T.C.
İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ

Y-ŞEKİLLİ YÜKSEK TEMASLI ELEKTROTLAR İLE DERİN BEYİN STİMÜLASYONUNDA VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI: SAYISAL TABANLI BİR SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

TEZLİ YÜKSEK LİSANS

SİBA KAR

İSTANBUL, 2025

T.C.

İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
TEZ ONAY BELGESİ

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı **22242401004** numaralı yüksek lisans öğrencisi **Siba KAR**'ın "**Y-Şekilli yüksek temaslı elektrotlar ile derin beyin stimülasyonunda verimliliğin arttırılması: Sayısal tabanlı bir simülasyon çalışması**" adlı tez çalışması, Enstitümüz Yönetim Kurulunun **22/07/2025** tarih ve **2025/06** sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 30/07/2025

Doç. Dr Sezen CANIM ATEŞ
Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üy. Sevil ÖZER
Eş Danışman

Prof. Dr. Nurcan DOĞAN BİNGÖLBALI
Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Burak CEYLAN
Jüri Üyesi

ETİK BEYAN

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

SİBA KAR

ÖNSÖZ

Hayatımın ilham kaynağı, en kıymetlileri, en değerlileri ve her şeyim olan canım oğlum ve kızım...
Bu aşamaya gelmemde büyük emekleri olan, her zaman yanımda duran, beni koşulsuz destekleyen sevgili annem ve babam...
Zor zamanlarımda beni anlayan, her daim yanımda olan ve desteğini hiç esirgemeyen canım eşim...
Hayatımın neşesi, enerjim ve en eğlenceli yol arkadaşlarım sevgili kardeşlerim...

Bu tezi sizlerin sevgisi, desteği ve inancı sayesinde tamamladım. Bugün geldiğim bu nokta, sizlerin varlığı ve katkısıyla mümkün oldu.
Bu tezi sizlere ithaf ediyor, başarımdaki payınızı gönülden kabul etmenizi diliyorum.

İyi ki varsınız. Hep sağlıklı, mutlu ve bir arada kalalım.

Canlarım, sonsuz sevgilerimle...

Bu tez sürecinde karşılaştığım her sorun ve zorlukta yanımda olan, sabırla açıklamalar yapan, yol gösterici destekleriyle katkı sağlayan sevgili eş danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Sevil Özer hocama ve değerli danışmanım Doç. Dr. Sezen Canım Ateş hocama en içten teşekkürlerimi sunarım.

İyi ki sizlerle çalışma fırsatı buldum.
Katkılarınız ve desteğiniz bu çalışmanın şekillenmesinde çok değerliydi.

Sağlıkla ve mutlulukla kalmanız dileğiyle,

Saygılarımla.

Bu tezin ilham kaynağı olan, aklımda bu tezin fikrini uyandıran, bana ilk kez Derin Beyin Stimülasyonu konusunu tanıtan, bu konunun araştırmamı neden olan, ameliyat odalarında beni kabul eden ve bu alandaki pratik prosedürleri yerinde gözlemleme fırsatı sunan Beyin ve Sinir Cerrahisi Uzmanı Prof. Dr. Amjad Alamin'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Katkılarınız ve desteğiniz benim için çok kıymetliydi.

Saygılarımla.

SİBA KAR

İstanbul, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI ..... …i
ETİK BEYAN ii
ÖNSÖZ iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİL LİSTESİ vi
TABLO LİSTESİ xv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ xvi
ÖZET xvii
ABSTRACT xviii
1. GİRİŞ 1
2. DERİN BEYİN STİMÜLASYONU NEDİR? 3
2.1 Beyin Anatomisi 3
2.2 Derin beyin stimülasyonunda hedeflenen ana çekirdekler 6
2.3 Derin Beyin Stimülasyonun Bileşenleri 7
2.4 Derin Beyin Stimülasyon Cerrahisinin Uygulanması 10
3. DERİN BEYİN STİMÜLASYON ELEKTROT VE IPG TASARIMI VE YENİLİKLERİ 11
3.1 Elektrot Kablosunda Yapılan Yenilikler 11
3.2 IPG'de Yenilikler: 15
4. Y-ŞEKİLLİ DERİN BEYİN STİMÜLSSYONU ELEKTROT TASARIMI 17
4.1 Tasarlanan Y-şeklinde Elektrodun Özellikleri ve Mevcut Silindirik Geometriye Sahip Elektrotlarla Karşılaştırılması 19
4.2 Karşılaştırma için Kullanılan Mevcut Elektrodun Özellikleri 20
4.3 Elektrik Alanı Çalışması 21
4.4 Elektrik Alan Analizinin Nedenleri: 22
4.5 Biyoısı (ht) Çalışması 23
5. YÖNTEMLER, MODELLEME VE STİMÜLASYON 26
5.1 Y-Şekilli Yönlendirilmiş Elektrot Tasarımı ve Sonlu Eleman Yöntemiyle Elektriksel-Thermal Performans Analizi 26
5.2 Kullanımda Mevcut Elektrodun ve Çevre Dokunun Modellemesi 26
5.3 Y-şekilli Elektrodun ve Çevre Dokunun Modellemesi 29
5.4 Kullanımda Olan Elektrot için Stimülasyon Parametreleri 31

5.4.1 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri 32
5.4.2 Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri 32
5.4.3 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri 33
5.4.4 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri 34
5.5 Y-şekilli Elektrodun Stimülasyon Parametreleri 35
5.5.1 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri 35
5.5.2 Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri 36
5.5.3 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri 37
5.5.4 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri 39
6. BULGULAR 40
6.1 Tek kutuplu (Monopolar) Geometri Karşılaştırmalı 40
6.1.1 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri (-0.01V) 40
6.1.2 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri (-0.01V, -0.01V) 46
6.2 Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri Karşılaştırmalı 52
6.2.1 Dar Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (-0.01V, +0.01V) 52
6.2.2 Dar Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (+0.01V, -0.01V) 58
6.2.3 Geniş Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (-0.01V, +0.01V) 63
6.2.4 Geniş Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (+0.01V, -0.01V) 69
6.3 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri Karşılaştırmalı 74
6.3.1 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (-1V, -1V, +1V) 75
6.3.2 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) 80
6.3.3. Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) 86
6.3.4 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) 91
6.4 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri Karşılaştırmalı 97
6.4.1 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) 97
6.4.2 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) 103
7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR 109
8. KAYNAKLAR 114

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Beyin anatomisi (Serebrum, serebellum, beyin sapı) [11]..... 4
Şekil 2. 2. Beyin lobları (Frontal, Temporal, Parieal, Oksiptal, Limbik) [11]..... 5
Şekil 2. 3. Ventrikül sistem [11] 6
Şekil 2. 4. DBS sisteminde hedeflenen çekirdekler (STN, GPI, VIM) [38] 7
Şekil 2. 5. DBS sistemi, IPG, Uzatma kabloları, Elektrot uçları [18]..... 8

Şekil 3.1. Değişken aralıklı 4–8 silindirik temaslı en yaygın DBS elektrotları [23]…… 12
Şekil 3. 2. (Halka modu) elektrotta akım yönlendirmesi [23]…….. 13
Şekil 3. 3. dDBS'de kullanılan yönlü elektrot [23]……...14
Şekil 3. 4. dDBS'de kullanılan Yönlü elektrotta akım yönlendirmesi [23]…….. 14
Şekil 3. 5. Kullanımda mevcut IPG'ler ve özellikleri [28]……15

Şekil 4. 1. µDBS elektrot [37]..... 17
Şekil 4. 2. a. Tinkercad ile tasarlanan Y-şekilli elektrot, **b.** Tinkercad ile tasarlanan Y-şekilli ve kullanımda mevcut olan silindirik geometrili elektrotlar 18
Şekil 4. 3. a. Y-şekilli elektrot ve boyut parametreleri, **b.** Kullanımda mevcut olan silindirik geometrili elektrot ve boyutları 19

Şekil 5. 1. a. Tinkercad ile Y-şekilli elektrot oluşturulması, **b.** Sonlu elaman modelleme programına elektrot-CAD dizaynının altarılması..... 26
Şekil 5. 2. Kullanımda mevcut elektrodun Sonlu elaman modelleme programı kullanılarak oluşturulması 27
Şekil 5. 3. a. Sonlu elaman modelleme programın ile kullanımda mevcut elektrodu, **b.** Kullanımda mevcut elektrodun boyutları [29] 27
Şekil 5. 4. a. Kullanımda mevcut elektrodu altın temas noktasının spesifikasyonu, **b.** Kullanımda mevcut elektrodu Poliimid izolatör noktasının spesifikasyonu, **c.** Kullanımda mevcut elektrodunun iç ağı (Mesh)..... 28
Şekil 5. 5. a. Elektrodun çevreleyen doku yarıçap r=30 mm, **b.** sonlu elaman modelleme programın ile çevre doku iç ağı (Mesh) 29
Şekil 5. 6. Sonlu elaman modelleme program ile Y-şekilli elektrot 30
Şekil 5. 7. a. Y-şekillindeki elektrot, altın temas noktaların spesifikasyonu, **b.** Y-şeklindeki elektrot, poliimid yalıtkan noktaların spesifikasyon, **c.** Y-şeklinde elektrot iç ağı (Mesh) 31
Şe**kil 5. 8. a.** Monopolar geometri tek katot -0.01V, **b.** Monopolar geometri çift katot -0.01V, -0.01V..... 32
Şekil 5. 9. a. Dar çift kutuplu (bipolar) geometri (-0.01V,+0.01V), **b.** Dar çift kutuplu (bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V), **c.** Geniş çift kutuplu (bipolar) geometri (-0.01V,+0.01V), d. Geniş çift kutuplu (bipolar) geometri (+0.01V,-0.01V) 33

Şekil 5. 10. a. Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V), **b.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V), **c.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V), d. Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) 34
Şekil 5. 11. a. Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V), **b.** Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) [29]. 35
Şekil 5. 12. a. Tek kutuplu (Monopolar) geometri 9 negatif voltaj (-0.01V), **b.** Tek kutuplu (Monopolar) geometri 18 negatif voltaj (-0.01V) 36
Şekil 5. 13. a. Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (-0.01V, +0.01V), **b.** Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (+0.01V, -0.01V), **c.** Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (-0.01V, +0.01V), **d.** Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (+0.01V, -0.01V)..... 37
Şekil 5. 14. a. Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (-0.01V, -0.01V, +0.01V), **b.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (+0.01V, +0.01V, -0.01V), **c.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (-0.01V, +0.01V, -0.01V), **d.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (+0.01V, -0.01V, +0.01V)..... 38
Şekil 5. 15. a. Dört kutuplu (Quadripolar) geometri 36 voltaj (+0.01V-0.01V,+0.01V,-0.01V), **b.** Dört kutuplu (Quadripolar) geometri 36 voltaj (-0.01V,+0.01V,+0.01V,-0.01V) . 39

Şekil 6. 1. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.011V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması41
Şekil 6. 2. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.011V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması 41
Şekil 6. 3. a. zy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.011V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** zy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması 42
Şekil 6. 4. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….. 42
Şekil 6. 5. a. Xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….. 43
Şe**kil 6. 6. a.** Yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….. 43
Şekil 6. 7. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……44
Şekil 6. 8. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……...44
Şekil 6. 9. a. yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……...45
Şekil 6. 10. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması……. 47
Şekil 6. 11. a. Xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması……. 47

Şekil 6. 12. a. Yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…… 48
Şekil 6. 13. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 48
Şekil 6. 14. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 49
Şekil 6. 15. a. yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 49
Şekil 6. 16. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Tek kutuplu geometri (Monopolar) (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……50
Şekil 6. 17. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Tek kutuplu geometri (Monopolar) (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……50
Şekil 6. 18. a. yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Tek kutuplu geometri (Monopolar) (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……51
Şekil 6. 19. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…… 53
Şekil 6. 20. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…… 53
Şekil 6. 21. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…… 54
Şekil 6. 22. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 54
Şekil 6. 23. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 55
Şekil 6. 24. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 55
Şekil 6. 25. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..56
Şekil 6. 26. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..56

Şekil 6. 27. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Dar çift kutuplu (Bia. polar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..57
Şekil 6. 28. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrodu için sıcaklık çalışması…….. 58
Şekil 6. 29. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrodu için sıcaklık çalışması…….. 59
Şekil 6. 30. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrodu için sıcaklık çalışması…….. 59
Şekil 6. 31. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……60
Şekil 6. 32. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……60
Şekil 6. 33. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……61
Şekil 6. 34. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..61
Şekil 6. 35. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..62
Şekil 6. 36. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..62
Şekil 6. 37. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 64
Şekil 6. 38. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 64
Şekil 6. 39. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 65
Şekil 6. 40. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……..65
Şe**kil 6. 41. a.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….. 66

Şekil 6. 42. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……...66
Şekil 6. 43. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..67
Şekil 6. 44. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..67
Şe**kil 6. 45. a.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..68
Şekil 6. 46. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 69
Şekil 6. 47. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 70
Şekil 6. 48. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 70
Şekil 6. 49. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….71
Şekil 6. 50. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….71
Şekil 6. 51. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….72
Şekil 6. 52. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..72
Şekil 6. 53. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..73
Şekil 6. 54. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..73
Şekil 6. 55. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 75
Şekil 6. 56. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 76

Şekil 6. 57. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 76
Şekil 6. 58. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……...77
Şekil 6. 59. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……...77
Şekil 6. 60. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……...78
Şekil 6. 61. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..78
Şekil 6. 62. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..79
Şekil 6. 63. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..79
Şekil 6. 64. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 81
Şekil 6. 65. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 81
Şekil 6. 66. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 82
Şekil 6. 67. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….82
Şekil 6. 68. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….83
Şekil 6. 69. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….83
Şekil 6. 70. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..84
Şekil 6. 71. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..84

Şekil 6. 72. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..85
Şekil 6. 73. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 86
Şekil 6. 74. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 87
Şekil 6. 75. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 87
Şekil 6. 76. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….88
Şekil 6. 77. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….88
Şekil 6. 78. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….89
Şekil 6. 79. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..89
Şekil 6. 80. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..90
Şekil 6. 81. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……..90
Şekil 6. 82. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 92
Şekil 6. 83. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 92
Şekil 6. 84. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 93
Şekil 6. 85. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….. 93
Şekil 6. 86. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……...94

Şekil 6. 87. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…….. 94
Şekil 6. 88. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……. 95
Şekil 6. 89. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……. 95
Şekil 6. 90. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması……. 96
Şekil 6. 91. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 98
Şekil 6. 92. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 98
Şekil 6. 93. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması…….. 99
Şekil 6. 94. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……99
Şekil 6. 95. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……..100
Şekil 6. 96. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……..100
Şekil 6. 97. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması ……101
Şekil 6. 98. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması ……101
Şekil 6. 99. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması ……102

Şekil 6. 100. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması……...103
Şekil 6. 101. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması……...104
Şekil 6. 102. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması……...104
Şekil 6. 103. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 105
Şekil 6. 104. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması…… 105
Şekil 6. 105. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması……..106
Şekil 6. 106. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması..106
Şekil 6. 107. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması..107
Şekil 6. 108. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansi…….. 107

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3. 1. Kullanımda mevcut IPG'ler ve özellikleri [28] 16

Tablo 4. 1. İki elektrot özelliklerinin karşılaştırılması 21
Tablo 4. 2. Biyoısı çevredeki doku özellikleri..... 24

Tablo 5. 1. Mevcut elektrot temas noktaların özellikleri..... 28
Tablo 5. 2. Çevredeki doku özellikleri 29

Tablo 6. 1. Y-şekilli elektot için veriler – Monopolar (-0.01V)…….. 45
Tablo 6. 2. Kullanımda mevcut elektrot için veriler- Monopolar (-0.01V)…… 45
Tablo 6. 3. Y-şekilli elektrot için veriler - Monopolar (-0.01V, -0.01V)…….51
Tablo 6. 4. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Monopolar (-0.01V, -0.01V)……... 51
Tablo 6. 5. Y-şekilli elektrot için veriler - Bipolar (-0.01V, +0.01V)……..57
Tablo 6. 6. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Bipolar (-0.01V, +0.01V)…… 57
Tablo 6. 7. Y-şekilli elektrot için veriler - Bipolar (+0.01V, -0.01V)……..63
Tablo 6. 8. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Bipolar (+0.01V, -0.01V)…… 63
Tablo 6. 9. Y-şekilli elektrot için veriler - Geniş Bipolar (-0.01V, +0.01V)……... 68
Tablo 6. 10. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Geniş Bipolar (-0.01V, +0.01V)……68
Tablo 6. 11. Y-şekilli elektrot için veriler - Geniş Bipolar (+0.01V, -0.01V)…… 74
Tablo 6. 12. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Geniş Bipolar (+0.01V, -0.01V)……74
Tablo 6. 13. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, -0.01V, +0.01V)…… 80
Tablo 6. 14. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, -0.01V, +0.01V)...80
Tablo 6. 15. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, +0.01V, -0.01V)……... 85
Tablo 6. 16. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, +0.01V, -0.01V)..85
Tablo 6. 17. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, +0.01V, -0.01V)…… 91
Tablo 6. 18. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, +0.01V, -0.01V).. 91
Tablo 6. 19. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V)……...96
Tablo 6. 20. Kullnımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V)... 96
Tablo 6. 21. Y-şekilli elektrot için veriler - Quadripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V, -0.01V) …….102
Tablo 6. 22. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Quadripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V, -0.01V)…… 102
Tablo 6. 23. Y-şekilli elektrot için veriler - Quadripolar (-0.01V, +0.01V,+-0.01V, -0.01V) …… 108
Tablo 6. 24. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Quadripolar (-0.01V, +0.01V,+-0.01V, -0.01V)…… 108

Tablo 7. 1. Sonuçlar tablosu (+) daha iyi sonuç (-) daha kötü sonuç 109
Tablo 7. 2. Y-şekilli elektrot, Kullanımda mevcut elektrot geometrilere göre karşılaştırmalı 110

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler :

E	**:** Electric field – Elektrik alanı
Φ	**:** Potential distribution - Potansiyel dağılım
J	**:** Current density - Akım yoğunluğu
V	**:** Electric potential - Elektrik potansiyeli
σ	**:** Electrical conductivity of the medium - Ortamın elektriksel iletkenliği
Q_{bio}	**:**Bioheat value - Biyoısı değeri
ρ_b	**:** Blood density - Kan yoğunluğu
ω_b	**:** Specific heat, blood - Spesifik ısı, kan
T_b	**:** Arterial blood temperature - Atardamar kan sıcaklığı
T	**:** Initial value - Başlangıç değeri
Q_{met}	**:** Metabolic heat source - Metabolik ısı kaynağı

Kısaltmalar:

DBS	**:** Deep Brain Stimulation - Derin Beyin Stimülasyonu
PD	**:** Parkinson Disease – Parkinson Hasatlığı
FDA	**:** Food Drugs Administration - Gıda İlaç İdaresi
STN	**:** Subthalamic nuclie- Subtalamik çekirdekler
GPI	**:** Globus palidus intena
VIM	**:** Ventrointermediate nuclie
OCD	**:** Obsessive compulsive disorder - Obsesif kompulsif bozukluk
CNS	**:** Central Nervous System - Merkezi Sinir Sistemi
CSF	**:** Cerebrospinal fluid - Beyin omurilik sıvısı
SNC	**:** Substantia Nigra Pars Compacta
IPG	**:** Implanted pulse generator - İmplante edilmiş puls üreteci
CPU	**:** Central Processing Unit - Merkezi İşlem Birimi
VC	**:** Ventral capsule - Ventral kapsül
VS	**:** Ventral striatum
BOS	**:** Beyin omurilik sıvısı
MRI	**:** Manyetik Rezonans Görüntüleme
DAC	**:** Mikrodenetleyici

ÖZET

Y-ŞEKİLİ YÜKSEK TEMASLI ELEKTROTLAR İLE DERİN BEYİN STİMÜLASYONUNDA VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI: SAYISAL TABANLI BİR SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

SİBA KAR

İstanbul Yeni Yüzyil Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Danışmanı: Doç. Dr. Sezen CANIM ATEŞ
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Sevil ÖZER

Derin Beyin Stimülasyonu (DBS), çeşitli nörolojik bozuklukları tedavi etmek için kullanılan bir nöroşirürjik prosedürdür. Mevcut tedavide kullanılan bazı elektrotların, daha az temas sayısı nedeniyle hedeflenen dokuda elektrik alanının daha dikey bir şekilde dağıtılamaması ve kesit nedeniyle daha fazla dokuya zarar verme gibi farklı yan etkileri vardı. Bu tez, daha az kesite ve daha fazla temas noktasına sahip yeni bir elektrot geometrisi oluşturmayı amaçlamaktadır. DBS gibi nöromodülasyon uygulamalarında, elektriksel stimülasyonun beyin dokusunda nasıl yayıldığını anlamak hem etkinlik hem de güvenlik açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle elektrot geometrisinin, temas noktalarının şekli ve sayısının elektrik alanının yayılımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, analitik çözümler yetersiz kalmakta ve bu durumda sayısal modelleme yöntemleri, özellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) tercih edilmektedir.

36 kontak ve 1.056 mm^2 kesit alanı yeni Y-şekilli elektrot Tinkercad tarafından oluşturulmuştur. Elektrot, sonlu eleman modelleme programına aktarıldı ve simüle edildi. Elektriksel potansiyel dağılımı Laplace denklemi ile hesaplanıp, elektrodun temas noktalarında akım yoğunluğu, ısı dağılımı sonlu elman modelleme programından elde edildi ve tartışıldı.

