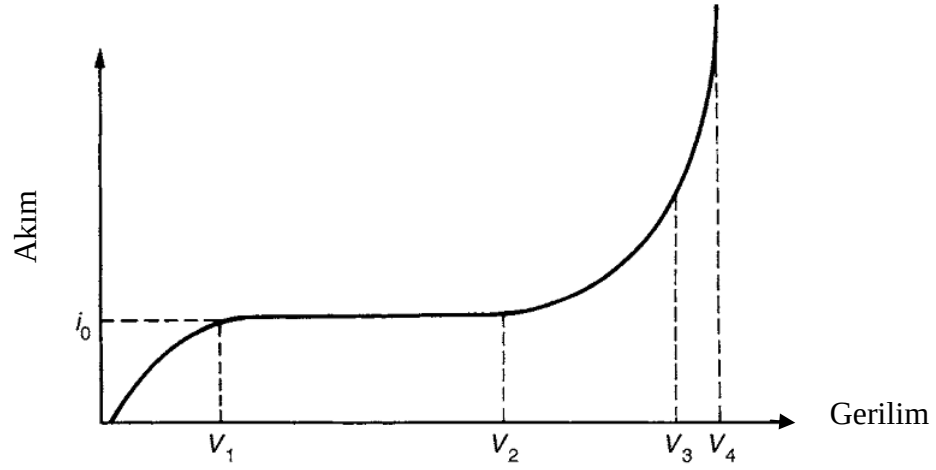
Normal sıcaklıkta ve basınçta gazlar mükemmel yalıtkanlardır. Düşük alanlarda hava içindeki iletkenlik, 10^{-16} – 10^{-17} A/cm^2 arasında değişmektedir. Bu akım, yeryüzünde ve atmosferde bulunan kozmik ışımalar ve radyoaktif maddelerden dolayı oluşmaktadır. Yüksek alanlarda yüklenen parçacıklar, elektriksel olarak yüksüz molekülleri iyonize edebilecek enerjiyi kendi aralarındaki çarpışmalar sayesinde kazanabilirler. Yüksek alan dayanımları için elektron etkisi ile iyonizasyon, gazların elektriksel olarak delinmesine neden olan en önemli süreçtir. Elektron etkisi ile oluşan iyonizasyonun verimliliği, bir elektronun elektrik alan yönünde ortalama serbest yol boyunca kazandığı enerjiye bağlıdır.

Eğer $\overline{\lambda_e}$, E elektrik alan şiddeti doğrultusundaki elektronun ortalama serbest yolu ise, o halde $\overline{\lambda}$ yolu boyunca ortalama kazanılan enerji $\Delta W = eE\overline{\lambda_e}$ olur. Bu nicelik E/p ile orantılıdır çünkü, ortalama serbest yol basınç ile ters orantılıdır, $\overline{\lambda_e} \propto 1/p$ ΔW enerjisi ile iyonizasyonun olabilmesi için ΔW en azından molekülün iyonizasyon enerjisi (eV_i)'ye eşit olmalıdır. (eV_i)'den daha düşük enerjili elektronlar parçacıkları uyarabilir ve uyarılmış parçacıklar düşük enerjili elektronların çarpışmasıyla iyonize edilebilir. Ayrıca, çarpışmalarla $\Delta W \geq eV_i$ enerjisini kazanmış bütün elektronlar iyonizasyona sebebiyet vermez çünkü çarpışma suretiyle iyonizasyon bütün diğer gaz boşalma süreçleri gibi olasılık teorisine dayanır ve genellikle iyonizasyon kesiti adı verilen $P_i\sigma = \sigma_i$ çarpım terimi ile açıklanır. P_i iyonizasyon olasılığıdır, σ ise alıkoyma veya durdurma için moleküler veya atomik kesit alanıdır. σ_i kesiti, farklı enerjilerdeki mono-enerjitik elektron ışınları sayesinde ölçülebilir.

4.1.1 Townsend birinci iyonizasyon katsayısı

Elektrik alanın olmadığı durumda sıradan bir gazda elektron ve pozitif iyon üretimi ayrışma sürecinde dengelenir. Bu denge durumu yüksek bir alan uygulanması ile bozulur. İki paralel düzlemsel elektrot arasındaki gaz akımının uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak değişimi ilk defa Townsend tarafından çalışılmıştır.

Townsend'ın gözlemine göre başlangıçta akım, uygulanan gerilim ile orantılı olarak artıp, daha sonra neredeyse bir i_0 akım değerinde sabit olarak kalmıştır. i_0 akımına doyma (satürasyon) akımı denilir. Eğer sürekli olarak daha yüksek bir gerilim uygulanırsa, akım i_0 ötesinde üstel olarak bir artış gösterir. Akım gerilim arasında genel ilişki Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Düzlemsel elektrot sisteminde akım gerilim arasındaki ilişki.

Townsend V_2 gerilimi ötesindeki akım artışını gazın elektron çarpışması ile iyonlaştığına yormaktadır. Alan arttıkça katottan çıkan elektronlar çarpışmalarla birlikte, bir gaz atom veya molekülü ile çarpışarak meydana getireceği iyonizasyonu oluşturabilmek için hızlanırlar.

Bu akım artışını açıklayabilmek için Townsend, Townsend'ın birinci iyonizasyon katsayısı diye bilinen α katsayısını tanıtmıştır. α katsayısı bir elektron tarafından, alan doğrultusundaki birim uzunlukta üretilen elektron sayısıdır.

Eğer Şekil 4.2'de katotdan x uzaklıktaki alan doğrultusundaki elektronların sayısı n ile gösterilirse dx yolundaki elektronların artışı dn,

$$dn = \alpha n dx \qquad \textbf{(4.1)}$$

ile gösterilir. (4.1) denklemi katotdan anoda olan d uzunluğu boyunca integre edilirse,

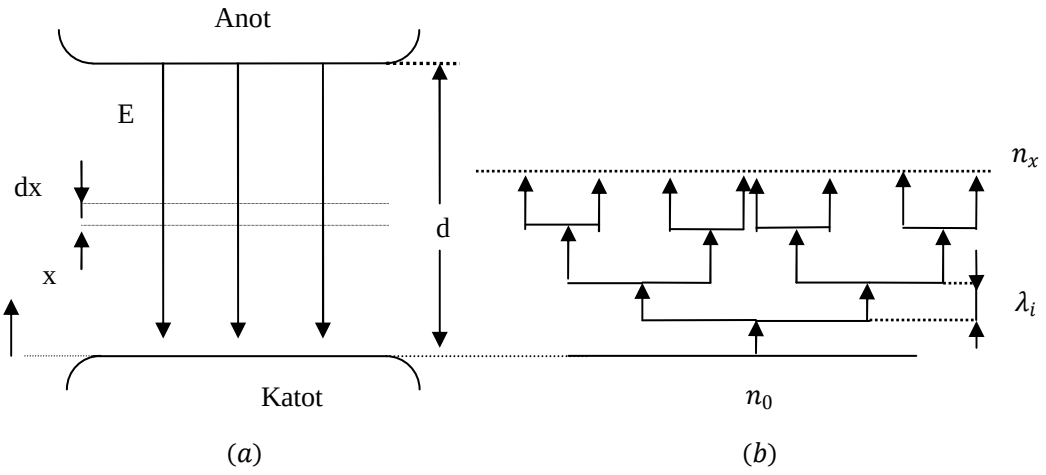
$$n = n_0 e^{\alpha d} \qquad \textbf{(4.2)}$$

olur. n_0 katotda üretilen birincil elektron sayısıdır. (4.2) eşitliği akım cinsinden yazılırsa,

$$I = I_0 e^{\alpha d} \qquad \textbf{(4.3)}$$

olur. Burada I_0 katodu terk eden akımdır.

(4.2) denklemindeki $e^{\alpha d}$ terimi elektron çığı olarak adlandırılır ve bir elektronun katotdan anoda gidişi sırasında üretilen elektron sayısını temsil eder. Şekil 4.2'de çığ içindeki elektron çarpışması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Elektron çarpışmasının şematik olarak gösterimi (a) boşluk düzenlemesi (b) elektron çığı.

Sabit sıcaklıkta, bir gazın enerji dağılımı ΔW, sadece E/p değerine bağlıdır. Üstelik verilen enerji dağılımı için iyonlaşma olasılığı gaz yoğunluğuna ve basıncına bağlıdır. Bu yüzden,

$$\alpha = pf(E/p) \tag{4.4}$$

veya

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \tag{4.5}$$

yazılabilir. (4.5) eşitliğindeki α/p'nin E/p'ye genel olarak bağlı olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır.

$\Delta W \geq eV_i$ enerjisini kazanmış bütün elektronlar, V_i iyonizasyon potansiyeli olmak üzere, bir gazı iyonize edebilir. Bu elektronların bir x yolunu katettiği düşünülürse, Clausius dağılımı kullanılarak x yolunu geçen elektronların bir kısmı, (4.6) eşitliği ile verilir.

$$f'(x) = e^{-x/\bar{\lambda}} \tag{4.6}$$

Bu yüzden sadece çok küçük olasılıkla uzun mesafeleri kat eden elektronlar, yüksek enerji kazanabilir. Başarılı çarpışmaların sayısı birinci iyonizasyon katsayısı α açıkça bu dağılımla ilişkilidir.

$$\alpha = -\frac{df'(x)}{dx} = \frac{1}{\bar{\lambda}} e^{-(\lambda_i/\bar{\lambda})} \quad \textbf{(4.7)}$$

$\lambda_i = x$ iyonizasyonun olmadığı yoldur. Hız dağılımı alan doğrultusu boyunca değişmeden sabit kalır, $\bar{\lambda}_E = \bar{\lambda}\nu$ elektron kayma hızı olmak üzere,

$$\frac{\overline{\nu}}{\bar{\lambda}} = \frac{\nu}{\lambda_E} \text{ ve } \bar{\lambda}_E = \frac{1}{n_E} \quad \textbf{(4.8)}$$

Eşitlik (4.7) alan kayma hızı ile düzenlenirse,

$$\alpha = n_E e^{-\lambda_i/\bar{\lambda}_E} = \frac{1}{\bar{\lambda}_E} e^{-\lambda_i/\bar{\lambda}_E} \quad \textbf{(4.9)}$$

σ_i iyonizasyon için doğru kesit ve N gaz yoğunluğu olmak üzere,

$$\overline{\lambda} = \frac{1}{N\sigma_i} \quad \textbf{(4.10)}$$

(4.10) denkleminde $N = p/kt$ olmak üzere, ortalama serbest yol eşitlik (4.11)'deki hale gelir.

$$\overline{\lambda} = \frac{kT}{p\sigma_i} \quad \textbf{(4.11)}$$

Eğer, $\lambda_i = V_i/E$ yazarsak,

$$\alpha = -\frac{df'(x)}{dx} = \frac{p\sigma_i}{kT} e^{-(V_i/kT)(p\sigma_i/kT)} \quad \textbf{(4.12)}$$

veya

$$\frac{\alpha}{p} = \frac{\sigma_i}{kT} e^{-(\sigma_i/kT)[V_i/(E/p)]} = A_{(T)} e^{-[B_{(T)}/(E/p)]} \quad \textbf{(4.13)}$$

burada,

$$A_{(T)} = \frac{\sigma_i}{kT}\,;\, B_{(T)} = \frac{V_i\sigma_i}{kT} \quad \textbf{(4.14)}$$

Çizelge 4.1 : A ve B iyonizasyon katsayıları (T = 20^{o}C).

Gaz	A $cm^{-1}torr^{-1}$	B $Vcm^{-1}torr^{-1}$	E/p $Vcm^{-1}torr^{-1}$	V_i volt
H_2	5	130	150-600	15,4
N_2	12	342	100-600	15,5
Hava	15	365	100-800	–
CO_2	20	466	500-1000	12,6
He	3	34	20-150	24,5
Hg	20	370	200-600	–

Denklem (4.13) A ve B'nin sabit değerleri için iyonizasyon sürecine belirli E/p değerlerinde karar verebilir. Değişik gazlar için A ve B sabitleri deneysel olarak tespit edilip literatürde yayınlanmıştır. Bazı gazlar için deneysel olarak bulunan A ve B katsayıları Çizelge 4.1'de verilmiştir [23]. (4.3) denklemi akımın kendi kendini beslemediğini gösterir. Dış etki kaldırılırsa analitik olarak $I_0 = 0$ olacağından $I = 0$

olur. Gerçekte elektrotlara uygulanan gerilimin belli bir değerinde boşalma kendi kendini besler. Boşalmanın kendi kendini beslemesi için katottan çıkan bir elektronun anoda varıncaya kadar yan olaylarla kendisi için bir yedek elektron meydana getirmesi gerekir, bu nedenle elektron çığının oluşumu sırasında meydana gelen pozitif iyonların etkisini de hesaba katmak gerekir.

4.1.2 Townsend'in ikinci iyonlaştırma katsayısı γ ve düzgün alanda delinme gerilimi

Bir pozitif iyonun elektrik alanı doğrultusunda 1 cm'lik yol gitmesi durumunda çarpma suretiyle meydana getirdiği iyon çifti sayısına iyonun iyonlaştırma katsayısı denir ve β ile gösterilir. Bu sayı α yanında çok küçük olduğundan, ihmal edilebilir, fakat bir pozitif iyonun katot yüzeyinden kopardığı elektron sayısı ihmal edilmez. Bu sayı γ ile gösterilir ve Townsend'in ikinci iyonlaştırma katsayısı olarak adlandırılır. Bir elektron katottan çıkıp anoda varıncaya kadar $e^{\alpha d}$ adet elektron ve $(e^{\alpha d} - 1)$ adet de pozitif iyon meydana getirdiğinden, $(e^{\alpha d} - 1)$ adet pozitif iyonun katottan çözdüğü elektron sayısı,

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \tag{4.15}$$

olur. Eğer bu sayı 1'e eşit ise, bu durumda katottan çıkan bir elektron anoda varıncaya kadar kendisi için bir yedek elektron hazırlamış demektir, bu sayede boşalma kendi kendini besleyecektir.

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \tag{4.16}$$

denklemine boşalmanın kendi kendini besleme koşulu denir. Bu denklem,

$$\alpha d = ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \tag{4.17}$$

şeklinde de yazılabilir. Burada αd, elektronun toplam iyonlaştırma katsayısını gösterir.

$\alpha = pf(E/p)$ ve $\gamma = f(E/p)$ olduğu düşünülürse ve (4.17) denkleminde E yerine de U_d/d konulursa (4.17) denklemi

$$pd.f(U_d/pd) = \ln\left(1 + \frac{1}{(U_d/p)}\right) \tag{4.18}$$

şekline girer. Burada U_d, boşalmanın kendi kendini besleme koşuluna karşı düşen delinme gerilimidir.

(4.18) denkleminde basınçla elektrotlar arası açıklık, çarpım şeklinde bulunmaktadır. Buradan, düzgün alanda ve sabit sıcaklıkta delinme geriliminin, basınçla elektrotlar arası açıklık çarpımının bir fonksiyonu olduğu anlaşılır. Aynı zamanda basıncı p ve açıklığı d olan bir düzlemsel elektrot sistemi ile basıncı (np) ve elektrot açıklığı (d/n) olan düzlemsel elektrot sistemlerinin delinme gerilimleri aynıdır. Bu bağıntı ilk defa Paschen tarafından deneysel olarak bulunduğu için Paschen yasası adını alır.

Düzlemsel elektrot sistemleri için delinme geriliminin analitik ifadesi hesaplanmak istenirse (4.17) denkleminde α yerine Ape^{-Bpd/U_d} yazılır ve $\gamma = sabit$ kabul edilirse, (4.17) denklemi,

$Apde^{-Bpd/U_d} = \ln(1 + 1/\gamma)$ şekline girer, buradan da U_d yalnız bırakılırsa,

$$U_d = \frac{Bpd}{ln\left[\frac{Apd}{ln(1+1/\gamma)}\right]} = f(pd) \qquad \textbf{(4.19)}$$

denklemi elde edilir. Gerçekte γ değeri (E/p)'ye ve elektrot malzemesine bağlı olup değeri 1/50 ile 1/5000 arasında değişir. Fakat denklemde bu terim $\ln(\ln(1 + 1/\gamma))$ şeklinde bulunduğundan, γ'nın büyük sınırlar içinde değişmesine rağmen bu terim çok az değişecektir.

(4.19) denkleminde sıcaklık $20\ °C$ sabit olarak kabul edilmiştir. Sıcaklığın etkisini de hesaba katmak gerekirse, delinme gerilimi bağıntısında A ve B sabitleri sıcaklıkla ters orantılı olduğundan, A yerine AT_0/T ve B yerine BT_0/T konursa, sıcaklığın etkisi hesaba katılır. Böylece,

$$U_d = \frac{BpdT_0/T}{ln\left[\frac{ApdT_0/T}{ln(1+1/\gamma)}\right]} = f(pd/T) \qquad \textbf{(4.20)}$$

denklemi elde edilir. Burada p/T yerine bağıl hava yoğunluğu cinsinden değeri konabilir. T mutlak sıcaklığı ve p basıncındaki hava yoğunluğunun T_0 mutlak sıcaklığı ve p_0 basıncındaki hava yoğunluğuna oranı bağıl hava yoğunluğunu verir ve δ ile gösterilir.

$$\delta = \frac{p}{p_0}\frac{T_0}{T} = \frac{293}{760}\frac{p}{T} = 0.386\frac{p}{T} \qquad \textbf{(4.21)}$$

dir. Bu ifade (4.20) denkleminde yerine konursa, $U_d = f(\delta d)$ olur bu bağıntıya genelleştirilmiş Paschen bağıntısı denir. Buna göre, düzgün alanda delinme gerilimi, bağıl hava yoğunluğu ile elektrotlar arası açıklık çarpımının bir fonksiyonudur.

δd'nin büyük değerleri için (atmosfer basıncı ve cm mertebesindeki açıklıklar için) $U_d = f(\delta d)$ değişimi, aşağı yukarı lineerdir. Bu yüzden düzgün alanda yaklaşık

hesaplar için ortalama delinme dayanımı $30\,kV/cm$ alınır ve delinme gerilimi, $U_d = 1.36 + 30\delta d$ ampirik formülü ile hesaplanır. Burada elektrot açıklığı d (cm) ve delinme gerilimi $U_d(kV)$ cinsindendir [24].

4.2 Modelleme

Gazlarda elektriksel delinme gerilimini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları elektrot şekli, elektrot açıklığı, basınç, sıcaklık, nem, elektrot malzemesi, gerilim türü (alternatif gerilim, doğru gerilim, darbe gerilimi, doğru ve darbe geriliminin kutbiyet etkisi), elektrik alan düzgünlük faktörü, gerilim artış hızı, gazın cinsi, gazın elektronegatif özelliği, gerilimin frekansı, gerilimin uygulanma süresidir.

Bu çalışmada, hava için değişken parametreler elektrot sistemi (küre-küre, küre-düzlem, düzlem-düzlem), basınç (760 mmHg, 660 mmHg, 560 mmHg), gerilim artış hızı (1 kV/s, 2 kV/s, 3 kV/s), elektrotlar arası açıklık (2 mm, 4 mm, 6 mm) olmak üzere delinme geriliminin tespitini yapmak için bir bilgisayar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model herhangi bir parametreyi arttırıp veya azaltarak birbirlerine göre etkilerini görmeyi sağlamıştır.

Parametrelerin etkilerini gözlemlemek için ise bulanık mantık sistemleri kurulmuştur, kurulan bulanık mantık sistemleri tek bir model üzerinden kullanılabilmesi amacıyla Matlab/Simulink modeline entegre edilmiştir.

(4.19) denklemine göre düzgün alanda hava için delinme geriliminin analitik olarak hesaplanması mümkündür. Fakat, (4.19) denklemi, sadece düzlem-düzlem elektrot sistemi için kullanılabilir olup, diğer elektrot sistemleri için denklem kullanılamaz. Bu yüzden, diğer elektrot sistemlerine göre (4.19) denklemini düzenlemek gereklidir. Bu düzenlemeyi yapabilmek için (4.19) denkleminde bulunan d açıklığını alan düzgünlük faktörü cinsinden denkleme katmak gerekir. Bunun için öncelikle alan düzgünlük faktörü, ortalama alan (E_{ort}), maksimum alan (E_{max}), gerçek açıklık (a), eşdeğer açıklık (α) kavramlarının bilinmesi gereklidir.

Düzlem-düzlem elektrot sisteminde gerçek açıklık ve eşdeğer açıklık birbirine eşit olup, $E_{ort} = U/a$, $E_{max} = U/\alpha$ olduğu düşünülürse, $E_{ort} = E_{max}$ bulunur. Alan düzgünlük faktörü $\eta = E_{ort}/E_{max}$ olduğu düşünülürse $\eta = 1$ bulunur. Dikkat edilirse, η için bir analitik ifade daha vardır.

$$\eta = \frac{E_{ort}}{E_{max}} = \frac{(U/a)}{(U/\alpha)} = \frac{\alpha}{a} \quad \textbf{(4.22)}$$

(4.22) denklemi sayesinde elektrot açıklığı olan a'yı, α ve η cinsinden yazmak mümkündür. Böylece $a = \alpha/\eta$ olur. (4.19) denklemini yeniden düzenlersek,

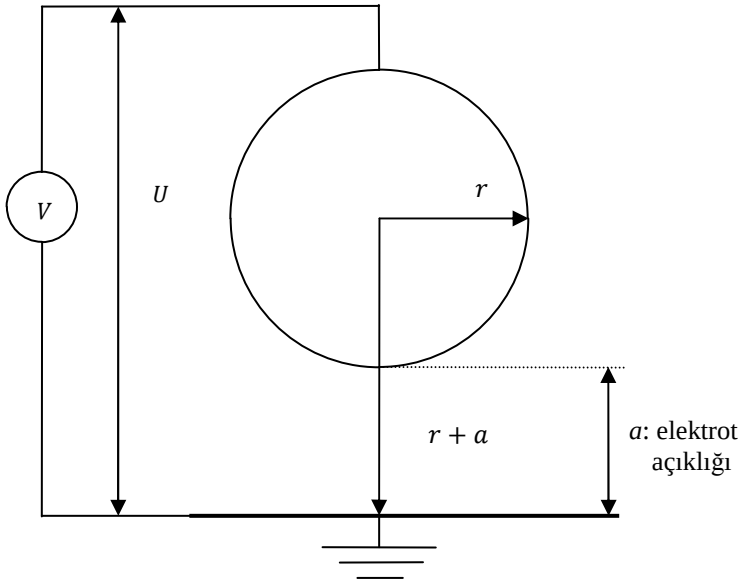
$$U_d = \frac{Bp(\alpha/\eta)}{\ln\left[\frac{Ap(\alpha/\eta)}{\ln(1+1/\gamma)}\right]} \quad \textbf{(4.23)}$$

şeklinde yazmamız mümkündür. (4.23) denklemi küre-küre ve küre- düzlem elektrot sistemlerinin delinme gerilimlerinin bulunmasında da kullanılabilir. Her elektrot sistemi için eşdeğer açıklık (α) ve düzgünlük faktörü (η)'nın bilinirse (4.23) denkleminde değerler yerine konularak delinme gerilimi hesaplanabilir.

4.3 Bazı Elektrot Sistemleri İçin E_{max} ve α'nın Analitik İfadesi

4.3.1 Küre-düzlem elektrot sistemi

Şekil 4.3'de paralel olarak yerleştirilen küre düzlem elektrot sistemi gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.3 : Küre-düzlem elektrot sistemi için bazı büyüklüklerin tanımlanması.

$$E_{max} = \frac{U}{\left(\frac{r_1}{r_2}\right)(r_2 - r_1)} \quad \textbf{(4.24)}$$

Burada, r_1 yerine *r*, r_2 yerine *r* + *a* alınırsa

$$\alpha = \frac{r_1}{r_2}(r_2 - r_1) = \frac{r}{r+a}a \quad \textbf{(4.25)}$$

olur.

4.3.2 Küre-küre elektrot sistemi

Küre- küre elektrot sisteminde karşılıklı aynı yarıçapa sahip iki küre elektrot olduğu düşünülürse, iki küre arasındaki a açıklığının ikiye bölünmesi ile $a/2$ elektrot açıklığına sahip iki adet küre-düzlem elektrot sistemi oluşur. İki küre arasına U gerilim uygulanırsa, her bir küre-düzlem sistemi için uygulanan gerilim U/2 gibi düşünülebilir. Bu yüzden,

$$E_{max} = \frac{U}{\left(\frac{r_1}{r_2}\right)(r_2 - r_1)} \tag{4.26}$$

Burada, *U* yerine *U*/2, r_1 yerine *r*, r_2 yerine *r* + *a*/2 alınırsa

$$\alpha = \frac{r\ a}{r + \frac{a}{2}} \tag{4.27}$$

olur.

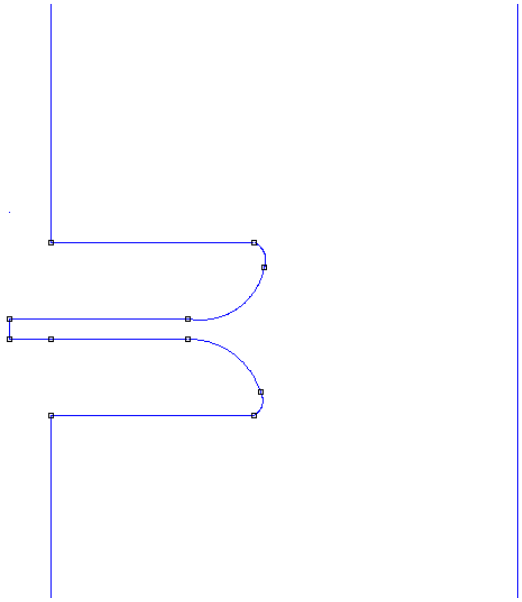
4.4 Elektrot Sistemleri İçin η'nın Hesaplanması

Modellemede kullanılması düşünülen üç farklı elektrot sistemi, düzlem-düzlem, küre-düzlem ve küre- küre elektrot sistemleridir. Kürelerin çapı 5 cm, düzlem elektrot ise altçapı 5 cm, üst çapı 3.5 cm yüksekliği h = 0,75 cm olan katı bir modeldir. Her düzende (düzlem-düzlem, küre-düzlem, küre-küre) elektrotlar 2 mm, 4 mm ve 6 mm elektrot açıklığı olacak şekilde yerleştirildiği düşünülmüştür. Bilindiği üzere maksimum elektrik alanı elektrotlar arası açıklık ve elektrot şekline göre değişmektedir. Alan düzgünlük faktörünü bulmak için ortalama elektrik alanı ve maksimum elektrik alanını bilmek gerekir. Bu hesapları yapabilmek için, sonlu elemanlar yöntemini esas alan FEMM adlı açık kodlu bir bilgisayar programında elektrot şekilleri çizilmiş ve maksimum elektrik alan hesapları yapılmıştır. Elektrotlar yüksekliği 50 cm, alt çapı 10 cm olan silindirik bir kap içerisinde olduğu düşünülerek çizimler yapılmıştır. Elektrotların tutturulduğu taşıyıcı kolların yarıçapı ise 4 mm'dir.

4.4.1 Düzlem-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar analizi

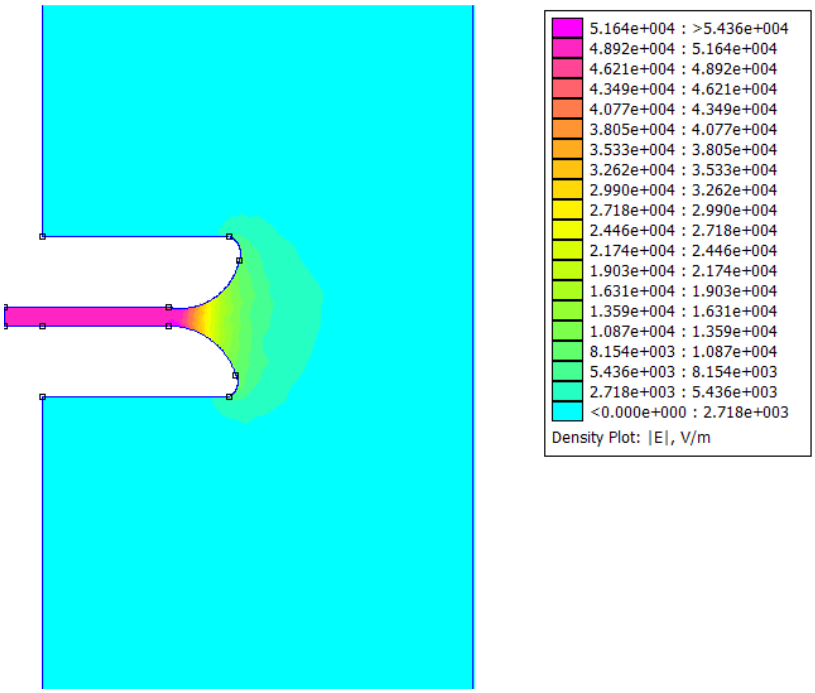
Düzlem-düzlem elektrot sistemi için üç farklı elektrot açıklığı (2 mm, 4 mm, 6 mm), kullanılarak şekiller çizilmiş, üst elektroda 100 V gerilim uygulanıp alt elektrota topraklandığı için 0 V gerilim değeri verilmiştir. Silindir kap içinde yalıtkan olarak hava $(\varepsilon_r = 1)$ göz önüne alınmış, problemin inceleme bölgesi üçgen sonlu

elemanlara bölünerek elektrik alan dağılımı hesabı yapılmıştır. Maksimum elektrik alanı (E_{max}) program sayesinde bulunmuştur. Şekil 4.4'de analizi yapılacak şeklin görüntüsü verilmiştir.



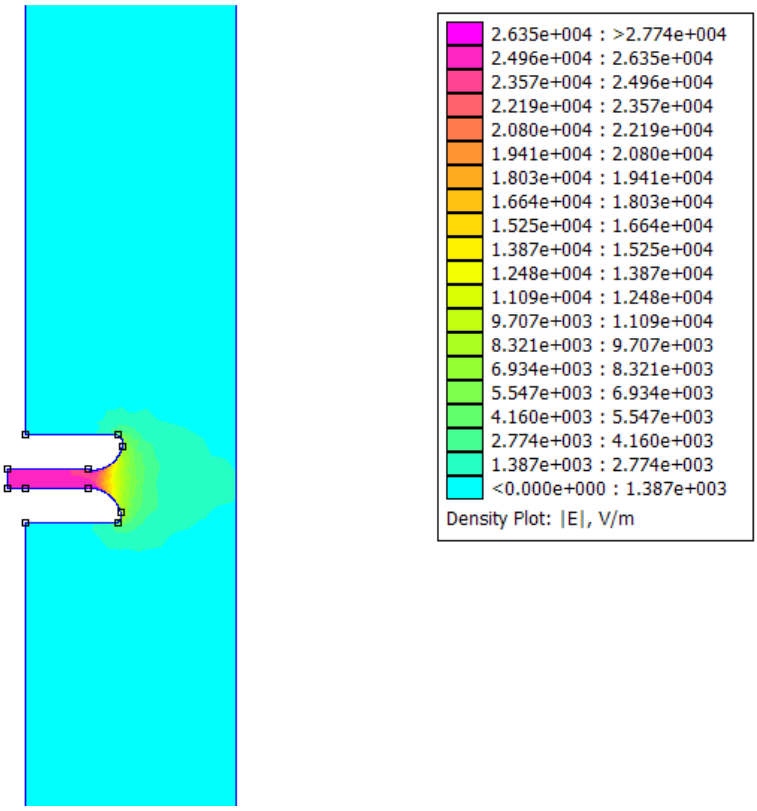
Şekil 4.4 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi (elektrot açıklığı 2 mm).

Şekil 4.5'te Şekil 4.4'te verilen elektrot sistemi için elektrik alan dağılımı gösterilmiştir.



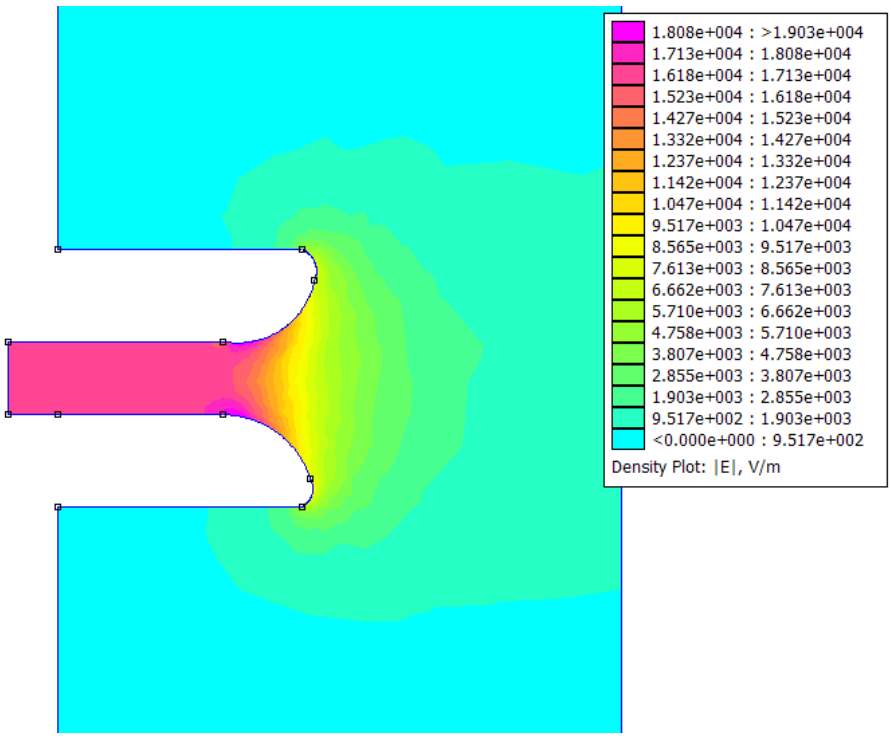
Şekil 4.5 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 2 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.

Şekil 4.6'da 4 mm için tekrar alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 4 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.

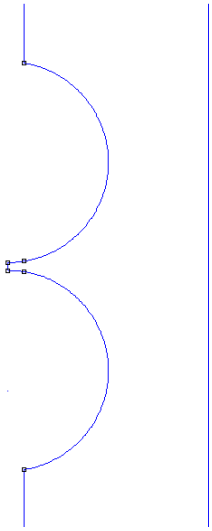
Şekil 4.7'de 6 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 6 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.

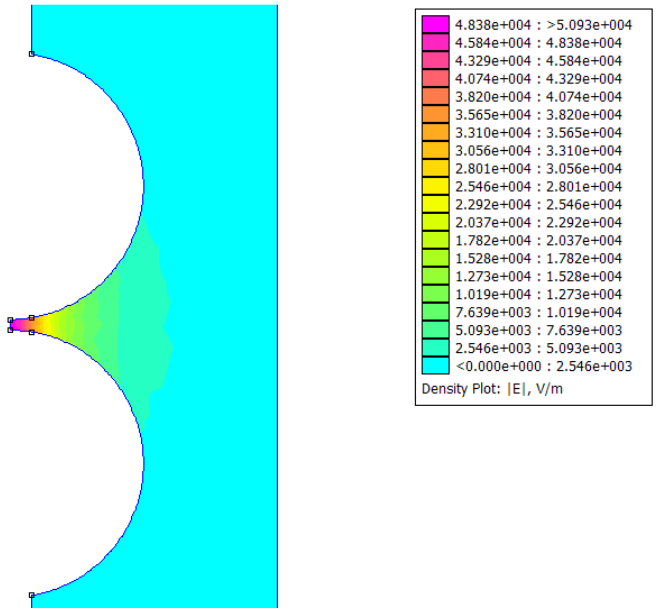
4.4.2 Küre-küre elektrot sistemi için sonlu elemanlar analizi

Küre-küre elektrot sistemi için üç farklı elektrot açıklığı (2 mm, 4 mm, 6 mm), kullanılarak şekiller çizilmiş, üst elektroda 100 V gerilim uygulanıp alt elektrot için 0 V gerilim değeri uygulanmış, silindir kap içinde yalıtkan olarak hava ($\varepsilon_r = 1$) tanımlanmış, üçgen elemanlara bölünerek elektrik alan hesabı yapılmıştır. Maksimum elektrik alan (E_{max}) program sayesinde bulunmuştur. Şekil 4.8'de analizi yapılacak şeklin görüntüsü verilmiştir.



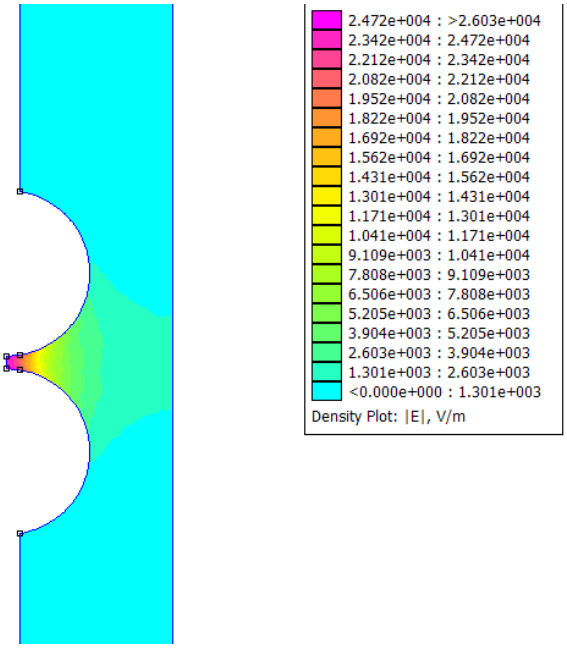
Şekil 4.8 : Küre-küre elektrot sistemi (elektrot açıklığı 2 mm).

Şekil 4.9'da Şekil 4.8'de verilen elektrot sistemi için elektrik alan dağılımı gösterilmiştir.