Y-şekilli elektrot, tüm geometrilerde, kullanımda mevcut olan elektroda göre çevredeki dokuyu daha az ısıttığı, daha yüksek enerji yoğunluğu olan elektrik alanı ilettiği gözlemlenmiştir. Y-şekilli olarak tasarlanan elektrot, yalnızca (1.056 mm^2)'lik kesit alanına sahip olması sayesinde çevre beyin dokularında minimum düzeyde fiziksel hasara yol açmaktadır. Elektrot üzerinde yer alan 36 adet temas noktası, daha yüksek enerji yoğunluklu bir elektrik alanın iletimine olanak sağlamaktadır. Temas yüzeylerinin (1.8 mm × 0.4 mm) boyutlarında ve dikdörtgen formda yerleştirilmiş olması, elektrik alanın yönlü (dikey) ve daha odaklanmış bir biçimde dağılmasını mümkün kılmaktadır. Test edilen tüm geometrilerde kullanımda mevcut elektrotlara kıyasla daha verimli enerji iletimi sağlaması, İmplante Edilmiş Pulse Üreteçleri (Implanted Pulse Generators, IPG) açısından enerji tasarrufu potansiyeli sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Elektriksel Stimülasyon, Derin Beyin Stimülasyonu, DBS Elektrotları, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

ABSTRACT

INCREASING EFFICIENCY IN DEEP BRAIN STIMULATION WITH Y-SHAPED HIGH CONTACTS ELECTRODE: A NUMERICALLY BASED SIMULATION STUDY

SIBA KAR

İstanbul Yeni Yüzyil University, Institute of Science

Master's Thesis

Advisor: Associate Prof. Dr. Sezen CANIM ATEŞ
Co-Advisor: Assistant Prof. Dr. Sevil ÖZER

Deep Brain Stimulation (DBS) is a neurosurgical procesure used to treat various neurological disorders. Some electrodes used in current treatment have different side effects such as inability to distribute the electric field more vertically in the targeted tissue due to the fewer contacts number and damging more tissue due to cross-section area. This thesis aims to build a new electrode geometry with less cross-section and more contacts points. In neuromodulation treatments like DBS, it's essential to understand how electrical stimulation spreads through the brain. This is important not only for making sure the treatment works effectively, but also for ensuring it's safe. Analytical solutions, are insufficient to evaluate the effects of electrode geometry, shape and number of contact points on the distribution of the electric field, therefor; numerical modeling methods, especially the Finite Element Method (FEM), are preferred.

Y-shaped electrode with 36 contacts and 1.056 mm2 cross-sectional area was created by Tinkercad. The electrode was imported to the finite element modeling program and simulated. The electrical potential distribution was calculated by the Laplace equation and the current density at the electrode contact points was obtained from the finite element modeling program and discussed.

Y-shaped electrode heats the surrounding tissue less than the current electrode and transmits an electric field with a higher energy density compared to the current electrode in all geometries. The Y-shaped electrode, designed with a cross-sectional area of only (1.056 mm^2), minimizes physical damage to the surrounding brain tissue. The electrode includes 36 contact points, which enable the transmission of an electric field with higher energy density. The rectangular configuration of these contact surfaces, each measuring (1.8 mm × 0.4 mm), allows the electric field to propagate in a more directional (specifically vertical) and focused manner. The fact that this design demonstrated more efficient energy delivery across all tested geometries compared to the currently used electrode suggests that it may offer a significant advantage in terms of energy savings for Implanted Pulse Generators.

KEYWORDS: Electrical Stimulation, Deep Brain Stimulation, DBS Electrodes, Finite Element Modelling.

1. GİRİŞ

DBS, ilaç dirençli motor komplikasyonları olan Parkinson Hastalığı (PD) hastalarının yaşam kalitesini iyileştirmek için kullanılan Gıda İlaç İdaresi (FDA) onaylı bir nörolojik tedavidir [1]. DBS, göğüs bölgesinde, köprücük kemiğinin yakınındaki deri altına bir darbe üretecinin (nöro stimülatör olarak da bilinir) yerleştirilmesini içerir ve bu, beynin hedeflenen bir bölgesine yerleştirilen bir elektrota bağlanan bir tel (uzatma olarak da adlandırılır) aracılığıyla elektrik darbeleri gönderir [2]. DBS prosedürlerinde, tedavi edilen duruma bağlı olarak beynin belirli bölgeleri sıklıkla hedef alınır. Subtalamik Çekirdek (STN) ve Globus Pallidus Internus (GPI), Parkinson hastalığı için hedeflenen çekirdeklerdir. Ventral Intermediate Çekirdek (VIM) ise titreme için hedeflenen çekirdeklerdir. Bu bölgelere odaklanmak titreme, sertlik ve diğer motor semptomlarını azaltmaya yardımcı olur ve hastanın yaşam kalitesinde önemli bir fayda sağlar [3]. Mevcut tedavide farklı tipte elektrot şekilleri, özellikle silindirik olan, kullanılmaktadır. Tedavi sonuçları bir nebze tatmin edicidir, ancak henüz giderilemeyen bazı yan etkileri de vardır. Birçok çalışma, yan etkilerin azaltılmasının, elektrik alanının yatay yayılmasının önlenmesi ve daha büyük dikey elektrik alanı dağılımı ile sağlanabileceğini göstermiştir. [4]. Bu tezin amacı daha az kesit alanı ve daha fazla temas noktasına sahip yeni bir elektrot geometrisi oluşturmaktır. Yeni elektrodun performansı, mevcut DBS ameliyatlarında kullanımda olan elektrotlarla karşılaştırılacaktır. Tasarlanan elektrot ile beyin dokularında daha iyi ve hassas bir şekilde hedeflemek, ameliyattan sonra ortaya çıkan yan etkileri azaltmak hedeflenmektedir. Bu çalışmada, beyin anatomisinden, derin beyin stimülasyon tarihinden ve ameliyat süreçlerinden, DBS sisteminin bileşenleri ve yapılan inovatif yeniliklerinden bahsedilmiştir. Y-şekilli elektrodun tasarlanması, oluşturulması, modellemesi ve simüle edilmesi detaylıca açıklanmıştır. 3 farklı çalışmanın sonuçları açılanmış ve halen kullanımda mevcut olan elektrot performansıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, daha fazla temas nokta sayısına (36 temas noktası) ve daha az kesite alana (1.056 mm^2) sahip olan Y-şekilli DBS elektrot tasarımın çıktıları, elektrik alanı ve biyoısı (ht) sonuçlarıyla beraber kullanımda olan mevcut elektrot performansıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, tasarlanan elektrotların biyoısı performansı da yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, değerlendirilmiştir.

Bu tez kapsamında, yeni Y-şekilli elektrot, Tinkercad adlı çevrimiçi modelleme aracı kullanılarak tasarlandı. Oluşturulan model daha sonra sonlu elemanlar analiz programına aktarıldı ve burada iki temel analiz gerçekleştirildi: Elektrik Akımı ve Biyoısı Transferi (ht).

Bu çalışmalar dört farklı uyarım geometrisiyle test edildi: Monopolar (tek kutuplu), Bipolar (çift kutuplu), Tripolar (üç kutuplu) ve Quadripolar (dört kutuplu). Yapılan analizlerde, yeni tasarlanan elektrotun sonuçları, kullanımda mevcut elektrotlarla karşılaştırıldı. Karşılaştırmalar sonucunda, Y-şekilli elektrotun birçok açıdan daha avantajlı özellikler sunduğu görüldü.

Öncelikle, Y-şekilli elektrotun kesit alanı yalnızca 1.056 mm^2 olduğı için beyin dokusuna verilen zarar en aza indirilmektedir. Karşılaştırmak gerekirse, şuan kullanımda olan mevcut elektrotların kesit alanı 5.064 mm^2 dir. Ayrıca bu çalışmada tasarlanan elektrot 36 adet temas noktasına sahip olup; bu sayı, mevcut elektrotlardaki 4 veya 8 temas noktasına göre oldukça yüksek alınmıştır. Temas yüzeyleri tam dikdörtgen biçiminde tasarlanmış olup (1.8 mm uzunluk, 0.4 mm genişlik), bu da elektrik alanın daha dikey ve odaklı bir şekilde yayılmasını sağlamaktadır. Kullanımda olan mevcut elektrotların temas yüzeyleri ise genellikle silindirik ve daha kısa (1.5 mm uzunlukta) olmaktadır. Bu dikdörtgen yapı ve temas noktalarının birbirinden ayrılmış yerleşimi sayesinde, Y-şekilli elektrot hem "ring" modunda (halkasal uyarım), hem de "directional" modda (yönlü uyarım) kullanılabilmektedir. Y-şekilli elektrotun bu yapısal avantajı, elektriksel enerjiyi hedef bölgeye daha hassas biçimde iletebilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu durum, hedeflenen nöral yapıların daha etkin ve güvenli bir biçimde uyarılabileceği anlamına gelmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, Y-şekilli elektrot, konvansiyonel silindirik elektrotlara kıyasla daha kontrollü, odaklı ve tercih edilebilir bir stimülasyon profili sunmaktadır.

Ayrıca, Y-şekilli elektrotun tüm test senaryolarında çevresel dokulara daha yüksek enerji yoğunluğu iletim kapasitesi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu özellik, DBS sistemlerinde kullanılan İmplante Edilmiş Pulse Üreteçleri açısından daha düşük enerji tüketimiyle aynı klinik etkinin sağlanabileceğini göstermektedir. Bu durum, cihazın batarya ömrünü uzatarak cerrahi müdahale ihtiyacını azaltabileceğini düşündürmektedir. Ek olarak, Y-şekilli elektrotun geometrisi, kompakt boyutları ve daha küçük temas yüzeylerine sahip olması, testlerde çevredeki dokularda oluşan ısı miktarını mevcut elektrotlara kıyasla düşürmüştür. Isı oluşumundaki bu azalma hem doku bütünlüğünü korumak hem de inflamatuar yanıt riskini azaltmak açısından klinik olarak önemlidir.

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, Y-şekilli elektrot tasarımı, mevcut DBS elektrotlarına alternatif olarak öne çıkmakta; özellikle de istenmeyen yan etkileri azaltma, enerji tasarrufu sağlama ve hedefe odaklı uyarım kapasitesiyle nöro stimülasyon alanında önemli bir katkı sunma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir

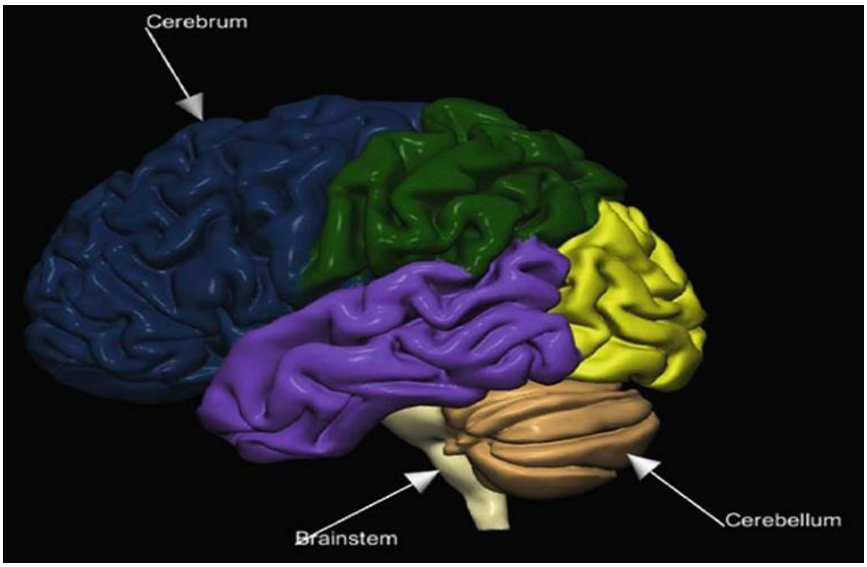
2. DERİN BEYİN STİMÜLASYONU NEDİR?

DBS tedavisi 19. yüzyılda hayvanların serebral korteksi üzerinde uygulanan çeşitli deneylerle başlamıştır. Daha derin beyin bölgelerinin uyarılması, ilk stereotaktik çerçevenin geliştirilmesinden sonra 1900'lerin başlarında başlatıldı. 1974'lerde X-ışınlarının tıbbi amaçlı kullanımı, derin beyin stimülasyonu sürecinde doktorların hedefleri lokalize etme yeteneklerini geliştirdi. Albe Fessard ve ark., 1963 yılında yaptıkları çalışmada ventral intermediate talamik çekirdeğin yüksek frekanslı (~100-200 Hz) elektriksel uyarımının Parkinson titremesini önemli ölçüde hafifletebileceğini bildiren ilk kişilerdi [4,5]. 1969'lara gelindiğinde Levodopa'nın Parkinson hastalığı semptomlarını iyileştirdiği kanıtlandı ve stereotaktik cerrahi gözden düştü [6]. 1987-2000 yılları arasında farklı bilim insanları ve farklı beyin cerrahları DBS'nin hareket bozukluğu hastalarının tedavisindeki rolüyle ilgili makaleler yayınladılar. Örneğin, 1987'de Benabid ve meslektaşları, talamotomi yerine titreme hastalarında talamik DBS'nin kullanılabileceğini açıklıyor. 1992'de Laitinen ve meslektaşları, ileri PD'li hastalar için Leksell pallidotomi tekniğini yeniden uygulamaya koydular. 1998'de Limousin ve arkadaşları bilateral Subthalamic nucli, DBS'nin güvenliğini ve etkinliğini ve ileri PD hastalarında dopaminerjik ilaçların azaltılmasındaki potansiyelini belgelediler. 2000'li yıllarda Coubes et al distoni hastaları için (GPi) DBS verilerini sundular [6,7]. 2002 yılında DBS, Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi tarafından PD tedavisi olarak onaylandı [8]. O tarihten bu yana PD ve esansiyel tremoru olan 40.000'den fazla hasta DBS ile tedavi edildi [9]. Sonuç olarak, tedavi başarısı sonuçları DBS'nin farklı nörodejeneratif hastalıkların tedavisinde kullanılma potansiyelini ortaya koymuştur. Günümüzde DBS, distoni ve obsesif kompulsif bozukluk (OKB) tedavisinde kullanılmaktadır. Bunun yanında DBS'nin şiddetli obezite tedavisinde kullanılabileceğini araştıran bazı araştırmalar da mevcuttur [10].

2.1 Beyin Anatomisi

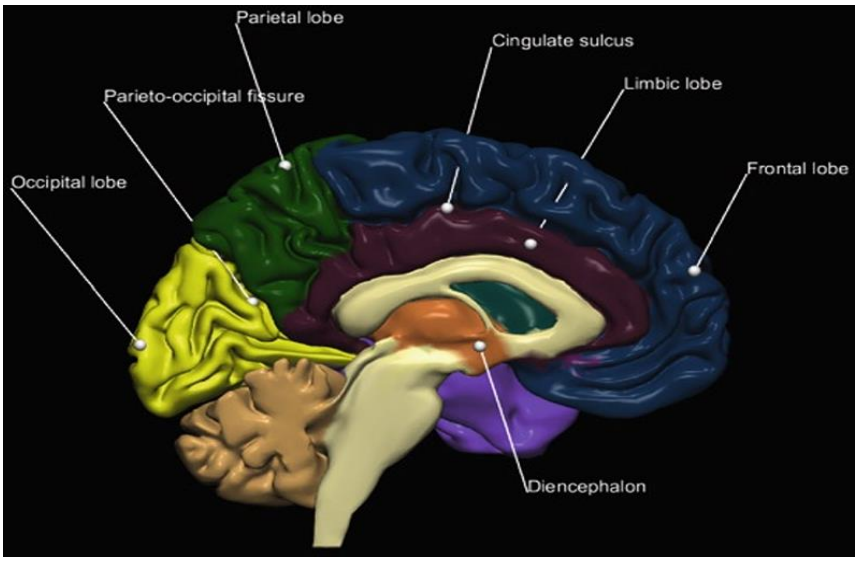
Beyin evrendeki en karmaşık organdır. Ve omurilikle birlikte insan merkezi sinir sisteminin (Central nervous system CNS) bir parçasıdır. Üç ana bölüme ayrılmıştır:

- Serebrum
- Serebellum (küçük beyin)
- Beyin sapı



Şekil 2. 1. Beyin anatomisi (Serebrum, serebellum, beyin sapı) [11]

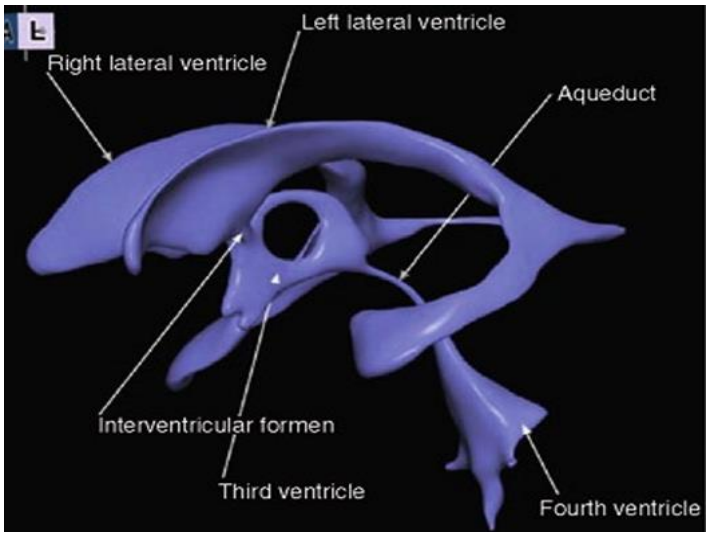
Serebrum, beynin en büyük kısmıdır ve üç bölümden oluşur. Bunlar sağ ve sol beyin yarım küreleri, ara beyin ve koyu gri çekirdeklerdir. Beynin en büyük kısmı, serebral korteks adı verilen dış gri maddeden ve derin gri çekirdekleri çevreleyen iç beyaz maddeden oluşan sağ ve sol serebral yarım kürelerdir. Beyin yarım küreleri: frontal lob, temporal lob, parietal lob, oksipital lob ve limbik lob olmak üzere beş loba ayrılır. Loblar kısmen sulkuslar/fissürlerle sınırlıdır. Yarım kürede iki sulkus vardır, merkezi sulkus frontal lobu parietal lobdan ayırır, ve singulat sulkus frontal lobu limbik lobdan ayırır. Buna ek olarak, yarımkürede yeralan fissürlar, Sylvian (lateral) fissür temporal lobu frontal ve parietal loblardan ayırırken, parieto-oksipital fissür ise parietal lobu oksipital lobdan ayırmaktadır [11].



Şekil 2. 2. Beyin lobları (Frontal, Temporal, Parieal, Oksiptal, Limbik) [11]

Diensefalon; Talamus, Subtalamik çekirdeği de içeren Subtalamus ve Hipotalamus'u içerir. Beyincik, beynin altında ve beyin sapının arkasında bulunan, sağ ve sol beyin yarım kürelerinden ve bunları birleştiren orta hattan oluşan kısımdır. Beyin sapı, serebrumun altında ve beyinciğin önünde bulunan, orta beyin, pons ve medulla olmak üzere üç bölümden oluşan kısımdır.

Beyinde birbiriyle bağlantılı dört adet ventrikül bulunur ve bunlara ventriküler sistem adı verilir ve içleri beyin omurilik sıvısı (BOS) ile doludur. Bu ventriküller sol ve sağ lateral ventrikül, üçüncü ventrikül ve dördüncü ventriküldür. BOS, bir tür lenf sıvısıdır çünkü içeriğinin üçte ikisinin lenfosit hücreleri ve üçte ikisinin monosit hücreleri olduğu açıktır. Bu nedenle plazmanın ultrafiltratı olan lenf sıvısı olarak kabul edilir. Oysa kan esas olarak granülosit hücreleri içerir [12].



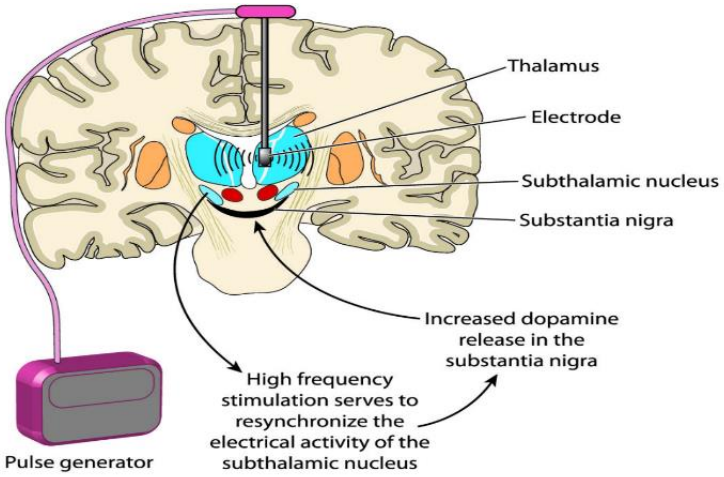
Şekil 2. 3. Ventrikül sistem [11]

2.2 Derin beyin stimülasyonunda hedeflenen ana çekirdekler

Stereotaktik ve fonksiyonel nöroşirürji, hareket bozukluklarını (özellikle Parkinson hastalığı, epilepsi ve ruhsal bozukluklar) tedavi etmek için beyindeki çeşitli yapıları hedef alır. Bu yapılar çoğu subtalamik çekirdeğin talamusudur. Bu çekirdeklerin küçük boyutlar nedeniyle STN ve talamustaki VIM gibi yapılar ile Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) üzerinde net bir şekilde ayrıt edilmemesi bölgenin hassas bir şekilde hedeflenmesi oldukça zordur [21]. Ayrıca çekirdeklerin şekli ve yerleşimindeki değişkenlik nedeniyle bölgenin hedeflenmesi daha da karmaşık hala getirmektedir. Bu zorlukların üstüne gelebilmek için ve bu yapıların daha doğru bir şekilde hedeflenmesini iyileştirmek için farklı çalışmalar yürütülmüştür [21, 22]. Hedeflenen çekirdeklerin seçimi esas olarak tedavi edilecek duruma bağlıdır. DBS tedavisinde hedeflenen başlıca çekirdekler şunlardır:

- Subtalamik çekirdeği STN
- Globus palidus intena GPI
- Ventrointermediate çekirdekler VIM

STN ve GPI, Parkinson hastalığını tedavi etmek için hedeflenen çekirdeklerdir, VIM ise titremeyi tedavi etmek için hedeflenen çekirdeklerdir [16,19].