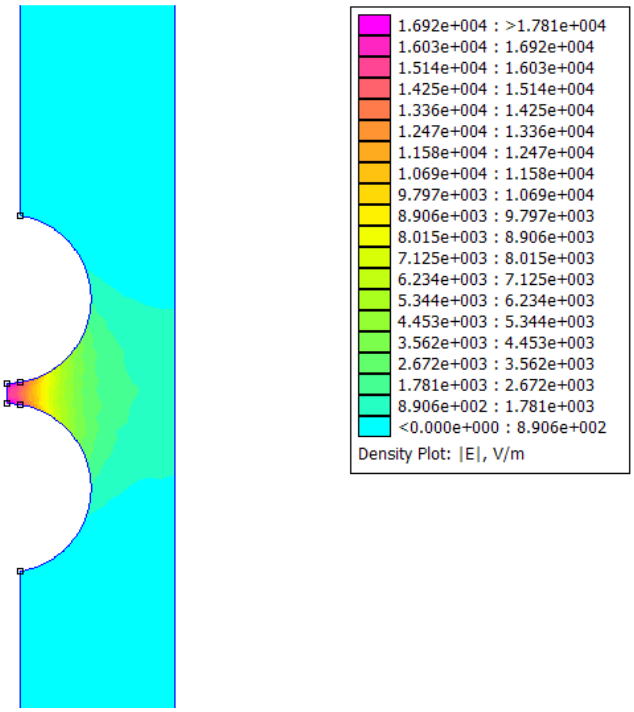
Şekil 4.9 : Küre-küre elektrot sisteminde 2 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.

Şekil 4.10'da 4 mm için tekrar alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : Küre-küre elektrot sisteminde 4 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.

Şekil 4.11'de elektrot açıklığı 6 mm yapılmıştır.

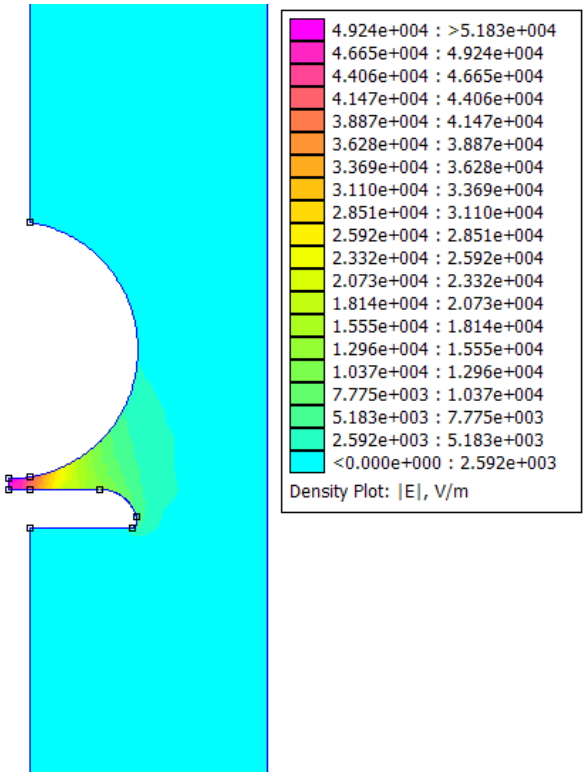


Şekil 4.11 : Küre-küre elektrot sisteminde 6 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.

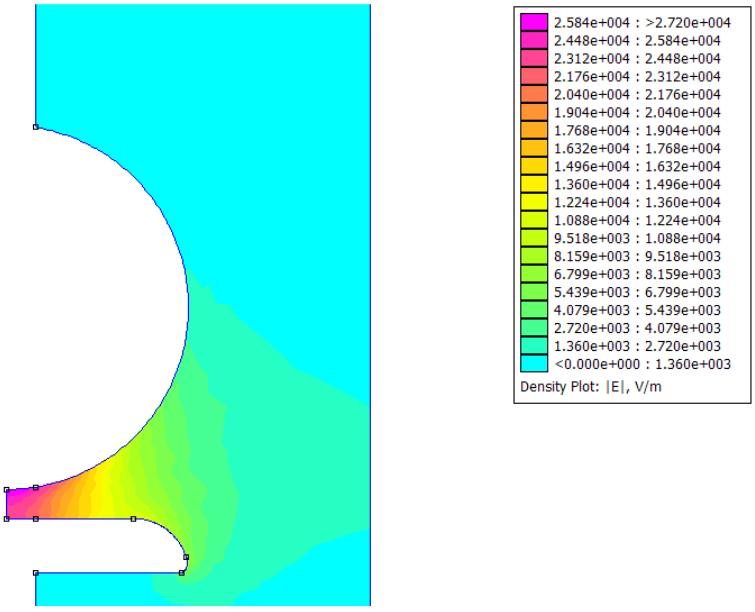
4.4.3 Küre-düzlem elektrot sistemi için sonlu elemanlar analizi

Küre-düzlem elektrot sistemi için de yukarıdaki durumlar göz önünde bulundurulmuştur. Aşağıda elektrik alan dağılımları gösterilmiştir. Şekil 4.12'de

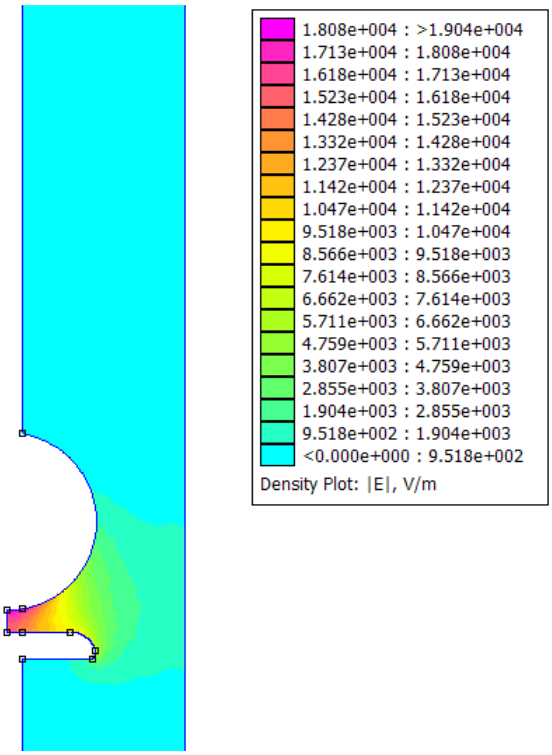
küre-düzlem elektrot sistemi için elektrotlar arası mesafe 2 mm olacak şekilde elektrik alan dağılımı yapılmıştır. Şekil 4.13'de elektrotlar arası mesafe 4 mm olacak şekilde bir alan dağılımı yapılmıştır. Şekil 4.14'de ise elektrotlar arası mesafe 6 mm'ye çıkarılmıştır.



Şekil 4.12 : Küre-düzlem elektrot sisteminde 2 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.



Şekil 4.13 : Küre-düzlem elektrot sisteminde 4 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.



Şekil 4.14 : Küre-düzlem elektrot sisteminde 6 mm elektrot açıklığı için alan dağılımı.

4.5 E_{ort}, E_{max} ve η'nın Hesaplanması

Yukarıda alan dağılımları gösterilen elektrot sistemleri için ortalama elektrik alan hesaplaması yapılmalıdır. Ortalama elektrik alanları analitik olarak hesaplanmıştır. Her durumda 100 V uygulandığı için üç farklı ortalama elektrik alanı mevcuttur. 2 mm açıklık için $E_{ort} = 100/2 = 50$ V/mm, 4 mm açıklık için $E_{ort} = 100/4 = 25$ V/mm, 6 mm açıklık için $E_{ort} = 100/6 = 16{,}666$ V/mm olarak hesaplanabilir.

Çizelge 4.2 : Elektrot şekli ve açıklıklarına göre alan düzgünlük faktörleri.

Elektrot açıklığı (mm)	Elektrot sistemi	$E_{ort} = U/a$ (V/mm)	$E_{max}(V/mm)$	$\eta(Eort/Emax)$
2	Küre-Küre	50	50,928	0,9817782
4	Küre-Küre	25	26,025	0,96061479
6	Küre-Küre	16,666	17,727	0,94013767
2	Küre-Düzlem	50	51,831	0,96467365
4	Küre-Düzlem	25	27,195	0,91928663
6	Küre-Düzlem	16,666	18,930	0,88039623
2	Düzlem-Düzlem	50	50	1
4	Düzlem-Düzlem	25	25	1
6	Düzlem-Düzlem	16,666	16,667	0,99998

Maksimum elektrik alanlarını bulabilmek için FEMM programından yararlanılmıştır. Bilindiği gibi, bir elektrot sisteminde maksimum alan genellikle elektrotların

birbirlerine en yakın olduğu noktalar arası göz önünde bulundurularak bulunur. Çizelge 4.2'de, elektrot tiplerine göre alan düzgünlük faktörü η, E_{ort}ve E_{max} özetlenmiştir.

4.6 Düzlem-Düzlem Elektrot Sistemi İçin Farklı Açıklıklarda, Farklı Basınçlarda ve Farklı Gerilim Artış Hızları Durumunda Delinme Geriliminin Hesaplanması

Delinme geriliminin analitik olarak hesaplanabilmesi için (4.23) denklemi kullanılmıştır. Bu denklemde elektrotlar arası açıklık yerine $d = \alpha/\eta$ konulmuştur. Fakat düzlem-düzlem elektrot sisteminde Çizelge 4.2'den görülebileceği gibi farklı elektrot açıklıkları için $\eta = 1$'dir, bu yüzden $d = \alpha$ olur. Aynı zamanda düzlem-düzlem elektrot sisteminde gerçek açıklık (a) ve eşdeğer açıklık (α) birbirine eşit olduğu için (4.23) denkleminde elektrotlar arası gerçek açıklığın çarpan olarak kullanılması mümkündür.

(4.23) denkleminin payda kısmında Townsend'in ikinci iyonizasyon katsayısı olan γ görülmektedir. γ'nın değeri $1/50$ ile $1/5000$ arasında değişmektedir. γ, bir pozitif iyonun katot yüzeyinden kopardığı elektron sayısını temsil eder. Delinme gerilimini etkileyen bir diğer parametre olan gerilim artış hızını hesaba katabilmek için γ değerinde değişiklikler yapabiliriz. Sistemimizde üç farklı gerilim artış hızı düşünülmüştür, bunlar, 1 kV/s, 2 kV/s ve 3 kV/s'dir. Normalde diğer parametreleri sabit tutarak gerilim artış hızını değiştirerek bir karşılaştırma yapılırsa bir yalıtkanın delinme gerilimi deneysel olarak gerilim artış hızının artmasıyla artacaktır. Yani $U_{d3_{kV/s}} > U_{d2_{kV/s}} > U_{d1_{kV/s}}$ olur. Eğer γ değeri büyük olursa sistemin katot yüzeyinden kopardığı elektron sayısı büyük olacağından sistemin delinme gerilimi küçük olup, γ değeri küçük olursa katot yüzeyinden koparılacak elektron sayısı az olacağından sistemin delinme gerilimi büyüyecektir. Bu yüzden gerilim artış hızının etkisini hesaba katabilmek için 1 kV/s gerilim artış hızı için γ'nın büyük değeri 1/50, 2 kV/s gerilim artış hızı için γ'yı 1/500 ve 3 kV/s gerilim artış hızı için γ'yı en büyük değeri olan 1/5000 olarak kabul edilmiştir. Bu ilişki en basit olarak şu şekilde düşünülebilir. γ değeri 1/50 iken 50 pozitif iyon 1 elektron koparırsa, 1 elektron koparabilmek için saniyede 50 pozitif iyon oluşmuştur. Dikkat edilecek olursa 3 kV/s gerilim artış hızı durumunda (γ = 1/5000 iken) aynı sürede 5000 pozitif iyon

oluşmuştur. Pozitif iyon oluşması daha hızlı şekilde gerçekleşmiştir. Buradan gerilim artış hızı ile γ arasında bir ilişki düşünülebilir.

Üç farklı elektrot açıklığı 2 mm, 4 mm, 6 mm olmak üzere üç farklı basınç 560 mmHg, 660 mmHg, 760 mmHg değeri göz önünde bulundurularak toplam 27 farklı delinme gerilimi hesaplanmıştır. Örnek olarak bir tanesini hesaplarsak,

Elektrot açıklığı: 0,2 cm,

Hava (gaz) basıncı: 760 mmHg,

Çizelge 4.2'den bakılarak $\eta = 1$,

Gerilim artış hızı 1 kV/s ($\gamma = 1/50$)

A = 14,6 1/cm. mmHg,

B = 300 V/cm. mmHg

(4.23) denkleminde yukarıdaki değerler yerine konursa,

$$U_d = \frac{300.760(0{,}2/1)}{\ln\left[\frac{14{,}6.760(0{,}2/1)}{\ln\left(1+1/\left(\frac{1}{50}\right)\right)}\right]} = 7{,}1971 \text{ kV}$$

olarak hesaplanır. Eğer açıklık 1 cm yapılırsa yaklaşık olarak $U_d \cong 31$ kV bulunur. Bu da denklemin güvenilirliğini sağlamaktadır.

Çizelge 4.3 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için farklı durumlardaki delinme gerilimleri.

				Delinme Gerilimi U_d (kV_{etkin})		
Elektrot açıklığı (cm)	Basınç (mmHg)	Açıklık ve basınç çarpımı ($p.d$) (mmHg.cm)	η	1 kV/s (γ= 1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	1	7,1971	7,7581	8,1973
0,2	660	132	1	6,3925	6,903	7,3039
0,2	560	112	1	5,5717	6,0298	6,3909
0,4	760	304	1	12,9749	13,8795	14,5781
0,4	660	264	1	11,4984	12,3177	12,952
0,4	560	224	1	9,9947	10,7255	11,293
0,6	760	456	1	18,4009	19,6092	20,5362
0,6	660	396	1	16,2888	17,3805	18,2199
0,6	560	336	1	14,1393	15,11039	15,8589

Çizelge 4.3'de düzlem-düzlem elektrot sistemi için $3.3.3 = 27$ farklı delinme gerilimi hesaplanmıştır. Hesaplamalar Excel'de basit bir formül oluşturulup, formül içinde elektrot açıklığını 0,2, 0,4, 0,6 cm, basınç değerini 560, 660 ve 760 mmHg ve γ'değerini de 1/50, 1/500 ve 1/5000 şeklinde değiştirerek 27 farklı durumda delinme gerilimleri kaydedilmiştir.

4.7 Küre-Küre Elektrot Sistemi İçin Farklı Açıklıklarda, Farklı Basınçlarda ve Farklı Gerilim Artış Hızları Durumunda Delinme Geriliminin Hesaplanması

Küre-küre elektrot sistemi için 5 cm çaplı karşılıklı iki küre aralarındaki mesafeler 2, 4 ve 6 mm olacak şekilde düşünülmüş ve sonlu elemanlar analizi ile maksimum elektrik alanları bulunarak Çizelge 4.2'de her bir elektrot açıklığına karşılık gelen alan düzgünlük faktörü (η) hesaplanmıştır. (4.23) denklemi kullanılarak, üç farklı elektrot açıklığı (2 mm, 4 mm, 6 mm), üç farklı gerilim artış hızı (1 kV/s, 2 kV/s, 3 kV/s), üç farklı basınç değeri (760 mmHg, 660 mmHg, 560 mmHg) durumunda 27 farklı delinme gerilimi hesaplanmıştır. Bunun için (4.23) denkleminde elektrot açıklığı yerine α/η oranı konulmuştur. η'yı sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmış olup, bu durumda her bir elektrot açıklığı için eşdeğer açıklık olan α'yı hesaplamak gereklidir. A ve B katsayıları her durum için sabit alınmıştır. Örnek olarak bir durum için hesaplar analitik olarak aşağıda yapılmıştır.

Elektrot açıklığı: 0,2 cm

Hava basıncı: 760 mmHg,

Gerilim artış hızı: 1 kV/s ($\gamma = 1/50$),

A = 14,6 1/cm.mmHg,

B = 300 V/cm.mmHg,

olmak kaydıyla, açıklığın 0,2 cm olduğu durumda, Çizelge 4.2'den $\eta \cong 0{,}98$ olduğu görülür. Şimdi açıklığın 0,2 cm olması durumunda eşdeğer açıklık olan α'nın hesaplanması gerekir. Küre-küre elektrot sistemi için α (4.27) denkleminde olduğu gibidir. (4.27) denkleminde $r = 2{,}5$ cm, $r + a/2 = 2{,}5 + 0{,}2/2 = 2{,}6$ cm, a ise 0,2 cm'dir. Bu yüzden α,

$\alpha = (2{,}5.0{,}2)/(2{,}5 + 0{,}2/2) \cong 0{,}1923$ bulunur.

Bulunan bu değerler (4.23) denkleminde yerine konursa,

$$U_d = \frac{300.760(0{,}1923/0{,}98)}{\ln\left[\frac{14{,}6.760(0{,}1923/0{,}98)}{\ln(1+1/(1/50))}\right]} = 7{,}072 \text{ kV}$$

olarak bulunur. Dikkat edilirse bu değer aynı elektrot açıklığındaki düzlem-düzlem elektrot sistemindeki delinme geriliminden daha düşüktür. Bunun sebebi alan düzgünlük faktörünün 1'den daha az olmasıdır.

Diğer sonuçlar için Excel'de bir program oluşturulmuş ve değerler değiştirilerek 27 durum için delinme gerilimi değerleri kaydedilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.4'teki gibidir.

Çizelge 4.4 : Küre-küre elektrot sistemi için farklı durumlardaki delinme gerilimi.

				Delinme Gerilimi U_d(etkin)		
Elektrot açıklığı (cm)	Basınç (mmHg)	Açıklık ve basınç çarpımı (*p.d*) (mmHg. cm)	η	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,9817	7,072	7,625	8,059
0,2	660	132	0,9817	6,282	6,785	7,181
0,2	560	112	0,9817	5,476	5,928	6,284
0,4	760	304	0,9606	12,572	13,453	14,135
0,4	660	264	0,9606	11,142	11,941	12,56
0,4	560	224	0,9606	9,686	10,399	10,953
0,6	760	456	0,9401	17,598	18,762	19,656
0,6	660	396	0,9401	15,58	16,632	17,442
0,6	560	336	0,9401	13,526	14,462	15,185

4.8 Küre-Düzlem Elektrot Sistemi İçin Farklı Elektrot Açıklıkları, Farklı Basınçlar ve Farklı Gerilim Artış Hızı için Delinme Gerilimleri

Küre-düzlem elektrot sistemi içinde yukarıda küre- küre ve düzlem düzlem için yapılan hesaplamalara benzer hesaplamalar yapılmıştır. 5 cm çapındaki bir küre üstte düzlem elektrot altta olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Örnek olarak bir durum için,

Elektrot açıklığı: 0,2 cm

Hava basıncı: 760 mmHg,

Gerilim artış hızı: 1 kV/s ($\gamma = 1/50$),

A = 14,6 1/cm.mmHg,

B = 300 V/cm.mmHg,

olmak kaydıyla, açıklığın 0,2 cm olduğu durumda Çizelge 4.2'den η'nın 0,96 olduğu görülür. Açıklığın 0,2 cm olduğu durumda eşdeğer açıklık olan α ise, (4.25) denkleminden hesaplanır. Burada $r_1 = 2{,}5$ cm, $r_2 = r_1 + a = 2{,}5 + 0{,}2 = 2{,}7$'dir. Bu durumda eşdeğer açıklık olan $\alpha = (2{,}5/2{,}7).(2{,}7 - 2{,}5) \cong 0{,}1851$ olarak hesaplanır. Bu değerler (4.23) denkleminde yerine konursa,

$$\mathrm{U_d} = \frac{300.760(0{,}1851/0{,}96)}{\ln\left[\frac{14{,}6.760(0{,}1851/0{,}96)}{\ln(1+1/(1/50))}\right]} = 6{,}953\ kV$$

olarak hesaplanır. Dikkat edilirse bu değer küre-küre elektrot sistemindeki aynı açıklıktaki delinme geriliminden daha düşüktür. Çünkü küre-düzlem elektrot şekli için küre-küre elekrot şeklindeki η değerinden daha düşük bir η değeri mevcuttur. Bunu şu şekilde yorumlayabiliriz. Elektrot sistemlerinde eğer bir simetri mevcutsa örneğin karşılıklı iki küre, daha az bir simetri durumu olan küre-düzlem elektrot sistemine göre daha düzgün bir alan dağılımı söz konusudur. Bu sebeple küre-küre elektrot sisteminin delinme gerilimi küre-düzlem elektrot sistemine göre daha büyük olacaktır. Çizelge 4.5'te diğer durumlar için olan delinme gerilimleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : Küre-düzlem elektrot sistemi için farklı durumlardaki delinme gerilimleri.