Şekil 2. 4. DBS sisteminde hedeflenen çekirdekler (STN, GPI, VIM) [38]

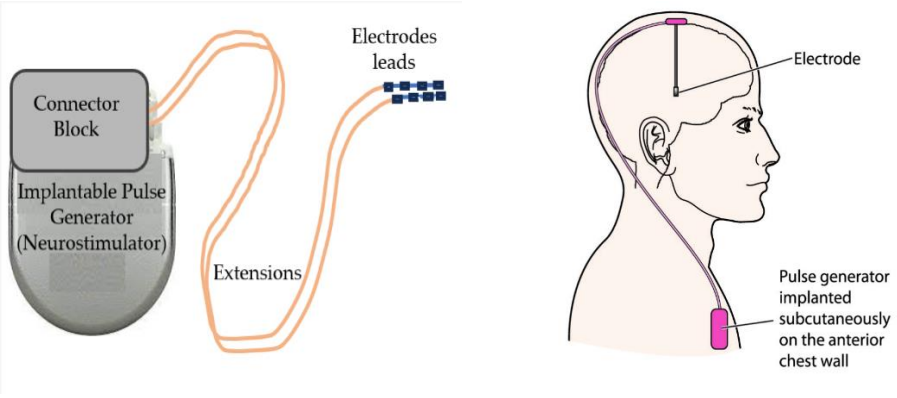
DBS genellikle Parkinson hastalığı, esansiyel tremor ve distoniyi tedavi etmek için kullanılır. Parkinson hastalığının %3-5'inin Parkinson hastalığı genleri olarak bilinen genetik nedenlerle bağlantılı olduğu açıklanmaktadır [13]. Ancak Parkinson hastalığına neden olan yaşlanma ve çevresel faktörler gibi çeşitli risk faktörleri bulunmaktadır [14]. Substantia nigra pars compacta'daki (SNc) nöronal kayıp ve bununla ilişkili striatal dopamin içeriğinin kaybı ve α-sinüklein agregatlarını içeren hücre içi kapanımların PD'nin klasik motor özelliklerinin sorumlusu olduğu düşünülmektedir [14, 15]. PD'nin nöropatolojik tanısı, belirgin dopaminerjik nöronal kaybın ve SNc'de Lewy cisimlerinin varlığının tespitini gerektirir [14].
Yapılan bir çalışma, bazal ganglionlardaki (vücudun motor kontrolünden sorumlu beyindeki bir çekirdek grubu) bozukluk nedeniyle beynin nöronlardaki kimyasal ve elektriksel işlevi kontrol edememesi durumunda, hareket bozukluğu, esansiyel titreme, distoni, bradikinezi ve katılık gibi farklı motor semptomlarına yol açtığını göstermiştir [17].
Ancak son zamanlarda psikiyatrik hastalıkların tedavisinde DBS uygulamasının kullanımının faydalarına odaklanan farklı deneme çalışmaları bulunmaktadır. Obsesif kompulsif bozukluk (OCD) ve tedaviye dirençli depresyon (TRD) bunlara örnek gösterilebilir. Bu çalışmalarda DBS uygulamasıyla hastalarda ventral kapsül/ventral striatumu (VC/VS) hedef alınmıştır [20].

2.3 Derin Beyin Stimülasyonun Bileşenleri

DBS, beyindeki belirli bir bölgeyi hedef alarak, cerrahi olarak vücuda yerleştirilen bir sistemdir. Sistem, kalp piline benziyor ancak elektrik sinyallerini kalbe göndermek yerine beyne gönderilmektedir. DBS sistemi genel olarak beyin pili olarak da anılır [17]. DBS

sistemi üç ana bileşenden oluşur, entegre darbe üreteci (aynı zamanda nörostimülatör olarak da bilinir) deri altına, göğüs bölgesine, köprücük kemiğinin yakınına yerleştirilmiştir, dalga formu üreteci ve güç kaynağı olarak görev yapar ve beyin dokusuna yerleştirilen bir elektroda bağlanan bir tel (ayrıca uzantı olarak da adlandırılır) aracılığıyla elektrik darbeleri gönderir [17]. Entegre Darbe Jeneratörü ise, DBS nörostimülasyon sisteminin beyni ve güç kaynağıdır. IPG'nin temel fonksiyonu, beyin içindeki elektrot uçlarına uzantılar aracılığıyla elektrik sinyalleri göndermektir.

IPG, tedavi sırasında her şeyin sorunsuz çalışmasını sağlamak için birlikte çalışan bir pil, bir güç modülü, merkezi işlem birimi (CPU), mikroişlemci de dahil olmak üzere küçük bilgisayarlardan oluşur. CPU ve mikroişlemci, DBS cihazını kontrol eder, açar veya kapatır, elektrik darbeleri gönderir, ne kadar iyi çalıştığını kontrol eder ve hatta bir doktorun programlama aracı gibi vücudun dışındaki cihazlarla iletişim kurar [18]. Uzatma, baştan başlayarak boyun ve omuz boyunca deri altından geçen, ucu IPG'ye bağlayan ince, esnek, yalıtımlı bir teldir. Kafatasında açılan bir delikten cerrahi olarak yerleştirilen ve hareket bozukluğunun söz konusu olduğu beyin bölgesine dikkatlice yerleştirilen sistemin bir parçası elektrot kablosu adı verilen ince, yalıtımlı bir teldir. Elektrot kablosunun yerleştirilme işlemi detaylı MR görüntüleri eşliğinde gerçekleştirilir. Kablo beyin dokusuna yerleştirildiğinde, yakındaki sinir hücrelerine ve liflere küçük elektrik darbeleri gönderir. Bu sinyaller, titreme veya sertlik gibi semptomları azaltarak o bölgedeki beyin aktivitesini düzenlemeye yardımcı olur [18].



Şekil 2. 5. DBS sistemi, IPG, Uzatma kabloları, Elektrot uçları [18]

DBS elektrotları genellikle silindirik formda olup, yaklaşık 1.27 mm çapındadır. Bu elektrotları genellikle çevresel halka biçiminde tek yönlü (izotropik) stimülasyon sağlarken,

günümüzde geliştirilen yönlü (directional) elektrotlar, stimülasyonu belirli yönlere odaklayarak hem tedavi etkinliğini artırmakta hem de yan etki riskini azaltmaktadır.

DBS elektrotları, biyouyumluluk açısından son derece hassas bir yapıya sahip olmak zorundadır. Platin, platin-iridyum ve altın gibi soy metaller hem korozyona dayanıklı hem de dokulara zarar vermeyecek iletken malzemelerdir. Yalıtım malzemesi olarak silikon, poliüretan veya Parylene-C gibi polimerler tercih edilmektedir [39].

Yeni nesil araştırmalarda, PEDOT gibi, karbon nanotüpler ve nanoyapılı yüzey modifikasyonları sayesinde hem elektrot direnci düşürülmekte hem de sinir-doku etkileşimi iyileştirilmektedir Elektrotların temas noktalarında yaygın olarak platin veya platin-iridyum alaşımları tercih edilir. Bu malzemeler, yüksek iletkenlikleri ve biyouyumlu yapıları sayesinde, vücut içinde uzun süreli kullanımda dayanıklılık sağlar. Son yıllarda altın, karbon nanotüpler ve iletken polimer kaplamalar (örneğin PEDOT) gibi alternatif malzemeler üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Yalıtkan yapı için ise genellikle silikon, poliüretan veya Parylene-C gibi biyouyumlu ve esnek polimerler kullanılır. Bu malzemeler hem elektriksel izolasyon sağlar hem de mekanik dayanıklılığı artırır.

Elektrotlarının üretimi, hassas mühendislik ve ileri malzeme teknolojilerini bir araya getiren çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreçte sıklıkla aşağıdaki üretim teknikleri kullanılır:

- Mikro-işleme teknikleri: Fotolitografi, plazma ile aşındırma ve lazer kesim gibi yöntemlerle mikro ölçekli yapılar hassas bir şekilde oluşturulur.
- Elektrokaplama: Temas yüzeylerinin yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılır.
- Montaj ve paketleme: İletken ve yalıtkan bileşenler birleştirilerek son haline getirilir.

IPG üretimi yüksek hassasiyet ve biyouyumluluk gerektiren bir süreçtir. Genel üretim adımları şunlardır:

- Elektronik devre kartlarının tasarımı ve montajı**:** Ultra düşük güç tüketimli mikroişlemciler kullanılarak, sinyal üretimi ve batarya yönetimi birimleri entegre edilir.
- Batarya montajı**:** Şarj edilebilir modellerde endüktif bobinler yerleştirilir. Güç yönetimi devreleri, aşırı şarj ve deşarjı önleyici sistemlerle donatılır [40].
- Titanyum kapsülleme ve lazer kaynak**:** Cihazın tüm bileşenleri, CNC ile işlenmiş titanyum kasaya yerleştirilerek sızdırmaz biçimde lazer kaynak ile kapatılır.

- Yüzey işlemleri**:** Titanyum yüzeyin doku uyumluluğunu artırmak için parlatma, anodizasyon veya pürüzlendirme işlemleri uygulanabilir.
- Kalibrasyon ve yazılım yüklemesi**:** Cihaza gerekli yazılımlar yüklenir ve programlanabilir parametreler tanımlanır.
- Kalite kontrol testleri**:** Elektriksel performans, pil ömrü, RF ile iletişim ve hermetik sızdırmazlık testleri gerçekleştirilir [41].

2.4 Derin Beyin Stimülasyon Cerrahisinin Uygulanması

Özellikle düzenli ilaç kullanan yaşlı hastalar için, DBS ameliyatının hazırlığı ameliyat gününden 7 ila 10 gün önce başlar. Stereotaktik prosedürler sırasında herhangi bir komplikasyondan kaçınmak için günlük kullanılan bazı ilaçların kesilmesi gerekir. Örneğin, normal kan pıhtılaşma fonksiyonunun geri dönmesini sağlamak için ameliyattan 7 ila 10 gün önce kesilmesi gereken antikoagülan ilaçlar bunlara örnek gösterilebilir. Arteriyel hipertansiyon ilacı, intrakranial kanama riskini artırabileceğinden ameliyattan 1 hafta önce kesilmelidir. Antiparkinson ilaçlar genellikle ameliyattan önceki gece alınır; böylece ameliyat sırasında Parkinson hastalığının semptomları tespit edilir [19]. Ameliyat öncesi hazırlık işlemleri tamamlandıktan sonra hasta hastaneye yatırılır. Bazı merkezler, ailenin katılık, titreme ve diğer Parkinson belirtilerine yardımcı olmak için hastayı ameliyattan önceki gece hastaneye yatırır. Bazı merkezler ise ameliyat günü sabah hasta kabul etmektedir. Cerrahi yaklaşım hastalığın semptomlarına ve hastanın cerrahiye toleransına göre değişmektedir. Ameliyat unilateral veya bilateral olabilir. Unilateral, DBS lead'i ve IPG'nin aynı gün içerisinde implante edilmesini içerirken, bilateral, DBS lead'inin 1. günde implante edilmesi ve 2. gün farklı evrelerde IPG'nin implant edilmesini içerir. Cerrahi prosedür, sterotaktik başlık uygulamasıyla başlayıp MRI ve BT görüntülemesiyle devam eden farklı aşamaları içerir. Daha sonra; tedavi sırasında kullanılan IPG markasına ve elektrot kablosuna bağlı olarak farklı yazılım programları kullanılarak hedef seçme işlemi gerçekleştirilir. Hedef seçildikten sonra ameliyathanede pozisyonlama ve anestezi işlemi gerçekleştirilir. Hasta anestezi altındayken stereotaktik yaklaşım başlatılır ve stereotaktik ark, kafatasındaki kesiyi ve burr deliğini işaretlemek için kullanılır. Daha sonra DBS elektrot implantasyonu ve test ile elektrofizyolojik haritalama başlatılır ve ardından IPG implantasyonu yapılır. Elektrodun seçilen yörüngede yer alıp almadığını doğrulamak için X-ışını sistemi veya floroskopi kullanılır. IPG programlama değerinin ayarlanmasında mikroelektrot kayıt ve uyarımı

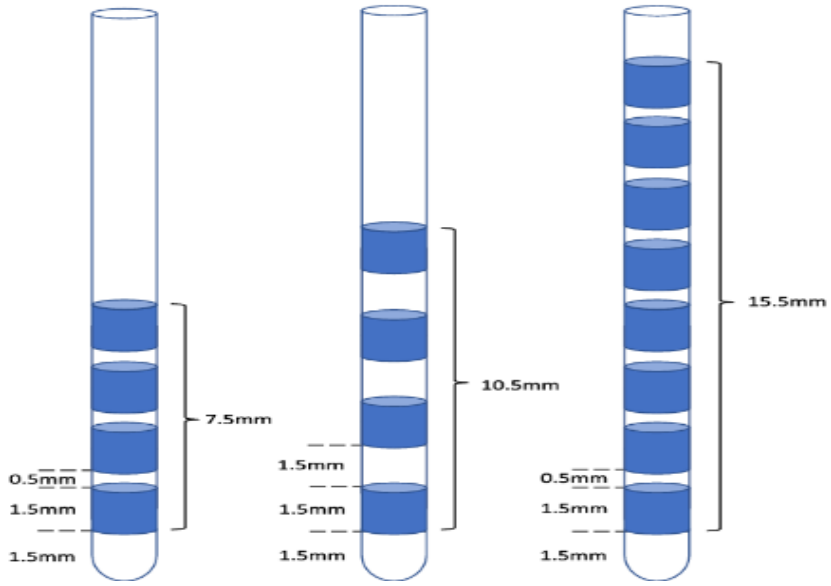
kullanılır. Genellikle 130 Hz frekanslı 4 V darbe, 60-90 darbe genişliği ve daha az yan etkiye sahip, geniş terapötik pencereli bir bipolar sistem kullanılmaktadır [19].

3. DERİN BEYİN STİMÜLASYON ELEKTROT VE IPG TASARIMI VE YENİLİKLERİ

DBS tedavisinde henüz istenmeyen ve üstesinden gelinemeyen farklı yan etkiler de mevcuttur. Dolayısıyla, daha iyi sonuçlar elde etmek için tedavinin donanım ve yazılımında çeşitli yeniliklere ihtiyaç duyulmuştur. Donanım yenilikleri arasında elektrot kablosu ve IPG geliştirmeleri yer alıyor. Yazılımsal yenilikler arasında ise tedavinin görüntülenmesi ve programlanması yöntemleri yer almaktadır.

3.1 Elektrot Kablosunda Yapılan Yenilikler

Elektrot kablosu elektriksel uyarıları beyin yapısına iletir ve bu onu DBS sisteminde çok önemli bir parça haline getirir. Klinik olarak kullanılabilen elektrot, biyouyumluluk, inertlik, dayanıklılık, zaman içinde kararlılık, cerrahi uygulanabilirlik, iyi iletkenlik, elektriksel özellikler, işlenebilirlik, uygun akım iletimi, mekânsal yapılandırma ve MRI uyumluluğu gibi kritik özelliklere sahip olmalıdır. Elektrodun tasarımı ve yapılandırması beyindeki akım yönlendirmesini etkiler. Bu nedenle farklı elektrot tasarımları geliştirilmiş ve DBS'de kullanılmak üzere onaylanmıştır. Çoğu DBS elektrodu, poliüretan kılıf içinde bulunan platin-iridyum tellerden ve nikel alaşımlı bağlantılardan oluşur. Standart elektrot şekli, dört elektrot kontağı olan 1,27 mm çaplı bir probdur. Her silindirik temas 1,5 mm uzunluğunda ve 0,5 mm veya 1,5 mm aralıklıdır. Bir başka elektrot tasarımında ise aynı çapa (1,27 mm) sahip ve sekiz elektrot kontağından oluşan bir prob dizaynı uygulanmıştır. Bu tasarımda, her temas noktasının 1,5 mm uzunluğunda ve noktaların arasında 0,5 mm aralığı mevcuttur. 4 veya 8 silindirik temaslı bu üç farklı elektrot tasarım şeması, elektrotun ucundan itibaren 7,5 ila 15,5 mm'lik bir dikey mesafeyi kaplayan değişken aralıklara sahiptir (Şekil 3.1) [23].

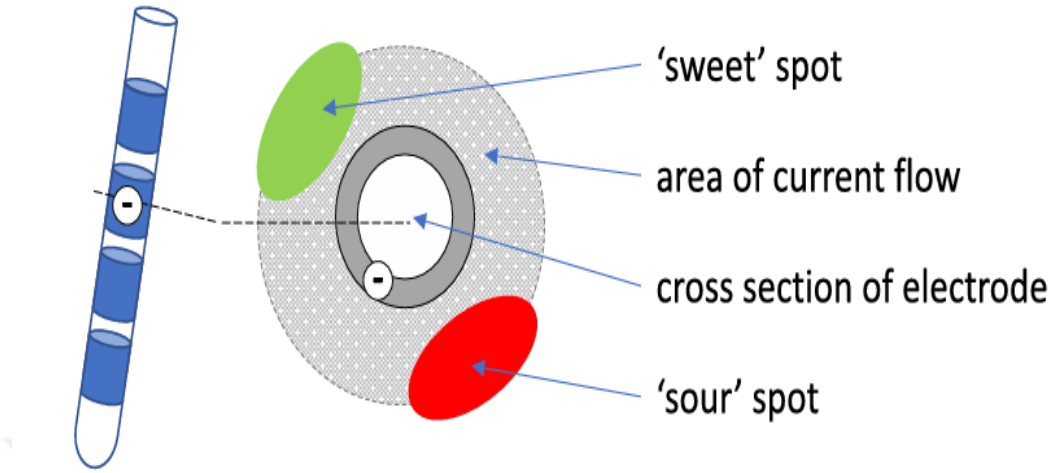


Şekil 3.1. Değişken aralıklı 4–8 silindirik temaslı en yaygın DBS elektrotları [23]

(Halka modu) adı verilen bu üç elektrot, yatay düzlemde radyal akım yayılımı (çok yönlü uyarım) oluşturur ve akımın beyindeki hedeflenen doku dışına yönlendirilmesini önlemek için x ve y yönlerinde doğru konumlandırılması gerekir. (Şekil 3.2), DBS uygulamalarında kullanılan halka modu (ring mode) elektrot tasarımını ve elektrik akımının yönlendirilmesini açıklamaktadır. Özellikle beyin içi hedef bölgelerde istenmeyen bölgelere uyarım gitmesini önlemek amacıyla geliştirilmiş bir yönlendirme tekniğidir. Şeklin solunda yer alan uzun mavi yapı, DBS elektrotunun bir kesitini göstermektedir. Üzerinde yer alan halkasal şeritler, stimülasyon yapabilen temas noktalarını göstermektedir. Şeklin ortasında dairesel görünüm ise bu elektrotun enine kesiti, yani beynin içine yerleştirilmiş olan elektrotun çevresindeki alanı göstermektedir. Elektrot çevresindeki gri alan, stimülasyon sırasında akımın yayıldığı genel alanı temsil eder. Sweet' Spot (Tatlı Nokta) olarak adlandırılan, yeşille gösterilen bölge, akımın hedeflenen dokuya başarıyla ulaştığı, terapötik etki yarattığı bölgedir. Bu noktaya doğru yönlendirilen akım, tedavi edici etkiyi maksimize ederken yan etkileri minimize eder. Bu nedenle elektrot pozisyonlaması yapılırken ve halka modu aktiflenirken, akımın bu bölgeye yönlendirilmesi amaçlanır. Sour' Spot (Ekşi Nokta) denilen kırmızı bölge ise, akımın istenmeyen bölgelere yayıldığı, yan etkilere (örneğin istemsiz hareketler, duyu bozuklukları) yol açabilecek bölgedir. Bu alanlardan uzak durmak için yönlendirilmiş stimülasyon (örneğin bipolar veya bölgesel uyarım) kullanılır.

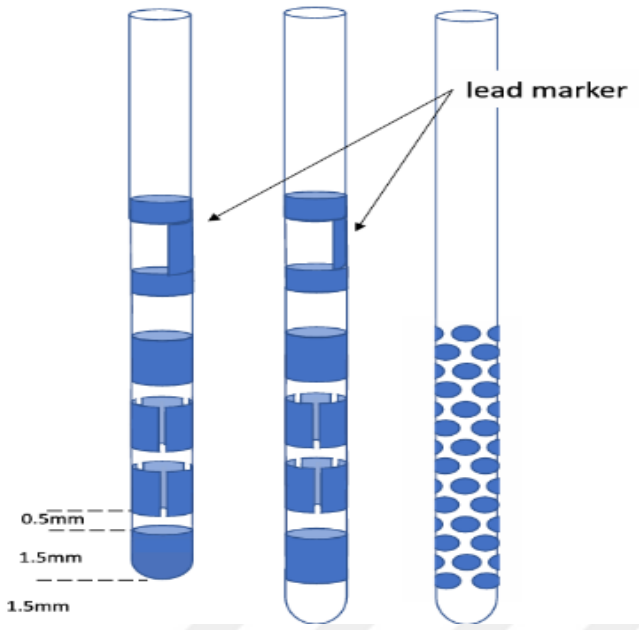
Geleneksel DBS sistemlerinde akım 360° her yöne dağılır (omnidirectional). Halka modu ise stimülasyonu belirli bir yöne odaklayarak, hedef dışı beyin dokusuna etkiyi azaltır. Bu mod,

özellikle hedeflemenin zor olduğu derin beyin bölgelerinde daha güvenli ve etkili stimülasyon sağlar. Aynı zamanda daha düşük voltajlarla çalışılarak batarya ömrünü artırabilir.



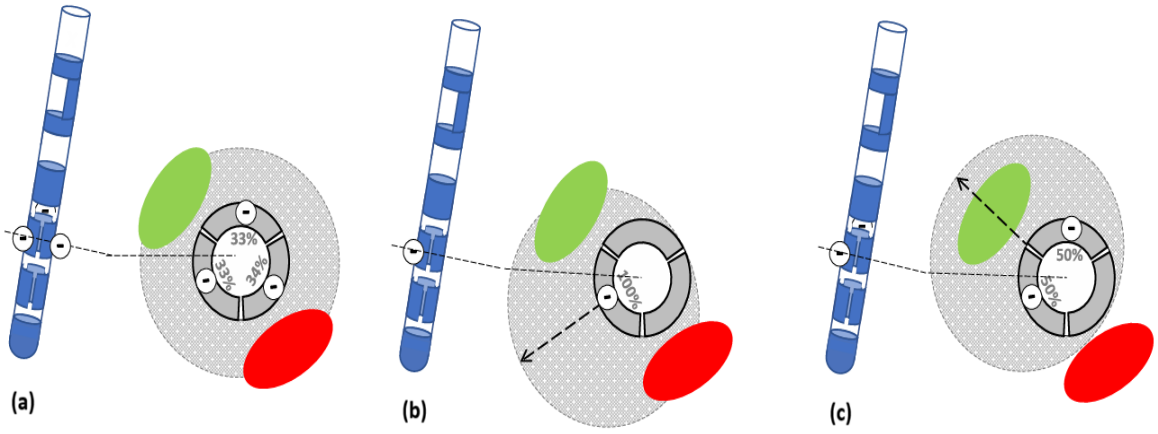
Şekil 3. 2. Halka modu elektrotta akım yönlendirmesi [23]

Akımın hedeflenen dokunun dışına yönlendirilmesi istenmeyen yan etkilere neden olacağından, beyin içindeki elektrik alanını kontrol etmek için yeni elektrot tasarımları ve şemaları geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Standart uçlu DBS'nin 20 yıl kullanılmasının ardında DBS'de kullanılmak üzere yeni bir elektrot şeması önerilmiştir. Yönlendirilmiş elektrot adı verilen bu elektrot ve yönlendirilmiş derin beyin stimülasyonu adı verilen dDBS tedavisi ise standart elektrotlu DBS'den farklıdır. Yönlü elektrotlar (directional electrode) akımın belirli yönlere odaklı bir şekilde iletilmesini sağlayarak, klasik halka (omnidirectional) elektrotlara kıyasla daha hassas ve hedefe yönelik stimülasyon sunar. Yönlendirilmiş iletkenin farklı prototiplerinden biri yaklaşık 0,8 mm çapında 40'a kadar küçük dairesel temasa sahip bir elektrottur. Diğer bir basit modelde ise, ortadaki iki temas halkasının 90° veya yaklaşık 120°'lik 3 ila 4 parçaya bölündüğü halka modlu elektrotlardan oluşmaktadır (Şekil 3.3) [24]. Görselde 3 farklı açıdan çizilmiş aynı yönlü elektrot gösterilmiştir. Elektrotun mavi bölgeleri stimülasyon kontaklarıdır (elektriksel temas noktaları), beyaz bölgeler ise yalıtılmış aralıklardır. Yönlü elektrotlarda ise her bir halkasal temas üçe bölünmüş halde olup, yalnızca belirli yönlere (örneğin medyal, lateral, anterior) stimülasyon yapılabilir. Bu da hedeflenen beyin bölgesine daha fazla doğrulukla uyarı verilmesini sağlar.



Şekil 3. 3. dDBS'de kullanılan yönlü elektrot [23]

Yönlü DBS kavramı, hedeflenen dokuya en yakın teması seçerek elektrik alan dağılımını kontrol etmektir (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4).



Şekil 3. 4. dDBS'de kullanılan Yönlü elektrotta akım yönlendirmesi [23]

Şekil 3.4a'da segmentli temasın tüm segmentleri aktive edildiğinde halka modlu temasın elde edildiği ve elektrik alanının derivasyonun her tarafına dağıldığı (omnidireksiyonel uyarım) gösterilmektedir. Segmentli temasın bir veya iki segmentini aktive ettiğimizde ise akım hedeflenen anatomik yapıya doğru tercihli açısal yönde enjekte edilecektir (Şekil 3.4-b,c). Bu iki elektrot tasarımının performansını ve akım yönlendirmesi yoluyla çok yönlü uyarıma bağlı

yan etkilerin ortadan kaldırılmasına olan etkilerini değerlendirmek amacıyla iki ayrı çalışma gerçekleştirilmiştir. Her iki tasarım da benzer klinik yönlendirme etkileri ortaya koymuştur [25, 26]. Başka bir çalışmada ise, dört halka temasına sahip standart bir elektrota dayanan segmentli halka mod elektrodu test edilmiştir. Bu tasarımda, elektrotun orta iki seviyesi, çevrenin yaklaşık 120°'sini kapsayan üç ayrı kontak şeklinde segmentlere ayrılmıştır. Çalışma, elektrik alanının açısal olarak yönlendirilmesinin daha iyi tolere edilen bir tedaviye olanak tanıyabileceğini ve aynı zamanda enerji tüketiminde tasarruf sağlayabileceğini göstermektedir [27].

3.2 IPG'de Yenilikler:

İmplante Edilebilir Puls Jeneratörü, DBS sisteminin donanımsal bir parçasıdır. Akımı üreten ve bunu sistemin diğer parçalarına ileten kısımdır. Tedavinin başarısında önemli rol oynar. IPG'nin içerisinde pil, güç modülü, CPU, program belleği ve mikroişlemci bulunmaktadır. Mikroişlemci, IPG'nin aktivasyon, deaktivasyon, darbe parametreleri, dahili tanılama ve DBS sisteminin harici parçalarıyla iletişim gibi tüm işlevlerini yöneten parçadır [28]. Günümüzde DBS tedavisinde kullanılan 10 farklı tipte IPG bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şarj edilebilir, bazıları ise şarj edilemezdir. Şekil 3.5'de, şu anda kullanılan IPG'ler gösterilmektedir.



Şekil 3. 5. Kullanımda mevcut IPG'ler ve özellikleri [28]

Kullanımda mevcut IPG'lerin özelikleri aşağıdaki Tablo da karşılaştırmalı olarak verilmiştir:

Tablo 3. 1. Kullanımda mevcut IPG'ler ve özellikleri [28]

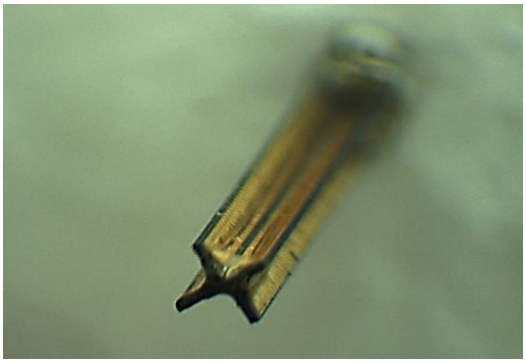
Model	St Jude (Abbott) Infinity 5	St Jude (Abbott) Infinity 7	Boston Scintific Versice PC	Boston Scintific Versice Cevia	Boston Scintific Versice Genus P5P18	Boston Scintific Versice Genus R16	Medtronic Activa PC	Medtronic Activa RC	Medtronic Activa SC	Medtronic Percept PC
Kanal sayısı	2	2	2	2	1/2	2	2	2	1	2
Ağırlık	49	58	55	26	58	27	67	40	44	61
Büyüklük (mm)	56*30*13	67*50*14	71*50*11	51*46*11	72*50*12	52*46*11	65*49*15	54*54*9	55*60*11	68*51*12
RC	No	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	No
Frekans oranı (Hz)	2-240	2-240	2-255	2-255	2-255	2-255	2-250	2-250	-250	2-250
Darbe genişliği	20-500	20-500	10-450	20-450	20-450	20-450	60-450	60-450	60-450	20-450
TF	MSS	MSS	A	A	A	A	IL	IL	IL	IL
CF	CA	CA	M/CC	M/CC	M/CC	M/CC	No	No	No	No
Yönlü elektrot	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No
MRI güvenliği	C	C	U	C	C	C	C	C	C	C
LFP algılama	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes

Klinik uygulamalarda, IPG'lerde karşılaşılan en önemli zorluklar pil ömrü ve değiştirme ameliyatlarıdır. Pil ömrü, pilin uyarım için istenen akımı sağladığı süredir. IPG değiştirme ameliyatından kaçınmak için DBS alanında pil ömrünün en üst düzeye çıkarılması öncelikli olmalıdır. Diğer zorluklar ise; IPG'lerin boyutu, IPG'lerin şarj edilmesi, MRI uyumluluğu, sınırlı sayıda kanal, yerel alan potansiyeli (LFP) algılama kalitesi ve uzaktan DBS programlamadır. Ancak tüm bu zorluklar, sahada geliştirilmeye açık konulardır.

4. Y-ŞEKİLLİ DERİN BEYİN STİMÜLSSYONU ELEKTROT TASARIMI

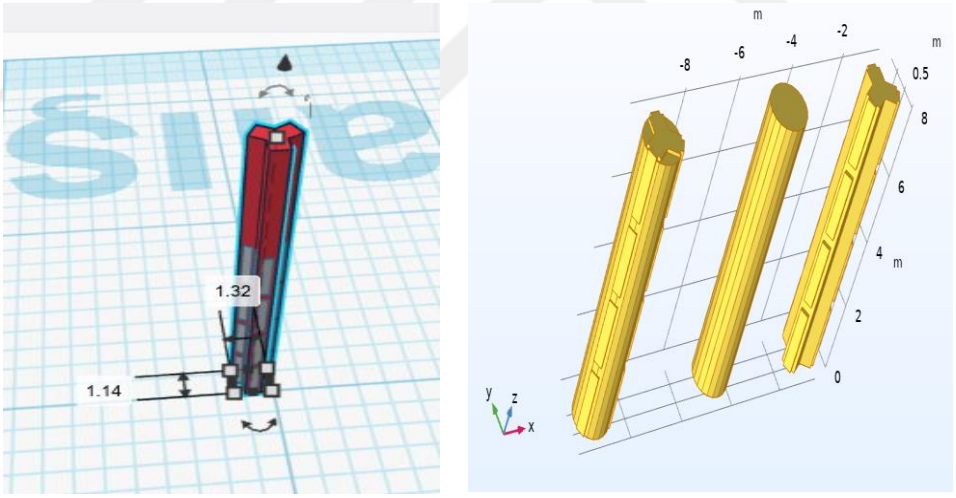
DBS 'te şu anda kullanılan elektrotların tamamı silindirik yapıdadır ve büyük temas nokta alanlarına (elektrik akımının anatomik dokuya iletildiği alan) sahiptir. Bununla beraber bütün elektrolarda üretildiği teknolojisi ile 8 kablodan 4 veya maksimum 8 temas noktasını elde ediliyor. Bu elektrotlarda temas noktanın uzunluğu 1.5 mm ve temas noktanın genişliği 3.9878 mm veya 1.3292 mm olarak elektrodun türüne bağlı olarak değişebilmektedir. Bu şekilde kullanımda mevcut olan elektrotların temas noktaların alanı 3.9878 * 1.5 = 5,9817 mm^2 veya 1.3292 * 1.5 = 1.9939 mm^2 elde edilmektedir. Bu temas noktaları, büyük boyutları nedeniyle daha geniş bir alana elektrik sinyali iletebilmekte; uzunluklarına oranla yüksek genişlikleri sayesinde hem yatay hem de dikey yönde elektrik alan dağılımı görece daha fazla olabilmektedir. Ancak bu geniş alan dağılımı, istenmeyen yan etkilerin artmasına yol açabilmektedir [29]. Ayrıca, elektriksel olarak iletilen uyarım, hedeflenen beyin çekirdeklerinin boyutuna kıyasla oldukça büyük kalmaktadır. Bu durum, elektrotun girdiği beyin dokularına zarar verme riskini artırmaktadır.

Bu iki yaygın elektrot tasarımının dışında, yine silindirik yapıda ancak farklı temas noktası geometrisine sahip başka bir elektrot da tasarlanmış; ancak çeşitli nedenlerle klinik kullanımda yer bulamamıştır. (Şekil 3.3), bu farklı tasarımlara ait üç elektrot tipini gösterilmiştir. Ek olarak hem kesit alanını azaltmak hem de temas noktasını artırmak amacıyla artı (+) işaretli bir elektrot tasarımı geliştirilmiştir (Şekil 4.1). Bu elektrot, toplamda 1760 temas noktasına sahiptir [37]. Ancak bu kadar yüksek sayıda temas noktasının bulunması, ameliyat sırasında programlama süresinin çok uzun olmasına ve dolayısıyla operasyon süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, söz konusu elektrot henüz klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmamıştır.



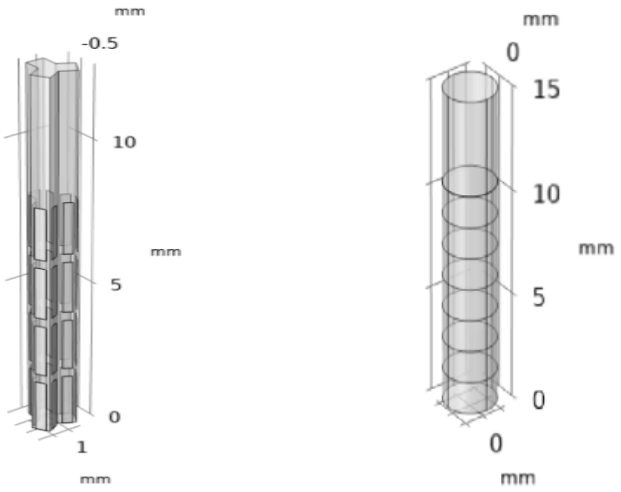
Şekil 4. 1. µDBS elektrot [37]

Bu gerekçeler doğrultusunda bu tezin amacı, daha fazla sayıda ancak daha küçük yüzey alanına (uzun ve dar) sahip temas noktaları içeren bir elektrot tasarlamak ve bu tasarımı, sonlu elemanlar modelleme programı aracılığıyla mevcut elektrotlarla karşılaştırmaktır. Bu kapsamda geliştirilen Y-şekilli elektrot tasarımıyla hedeflenen; elektrotun kesit alanını azaltmak, temas noktalarını tam dikdörtgen formda tasarlamak ve temas noktası sayısını artırırken böylece hastanın maruz kaldığı uygulama süresini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu elektrot tasarımında her bir temas noktası, z ekseninde uzun, x ve y eksenlerinde dar olacak şekilde tam dikdörtgen şeklindedir. Bu dikdörtgen form, dikey elektrik alan dağılımını artırmak, yatay elektrik alan yayılımını ise azaltmak amacıyla tercih edilmiştir. Bu şekilde, elektrik alan dağılımının daha yönlü olmasıyla yan etkilerin azaltılabileceği öngörülmektedir. Bu amaçla, beyin dokusuna daha az zarar vermesi için 1.056 mm² kesit alanına sahip Y-şekilli bir elektrot tasarlanmıştır. Elektrot, her biri 0,72 mm² alanına sahip 36 adet tam dikdörtgen temas noktasından oluşmaktadır. Tasarım, Tinkercad yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve sonlu elemanlar modelleme programına aktarılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir.



a **b**

Şekil 4. 2. a. Tinkercad ile tasarlanan Y-şekilli elektrot, **b.** Tinkercad ile tasarlanan Y-şekilli ve kullanımda mevcut olan silindirik geometrili elektrotlar



a **b**

Şekil 4. 3. a. Y-şekilli elektrot ve boyut parametreleri, **b.** Kullanımda mevcut olan silindirik geometrili elektrot ve boyutları

4.1 Tasarlanan Y-şeklinde Elektrodun Özellikleri ve Mevcut Silindirik Geometriye Sahip Elektrotlarla Karşılaştırılması

- Kesit Alanı: Tasarlanan Y-şekilli elektrotun kesit alanı, mevcut silindirik elektrotlara kıyasla daha küçüktür. Hâlihazırda kullanılan elektrotun yarıçapı r=1,27 mm olup, kesit alanı $A=\pi \cdot r^2=5{,}064\ mm^2$ olarak hesaplanmaktadır. Y-şekilli elektrotun ise yaklaşık kesit alanı A=(3*(0.6*0.5))+((0.6) 2*√3/4)=1.056 mm^2 dir. Bu tasarımla birlikte elektrotun kesit alanı 5,064 mm²'den 1.056 mm²'ye düşürülerek beyin dokusuna verilen fiziksel hasarın azaltılması hedeflenmiştir.
- Temas Noktası Sayısı ve Alanı: Y-şekilli elektrot 36 adet temas noktasına sahiptir. Her bir temas noktası 0,4 mm genişliğinde ve 1,8 mm uzunluğundadır; bu da her birinin alanını $0{,}4\times1{,}8=0{,}72\ mm^2$ yapmaktadır. Buna karşılık, mevcut elektrotlarda yalnızca 4 temas noktası bulunmaktadır ve her birinin yüzey alanı ($2\pi r \times h$) $7{,}9756\times1{,}5=11{,}9634\ mm^2$ olarak hesaplanmaktadır. (h temas noktanın uzunluğu 1.5 mm). Bu sayede Y-şekilli elektrot ile temas noktası sayısı artırılmış, ancak her bir temas noktasının alanı önemli ölçüde azaltılmıştır.
- Toplam Temas Alanı: Y-şekilli elektrotun toplam temas yüzeyi $36\times0{,}72=25{,}92\ mm^2$ iken, mevcut silindirik elektrotun (sadece 4 temas yüzeyi dikkate alındığında) toplam temas alanı $4\times11{,}9634=47{,}8536\ mm^2$ olarak hesaplanmaktadır. Böylece, elektriksel stimülasyonun dokuya aktarıldığı yüzey azaltılmış ve yan etki potansiyeli minimize edilmiştir.

- Temas Noktası Boyutları ve Elektrik Alan Dağılımı: Y-şekilli elektrotun temas noktalarının uzunluğu 1,8 mm, genişliği ise 0,4 mm'dir. Mevcut sistemlerde bu ölçüler sırasıyla 1,5 mm ve 7,9756 mm'dir. Bu yeni tasarımla temas noktalarının uzunluğu artırılarak dikey (longitudinal) elektrik alan dağılımı güçlendirilmiş, genişliğin daraltılmasıyla da yatay (lateral) elektrik alan yayılımı azaltılmıştır.
- Bağlantı Teknolojisi: Y-şekilli elektrot, IC (Entegre Devre) çip teknolojisi kullanılarak yalnızca 8 kablo aracılığıyla 36 temas noktasının kontrolünü mümkün kılmaktadır. Mevcut teknolojilerde ise 8 kabloyla yalnızca 4 veya 8 temas noktası kontrol edilebilmektedir. Bu durum, elektrotun çok daha kompakt ve işlevsel bir kontrol yapısına sahip olduğunu göstermektedir.
- Kablo Sayısı ve Temas Noktalarının Artırılması: Y-şekilli elektrotta kablo sayısı artırmadan temas noktaların sayısı arttırıldı. Tek kablodan farklı noktalar uyarmak için farklı yöntemler kullanılabilir. Analog Switch IC'leri ya da Multiplexer IC'leri **(**CD4051, CD4052, ADG704, Mikrodenetleyici + dijital potansiyometre + DAC kombinasyonları). Tek bir kablo üzerinden kontrol sinyali gönderilir (örneğin SPI/I2C protokolü ile). Ancak bu yöntem yük bağımlı olduğu için hassas uygulamalarda önerilmez. Y-şekilli elektrot için mikrodenetleyici tabanlı bir kontrol yapısı öngörülmüştür. DBS cihazının içinde yer alan mikrodenetleyici, her bir elektrot temas noktasına iletilecek uygun voltajı hesaplamakta ve bu voltajlar mikrodenetleyici (DAC) aracılığıyla analog sinyallere dönüştürülmektedir. Analog multiplexer kullanılarak bu sinyaller tek bir çıkış hattı üzerinden, çok kısa süre aralıklarıyla sırasıyla farklı temas noktalarına yönlendirilir. Elektrotun temas noktaları yüksek frekansta sırasıyla uyarıldığı için, bu işlem beyin tarafından kesintisiz ve sürekli bir uyarım olarak algılanmaktadır. Bu sistem, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda daha yönlü, daha odaklı ve kontrollü stimülasyon uygulamalarını da mümkün kılmaktadır. Ayrıca kablo sayısının artırılmaması sayesinde, cerrahi implantasyonun karmaşıklığı da azaltılmakta ve cihazın biyolojik ortama adaptasyonu kolaylaşmaktadır.

4.2 Karşılaştırma için Kullanılan Mevcut Elektrodun Özellikleri

- Kesit Alanı: Mevcut elektrotun yarıçapı r=1,27mm olup, kesit alanı $A=\pi\cdot(1,27)^2=5,064\ mm^2$ olarak hesaplanmaktadır. Buna karşılık, Y-şekilli elektrotun kesit alanı yaklaşık olarak $A=1,056\ mm^2$ dir.

- Temas Nokta Sayısı ve Alanı: Mevcut elektrot 4 adet temas noktasına sahiptir. Her bir temas noktasının alanı 7,9756×1,5=11,9634 mm^2 olarak hesaplanmaktadır. Y-şekilli elektrot ise 36 temas noktasına sahiptir ve her bir temas noktasının yüzey alanı 0,4×1,8=0,72 mm^2 dir.
- Toplam Temas Alanı: Mevcut elektrotun toplam temas alanı 11,9634×4=47,8536 mm^2, Y-şekilli elektrotun ise 0,72×36=25,92 mm^2 dir. Bu temas alanı, elektrik akımının anatomik dokuya iletildiği yüzeyi temsil etmektedir. Y-şekilli elektrot ile bu alan azaltılarak hedef dışı stimülasyonun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.
- Temas Noktası Geometrisi ve Elektrik Alan Dağılımı: Mevcut elektrotun temas noktaları silindirik formdadır ve her bir temas noktasının uzunluğu 1,5 mm, çapı ise 1,27 mm'dir. Y-şekilli elektrotun temas noktaları ise dikdörtgen biçiminde olup, uzunluğu 1,8 mm ve genişliği 0,4 mm'dir. Bu tasarım ile dikey (longitudinal) elektrik alan dağılımı artırılırken, yatay (lateral) yayılım azaltılmıştır.
- Kablo Bağlantı Yapısı: Mevcut elektrot, 8 kablo bağlantısıyla maksimum 8 temas noktasını kontrol edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Y-şekilli elektrot ise entegre devre (IC) teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş olup, yalnızca 8 kabloyla 36 temas noktasının ayrı ayrı kontrol edilebilmesini mümkün kılmaktadır.

Tablo 4. 1. İki elektrot özelliklerinin karşılaştırılması

Özellikler	Y-şekilli elektrot	Kullanımda mevcut elektrot
Elektrot şekli	Y şekli	Silindirik
Elektrodun kesit alanı	1.056 mm^2	5.064 mm^2
Temas noktanın şekli	Dikdörtgen	Silindirik
Temas noktanın abatları	Uzunluk 1.8 mm – genişlik 0.4 mm	R= 1.27
Temas noktanın alanı	0,72 mm^2	11.9634 mm^2
Toplam temas alanı	25,92 mm^2	47.8536 mm^2
Temas noktaların sayısı	36	8

4.3 Elektrik Alanı Çalışması

Derin beyin stimülasyonu gibi nörostimülasyon uygulamalarında, hedeflenen beyin bölgesine iletilen elektrik alanın dağılımı, terapötik etkinlik ve yan etkilerin ortaya çıkmasında

belirleyici rol oynar. Bu nedenle, elektrot geometrisinin ve temas noktalarının elektriksel performansını değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar modellemesi (FEM) kullanılarak elektrik alan ve akım yoğunluğu dağılımları hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada hem geleneksel silindirik elektrot hem de yeni tasarlanan Y-şekilli elektrot için dört farklı geometrik yapı altında elektrik alan dağılımı ve biyoısı transferi (ht) analiz edilmiştir. Bu analiz, yeni elektrot tasarımının dokuya olan etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirebilmek için kritik öneme sahiptir. Elektrik alanın hesaplanmasında kullanılan temel fiziksel ilkeler aşağıda verilmiştir:

Elektrik potansiyeli V(r) bilindiğine göre, elektrik alanı E ve toplam akım yoğunluğu J Denklem 1 ve Denklem 2 kullanılarak hesaplanır:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \qquad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j_e} \qquad (2)$$

Ayrıca Akım yoğunluğunun süreklilik denklemi 3 denklem ile hesaplanır:

$$\nabla . \mathbf{J} = \mathbf{Q_{j.v}} \qquad (3)$$

Elektrot yüzeyinde tanımlanan sınır koşulları altında, yüzey akım yoğunluğu entegre edilerek toplam enjekte edilen akım hesaplanır. Bu sayede, farklı elektrot tasarımlarının oluşturduğu elektriksel etkiler karşılaştırılabilir hale gelir.