				Delinme Gerilimi U_d (kV_{etkin})		
Elektrot açıklığı (cm)	Basınç (mmHg)	Açıklık ve basınç çarpımı (*p.d*) (mmHg. cm)	η	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,9646	6,953	7,499	7,926
0,2	660	132	0,9646	6,177	6,673	7,064
0,2	560	112	0,9646	5,384	5,83	6,182
0,4	760	304	0,9192	12,28	13,145	13,813
0,4	660	264	0,9192	10,885	11,668	12,275
0,4	560	224	0,9192	9,463	10,162	10,706
0,6	760	456	0,8803	17,058	18,192	19,064
0,6	660	396	0,8803	15,103	16,129	16,918
0,6	560	336	0,8803	13,114	14,027	14,731

4.9 Bulanık Çıkarım Sistemleri İçin Giriş ve Çıkış Değerlerinin Hesaplanması

Oluşturulan Simulink modelinde toplam 6 farklı bulanık çıkarım sistemi tasarlanmıştır. Bunlardan üç tanesi her bir elektrot sistemi (düzlem-düzlem, küre-düzlem, küre-küre) için delinme geriliminin bulunması; diğer üç tanesi ise her bir elektrot sistemi için elektrot açıklığına bağlı olarak alan düzgünlük faktörünü bulabilmek için tasarlanmıştır. Tasarlanan üç bulanık çıkarım sisteminde, üç farklı elektrot sistemi için giriş değişkenleri basınç ve açıklık çarpımı olan *p.d* değeri ile gerilim artış hızı çıkış değişkeni ise delinme gerilimidir. Diğer üç bulanık çıkarım sisteminde ise giriş değişkeni elektrot açıklığı, çıkış değişkeni ise η'dır.

Fakat Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5'te, analitik olarak elde ettiğimiz basınç çarpı açıklık (pd) değerlerine baktığımız zaman aralarında çok büyük farklar olan ve belirli bir sistematiği olmayan sayılar görünmektedir. Aynı şekilde açıklık ve alan düzgünlük faktörleri arasında da büyük farklar vardır. Örneğin 9 farklı (*pd*) değeri 112 ile 456 arasında değişmekte olup bu 9 farklı değere karşılık gerilim artış hızına bağlı olarak 9 farklı delinme gerilimi karşılık gelmektedir. Fakat 9 adet (*pd*) değerleri arasında büyük farklar vardır ve düzenli olarak artmamaktadır. Bu yüzden (*pd*) değerlerine interpolasyon uygulanarak (*pd*) değeri 112'den 450 mmHg.cm'ye kadar 10'ar 10'ar arttırılarak bilinmeyen değerlere karşılık gelen delinme gerilimleri bulunmuştur. İnterpolasyon hesabı Matlab programında Interp1 fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Interp1 fonksiyonu aşağıdaki biçimde kullanılabilir:

yi = interp1(x,Y,xi)

Bu fonksiyon en basit şeklinde, (x,Y) veri çiftleri bilinen ve bu bilinen veri çiftlerini kullanarak bilinmeyen x ara değerleri olan xi değerlerine karşı gelen yi değerlerini hesaplar. Örnek olarak Çizelge 4.3'te 1 kV/s için dokuz farklı (*pd*) değerine karşılık düşen dokuz farklı delinme gerilimi Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Çizelge 4.6'daki herbir (*pd*) değerine karşı düşen delinme gerilimlerini ele alarak interpolasyon ile farklı (*pd*) değerlerine karşılık düşen delinme gerilimlerini hesaplarsak:

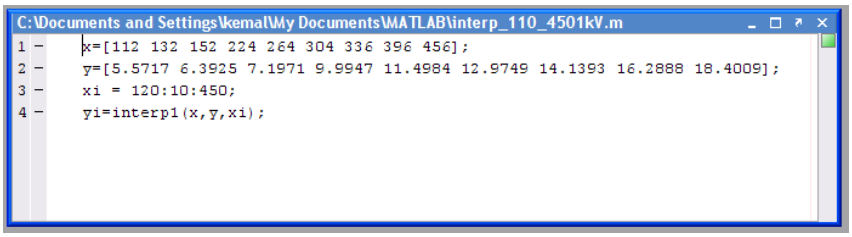
Çizelge 4.6 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 1 kV/s gerilim artış hızında farklı (*pd*) değerleri için karşı düşen delinme gerilimleri.

Gerilim artış hızı 1 kV/s									
(pd) (mmHg.cm)	112	132	152	224	264	304	336	396	456
u_d (kV)	5,5717	6,3925	7,1971	9,9947	11,4984	12,9749	14,1319	16,2888	18,4009

Çizelge 4.7 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için 1 kV/s gerilim artış hızında (*pd*) ve delinme gerilimi arasında yapılan interpolasyon değerleri.

Gerilim Artış Hızı 1 kV/s	
(*pd*) (mmHg.cm)	U_d (kV)
112	5,5717
120	5,9000
130	6,3104
140	6,7143
150	7,1166
160	7,5079
170	7,8965
180	8,2851
190	8,6736
200	9,0622
210	9,4507
220	9,8393
230	10,2203
240	10,5962
250	10,9721
260	11,348
270	11,7199
280	12,089
290	12,4581
300	12,8272
310	13,1932
320	13,5571
330	13,921
340	14,2826
350	14,6409
360	14,9991
370	15,3573
380	15,7156
390	16,0739
400	16,4296
410	16,7816
420	17,1336
430	17,4857
440	17,8377
450	18,1897

(*pd*) değerlerini 10’ar 10’ar arttırarak 112’den 450’ye kadar olan değerlere karşı gelen delinme gerilimlerini bulabilmek için Şekil 4.15’teki program oluşturulmuştur.



Şekil 4.15 : Düzlem-düzlem elektrot sisteminde 1 kV/s gerilim artış hızı için (*pd*) ve delinme gerilimi arasında interpolasyon hesabı yapan m.file.

Sonuç olarak kaydedilen değerler Çizelge 4.7'deki gibidir. Çizelge 4.8'de düzlem-düzlem elektrot sistemi için üç farklı gerilim artış hızlarına göre (*pd*) değerlerine karşılık gelen delinme gerilimlerini göstermektedir. Değerler yukarıdaki interpolasyon hesabına göre yapılmıştır.

Çizelge 4.8 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için farklı yükselme hızlarında interpolasyon hesabı ile bulunmuş delinme gerilimi değerleri.

(*pd*) (mmHg.cm)	Delinme gerilimi U_d (kV)		
	1 kV/s	2 kV/s	3 kV/s
112	5,5717	6,0298	6,3909
120	5,9000	6,3791	6,7561
130	6,3104	6,8157	7,2126
140	6,7143	7,245	7,6613
150	7,1166	7,6726	8,108
160	7,5079	8,0878	8,5413
170	7,8965	8,5	8,9712
180	8,2851	8,9121	9,4012
190	8,6736	9,3242	9,8311
200	9,0622	9,7364	10,2611
210	9,4507	10,1485	10,6911
220	9,8393	10,5606	11,121
230	10,2203	10,9643	11,5419
240	10,5962	11,3624	11,9566
250	10,9721	11,7604	12,3714
260	11,348	12,1585	12,7861
270	11,7199	12,552	13,1959
280	12,089	12,9424	13,6024
290	12,4581	13,3329	14,009
300	12,8272	13,7233	14,4155
310	13,1932	14,1103	14,8182
320	13,5571	14,4949	15,2185
330	13,921	14,8795	15,6188
340	14,2826	15,2616	16,0163
350	14,6409	15,64	16,4098
360	14,9991	16,0184	16,8033
370	15,3573	16,3967	17,1968
380	15,7156	16,7751	17,5903
390	16,0739	17,1535	17,9838
400	16,4296	17,5291	18,3743
410	16,7816	17,9005	18,7604
420	17,1336	18,272	19,1464
430	17,4857	18,6434	19,5325
440	17,8377	19,0149	19,9185
450	18,1897	19,3863	20,3026

Çizelge 4.8'deki değerler gözönüne alınırsa basınç ve elektrotlar arası uzaklık çarpım değeri arttıkça ve gerilim artış hızına bağlı olarak interpolasyon ile elde edilen delinme gerilimi değerleri arasında bir uygunluk ve sistematik söz konusudur.

Çizelge 4.9'da küre-küre elektrot sistemi için interpolasyon değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : Küre-küre elektrot sistemi için interpolasyon hesabı yapılmış değerler.

(*pd*) (mmHg.cm)	Delinme gerilimi (kV)		
	1 kV/s	2 kV/s	3 kV/s
112	5,476	5,928	6,284
120	5,7984	6,2708	6,6428
130	6,2014	6,6993	7,0913
140	6,598	7,121	7,5322
150	6,993	7,541	7,9712
160	7,3624	7,9332	8,3806
170	7,7255	8,3185	8,7825
180	8,0886	8,7038	9,1844
190	8,4516	9,0891	9,5864
200	8,8147	9,4743	9,9883
210	9,1777	9,8596	10,3903
220	9,5408	10,2449	10,7922
230	9,9044	10,6303	11,194
240	10,2684	11,0158	11,5958
250	10,6324	11,4013	11,9976
260	10,9964	11,7868	12,3993
270	11,3565	12,1678	12,7963
280	11,714	12,5458	13,19
290	12,0715	12,9238	13,5838
300	12,429	13,3018	13,9775
310	12,7509	13,6422	14,3319
320	13,049	13,9575	14,66
330	13,3471	14,2728	14,9881
340	13,6629	14,6067	15,3355
350	14,0053	14,9683	15,7116
360	14,3476	15,33	16,0878
370	14,6899	15,6917	16,464
380	15,0323	16,0533	16,84
390	15,3746	16,415	17,2163
400	15,7145	16,774	17,5896
410	16,0509	17,129	17,9586
420	16,3872	17,484	18,3276
430	16,7235	17,839	18,6966
440	17,0599	18,194	19,0656
450	17,3962	18,549	19,4346

Çizelge 4.10'da ise küre-düzlem elektrot sistemi için yapılmış olan interpolasyon hesabına göre değerler verilmektedir.

Çizelge 4.10 : Küre-düzlem elektrot sistemi için interpolasyon değerleri.

(*pd*)	1 kV/s	2 kV/s	3 kV/s
112	5,384	5,83	6,182
120	5,7012	6,1672	6,5348
130	6,0977	6,5887	6,9758

Çizelge 4.10’un devamı :

140	6,4874	7,0034	7,4080
150	6,8754	7,4164	7,8398
160	7,2319	7,7949	8,2349
170	7,5805	8,1647	8,621
180	7,9291	8,5346	9,0071
190	8,2777	8,9045	9,3932
200	8,6263	9,2743	9,7793
210	8,9749	9,6442	10,1654
220	9,3236	10,0141	10,5516
230	9,6763	10,3879	10,9414
240	10,0318	10,7644	11,3336
250	10,3873	11,1409	11,7258
260	10,7428	11,5174	12,1181
270	11,0942	11,8896	12,5057
280	11,443	12,2588	12,8902
290	11,7918	12,6281	13,2747
300	12,1405	12,9973	13,6592
310	12,4364	13,3104	13,9851
320	12,697	13,586	14,272
330	12,9576	13,8616	14,5589
340	13,2466	14,1671	14,8768
350	13,5781	14,5175	15,2413
360	13,9096	14,8678	15,6058
370	14,2411	15,2181	15,9703
380	14,5726	15,5685	16,3348
390	14,9041	15,9188	16,6993
400	15,2333	16,2665	17,0611
410	15,5592	16,6104	17,4187
420	15,885	16,9542	17,7764
430	16,2108	17,298	18,1341
440	16,5367	17,6419	18,4917
450	16,8625	17,9857	18,8494

Alan düzgünlük faktörünün elektrot açıklığı ve elektrot sistemine bağlı olduğunu söylemiştik. Çizelge 4.2’de verilen η değerleri FEMM programı yardımıyla bulunmuştu. Bulunan bu değerler üç farklı elektrot açıklığı olan 2 mm, 4 mm ve 6 mm için yapılmıştı. Elektrot açıklığı 3 ve 5 mm olduğu durumda η değerleri ise 1 boyutlu interpolasyon hesabı ile bulunup Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

İnterpolasyon hesabı daha önce uygulandığı gibi Matlab programı yardımıyla yapılmıştır. İnterpolasyon değerlerine dikkat edilirse değerler birbiriyle uyumludur.

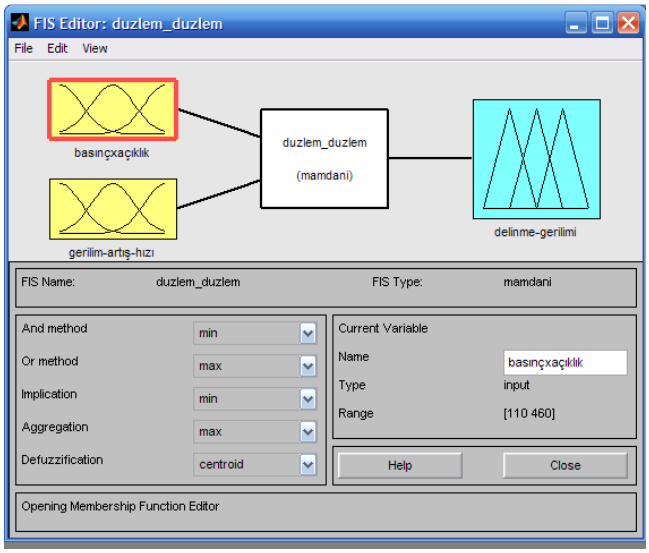
Çizelge 4.11 : Elektrot açıklığına bağlı olarak alan düzgünlük faktörü değerlerinin interpolasyon değerleri.

	Elektrot sistemi düzgünlük faktörü		
Elektrot açıklığı (mm)	Küre-Küre	Küre-Düzlem	Düzlem-Düzlem
2	0,9817	0,9646	1
3	0,9711	0,9419	1
4	0,9606	0,9192	1
5	0,9504	0,8998	1
6	0,9401	0,8803	1

4.10 Bulanık Çıkarım Sistemleri

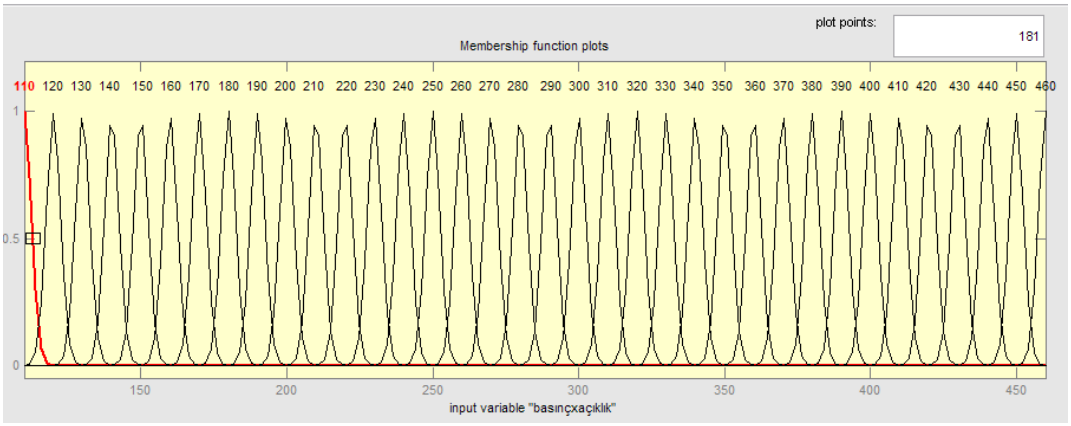
Model için altı farklı bulanık çıkarım sistemi tasarlanmıştır. Bunlardan üç tanesi, üç farklı elektrot sistemi için delinme geriliminin bulunması, diğer üç tanesi ise üç farklı elektrot sisteminin alan düzgünlük faktörünü bulabilmek için tasarlanmıştır. Delinme geriliminin tespitini yapabilmek için tasarlanan bulanık çıkarım sistemlerinde giriş değişkeni olarak basınç ve elektrot açıklığının çarpımı ile gerilim artış hızıdır. Alan düzgünlük faktörünün tespiti için tasarlanan bulanık çıkarım sistemlerinde ise giriş değişkeni elektrot açıklığı çıkış değişkeni ise alan düzgünlük faktörü olan η'dır. Tasarlanan bütün bulanık çıkarım sistemlerinde Min-Max çıkarım, Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi ve durulama birimi olarak ise ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır.

4.10.1 Düzlem-düzlem elektrot sistemi delinme gerilimi için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi



Şekil 4.16 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için giriş ve çıkış değişkenleri.

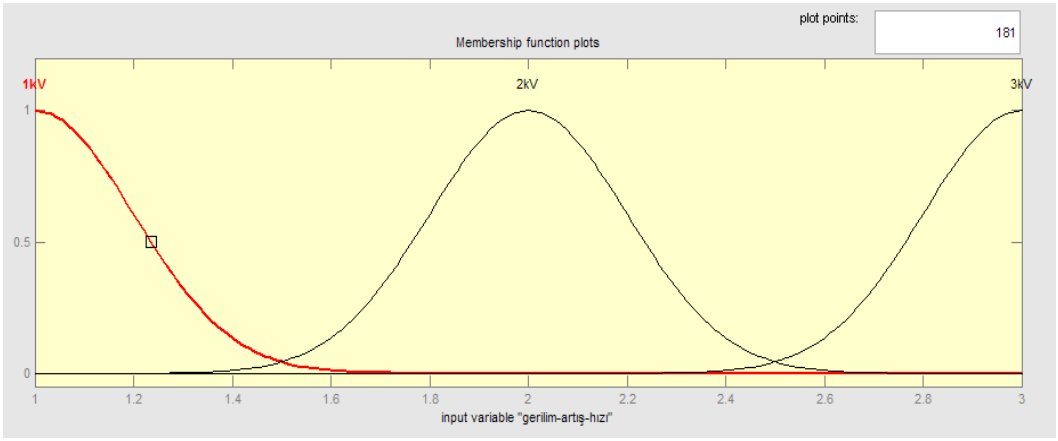
Şekil 4.16’da düzlem-düzlem elektrot sistemi için iki farklı giriş değeri olan basınç x açıklık (açıklık ve basınç çarpımı) ve gerilim-artış-hızı (gerilim artış hızı), bir adet de çıkış değişkeni olan delinme-gerilimi (delinme gerilimi) görünmektedir. Basınç x açıklık değeri 112 mmHg.cm ile 456 mmHg.cm aralığında olduğundan 110 ve 460 mmHg.cm aralığında üyelik fonksiyonları almaktadır. Gerilim artış hızı 1 kV/s - 3 kV/s aralığında olduğu için 1 ve 3 aralığında, delinme gerilimi ise interpolasyon hesapları göz önünde bulundurularak Çizelge 4.8’de en düşük delinme gerilimi 5,5717 ile 20,3026 arasında değiştiğinden 5,5 ve 20,5 aralığında değerler almaktadır.