Denklemlerde:

- E elektrik alanıdır
- σ Elektriksel iletkenlik
- J akım yoğunluğu vektörüdür (A/m^2).
- V elektrik potansiyelini ifade etmektedir.
- $Q_{j.v}$ Hacimsel akım kaynağı (A/m^3)
- j_e yer değiştirme akımı

4.4 Elektrik Alan Analizinin Nedenleri:

- Elektriksel Etkinlik Karşılaştırması: Yeni Y-şekilli elektrot ile mevcut elektrotun uyarılmış elektrik alanlarının büyüklüğü ve yayılım yönü kıyaslanarak, hangi tasarımın daha hedefli ve etkin uyarım sağladığı belirlenmiştir.

- Yan Etki Potansiyelinin Değerlendirilmesi: Geniş yayılımlı yatay elektrik alan, komşu yapılarda istenmeyen stimülasyonlara yol açarak yan etkilere neden olabilir**.** Bu nedenle, özellikle dikey (longitudinal) alan dağılımını artırmak ve yatay (lateral) yayılımı azaltmak**,** tasarımın klinik başarısı açısından önemlidir.
- Dokuya Zararın Azaltılması: Daha küçük kesit alanına ve daha yönlü stimülasyona sahip bir elektrotun doku hasarını azaltma potansiyeli, elektrik alan yoğunluğu analizleriyle değerlendirilmektedir.
- Klinik Planlama ve Modelleme Altlığı: Bu analizler, sadece tasarım doğrulaması değil; aynı zamanda gelecekteki hasta-özel stimülasyon modelleri ve cerrahi planlamalar için de ön bilgi sağlar.

4.5 Biyoısı (ht) Çalışması

Biyoısı (bioheat), canlı dokuların içindeki ısı transferi süreçlerini tanımlayan, biyolojik sistemlerdeki ısı üretimi, ısı iletimi, kan dolaşımı yoluyla ısı taşınımı ve metabolik aktiviteler sonucu oluşan enerji dönüşümünü ifade eder. Temel olarak, biyoısı analizi canlı doku ortamlarında ısının nasıl yayıldığını, nasıl üretildiğini ve nasıl taşındığını anlamaya yönelik termodinamik bir yaklaşımdır.
Bu tür analizler genellikle tıbbi uygulamalarda (örneğin: hipertermi tedavisi, lazer cerrahisi, RF ablasyon ve DBS gibi nörostimülasyon uygulamaları kullanılır. Çünkü elektriksel stimülasyonun neden olabileceği ısı artışı, doku hasarına yol açabilir, bu nedenle önceden sayısal olarak tahmin edilmelidir.

Bu çalışmada biyoısı, Pennes'in biyoısı transfer modeli kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) otomatik olarak çözülmüştür. İlgili denklem aşağıdaki gibidir:

$$Q_{bio} = \rho_b C_{p,b} \omega_b (T_b - T) + Q_{met} \qquad (5)$$

Denklemde:

- Q_{bio} biyoısı değeri
- ρ_b kan yoğunluğu
- $C_{p,b}$ spesifik ısı, kan
- ω_b kan perfüzyon oranı
- T_b atardamar kan sıcaklığı
- T başlangıç değeri

- Q_{met} metabolik ısı kaynağı ifade etmektedir.

Ancak bu ifade Pennes denkleminin tamamı değil, sadece vücut içinde biyolojik kaynak terimi kısmını göstermektedir.

Bu tez çalışmasında yeni geliştirilen Y-şekilli DBS elektrodu ile mevcut silindirik elektrot arasında ısı dağılımının kıyaslanması amacıyla biyoısı analizine ihtiyaç duyulmuştur. Bunun nedenleri:

- Elektriksel Stimülasyonun Isıl Etkileri: DBS sistemlerinde elektrik akımı iletilirken, dirençli dokulardan geçerken bir miktar ısı açığa çıkar. Bu ısıl yükleme, hedef dışı doku hasarına neden olabilir. Bu nedenle stimülasyonun termal etkileri, elektrot tasarımı kadar önemlidir.
- Doku Hasarını Önleme: Beyin dokusu sıcaklık artışlarına karşı çok hassastır. 42°C üzeri sıcaklıklar, birkaç dakika içinde geri dönüşü olmayan hücresel hasara neden olabilir. Y-şekilli elektrotun daha az kesit alanına ve daha yönlü uyarıma sahip olması, ısı birikimini azaltabilir mi sorusuna yanıt aramak için biyoısı analizi yapılmıştır.
- Elektrot Tasarımının Termal Avantajlarını Değerlendirme: Yeni elektrot tasarımı, temas alanını ve akım dağılımını değiştirdiği gibi ısı dağılımını da etkiler. Bu nedenle, sonlu eleman modellemesiyle oluşturulan geometri üzerinde: Isı üretimi nerede yoğunlaşıyor? Y-şekilli elektrot, daha düşük sıcaklık bölgeleri sağlıyor mu? Kan perfüzyonu ve metabolik ısı üretimiyle birlikte sıcaklık nasıl değişiyor? …. vb. gibi sorulara sayısal yanıtlar aranmıştır.

Biyoısının çalışması, çevreleyen dokuları uygulanmak için, çevreleyen dokulara beyinin değerleri sonlu eleman modelleme programına eklendi, eklenen değereler aşağıdaki tabloda yer almaktadır:

Tablo 4. 2. Biyoısı çevredeki doku özellikleri

Eleman	Değer
ρ_b kan yoğunluğu	1000 kg/m^2
$C_{p,b}$ spesifik ısı, kan	3600 j/ (kg.K)
ω_b kan perfüzyon oranı	0.0005 1/s
T_b atardamar kan sıcaklığı	310.15 K

Q_{met} metabolik ısı kaynağı	700 W/m^3

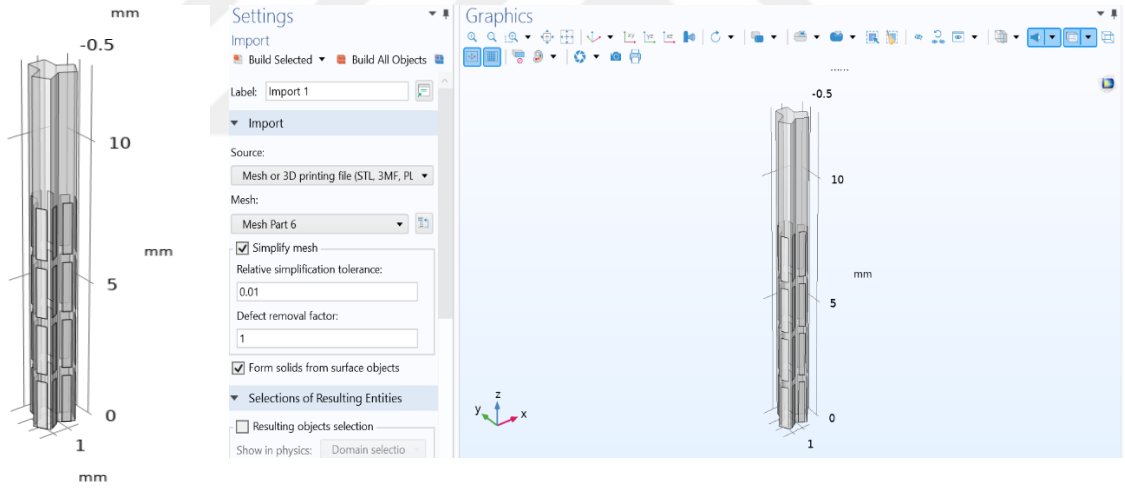
T başlangıç değeri 310.15 K sonlu eleman modelleme programın tarafından otomatik olarak seçilmiştir. Hem elektrik akımları hem de biyoısı transfer (ht) çalışmaları, dört geometride de kullanımda mevcut elektrotlar ve tasarımımız olan Y-şeklindeki elektrot için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında biyoısı analizi gerçekleştirilmeseydi, sadece elektrik alan dağılımına bakılarak elektrotun biyolojik güvenliği eksik değerlendirilmiş olurdu. Özellikle yeni elektrotun termal yük yaratıp yaratmadığını göstermek için biyoısı modeli vazgeçilmezdir. Sonuç olarak, biyoısı hesaplaması, elektrot tasarımının sadece elektriksel değil, aynı zamanda fizyolojik ve güvenlik açısından da optimize edilmesini sağlayan kritik bir adımdır.

5. YÖNTEMLER, MODELLEME VE STİMÜLASYON

5.1 Y-Şekilli Yönlendirilmiş Elektrot Tasarımı ve Sonlu Eleman Yöntemiyle Elektriksel-Thermal Performans Analizi

Y-şekilli elektrot, Tinkercad çevrimiçi tasarım programı kullanılarak modellenmiş ve tasarlandıktan sonra, elektrik akımı ve biyoısı transferi (ht) analizlerini gerçekleştirmek amacıyla sonlu elemanlar modelleme yazılımına aktarılmıştır. Elektrik akımı analizi, elektrotun beyin dokusu içerisinde oluşturduğu elektrik alan dağılımını hesaplamak amacıyla yapılmıştır. Biyoısı transferi (ht) analizi ise elektrotun uygulama sırasında beyin dokusunda neden olabileceği ısı artışını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.1.a, Tinkercad programı ile oluşturulan Y şekilli elektrodu ve Şekil 5.1.b, Y şekilli elektrodun sonlu elaman modelleme programı aktarılmasını göstermektedir.



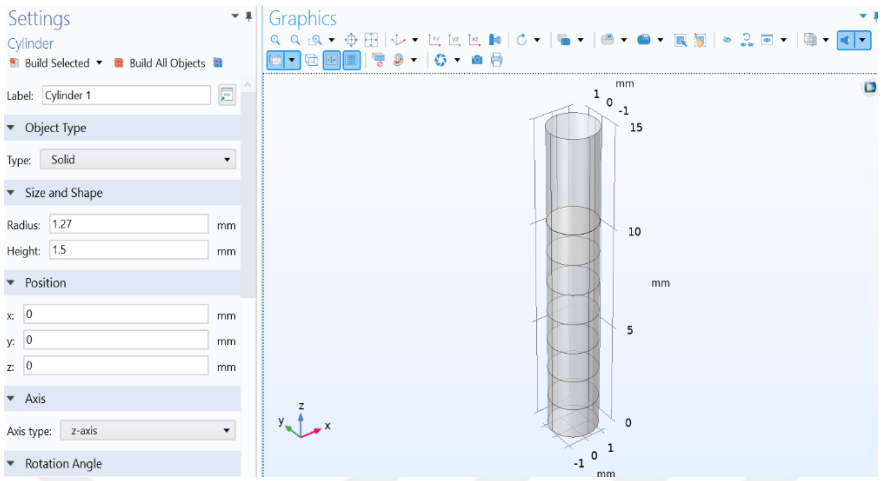
a **b**

Şekil 5. 1. a. Tinkercad ile Y-şekilli elektrot oluşturulması, **b.** Sonlu elaman modelleme programına elektrot-CAD dizaynının altarılması

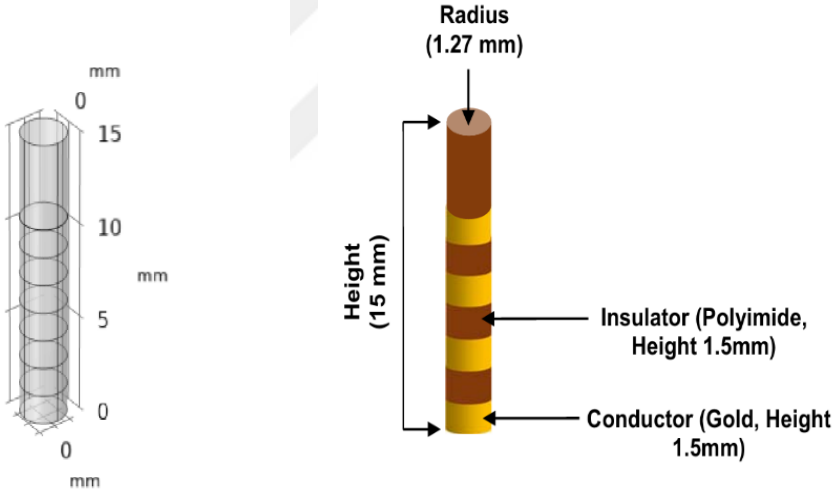
5.2 Kullanımda Mevcut Elektrodun ve Çevre Dokunun Modellemesi

Kullanımda mevcut olan elektrot, sonlu elemanlar modelleme programının geometri oluşturma modülü kullanılarak doğrudan modellenmiş, çevresini saran sinir dokusu ortamı da benzer şekilde tanımlanmıştır. Elektrot, 15 mm uzunluğa ve 1,27 mm yarıçapa sahip silindirik bir yapı olarak modellenmiştir. Elektrot, dört adet altın temas noktasına sahip olup, bu

kontaklar polimid yalıtkan tabakalar ile birbirinden ayrılmıştır. Model üzerinde hem elektrik akımı hem de biyoısı transferi (ht) analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. 2. Kullanımda mevcut elektrodun Sonlu elaman modelleme programı kullanılarak oluşturulması



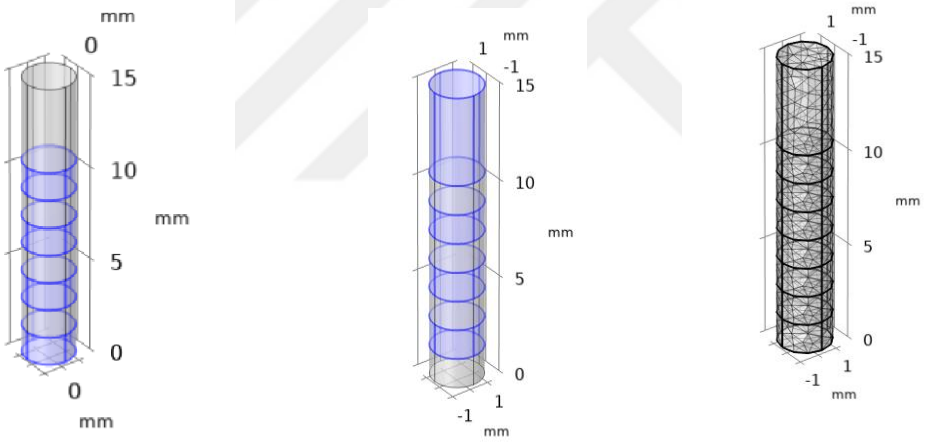
a **b**

Şekil 5. 3. a. Sonlu elaman modelleme programın ile kullanımda mevcut elektrodu, **b.** Kullanımda mevcut elektrodun boyutları [29]

Altın temas ve poliimid izolatör için malzeme spesifikasyonu modelleme programında mevcut olan kütüphane kullanılarak eklendi [29].

Tablo 5. 1. Mevcut elektrot temas noktaların özellikleri

Malzeme	Altın temas noktası	Poliimid izolatör noktası
Elektriksel iletkenlik (S/m)	45.6e6	1e−15
Isı iletkenliği (W/m*K)	317	18
Isı kapasitesi (J/Kg*K)	129	840
Göreceli geçirgenlik	3.6	3.4
Poisson's oranı	0.44	0.34
Yoğunluk (kg/m^3)	19300	1300
Katsayı ve termal genleşme (1/K)	14.2e-6	-
Yaung modülü (Pa)	70e9	3.1e9



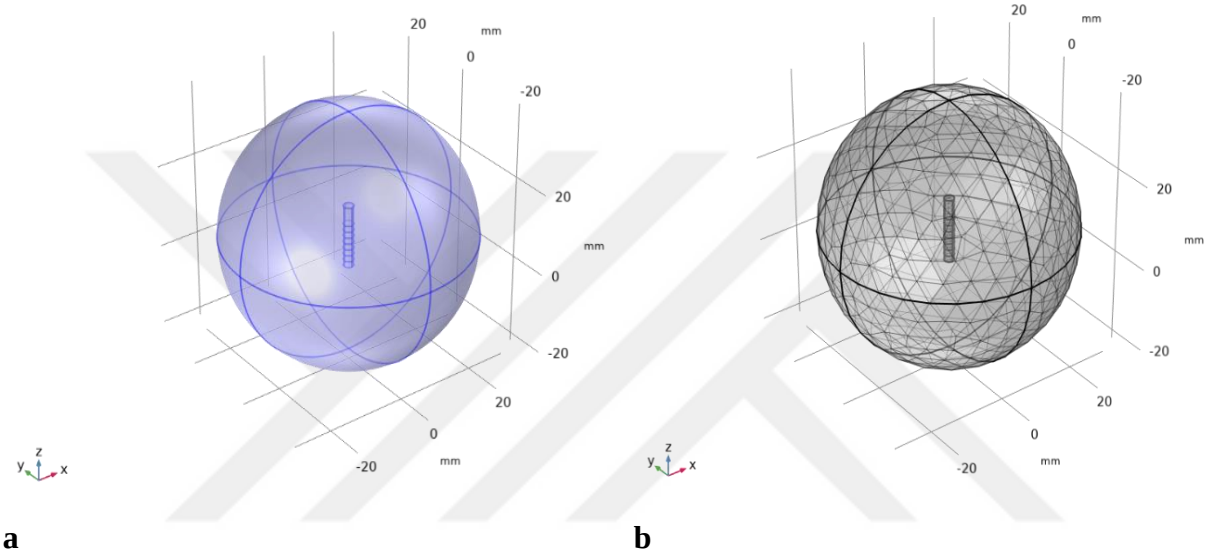
a b c

Şekil 5. 4. a. Kullanımda mevcut elektrodu altın temas noktasının spesifikasyonu, **b.** Kullanımda mevcut elektrodu Poliimid izolatör noktasının spesifikasyonu, **c.** Kullanımda mevcut elektrodunun iç ağı (Mesh)

Simetrik çözüm elde edebilmek amacıyla elektrodu çevreleyen doku, 30 mm yarıçapında bir küre olarak modellenmiştir. Bu modellemede, çevre dokunun, Globus Pallidus (GP) ve (STN) gibi olası hedef uyarım alanlarını temsil ettiği varsayılmıştır [31, 32, 33]. Dokuya ait gri madde özellikleri, modelleme yazılımının kütüphane veritabanı kullanılarak tanımlanmıştır [30]. Çevreleyen dokunun iç ağı (Mesh) sonlu elaman modelleme programın ile oluşturuldu.

Tablo 5. 2. Çevredeki doku özellikleri

Malzeme	Beynin gri maddesi
Elektriksel iletkenlik (S/m)	0.2
Isı iletkenliği (W/m*K)	0.57
Isı kapasitesi (J/Kg*K)	3650
Göreceli geçirgenlik	52
Yoğunluk (kg/m^3)	21.4

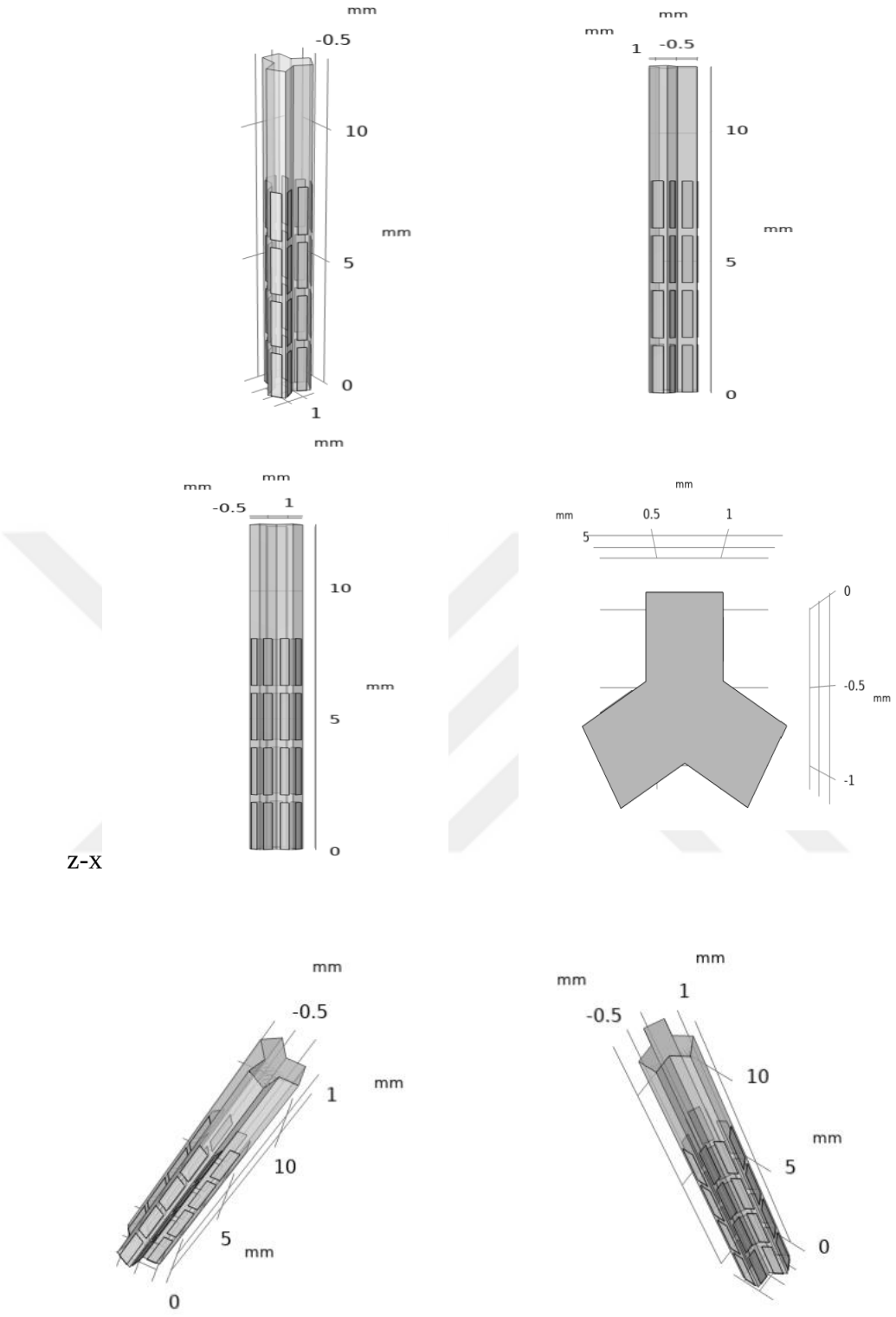


a **b**

Şekil 5. 5. a. Elektrodun çevreleyen doku yarıçap r=30 mm, **b.** sonlu elaman modelleme programın ile çevre doku iç ağı (Mesh)

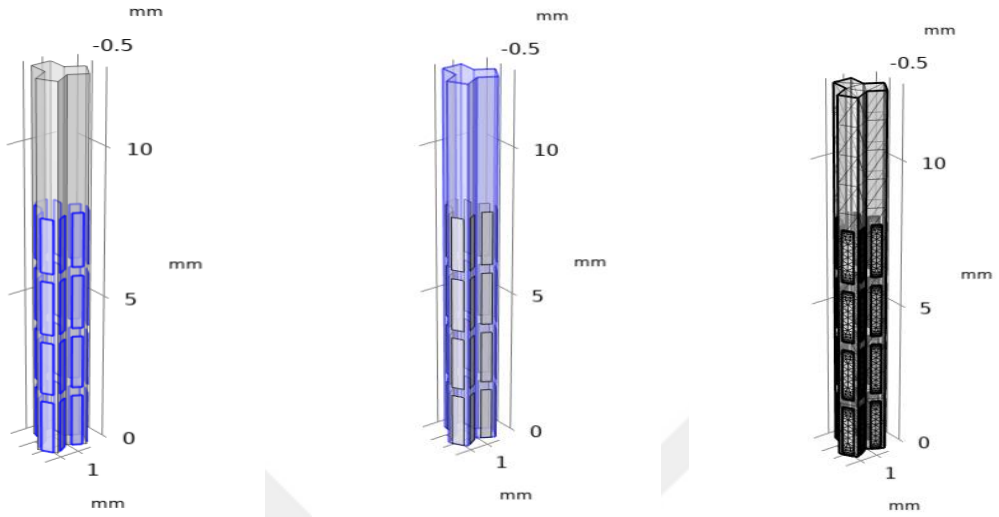
5.3 Y-şekilli Elektrodun ve Çevre Dokunun Modellemesi

Yeni tasarlanan Y-şekilli elektrot, Tinkercad çevrimiçi programı kullanılarak modellenmiş ve oluşturulmuştur. Daha sonra, elektrik akımı ve biyoısı transferi (ht) analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla sonlu elemanlar modelleme programına aktarılmıştır. Şekil 4.2'de, Tinkercad programı ile oluşturulan Y-şekilli elektrot tasarımınının üç düzlemde de boyutları görülmektedir. Şekil 5.7.a mavi bölgeler altın temas noktalarını göstermektedir.



Şekil 5. 6. Sonlu elaman modelleme program ile Y-şekilli elektrot

Altın temas noktaları ve poliimid izolatör noktaları için malzeme spesifikasyonları modelleme programına Tablo 5.1 de yeralan değerler olarak eklenmiştir [29]. Y-şeklindeki elektrot için iç ağı (Mesh), sonlu eleman modelleme programı ile oluşturuldu.



a b c

Şekil 5. 7. a. Y-şekillindeki elektrot, altın temas noktaların spesifikasyonu, **b.** Y-şeklindeki elektrot, poliimid yalıtkan noktaların spesifikasyon, **c.** Y-şeklinde elektrot iç ağı (Mesh)

Simetrik çözüm elde edebilmek amacıyla elektrodu çevreleyen doku, 30 mm yarıçapında bir küre olarak modellenmiştir. Bu modellemede, çevre dokunun, Globus Pallidus (GP) ve (STN) gibi olası hedef uyarım alanlarını temsil ettiği varsayılmıştır [31, 32, 33]. Dokuya ait gri madde özellikleri, modelleme yazılımının kütüphane veritabanı kullanılarak tanımlanmıştır [30] (Tablo 5.2). Çevreleyen dokunun iç ağı (Mesh) sonlu elaman modelleme programın ile oluşturuldu.

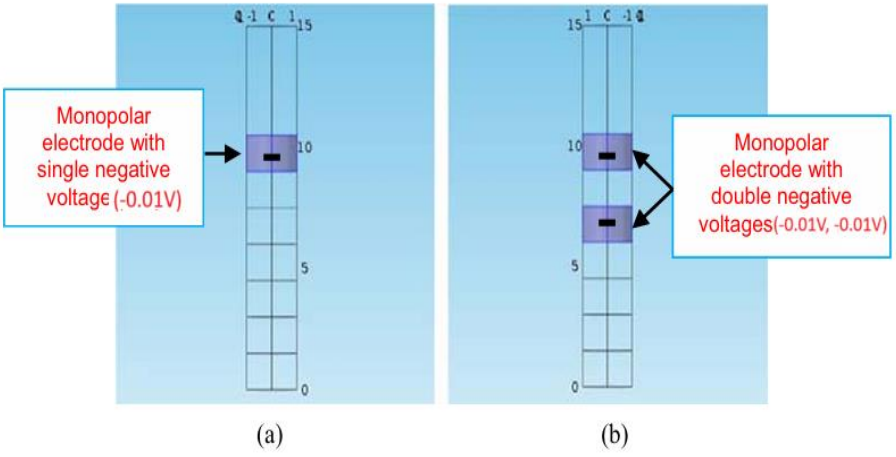
5.4 Kullanımda Olan Elektrot için Stimülasyon Parametreleri

Kullanımda olan elektrot dört farklı geometri ile uyarılmıştır. Bu geometriler şunlardır:

- Tek kutuplu (Monopolar)
- Çift kutuplu (Bipolar)
- Üç kutuplu (Tripolar)
- Dört kutuplu (Quadripolar)

5.4.1 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri

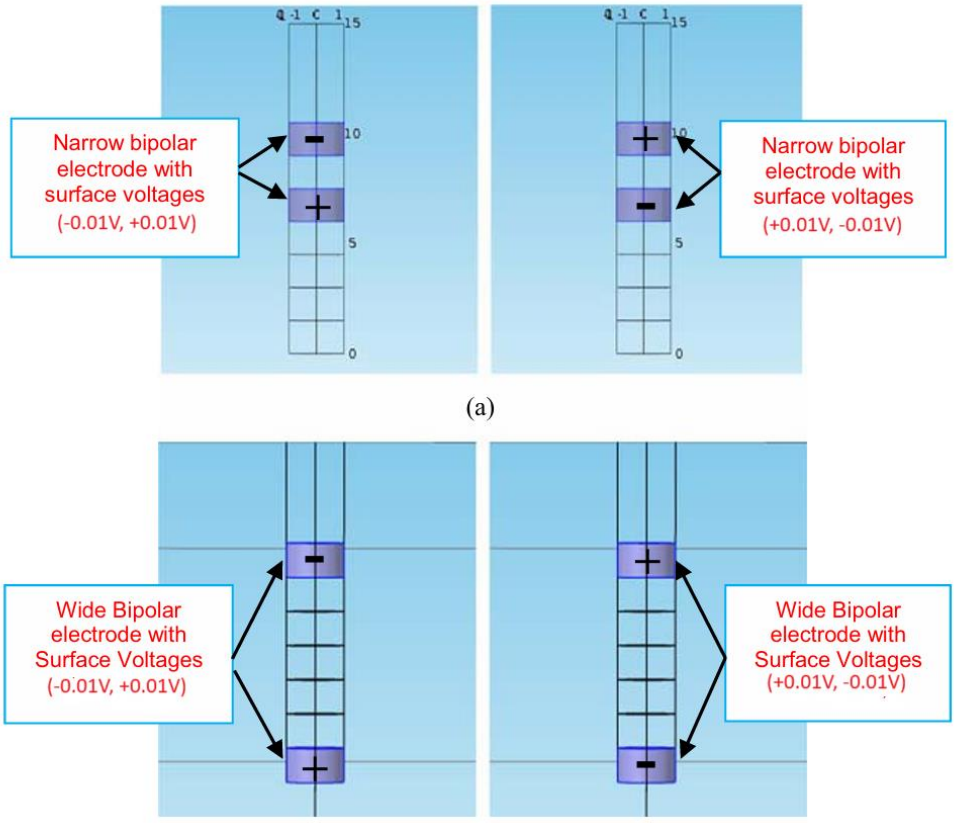
Tek kutuplu (monopolar) stimülasyon geometrisi için iki ayrı model oluşturulmuştur. İlk modelde (a), negatif yüklü tek bir katot (-0.01 V) tanımlanmıştır. İkinci modelde ise (b), iki adet negatif yüklü katot tanımlanarak stimülasyon (-0.01 V, -0.01 V) şeklinde yapılandırılmıştır (Şekil 5.8).



Şe**kil 5. 8. a.** Monopolar geometri tek katot -0.01V, **b.** Monopolar geometri çift katot -0.01V, -0.01V

5.4.2 Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri

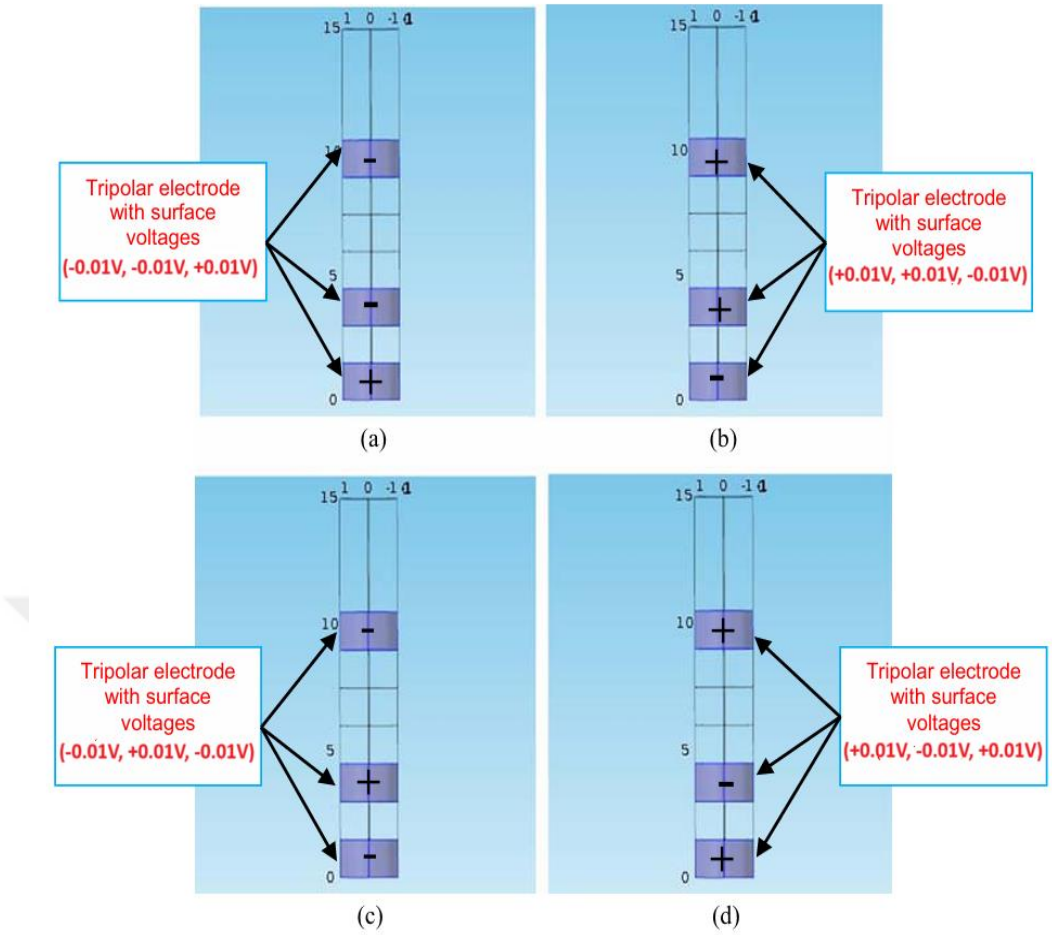
Çift kutuplu (Bipolar) geometrisi dört farklı modelle oluşturuldu. Yüzey voltajlarına sahip dar bipolar elektrot (a) (-0.01V, +0.01V), yüzey voltajlarına sahip dar bipolar elektrot (b) (+0.01V, -0.01V), yüzey voltajlarına sahip geniş bipolar elektrot (c) (-0.01V, +0.01V), yüzey voltajlarına sahip geniş bipolar elektrot (d) (+0.01V, -0.01V) (Şekil 5.9).



Şekil 5. 9. a. Dar çift kutuplu (bipolar) geometri (-0.01V,+0.01V), **b.** Dar çift kutuplu (bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V), **c.** Geniş çift kutuplu (bipolar) geometri (-0.01V,+0.01V), d. Geniş çift kutuplu (bipolar) geometri (+0.01V,-0.01V)

5.4.3 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri

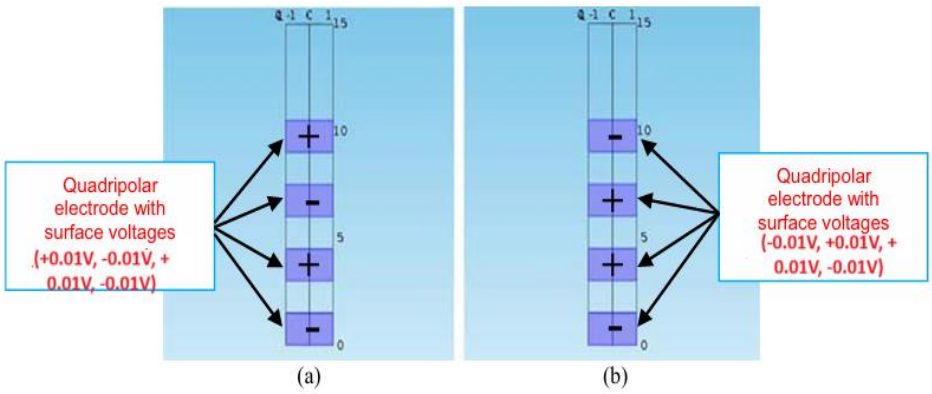
Üç kutuplu (Tripolar) geometrisi dört farklı modelle oluşturuldu. Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (a) (-0.01V, -0.01V, +0.01V), Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (b) (+0.01V, +0.01V, -0.01V), Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (c) (-0.01V, +0.01V, -0.01V), Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (d) (+0.01V, -0.01V, +0.01V) (Şekil 5.10).



Şekil 5. 10. a. Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V), **b.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V), **c.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V), d. Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)

5.4.4 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri

Dört kutuplu (Quadripolar) geometri iki modelle oluşturuldu. Yüzey voltajlarına sahip dört kutuplu (Quadripolar) elektrot (a) (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V), yüzey voltajlarına sahip dört kutuplu (Quadripolar) elektrot (b) (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) (Şekil 5.11).



Şekil 5. 11. a. Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V), **b.** Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) [29].

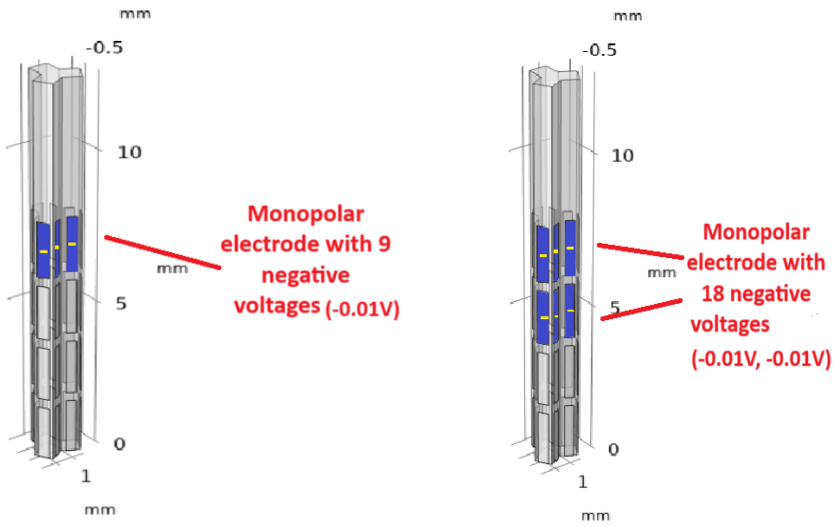
5.5 Y-şekilli Elektrodun Stimülasyon Parametreleri

Bu çalışmada geliştirilen Y-şekilli elektrot, farklı stimülasyon stratejilerini değerlendirebilmek amacıyla dört farklı stimülasyon geometrisi ile test edilmiştir. Her bir geometri, elektrotun elektriksel performansını, hedeflenen uyarım alanına etkisini ve yan etki potansiyelini belirlemeye yönelik olarak yapılandırılmıştır. Y-şekilli elektrota uygulanan stimülasyon geometrileri şunlardır:

- Tek kutuplu (Monopolar)
- Çift kutuplu (Bipolar)
- Üç kutuplu (Tripolar)
- Dört kutuplu (Quadripolar)

5.5.1 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri

Elektrot üzerindeki bir temas noktası katot (negatif kutup) olarak tanımlanırken, uzak bir referans (genellikle nötr) anot olarak kullanılır. Bu geometri, elektrik alanın geniş bir alana yayılmasına neden olur ve genellikle daha derin dokuların uyarımı için tercih edilir. Tek kutuplu (Monopolar) geometri iki model ile oluşturuldu. Model 1(a): Elektrot üzerinde 9 adet katot aktif hâle getirilmiş ve her biri için -0.01V potansiyel uygulanmıştır. Model 2 (b): Elektrot üzerinde 18 adet katot eşzamanlı olarak etkinleştirilmiş ve yine her birine -0.01V potansiyel tanımlanmıştır (Şekil 5.12).

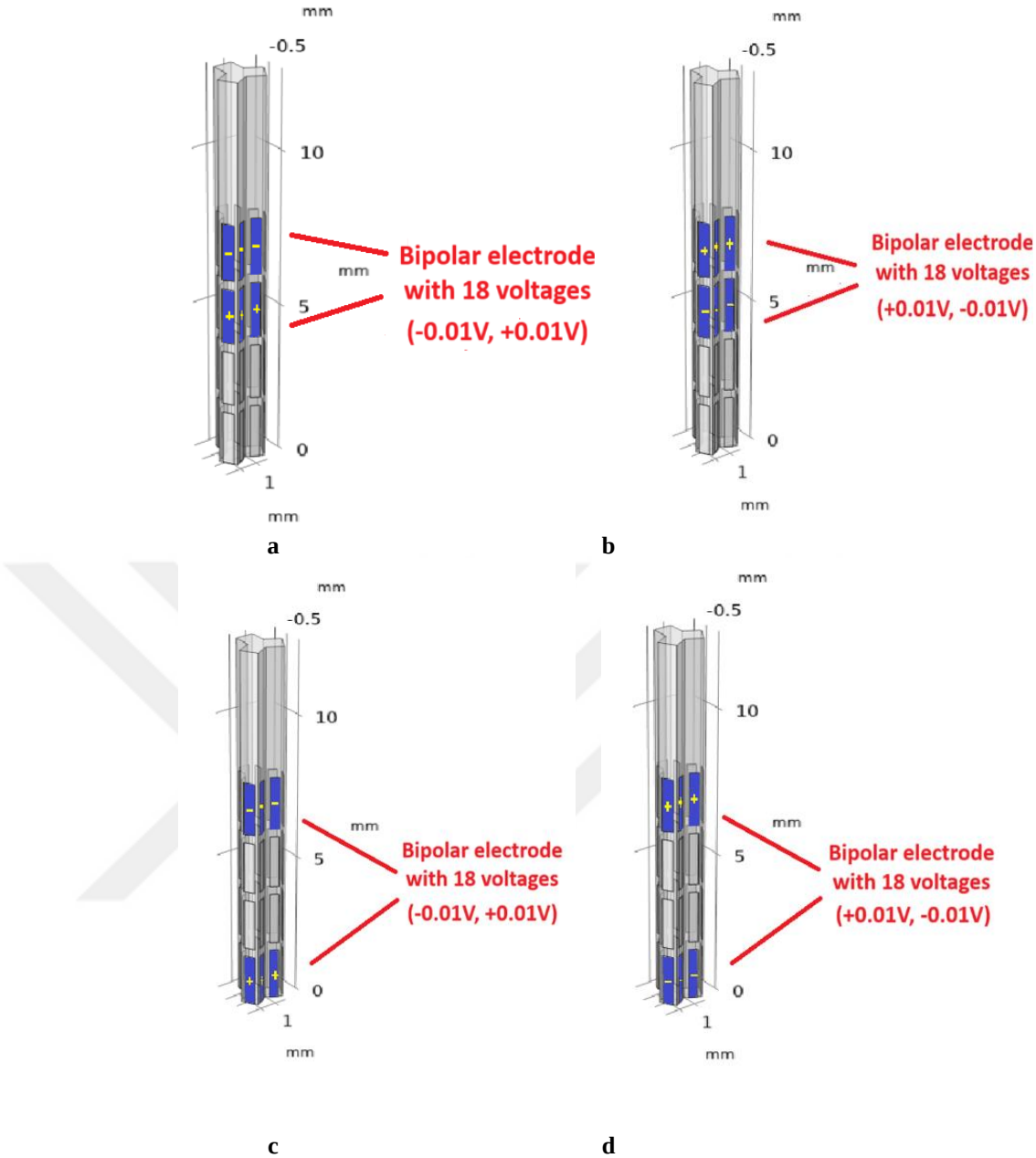


a b

Şekil 5. 12. a. Tek kutuplu (Monopolar) geometri 9 negatif voltaj (-0.01V), **b.** Tek kutuplu (Monopolar) geometri 18 negatif voltaj (-0.01V)

5.5.2 Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri

İki temas noktası birbirine yakın konumlandırılır; biri katot (−), diğeri anot (+) olarak tanımlanır. Bu yapı, daha lokalize ve yönlü bir elektrik alan üretir ve hedef dışı uyarımı azaltma potansiyeline sahiptir. Çift kutuplu (Bipolar) geometri dört modelle oluşturuldu. Model 1 (a): Elektrot üzerinde 9 katot temas noktası için -0.01 V, bitişik konumdaki 9 anot için +0.01 V potansiyel uygulanmıştır. Model 2 (b): Aynı sayıda anot ve katot kullanılmış; bu kez anotlar merkeze, katotlar dışa yerleştirilmiştir (+0.01 V anot, -0.01 V katot). Model 3 (c): 9 katot temas noktası için -0.01 V, daha uzak konumda yer alan 9 anot için +0.01 V potansiyel tanımlanmıştır. Model 4 (d): 9 anot için +0.01 V, karşılıklı konumlandırılmış 9 katot için -0.01 V potansiyel uygulanmıştır (Şekil 5.13).