Şekil 4.17 : Basınç ve açıklık çarpımı için üyelik fonksiyonları.

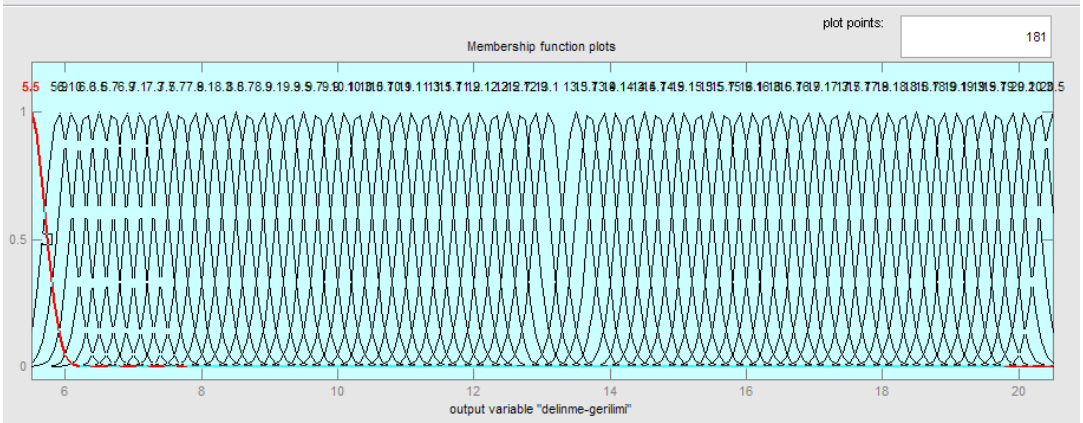
Şekil 4.17’de görüldüğü gibi 110 ve 450 mmHg.cm aralığında 36 adet gauss (çan eğrisi) fonksiyonu şeklinde üyelik fonksiyonları eklenmiştir. Üyelik fonksiyonlarının üstünde yazan değerler gauss fonksiyonunun ortalama değeri olan μ olup 110’dan başlayarak sağa doğru her bir üyelik fonksiyonu için 10’ar 10’ar arttırılmıştır. Bütün üyelik fonksiyonlarının yayılımı olan σ^2 değerleri hepsinde aynı olup 2,5 seçilmiştir.

Şekil 4.18’de gerilim artış hızı için üyelik fonksiyonları görülmektedir.



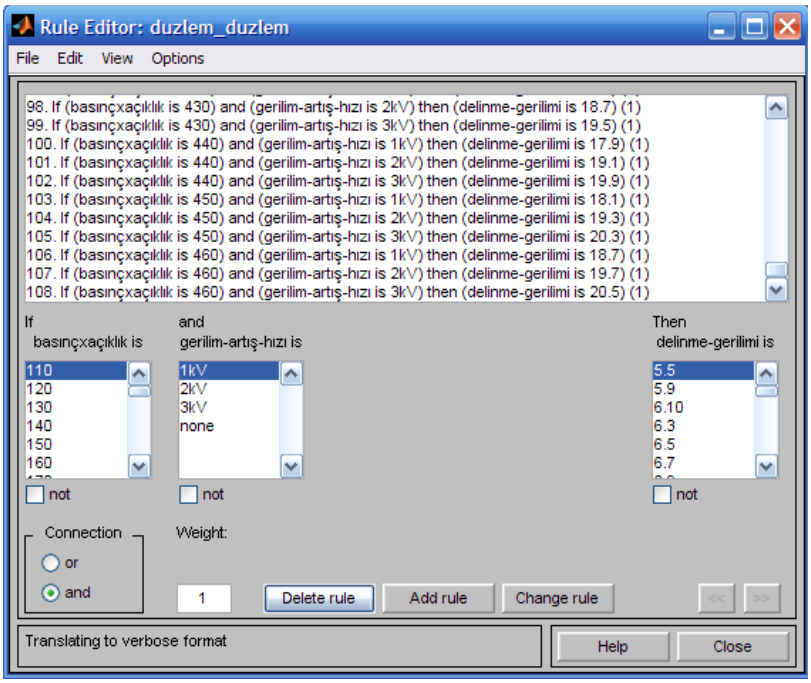
Şekil 4.18 : Gerilim artış hızı için üyelik fonksiyonları.

Şekil 4.18'de gerilim artış hızı giriş değişkeni için 1 ve 3 aralığında 3 adet üyelik fonksiyonu eklenmiş, üyelik fonksiyonlarının ortalama değerleri olarak 1, 2 ve 3 seçilmiş olup, yayılım değeri için hepsinde 0,2 seçilmiştir.



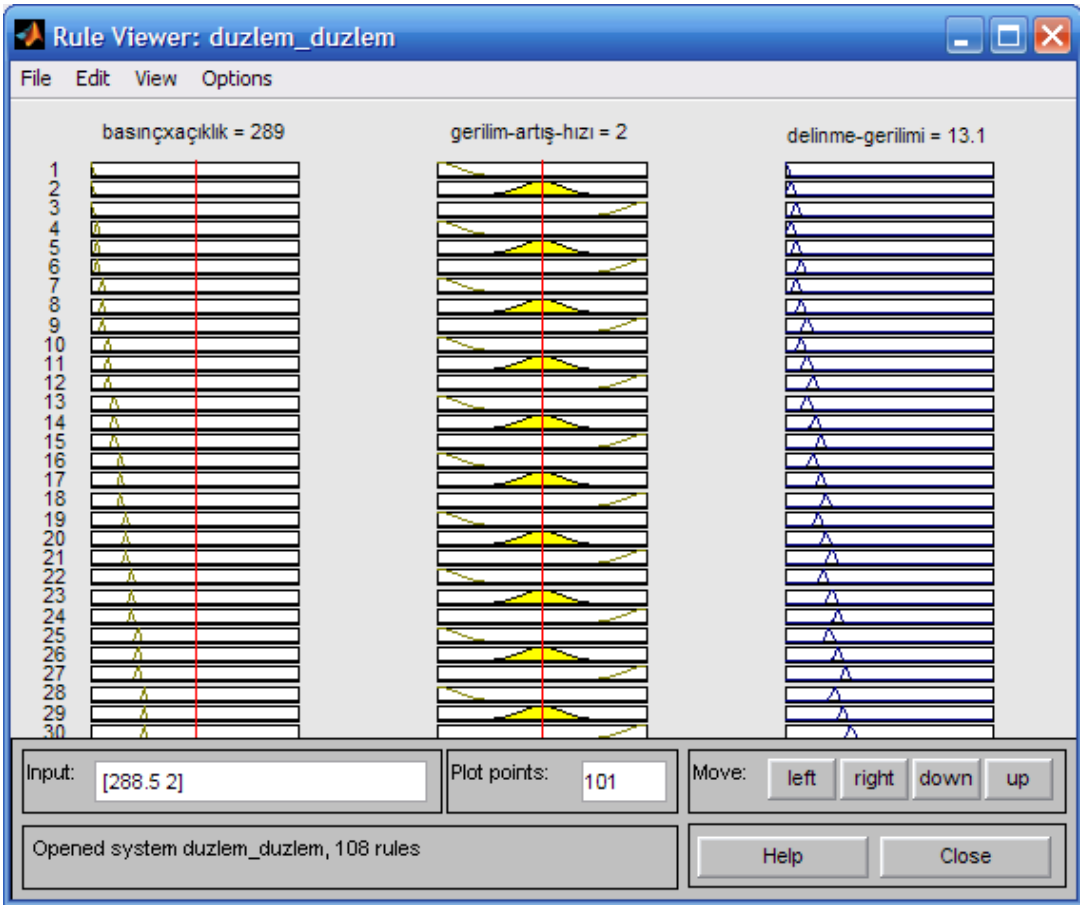
Şekil 4.19 : Delinme gerilimi için üyelik fonksiyonları.

Şekil 4.19'da delinme gerilimi için üyelik fonksiyonları görülmektedir. 5,5 ile 20,5 aralığında ortalama değeri 5,5 ten başlayarak, Çizelge 4.8'de bulunan interpolasyon hesaplamaları göz önünde bulundurularak 20,5'e kadar yayılım değeri 0,2 olacak şekilde gauss üyelik fonksiyonları ile doldurulmuştur. Örnek olarak eğer basınç ve açıklık çarpımı 450, gerilim artış hızı 3 kV/s ise Çizelge 4.8'de bu değere karşılık gelen değer 20,3026'yı gösterdiğinden 20,3 isimli delinme gerilimi üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Diğer kurallarda buna benzer şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 4.20 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için kural tablosu.

Şekil 4.20’de düzlem-düzlem elektrot sistemi delinme geriliminin tahmini için kural tablosu görünmektedir. Kuralların her birinin ağırlığı eşit olarak alınmış ve bağlama şekli olarak Ve yöntemi kullanılmıştır. Toplam 108 adet kural yazılmış ve kurallar Çizelge 4.8 göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır.



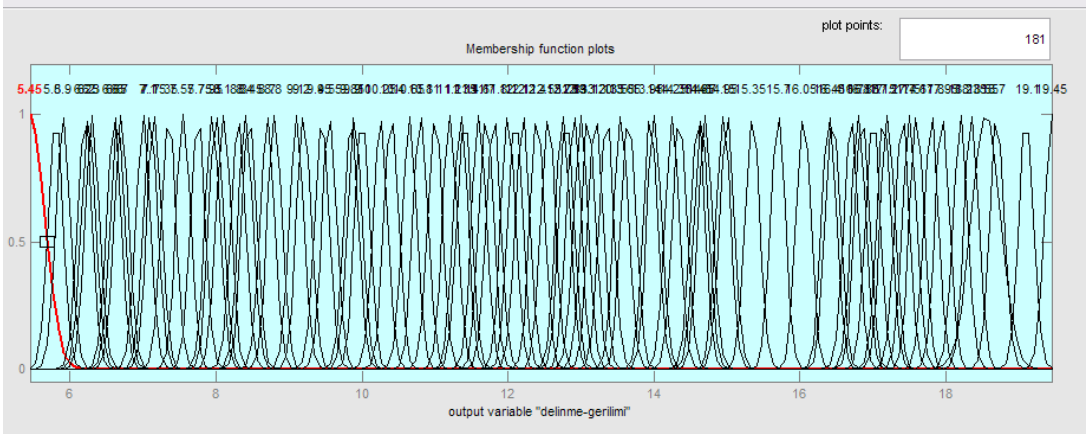
Şekil 4.21 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için sonuç gösterici.

Şekil 4.21’de giriş değişkenleri üzerinde bulunan kırmızı çizgiyi sağa veya sola sürükleyerek çıkış değişkeninin ne değer aldığı görülebilir. Örneğin yukarıda basınç x açıklık 289 mmHg.cm, gerilim artış hızı 2 kV/s iken delinme gerilimi 13,1 kV’tur.

4.10.2 Küre-küre elektrot sistemi delinme gerilimi için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi

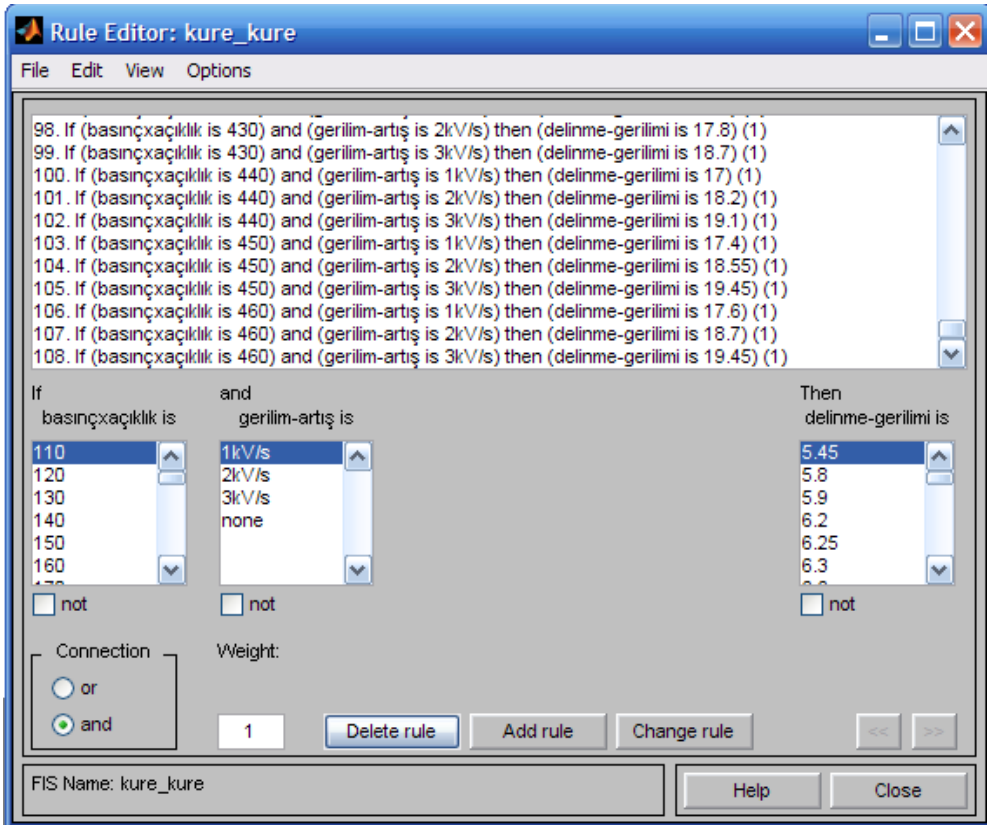
Küre-küre elektrot sistemi için de giriş değişkenleri, açıklık ve basınç çarpımı ile gerilim artış hızı olup, çıkış değişkeni delinme gerilimidir. Tasarlanan bulanık çıkarım sisteminde giriş değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları düzlem-düzlem elektrot sistemi ile aynı olup, sadece çıkış değişkeni olan delinme gerilimi üyelik fonksyionları Çizelge 4.9 göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.Çizelge 4.9’da

en küçük delinme gerilimi 5,476 kV olup en büyük delinme gerilimi 19,4346 kV olduğu için bulanık çıkarım sisteminde çıkış değişkeni üyelik fonksiyonlarının aralık değeri 5,45 ile 19,45 olarak düzenlenmiştir.



Şekil 4.22 : Küre-küre elektrot sistemi için delinme gerilimi üyelik fonksiyonları.

Şekil 4.22'deki üyelik fonksiyonlarının ortalama değerleri 5,45'ten başlayarak Çizelge 4.9'daki değerlerde göz önünde bulundurularak belirli bir artırım yapılıp 19,45'e kadar doldurulmuştur. Her bir üyelik fonksiyonunun yayılımı 0,2'dir.

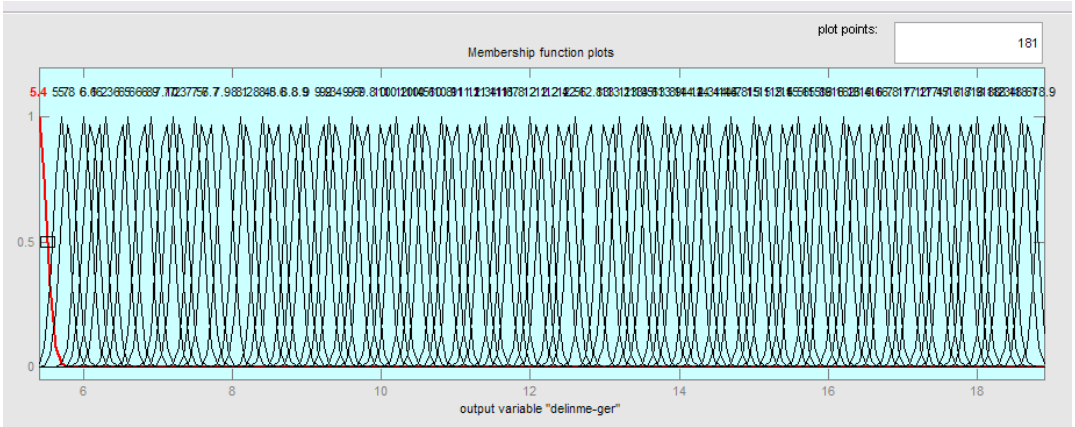


Şekil 4.23 : Küre-küre elektrot sistemi için kural tablosu.

Küre-küre elektrot sistemi için 108 adet kural oluşturulmuştur.

4.10.3 Küre-düzlem elektrot sistemi delinme gerilimi için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi

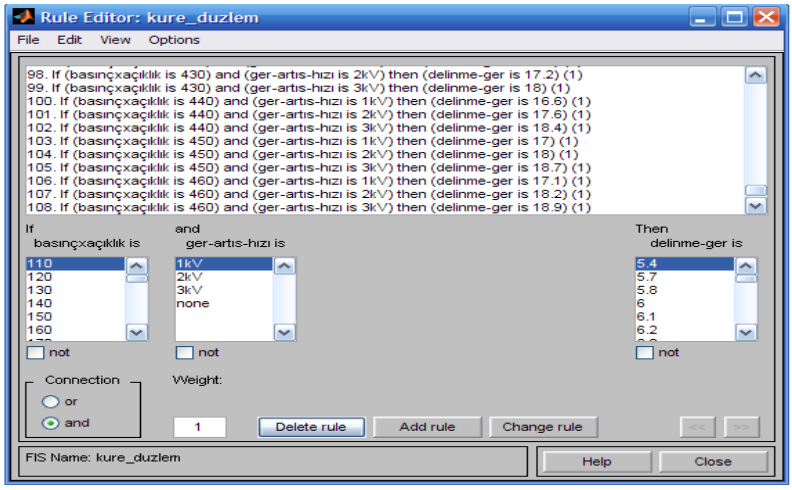
Küre-düzlem elektrot sistemi içinde diğer elektrot sistemlerindeki giriş değişkenleri aynı olup, üyelik fonksiyonlarında ve aralıkta herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Sadece çıkış değişkeni olan delinme gerilimi için üyelik fonksiyonlarının aralık değeri, Çizelge 4.10'da en küçük delinme gerilimi 5,384 en büyük delinme gerilimi ise 18,8494 olduğu için 5,4 ile 18,9 olacak şekilde değiştirilmiştir.



Şekil 4.24 : Küre-düzlem elektrot sistemi için delinme gerilimi üyelik fonksiyonları.

Küre-düzlem elektrot sistemi delinme gerilimi çıkış değişkeninin üyelik fonksiyonları diğer elektrot sistemlerine göre daha sık olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çizelge 4.10'daki değerler birbirlerine bazen çok yakın oldukları için giriş değişkenlerinin etkileri çok iyi görülmeyebilir, bu yüzden daha sık bir şekilde üyelik fonksiyonu oluşturmak buna bir çözüm olarak düşünülebilir.

Şekil 4.25'te küre-düzlem elektrot sistemi için yapılmış kural tablosu görünmektedir.

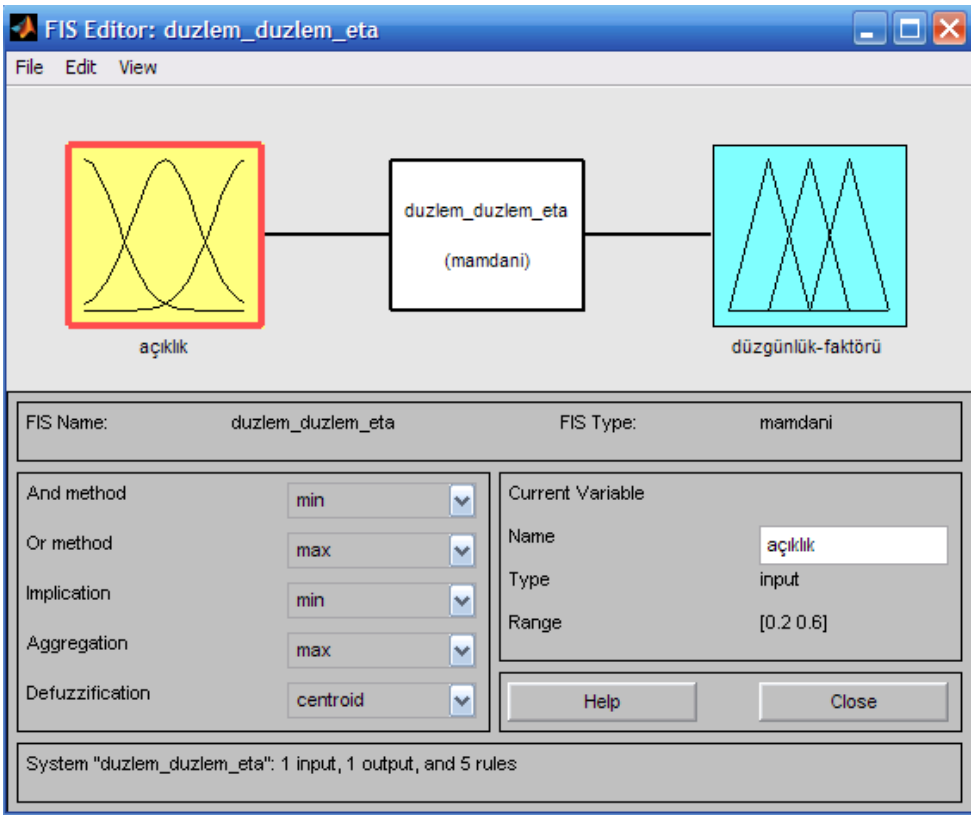


Şekil 4.25 : Küre-düzlem elektrot sistemi bulanık çıkarım sistemi için kural tablosu.

Buraya kadar yapılan bulanık çıkarım sistemlerine göre açıklık ve basınç çarpımı ile gerilim artış hızını değiştirmek kaydıyla her bir elektrot sistemi için delinme geriliminin ne olduğu üzerinde durulmuştur. Diğer üç bulanık çıkarım sistemi ise her bir elektrot sistemi için ayrı ayrı tasarlanıp giriş değişkeni olarak elektrot açıklığı çıkış değişkeni olarak alan düzgünlük faktörü η'dır.

4.10.4 Düzlem-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi

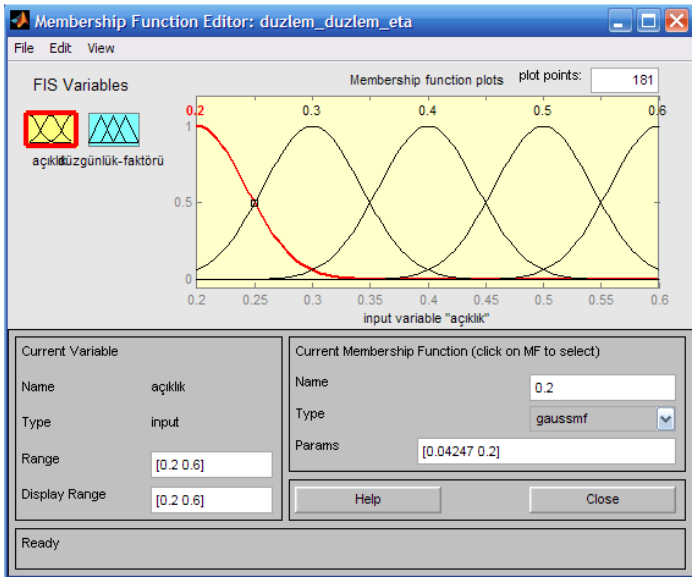
Düzgünlük faktörü η'nın elektrot şekli ve açıklığa bağlı olduğunu söylemiştik. Elektrot şekillerini ve açıklıkları FEMM programına çizip ayrı ayrı her bir elektrot sistemi için elektrot açıklıklarına göre düzgünlük faktörü η'yı bulup elektrot değerlerinin ara değerleri interpolasyon hesabı ile bulunup Çizelge 4.11'de verilmişti. Buna göre açıklığa bağlı olarak üç ayrı elektrot sistemi için alan düzgünlük faktörünü bulabilmek için üç ayrı bulanık çıkarım sistemi tasarlanmıştır. Bunlardan düzlem-düzlem elektrot sistemi için giriş değişeni açıklık çıkış değişkeni düzgünlük faktörü olarak, Şekil 4.26'da görüldüğü gibi bir bulanık çıkarım sistemi tanımlanmıştır.



Şekil 4.26 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi.

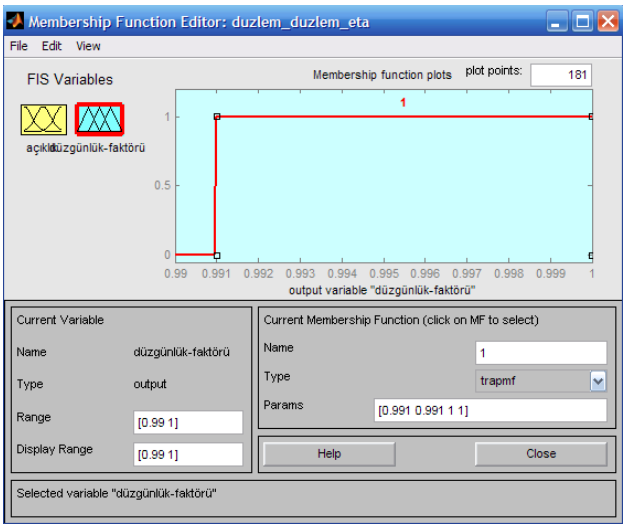
Burada açıklık için aralık 0,2 cm ile 0,6 cm arasında değişip, düzgünlük faktörü içinde 0,99 ile 1 arasında değişmektedir.

Giriş değişkeni açıklık için 5 adet gauss tipi üyelik fonksiyonu seçilmiş olup ortalama değerleri 0,2'den 0,6 ya kadar 1'er artırılarak 0,2 ve 0,6 aralığına yerleştirilmiştir. Bütün üyelik fonksiyonları için yayılma değeri 0,04247 olarak düşünülmüştür. Şekil 4.27'de görülmektedir.

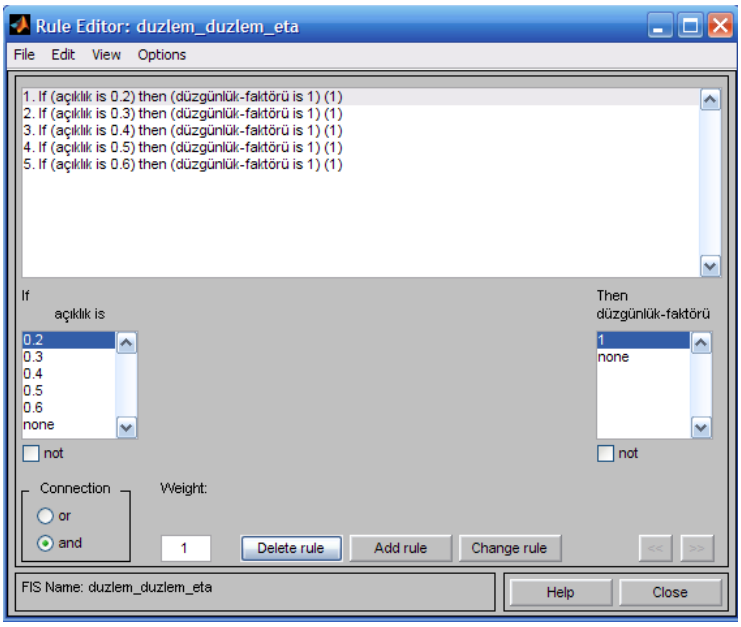


Şekil 4.27 : Açıklık değişkeni için üyelik fonksiyonları.

Çıkış değişkeni alan düzgünlük faktörü için de trapezoidal üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 4.28'de görülmektedir. Burada trapezoidal üyelik fonksiyonunun kullanılmasının sebebi düzgünlük faktörünün neredeyse bütün açıklık değerleri için 1 olmasıdır.

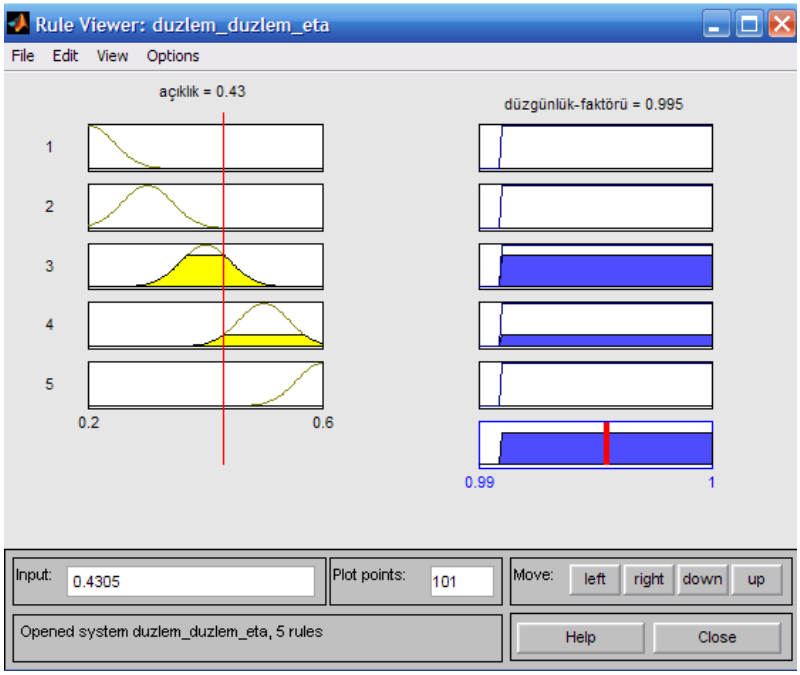


Şekil 4.28 : Düzgünlük faktörü çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonu.



Şekil 4.29 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü bulanık çıkarım sistemi için kural tablosu.

Şekil 4.29'da görüldüğü gibi toplam 5 adet kural yazılmıştır. Açıklık değişkeninin her bir üyelik fonksiyonuna göre çıkış değişkeni olan düzgünlük faktörü değeri belirtilmiştir. Burada düzgünlük faktörü her durumda 1'dir ve bu yüzden 1 isimli üyelik fonksiyonu seçilmiştir.



Şekil 4.30 : Kural görüntüleyici.

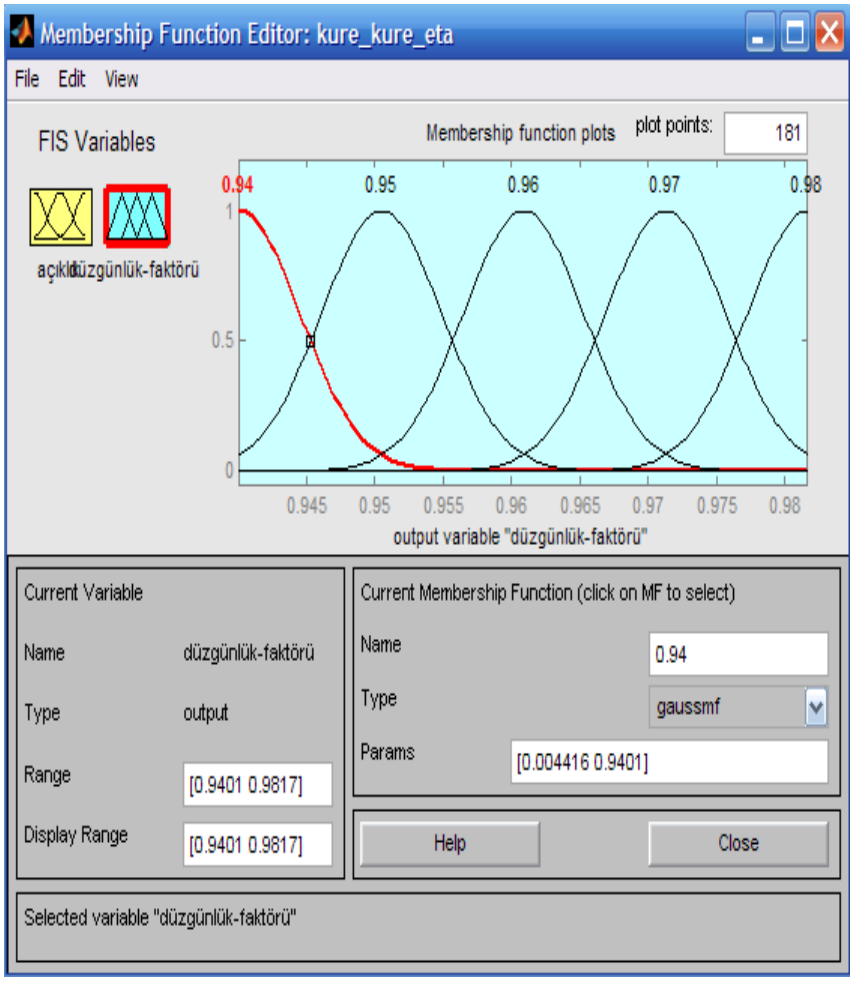
Şekil 4.30'da giriş değişkeni üzerinde bulunan kırmızı çizgi sağa ve sola kaydırılarak çıkış değişkeninin değişimi görülmektedir.

4.10.5 Küre-küre elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi

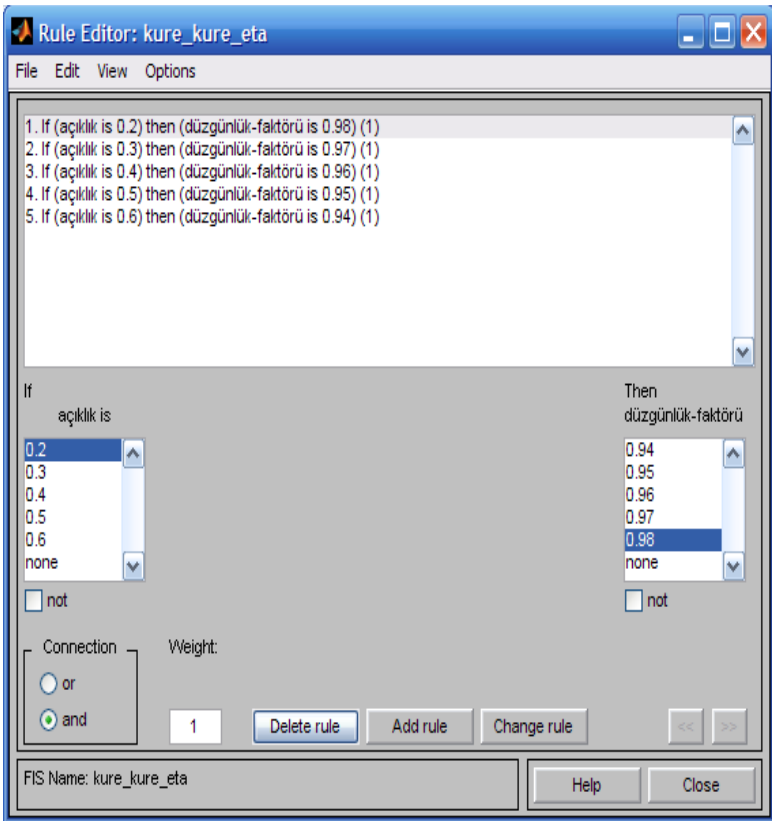
Küre-küre elektrot sisteminde ise giriş ve çıkış değişkenleri düzlem-düzlem elektrot sistemindeki gibidir. Fakat küre-küre elektrot sisteminin çıkış değişkeninin üyelik fonksiyonları Çizelge 4.11'e göre düzenlenmelidir. Çizelge 4.11'de düzgünlük faktörü elektrot açıklığına bağlı olarak 0,9401'den 0,9817'ye değişmektedir. Bu sebeple 5 farklı elektrot açıklığına karşılık gelen 5 farklı üyelik fonksiyonu düzgünlük faktörü içine atanmıştır. Bunlar Şekil 4.31'de görülmektedir.

Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları atandıktan sonra kurallar oluşturulmuştur. Kurallar Çizelge 4.11 göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Örneğin açıklık 0,2 cm ise Çizelge 4.11'e göre 0,9817 değeri olduğu için oluşturulan kural:

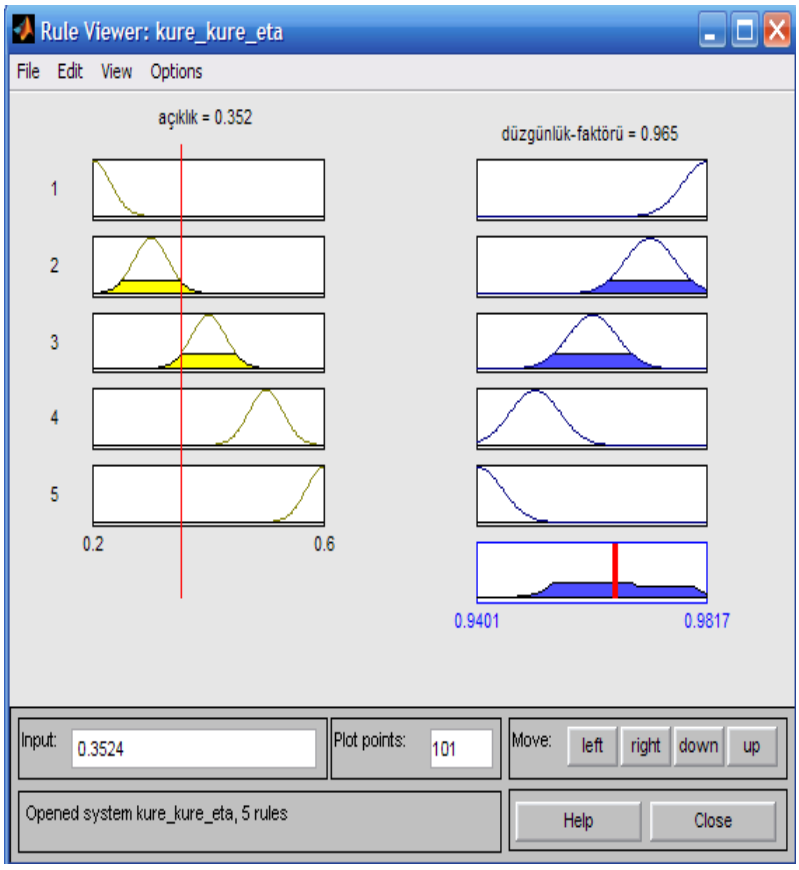
Eğer Açıklık 0,2 Öyleyse Düzgünlük faktörü 0,98 olacak şekildedir. Şekil 4.32'de detaylı olarak görünmektedir.