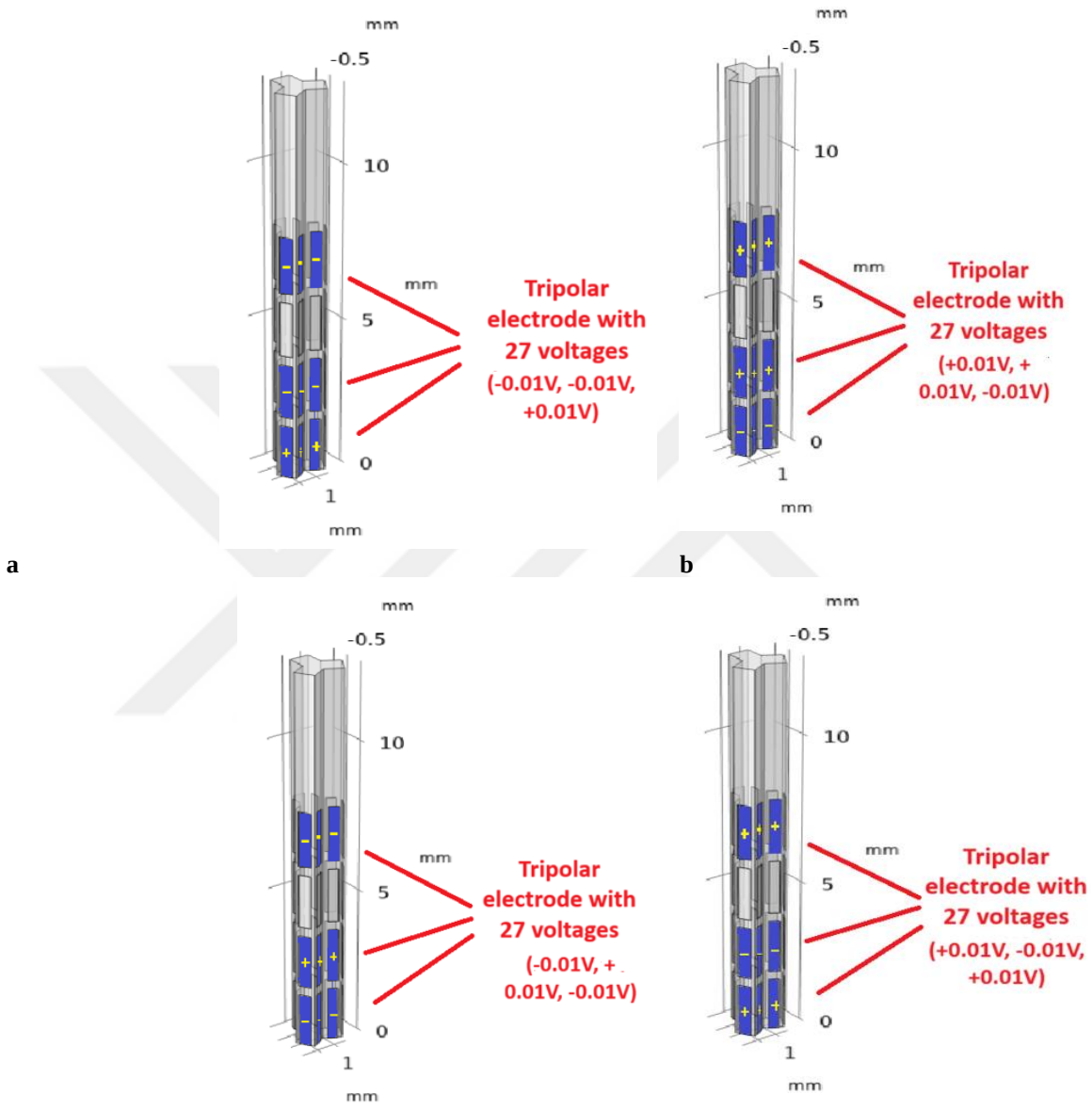


Şekil 5. 13. a. Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (-0.01V, +0.01V), **b.** Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (+0.01V, -0.01V), **c.** Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (-0.01V, +0.01V), **d.** Çift kutuplu (Bipolar) geometri 18 voltajı (+0.01V, -0.01V)

5.5.3 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri

Ortadaki temas noktası katot olarak belirlenirken, çevresindeki iki temas noktası anot görevi görür. Bu yapı sayesinde elektrik alan daha simetrik ve sınırlı bir şekilde yayılır, böylece hedefe yönelik stimülasyon sağlanabilir. Üç kutuplu (Tripolar) geometri dört modelle oluşturuldu. Model 1 (a) : (−0.01V, −0.01V, +0.01V), 18 temas noktası katot olarak tanımlanmış (−0.01 V) ve bunların yanında konumlandırılan 9 temas noktası anot olarak tanımlanmıştır (+0.01 V). Model 2 (b) : (+0.01V, +0.01V, −0.01V): 18 temas noktası anot (+0.01 V), 9 temas noktası ise katot (−0.01 V) olarak tanımlanmıştır. Model 3 (c) : (−0.01V,

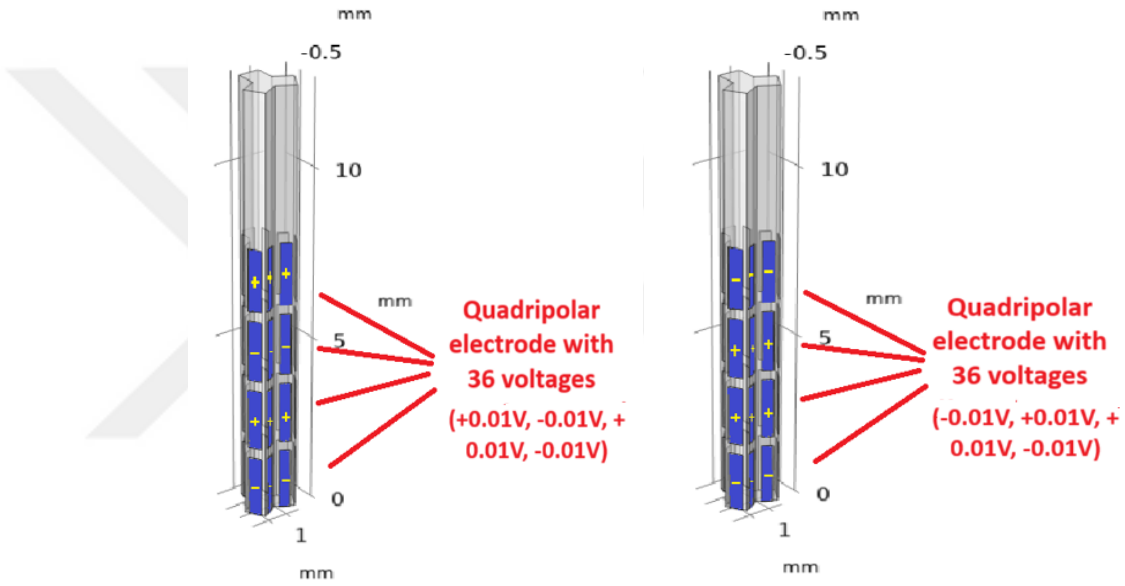
+0.01V, −0.01V): 18 temas noktası katot (−0.01 V) ve 9 temas noktası anot (+0.01 V) olarak belirlenmiştir. Model 4 (d) : (+0.01V, −0.01V, +0.01V): Bu modelde, 18 temas noktası anot (+0.01 V) olarak, 9 temas noktası ise katot (−0.01 V) olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5. 14. a. Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (-0.01V, -0.01V, +0.01V), **b.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (+0.01V, +0.01V, -0.01V), **c.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (-0.01V, +0.01V, -0.01V), **d.** Üç kutuplu (Tripolar) geometri 27 voltajı (+0.01V, -0.01V, +0.01V)

5.5.4 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri

Dört temas noktası bir arada kullanılarak, farklı kombinasyonlarla katot ve anot tanımlamaları yapılır. Bu yapı, karmaşık yönlendirme stratejileriyle daha hassas alanlara odaklanma imkânı sunar. Dört kutuplu (Quadripolar) geometri iki modelle oluşturuldu. Model 1 (a) : (+0.01V, −0.01V, +0.01V, −0.01V): Bu modelde 18 temas noktası katot olarak tanımlanmıştır (−0.01 V), diğer 18 temas noktası ise anot olarak yapılandırılmıştır (+1 V). Model 2 (b) : (−0.01V, +0.01V, +0.01V, −0.01V): Bu modelde de 18 katot (−0.01 V) ve 18 anot (+0.01 V) temas noktası kullanılmıştır (Şekil 5.15).



a **b**

Şekil 5. 15. a. Dört kutuplu (Quadripolar) geometri 36 voltaj (+0.01V-0.01V,+0.01V,-0.01V), **b.** Dört kutuplu (Quadripolar) geometri 36 voltaj (-0.01V,+0.01V,+0.01V,-0.01V)

Bu dört stimülasyon modeli, Y-şekilli elektrotun elektrik alan dağılımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve geleneksel elektrot geometrilerine göre avantajlarını analiz etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiştir.

6. BULGULAR

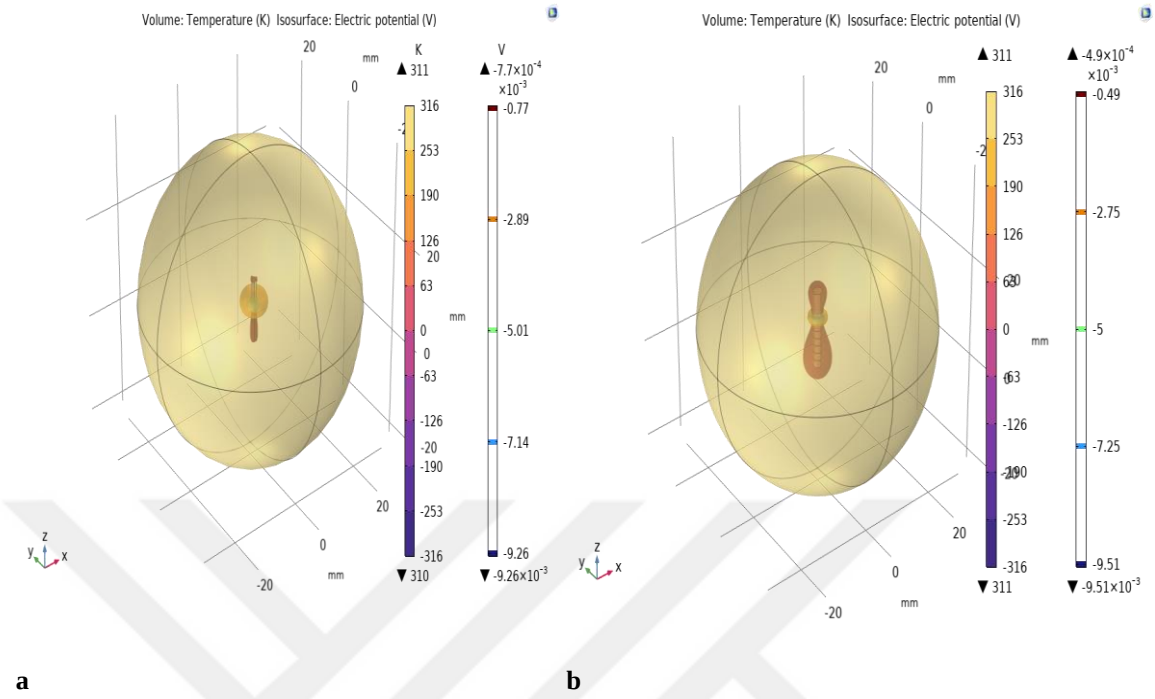
6.1 Tek kutuplu (Monopolar) Geometri Karşılaştırmalı

Bu çalışmada, tek kutuplu (Monopolar, –0.01 V ve –0.01 V, –0.01 V) stimülasyon altında hem Y-şekilli elektrot hem de kullanımda mevcut silindirik elektrot için elektrik potansiyeli ve elektrik alan dağılımları analiz edilmiştir. Sadece potansiyel analizi yapılsaydı, hangi bölgelerde uyarımın başlayacağını, şiddetini ve yönünü belirlenemezdi. Sadece elektrik alan analizi yapılsaydı, alanın neden o bölgede oluştuğunu ve ne kadar derine yayıldığını görülemezdi. Bu nedenle özellikle nörostimülasyon, DBS, RF ablasyon, nöron aktivasyon eşikleri gibi biyomedikal mühendislik uygulamalarında elektrik potansiyeli ve elektrik alanı çalışmaları birlikte yapılmak zorundadır. Bu çalışmada, Potansiyel analizi, elektrotların uyarımı ne kadar sınırlı/odaklı tuttuğunu gösterirken, elektrik alan analizi de, bu sınırlı alan içinde gerçek uyarımın nerede gerçekleşeceğini ve etkisinin ne kadar güçlü olduğunu belirler. İkisinin birlikte değerlendirilmesi, elektrot tasarımının etkinliği ve güvenliği hakkında en doğru ve bütüncül yorumu yapabilmek için elzemdir.

6.1.1 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri (-0.01V)

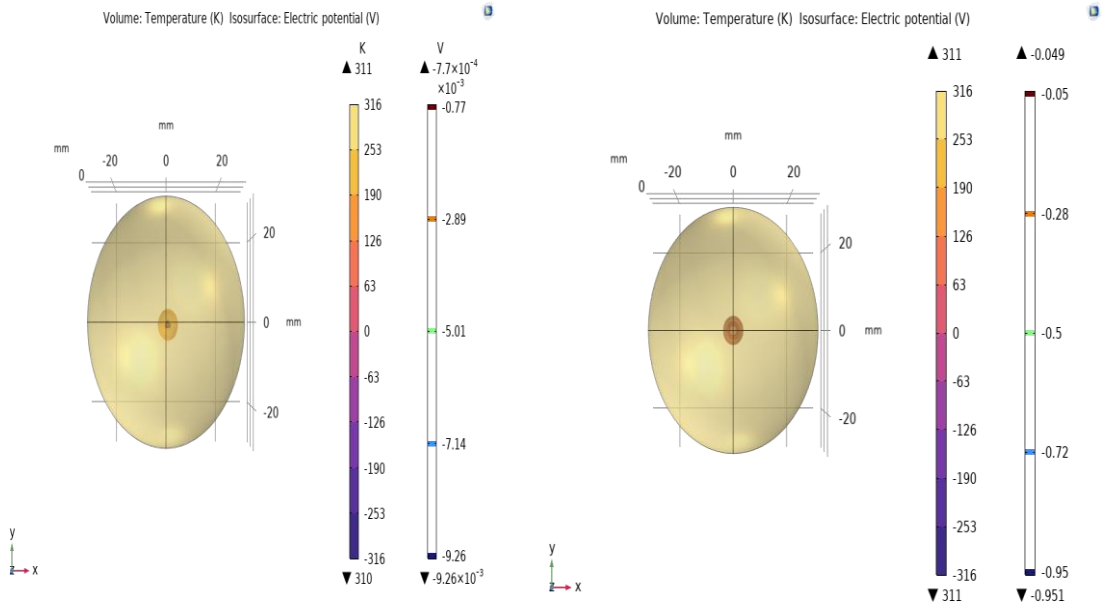
Tek kutuplu (monopolar) stimülasyon geometrisi, Y-şekilli elektrot için –0.01 V'luk negatif yüklü 9 katot (Şekil 5.12.a) ve kullanımda mevcut elektrot için –0.01 V'luk negatif yüklü tek bir katot (Şekil 5.8.a) olacak şekilde modellenmiştir. Her iki elektrot modeli için biyoısı transferi (ht) ve elektrik akımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analizler kapsamında, sıcaklık dağılımı, elektrik potansiyeli ve elektrik alan dağılımı sonuçları her iki elektrot için ayrı ayrı elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

a. Sıcaklık çalışması



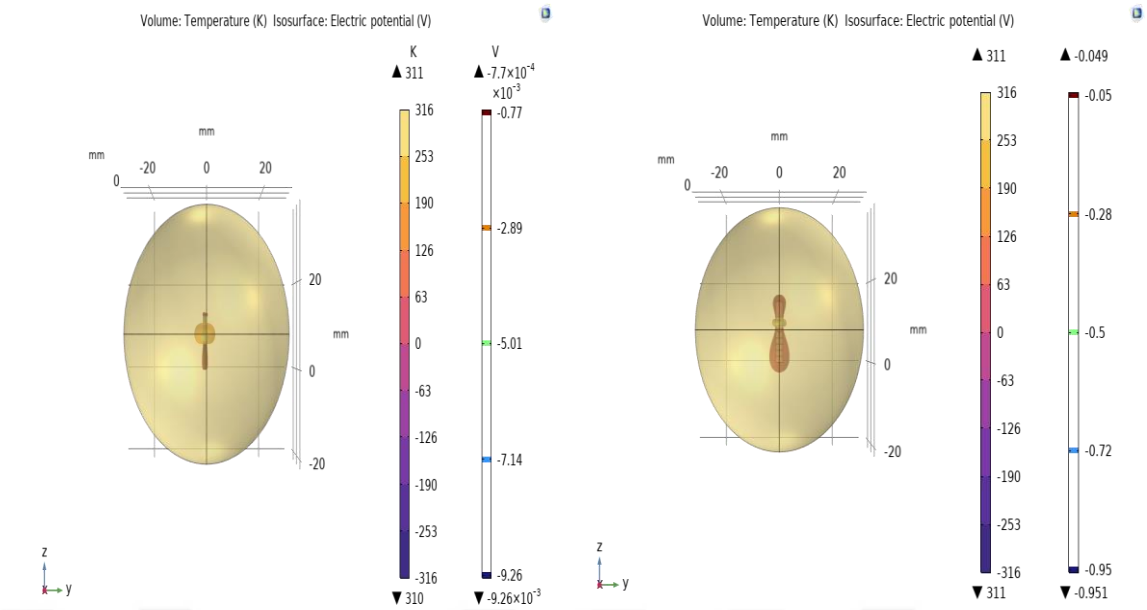
a **b**

Şekil 6. 1. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.011V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

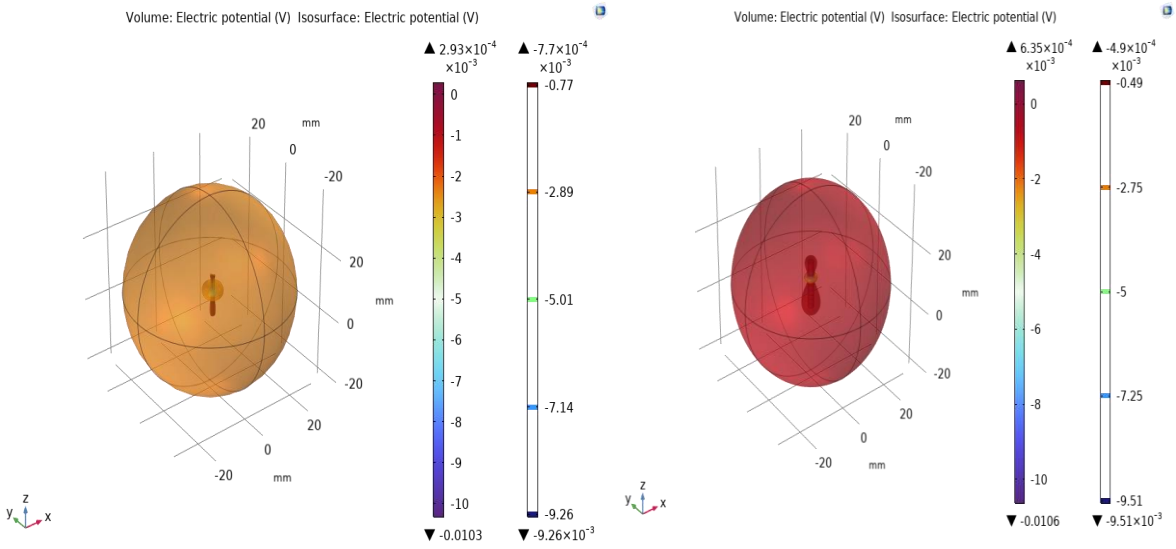
Şekil 6. 2. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.011V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

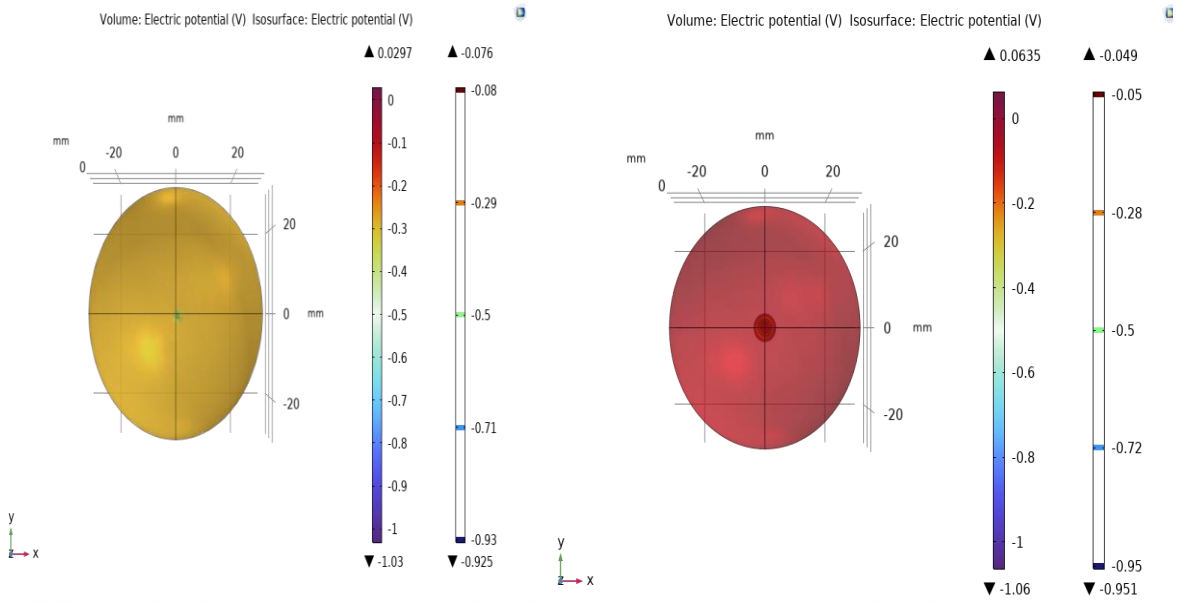
Şekil 6. 3. a. zy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.011V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** zy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyeli çalışması