Şekil 4.31 : Küre-küre elektrot sistemi düzgünlük faktörü değişkeni için üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.32 : Küre-küre elektrot sistemi düzgünlük faktörü için kural tablosu.

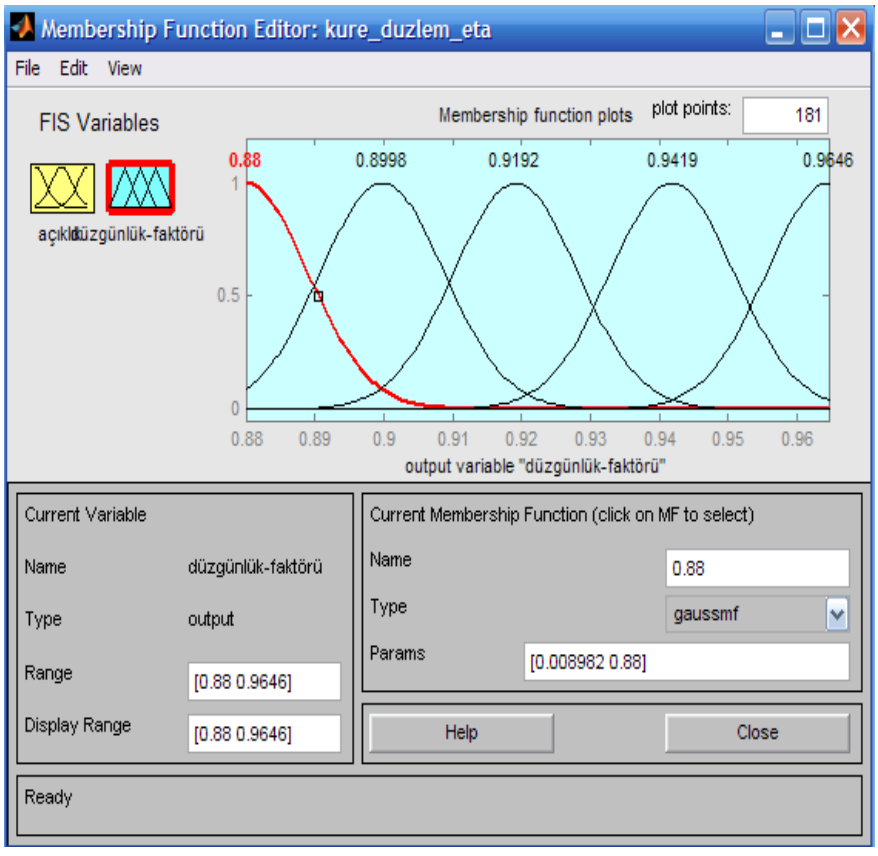


Şekil 4.33 : Küre-küre elektrot sistemi kural gösterici.

Şekil 4.33'teki gibi giriş değişkeni sağa sola kaydırılarak çıkış değişkenin aldığı değer görülmektedir.

4.10.6 Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için tasarlanan bulanık çıkarım sistemi

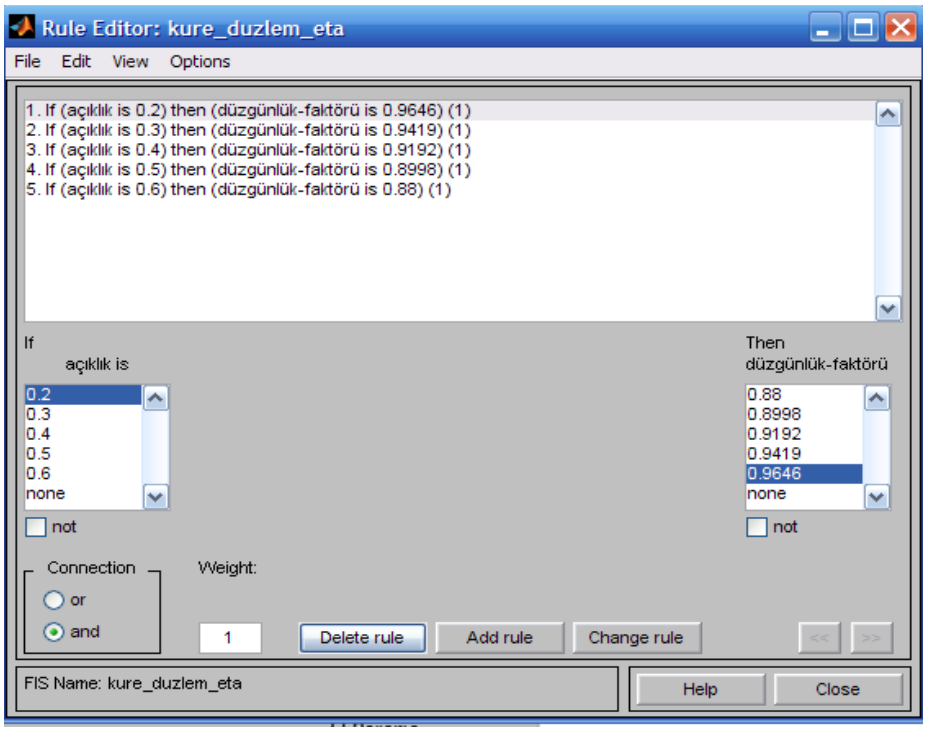
Küre-düzlem elektrot sistemi için diğer elektrot sistemlerinde olduğu gibi açıklık olarak giriş değişkeni düzgünlük faktörü de çıkış değişkeni olacak şekilde bir tasarım yapılmıştır. Açıklık değişkeninin aldığı üyelik fonksiyonu değerleri diğer iki elektrot sistemindekinin aynıdır. Fakat düzgünlük faktörü değişkeni için üyelik fonksiyonları değiştirilmiştir. Çizelge 4.11'deki değerler göz önüne alınarak düzenleme yapılmıştır. Daha sonra kurallar oluşturulmuştur. Şekil 4.34'de düzgünlük faktörü çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonları görülmektedir.



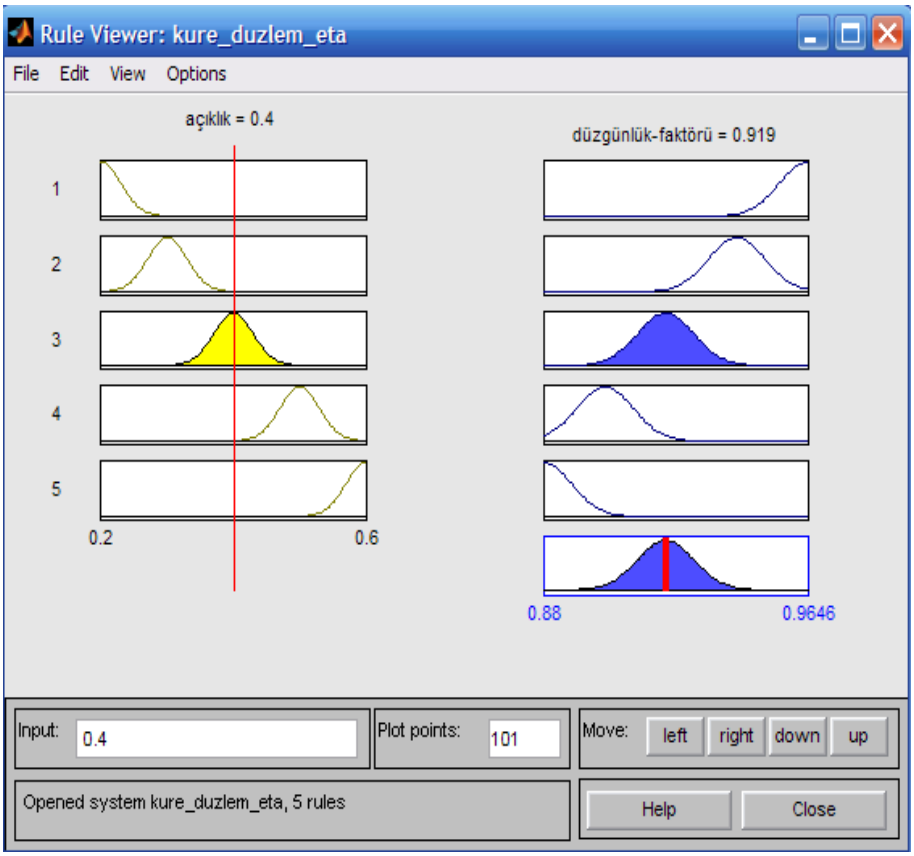
Şekil 4.34 : Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü değişkeni için üyelik fonksiyonları.

Çıkış değişkeni olan düzgünlük faktörü için 5 adet gauss tipinde üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Tepe değerleri sırasıyla 0.88, 0.8998, 0.9192, 0.9419 ve 0.9646'dır.

Şekil 4.35'te küre-düzlem elektrot sistemi için kurallar oluşturulmuştur. Kurallar aşağıda kural düzenleyicide görünmektedir.



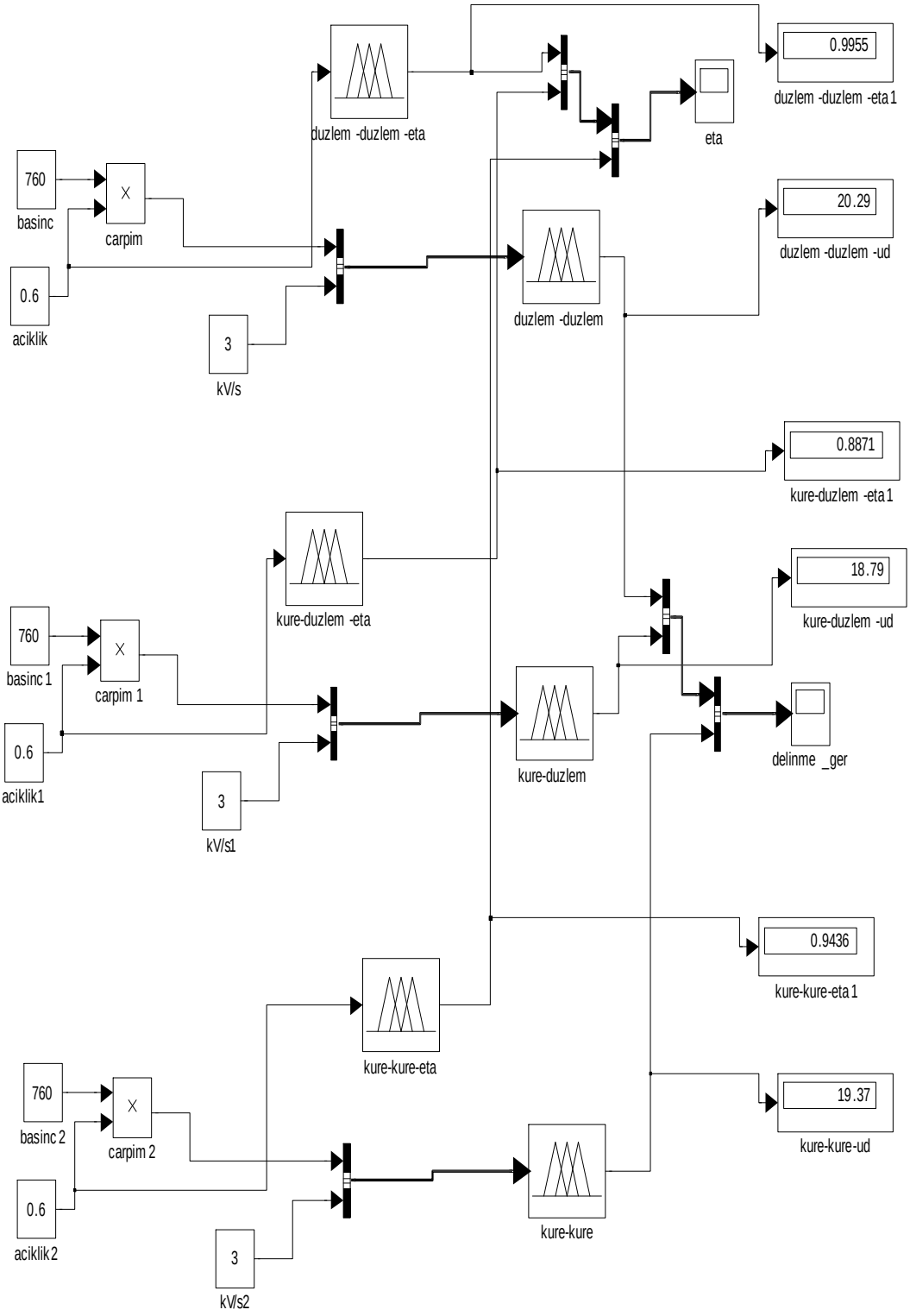
Şekil 4.35 : Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü için kural tablosu.



Şekil 4.36 : Küre-düzlem elektrot sistemi düzgünlük faktörü kural görüntüleyici.

Kural tablosu Şekil 4.35'teki gibidir. Şekil 4.36'dan da görüldüğü gibi giriş değişkenin kaydırılmasıyla düzgünlük faktörü değeri değişmektedir.

4.11 Farklı Elektrot Sistemleri, Farklı Elektrot Açıklıkları, Farklı Basınç Değerleri ve Farklı Gerilim Artış Hızları için Delinme Gerilimini Gösteren Simulink Modeli



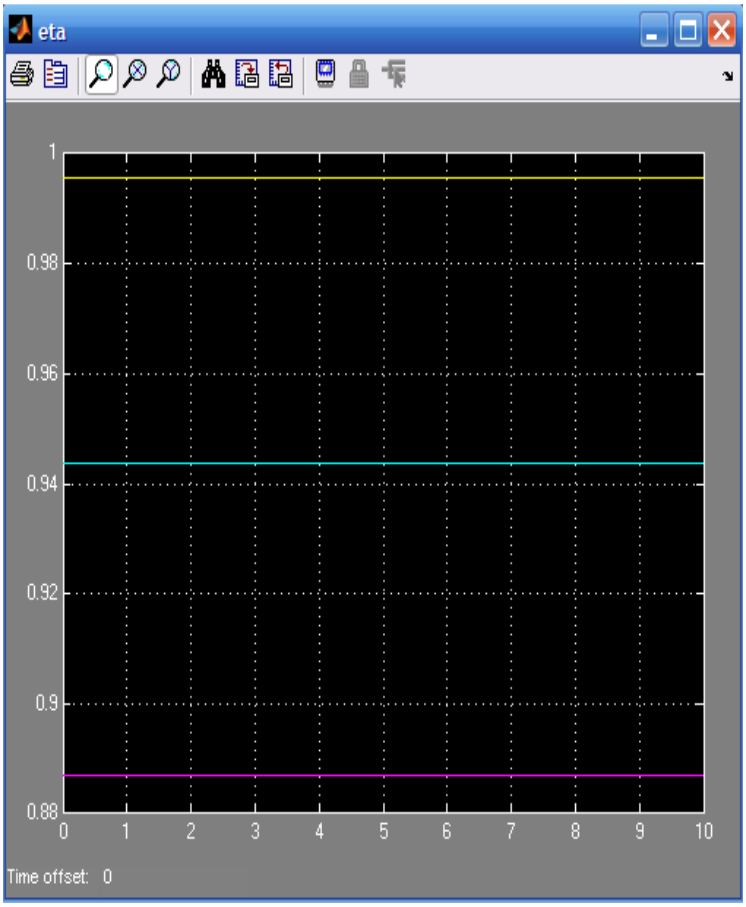
Şekil 4.37 : Farklı elektrot sistemleri delinme gerilimi karşılaştırması yapan simulink modeli.

Daha önce tasarlanan altı farklı bulanık çıkarım sisteminin her biri farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Her biri tek tek çalıştırılarak kullanıcı tarafından giriş değişkenlerine bağlı olarak çıkış değerlerini göstermektedir. Bu sebeple kullanıcı sadece bir model üzerinden, her bir elektrot sistemine ait elektrot açıklık değerini cm olarak, basınç değerini mmHg olarak, gerilim artış hızını ise kV/s olarak girerek her bir elektrot sistemine ait alan düzgünlük faktörü olan η ve delinme geriliminin kV olarak ifadesini görebileceği bir model düşünülmüştür. Bu sayede kullanıcı üç elektrot sistemi olan düzlem-düzlem, küre-düzlem, küre-küre için aynı elektrot açıklık değeri, aynı basınç değeri, aynı gerilim artış hızı değeri için delinme geriliminin karşılaştırmasını yapabilecektir. Bu amaçla daha önce tasarlanan bulanık çıkarım sistemleri bir Simulink modeline maskelenmiştir ve bir takım girişler verilerek maskelere çıkışların etkisi hem grafiksel hem de sayısal değer olarak görülmüştür. Oluşturulan Simulink modeli Şekil 4.37'deki gibidir.

Şekil 4.37'de oluşturulan model görülmektedir. Burada kullanıcı tarafından yukarıdan aşağıya doğru düzlem-düzlem, küre-düzlem, küre-küre elektrot sistemi için kullanıcı giriş değeri olarak elektrot açıklığı, basınç ve gerilim artış hızını girerek çıkış değeri olarak her bir elektrot sistemine ait olan delinme geriliminin kV cinsinden ifadesi ile alan düzgünlük faktörü değerini görebilmektedir. Fakat, bir takım kısıtlamalar mevcuttur. Daha önce tasarlanan bulanık çıkarım sistemlerinden her bir elektrot sistemine ait alan düzgünlük faktörünü gösteren programlarda açıklık 2 mm ile 6 mm arasında değiştiğinden kullanıcı açıklık değerlerine 0,2 cm ile 0,6 cm aralığında değerler girebilir, bu değerlerin dışında bir elektrot açıklığı girilirse program hata verecektir. Diğer taraftan kullanıcının gireceği basınç değeri de önemlidir. Kullanıcı girdiği aralık ve basınç çarpımının 110 mmHg.cm ile 460 mmHg.cm aralığında olmalıdır. Örneğin Şekil 4.37'de her bir elektrot sistemi için 760 mmHg basınç 0,6 cm elektrot açıklığı girilmiş, basınç ve açıklık değerinin çarpımı 760.0,6 = 456 mmHg.cm aralık dahilindedir. Bir diğer kısıtlama ise gerilim artış hızı 1 kV/s ile 3 kV/s aralığında olmalıdır.

Şekil 4.37'de bütün elektrot sistemleri için basınç değeri 760 mmHg, elektrot açıklığı 0,6 cm, gerilim artış hızı 3 kV/s olarak girilmiştir. Sonuç olarak, düzlem-düzlem elektrot sistemine ait η değeri 0,9955, küre-düzlem için 0,8871, küre-küre için 0,9436 değerleri görünmektedir. Delinme gerilimleri ise düzlem-düzlem elektrot sistemi için 20,29 kV, küre-düzlem için 18,79 kV ve küre-küre için 19,37 kV olarak

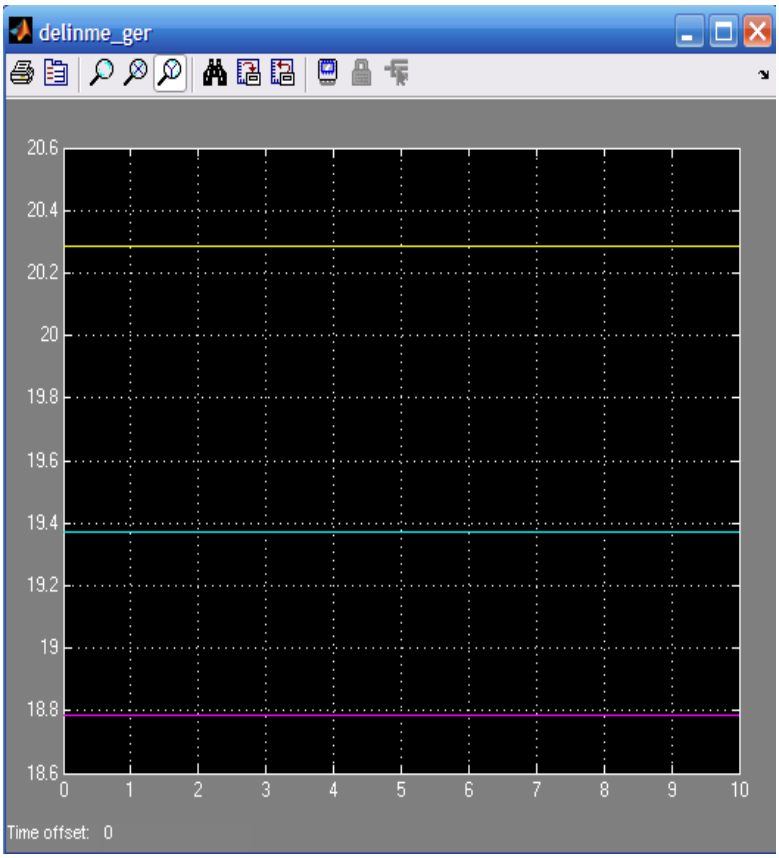
görülmektedir. Paschen denklemine göre düzgün ve az düzgün alanlarda delinme gerilimi basınç ve elektrot açıklığının çarpımının bir fonksiyonu olduğu için model bu denkleme göre tasarlanmıştır. Dikkat edilecek olursa aynı basınç ve elektrot açıklığı değerleri için elektrot sistemlerinin delinme gerilimlerinde farklılıklar mevcuttur. Bu farklılık alan düzgünlük faktörlerinin her bir elektrot sistemi için farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Burada en büyük delinme gerilimi düzlem-düzlem elektrot sistemine ait olup, daha sonra η değeri 0,9436 değeri olan küre-küre elektrot sistemine, en küçük delinme gerilimi ise η (alan düzgünlük faktörü)'sı 0,8871 olan küre-düzlem elektrot sistemine aittir. Elektrot düzgünlüğünün bozulmasıyla birlikte delinme gerilimi düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 4.38 : Aynı elektrot açıklığına sahip elektrot sistemleri için düzgünlük faktörünün karşılaştırılması.

Şekil 4.38'de veŞekil 4.39'da aynı giriş değerlerine sahip elektrot sistemleri için grafiksel alan düzgünlük faktörü ve delinme gerilimlerinin ifadeleri gösterilmiştir. Grafiklerde bulunan çizgi renkleri elektrot sistemlerine aittir. Sarı çizgi düzlem-düzlem elektrot, mavi çizgi küre-küre, mor çizgi ise küre-düzlem elektrot sistemine aittir. Grafiklerden de görüldüğü gibi aynı basınç, aynı elektrot açıklığı, aynı gerilim

artış hızına sahip elektrot sistemlerinin delinme gerilimleri elektrot sistemlerine göre farklılık göstermektedir. Bütün elektrot sistemlerinde kullanılan yalıtkan havadır. Yalıtkan olarak kullanılan havanın sıcaklığı sabit 20°C olarak kabul edilmiş sıcaklığın etkisi hesaba katılmamıştır.



Şekil 4.39 : Aynı giriş değerlerine sahip elektrot sistemleri için delinme geriliminin karşılaştırılması.

Kullanıcı elektrot sistemlerine aynı giriş değerlerini vermek zorunda değildir. Sadece karşılaştırma yapılabilmesi adına yukarıda elektrot sistemlerine aynı elektrot açıklığı, aynı basınç değerleri ve aynı gerilim artış hızları girilmiştir. Her bir elektrot sistemi giriş değerlerine farklı değerler verilerek program çalıştırılıp karşılaştırmalı olarak hangi giriş parametresinin delinme gerilimini büyük ölçüde etkilediği görülebilir. Delinme gerilimini etkileyen en önemli parametre elektrot açıklığı ve basınç çarpımı olup alan düzgünlük faktörü ve gerilim artış hızı daha az etkilidir.

Eğer silindirik kap içerisinde bulunan yalıtkan olan havanın sıcaklığını da hesaba katmak istenirse yukarıda elde edilen delinme gerilimleri T_0/T ile çarpılabilir. Burada T_0 273 K olup T değeri de gazın sıcaklığının Kelvin cinsinden ifadesidir. Bilindiği

gibi bir gazın sıcaklığı artarsa gazın içinde bulunan parçacıkların kinetik enerjileri arttığından çarpışma ile iyonizasyon daha hızlı olacaktır ve delinme gerilimi düşecektir. Yapılan modellemede kaynak gerilim türü olarak alternatif gerilim düşünülmüştür.

4.11.1 Modellemeden elde edilen delinme gerilimi değerleri

Çizelge 4.12'de düzlem-düzlem elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimi değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.12 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimleri.

Düzlem-Düzlem Elektrot Sistemi				Delinme Gerilimi (Ud, kVeff) (Bulanık Mantık)		
Açıklık (cm)	Basınç (mmHg)	(*pd*) (mmHg.cm)	η	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,9955	7,106	7,706	8,104
0,2	660	132	0,9955	6,304	6,705	7,106
0,2	560	112	0,9955	5,64	5,911	6,304
0,4	760	304	0,9955	12,93	13,77	14,41
0,4	660	264	0,9955	11,37	12,17	12,77
0,4	560	224	0,9955	9,929	10,57	11,17
0,6	760	456	0,9955	18,59	19,63	20,29
0,6	660	396	0,9955	16,43	17,43	18,23
0,6	560	336	0,9955	14,23	15,23	16

Çizelge 4.13'de de küre-küre elektrot sistemi için modellemeden elde edilen delinme gerilimleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 : Küre-küre elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimleri.

Küre-Küre Elektrot Sistemi				Delinme Gerilimi (Ud, kVeff) (Bulanık Mantık)		
Açıklık (cm)	Basınç (mmHg)	(pd) (mmHg.cm)	η	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,9782	7,007	7,557	7,954
0,2	660	132	0,9782	6,21	6,705	7,102
0,2	560	112	0,9782	5,586	5,91	6,307
0,4	760	304	0,9609	12,47	13,4	14,04
0,4	660	264	0,9609	11,07	11,88	12,49
0,4	560	224	0,9609	9,602	10,32	10,86
0,6	760	456	0,9436	17,58	18,64	19,37
0,6	660	396	0,9436	15,62	16,72	17,54
0,6	560	336	0,9436	13,6	14,53	15,3

Çizelge 4.14'de küre-düzlem elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimi değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.14 : Küre-düzlem elektrot sistemi için simulink modeli ile elde edilen delinme gerilimleri.

Küre-Düzlem Elektrot Sistemi				Delinme Gerilimi (Ud, kVeff) (Bulanık Mantık)		
Açıklık (cm)	Basınç (mmHg)	(*pd*) (mmHg.cm)	η	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,9574	6,906	7,499	7,903
0,2	660	132	0,9574	6,109	6,606	6,908
0,2	560	112	0,9574	5,458	5,803	6,202
0,4	760	304	0,9192	12,4	13,02	13,68
0,4	660	264	0,9192	10,83	11,64	12,18
0,4	560	224	0,9192	9,379	10,07	10,61
0,6	760	456	0,8871	17,09	18,19	18,79
0,6	660	396	0,8871	15,17	16,23	16,95
0,6	560	336	0,8871	13,19	14,12	14,78

Yapılan Simulink modeli için farklı elektrot sistemleri için havanın delinme gerilimleri çizelgeler halinde verilmiştir. Alınan değerler bulanık mantık değerleridir.

Bulanık mantık modellemesiyle elde edilen delinme gerilimi değerlerinin, sayısal olarak elde edilen delinme gerilimi değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çizelge 5.1'de düzlem-düzlem elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarında elde edilen değerlere göre bağıl hatalar her bir delinme gerilimi için hesaplanmış ve tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Düzlem-düzlem elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarının bağıl hata değerleri.

Düzlem-Düzlem Elektrot Sistemi				Delinme Gerilimi Bağıl Hata Değerleri (%)		
Açıklık (cm)	Basınç (mmHg)	(*pd*) (mmHg.cm)	η Bağıl hata (%)	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,45	1,26	0,67	1,13
0,2	660	132	0,45	1,38	2,86	2,70
0,2	560	112	0,45	-1,27	1,97	1,35
0,4	760	304	0,45	0,34	0,78	1,15
0,4	660	264	0,45	1,11	1,19	1,40
0,4	560	224	0,45	0,65	1,44	1,08
0,6	760	456	0,45	-1,02	-0,10	1,19
0,6	660	396	0,45	-0,86	-0,28	-0,05
0,6	560	336	0,45	-0,64	-0,79	-0,88

Çizelge 5.2'de küre-küre elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarına göre bağıl hatalar gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Küre-küre elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarının bağıl hata değerleri.

Küre-Küre Elektrot Sistemi				Delinme Gerilimi Bağıl Hata Değerleri (%)		
Açıklık (cm)	Basınç (mmHg)	(*pd*) (mmHg.cm)	η Bağıl hata (%)	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,35	0,91	0,89	1,30
0,2	660	132	0,35	1,14	1,17	1,10
0,2	560	112	0,35	-2	0,3	-0,36
0,4	760	304	0	0,81	0,39	0,67
0,4	660	264	0	0,64	0,51	0,55
0,4	560	224	0	0,86	0,75	0,84
0,6	760	456	-0,37	0,10	0,65	1,45
0,6	660	396	-0,37	-0,25	-0,52	-0,56
0,6	560	336	-0,37	-0,54	-0,47	-0,75

Çizelge 5.3'de küre-düzlem elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarından elde edilen değerlere göre bağıl hatalar hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3 : Küre-düzlem elektrot sistemi için sayısal ve modelleme sonuçlarının bağıl hata değerleri.

Küre-Düzlem Elektrot Sistemi				Delinme Gerilimi (Ud, kVeff) (Bulanık Mantık)		
Açıklık (cm)	Basınç (mmHg)	(*pd*) (mmHg.cm)	η	1 kV/s (γ=1/50)	2 kV/s (γ=1/500)	3 kV/s (γ=1/5000)
0,2	760	152	0,74	0,67	0	0,29
0,2	660	132	0,74	1,10	1	2,20
0,2	560	112	0,74	-1,37	0,46	-0,32
0,4	760	304	0	-0,97	0,95	0,96
0,4	660	264	0	0,50	0,23	0,77
0,4	560	224	0	0,88	0,90	0,89
0,6	760	456	-0,77	-0,18	0,01	1,43
0,6	660	396	-0,77	-0,44	-0,62	-0,18
0,6	560	336	-0,77	-0,57	-0,66	-0,33

Bu bölümde tez çalışmasının sonuçları ve analitik olarak hesaplanan farklı elektrot sistemleri için delinme gerilim değerlerinin simulink modeli ile hesaplanan değerlere göre bağıl hataları verilmiştir. Bağıl hatalar hesaplanırken sayısal olarak hesaplanan delinme geriliminden modelleme ile elde edilen delinme geriliminin farkı alınmış, bu fark sayısal olarak hesaplanan delinme gerilimine bölünmüş ve yüz ile çarpılmıştır. Aşağıdaki çizelgelerde bağıl hata oranları verilmiştir. Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'e dikkat edilecek olursa delinme gerilimi sonuçlarında bağıl hata değeri ±3% değerini geçmemiştir, bu da modelleme sonucunun başarılı olduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışmasında bulanık mantık yaklaşımı ile delinme gerilimi değerleri saptanmaya çalışılmıştır. Bu çalışma geliştirilebilir. ANFIS kullanılarak modelin kendi kendine öğrenmesi ve sayısal hesaplamalardan kurtulunabileceği gibi yapay sinir ağları da uygulanabilir.

Yukarıda listelenen hata oranlarına dikkat edilecek olursa, bazı değerler diğerlerine göre daha büyüktür. Örneğin düzlem-düzlem elektrot şekli, 2 kV/s gerilim artış hızı, elektrot açıklığı 0,2 cm, basınç değeri 660 mmHg, basınç çarpı açıklık değeri 132 mmHg.cm için analitik olarak hesaplanan delinme gerilimi değeri Çizelge 4.3'te 6,903 olarak hesaplanmış, interpolasyon hesabıyla basınç çarpı açıklık değeri 130'a karşılık Çizelge 4.8'de 6,8157 olarak normalize edilmiş olup modelleme sonucunda

delinme gerilimi 6,7 olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi, ilgili delinme gerilimini elde edecek kural oluşturulurken çıkış değişkeninde üyelik fonksiyonunun tepe değeri 6,7 olarak seçilmesidir.

Hata oranlarını azaltmak için üyelik fonksiyonları sayısı arttırılabilir. Kurallar yeniden gözden geçirilip arttırılan üyelik fonksiyonlarına göre tekrar düzenlenilebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Kunhardt, E. E.** (1980). Electrical Breakdown of Gases: The Prebreakdown Stage. *IEEE Transactions on Plasma Science,* cilt PS. 8, no. 3, Sf. 130-138.

[2] **Balaji, S. P., Latha, M. K. ve Usa, S.** (2012). Prediction of v-t Characteristics of Air at Different Pressures. 2012 *Int. Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, Sf. 46-49, Sept. 17-20.

[3] **Predrag, O.** (1993). Mechanism of Electrical Breakdown of Gases at Very Low Pressure and Interelectrode Gap Value. *IEEE Transactions on Plasma Science,* Cilt 21, no. 6, Sf. 645-653.

[4] **Husain, E. ve Nema, R. S.** (1982), Analysis of Paschen Curves for Air, N2, and SF6 Using The Townsend Breakdown Equation. *IEEE Transactions on Electrical Insulation,* Cilt 1 / EI-17, no. 4, Sf. 350-353.

[5] **Kalenderli, Ö., Önal, E. ve Altay, Ö.** (2001). Computing the Corona Onset and the Utilization Factor of Rod-Plane Electrode by Using Charge Simulation Method. *Electrical Insulation Conference* (EIC) 2001, Cincinnati, Ohio, USA, Sf. 453-456, 2001.

[6] **Kolev, N. P. ve Chalashkanov, N. M.** (2007). Modelling of Partial Discharge Inception and Extinction Voltages Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *2007 International Conference on Solid Dielectrics,* Sf. 605-608, 8-13 July.

[7] **Mohanty, S. ve Ghosh, S.** (2011). Modeling of the breakdown voltage of solid insulating materials using fuzzy logic techniques. *IEEE* 2011 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (CEIDP), Sf. 530-533, 2011.

[8] **Cavallini, A., Conti, M., Contin, A. ve Montanari, G. C.** (2002). Inferring Partial Discharge Identifieation Through Fuzzy Tools. *2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,* Sf. 698-702, 2002.

[9] **Phung, B. T., Blackburn, T. R. ve James, R. E.** (1998). Recognition of Partial Discharge Using Fuzzy Logic. *Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, in conjunction with 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation and the 30th Symposium on Electrical Insulating Materials,* cilt P2, no. 16, Sf. 657-660, 27-30 September.

[10] **Gopal, S., Karthikeyan, B. ve Kavitha, D.** (2004). Partial Discharge Pattern Classification Using Fuzzy Expert System. *2004 International Conference on Solid Dielectrics,* Toulouse, France, Sf. 1-4, 5-9 July.

[11] **Salama, M. M. A. ve Bartnikas, R.** (2000). Fuzzy Logic Applied to PD pattern Classification. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,* cilt 7, no. 1, Sf. 118-123.

[12] **Kun-Li, W., Yu-Gi, C. ve Shih-Shong, Y.** (1995). Use of The Fuzzy Method to Predict The Probability of The Breakdown in Gas. *International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies*, Taipei, Taiwan, Sf. 354-357, 22-27 May 1995.

[13] **Bourek, Y., Mokhnache, L., Said, N. N. ve Kattan, R.** (2011). Determination of ionization conditions characterizing the breakdown threshold of a point-plane air interval using fuzzy logic. *Electric Power Systems Research,* Cilt 81, Sf. 2038-2047, 20 July.

[14] **Wu, F., Liao, R., Liu, X., Yang, F., Yang, L., Zhou, Z. ve Luo, Y.** (2012). Numerical Simulation of DC Positive Corona Discharge under Atmospheric Environment. *Int. Conf. on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, Sf. 652-656, 17-20 September.

[15] **Holtzhausen, J. P. ve Pieterse, P. J.** (2010). Investigation of the Effect of Conductor Temperature on AC Power Line Corona. *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2010,* Sf. 96-99.

[16] **Chen, L., Zheng, Z., Chen, M. ve Yu, H.** (2012). The study of the discharge mechanism and characteristics of micro-voids in the solid dielectric. *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, Sf. 714-717, 17-20 September.

[17] **Illias, H. A., Chen, G. ve Lewin, P. L.** (2010). Measurement and Modelling of Partial Discharge Behaviour in a Spherical Cavity within a Solid Dielectric Material as a Function of Applied Voltage Amplitude. *IEEE Int. Conf. on High Voltage Engineering and Application,* Sf. 441-444.

[18] **Beroual, A., Coulibaly, M. L., Aitken, O. ve Girodet, A.** (2010). Study of Creeping Discharges Propagating over Epoxy Resin Insulators in Presence of Different Gases and Mixtures. *Int. Conference on High Voltage Engineering and Application* (ICHVE), Sf. 89-90, 11-14 Oct.

[19] **Hasheminezhad, M. ve Ildstad, E.** (2010). Partial Discharge Inception of Interface Voids versus Mechanical Surface Pressure. *International Conference on High Voltage Engineering and Application* (ICHVE), p. 397, 11-14 Oct. 2010.

[20] **Elmas, Ç.** (2011). Yapay Zeka Uygulamaları, 2. Baskı, Ankara, Seçkin Yayınevi, Sf. 185-198.

[21] **The Mathworks**, (2012). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide,* Massachusetts, USA.

[22] **Alcı, M. ve Karatepe, E.** (2012). Bulanık Mantık ve Matlab Uygulamaları, 1. Baskı, İzmir, Bornova, Sf. 19-20.

[23] **Kuffel, E. ve Zaengl, W. S.** (2004). High Voltage Engineering Fundamentals, McGraw Hill, New York.

[24] **Özkaya, M.** (2008). Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, İstanbul, Birsen Yayınevi, Sf. 234-240.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Kemal Arıkan

Doğum Yeri ve Tarihi: Muğla - 1988

E-Posta: kemalarikan.itu@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi-Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi:

Arikan, K., Kalenderli, Ö., Kara, A., Font, A., Önal, E (2013). The prediction of ac breakdown voltage using fuzzy inference system. *18th International Symposium on High Voltage Engineering* (*ISH 2013*), Seoul, Korea, pp. 206-209, 25-30 August.