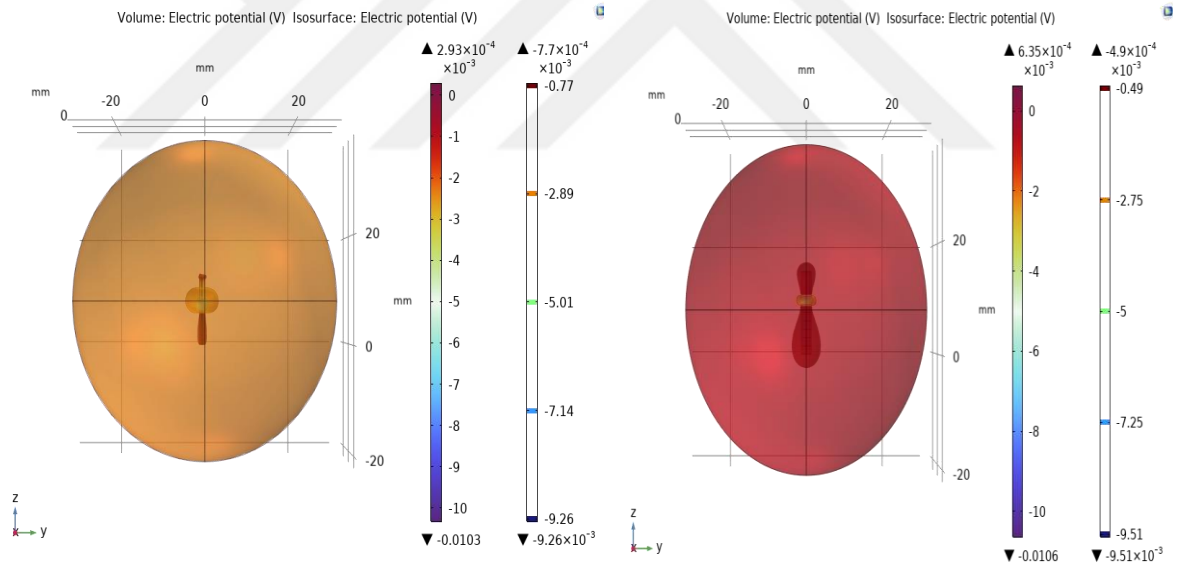
a **b**

Şekil 6. 4. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

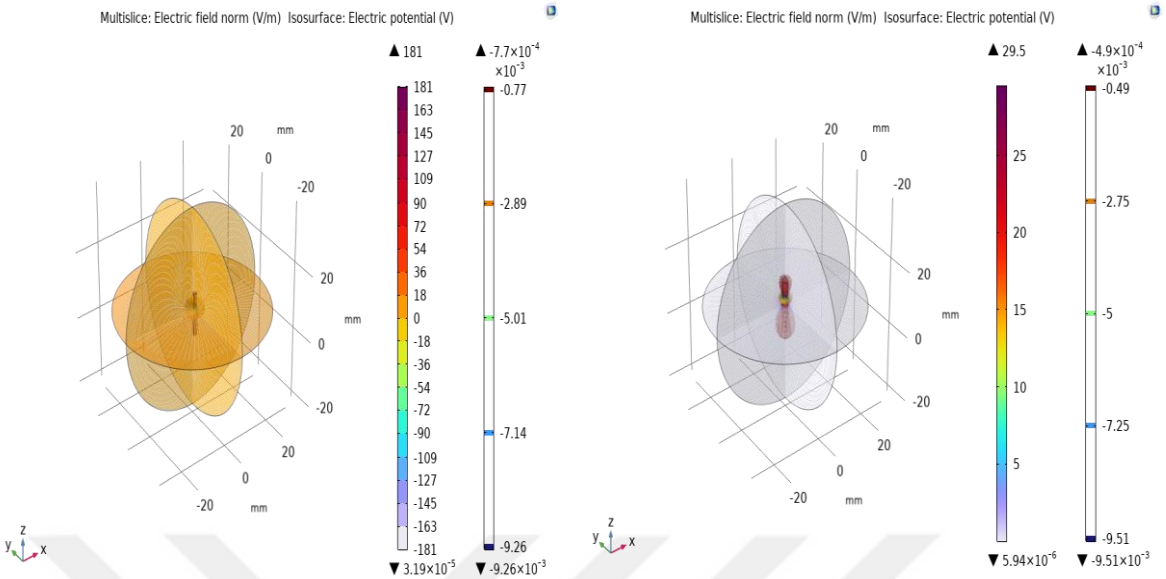
Şekil 6. 5. a. Xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

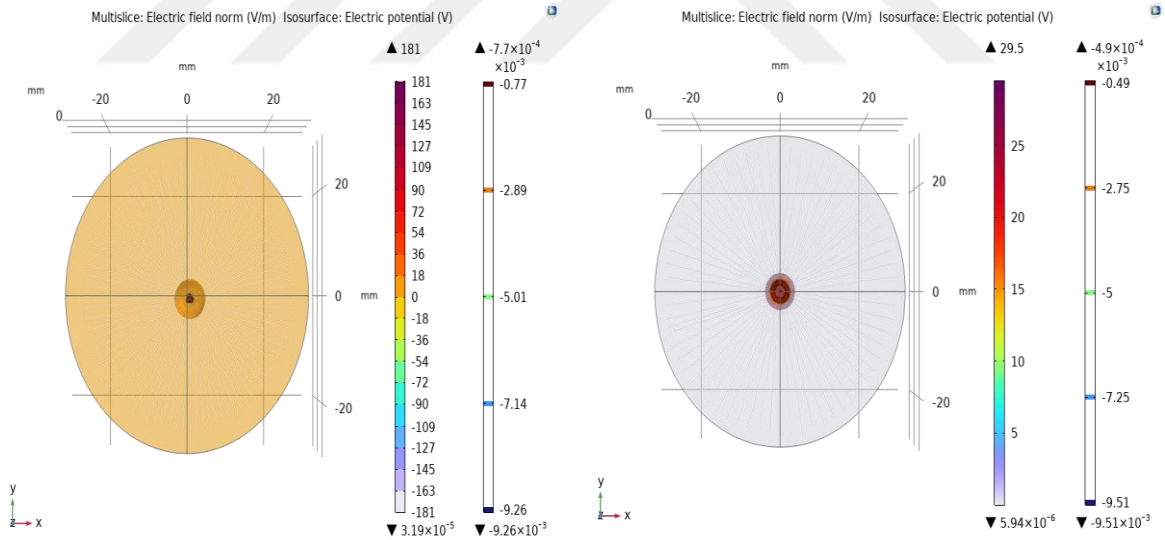
Şe**kil 6. 6. a.** Yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması

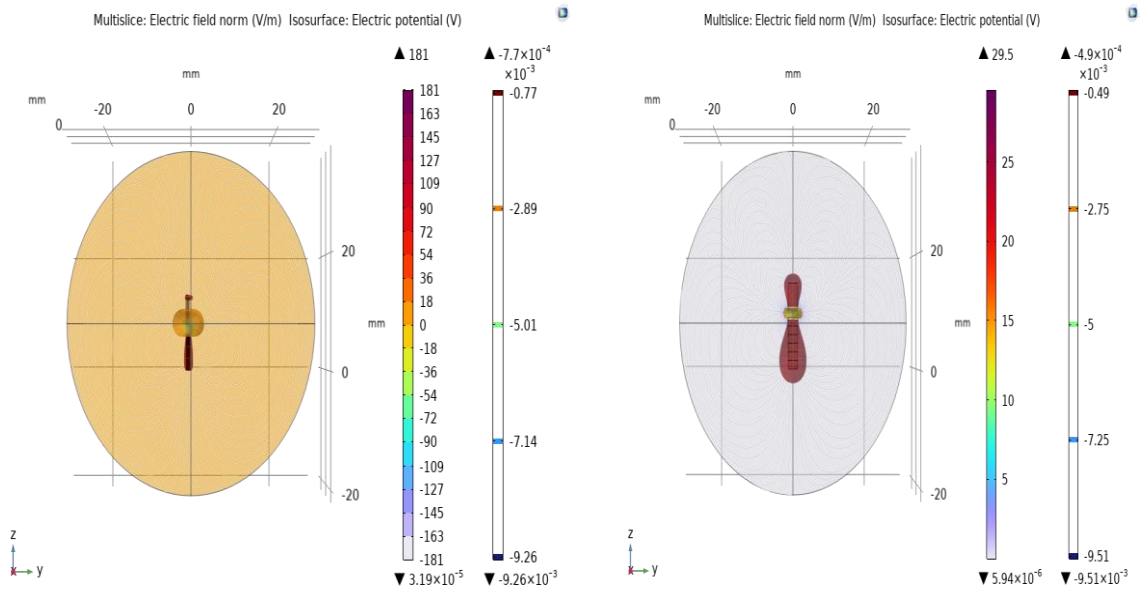


a **b**

Şekil 6. 7. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



Şekil 6. 8. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



Şekil 6. 9. a. yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 1. Y-şekilli elektot için veriler – Monopolar (-0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0027557	5.9594	0.60839

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 2. Kullanımda mevcut elektrot için veriler- Monopolar (-0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0010440	1.7409	0.69638

Sıcaklık, elektrik potansiyeli ve elektrik alanı çalışmasına istinaden:

Elektrik alan (E): Y-şekilli kenarda ~3.4× daha yüksek (5.96 vs 1.74 V/m). Yani Y-şekilli konfigürasyon kenarda daha fokal ve daha güçlü bir lokal alan üretiyor.

Akım yoğunluğu (J): Silindrik kenarda biraz daha yüksek (0.696 vs 0.608 A/m²). Yani yüzey başına akım silindrikte hafifçe daha fazla.

Potansiyel ve sıcaklık her iki noktada ihmal edilebilir farklarda; ısı yükselmesi için bu tekil değerler zaten çok küçük.

Doku hasarı (elektrokimyasal / termal):

Kullanımda mevcut silindrik elektrot, küçük ama anlamlı şekilde daha yüksek J verdiği için (aynı aktif alan varsayımıyla) charge density biraz daha yüksek olabilir → çok uzun/yoğun puls durumlarında dezavantaj olur.

Y-şekilli elektrot, daha yüksek E üretmesine rağmen J biraz daha düşük; bu, hedefi daha iyi fokal aktive edip daha düşük yüzey akım yoğunluğu ile çalışabileceğin anlamına gelir, dolayısıyla doku hasarı riski daha düşük veya en azından eşiklere daha rahat uyulabilir.

Pil ömrü (enerji verimliliği):

Pil ömrü doğrudan toplam akım I_total ve uygulanan pulse ile ilgilidir. Tekil J küçük farklar gösterse de I_total elektrot alanına ve J dağılımına bağlıdır.

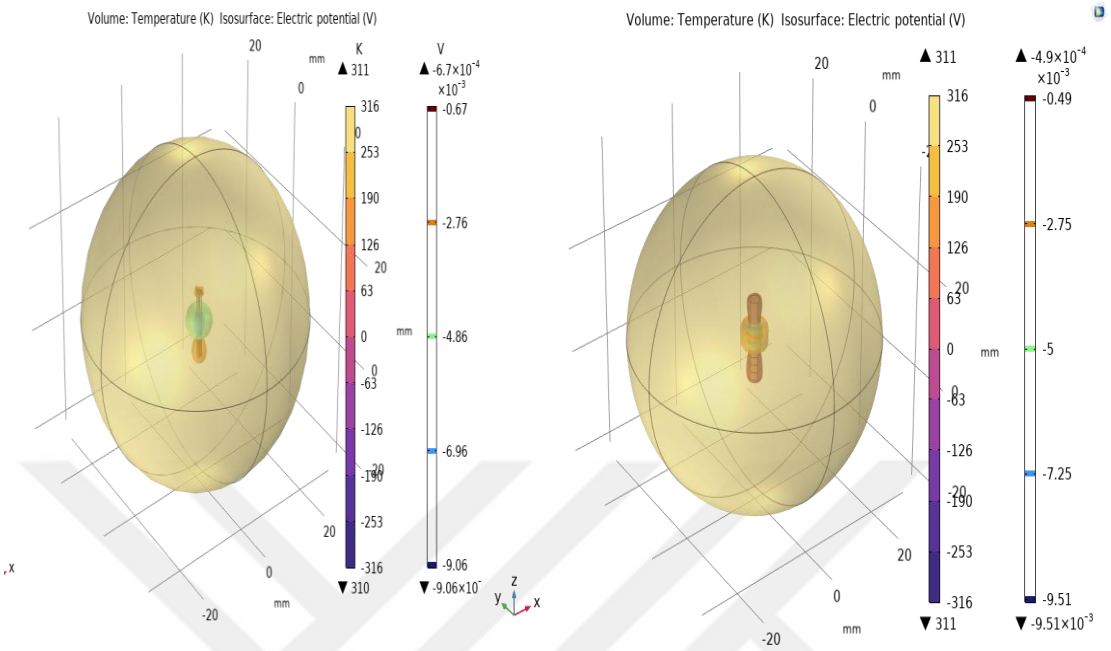
Y-şekilli elektrot aynı hedefi (aynı etkilenen doku hacmini) daha yüksek E ile sağlıyor, aynı etki için daha düşük toplam akım gerekebilir → bu durum pil ömrüne olumlu yansır.

Özetle: elimizdeki tekil değerlere göre Y-şekilli, hedefe göre daha enerji-verimli (pil için daha avantajlı) olma potansiyeline sahip.

6.1.2 Tek Kutuplu (Monopolar) Geometri (-0.01V, -0.01V)

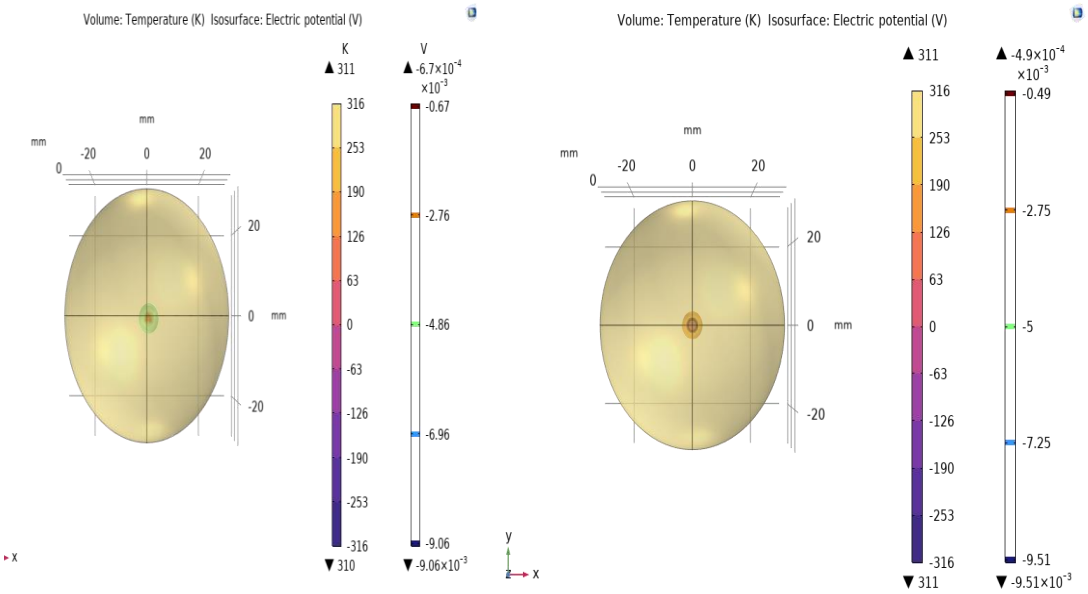
İkinci Tek kutuplu (Monopolar) geometri, Y-şekilli elektrot için negatif yüklü -0.01V'luk 18 katot (şekil 5.12.b) ve kullanımda mevcut elektrot için negatif yüklü -0.01V'luk iki katot (şekil 5.8.b) olarak oluşturuldu. Biyoısı transferi (ht) ve elektrik akımı çalışmaları yapıldı. Sıcaklık çalışması, elektrik potansiyeli çalışması ve elektrik alanı çalışması sonuçları iki elektrot için kaydedildi.

a. Sıcaklık çalışması



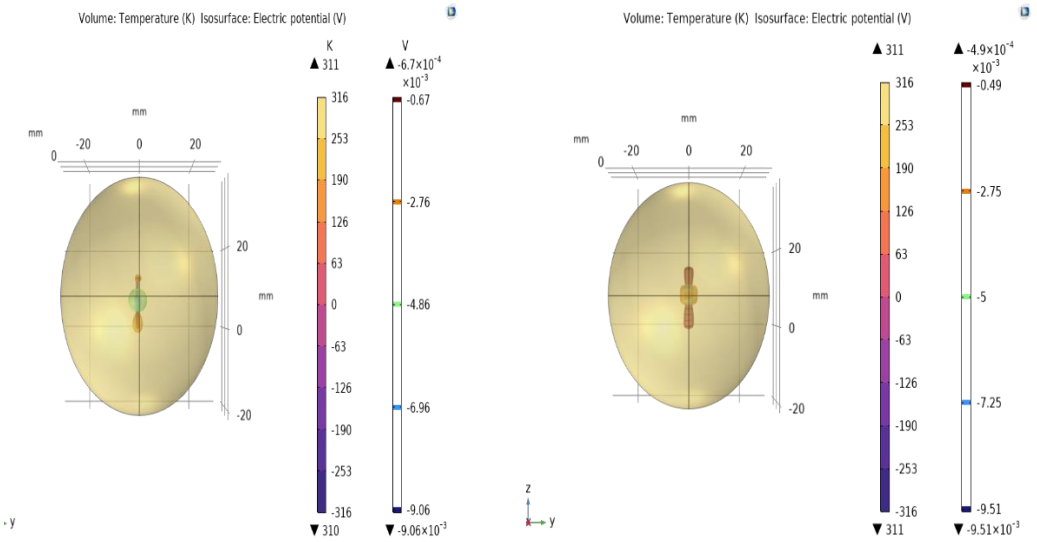
a **b**

Şekil 6. 10. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

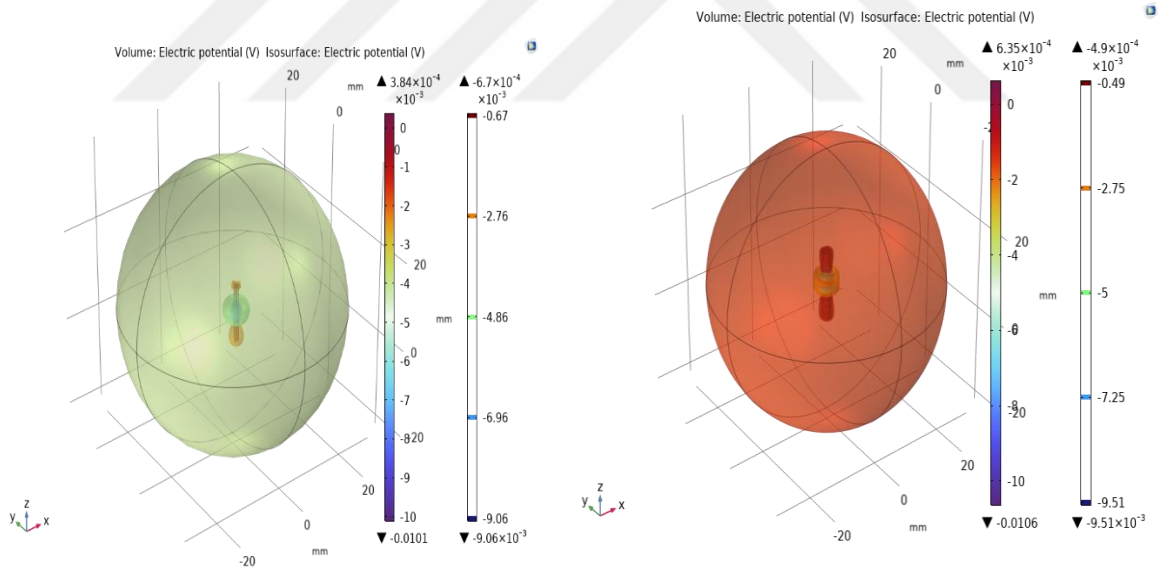
Şekil 6. 11. a. Xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

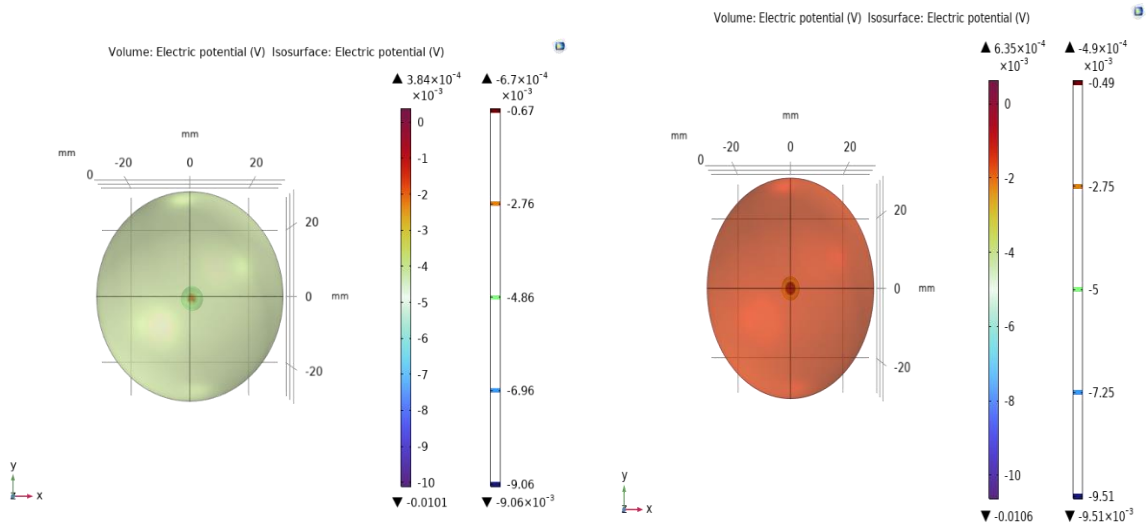
Şekil 6. 12. a. Yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyeli çalışması



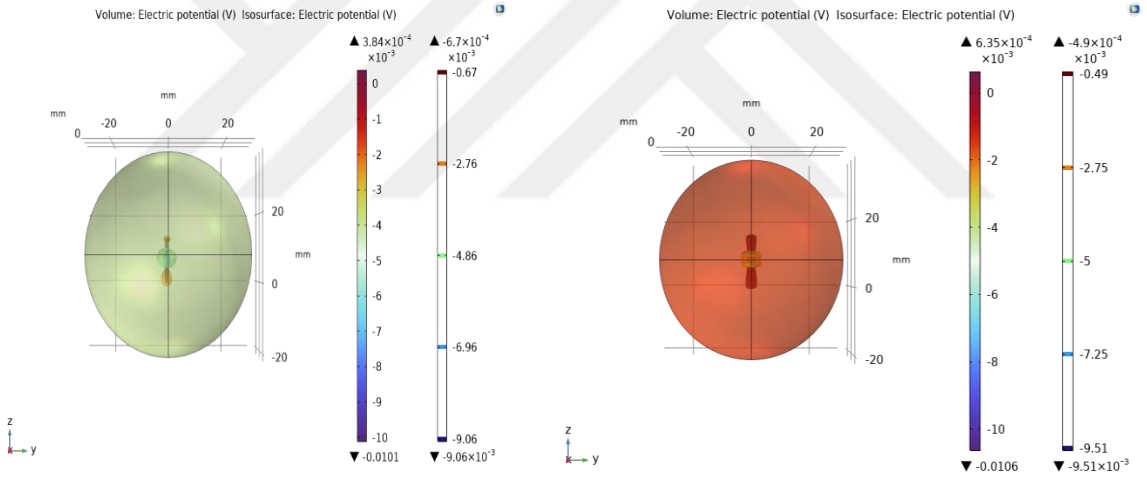
a **b**

Şekil 6. 13. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

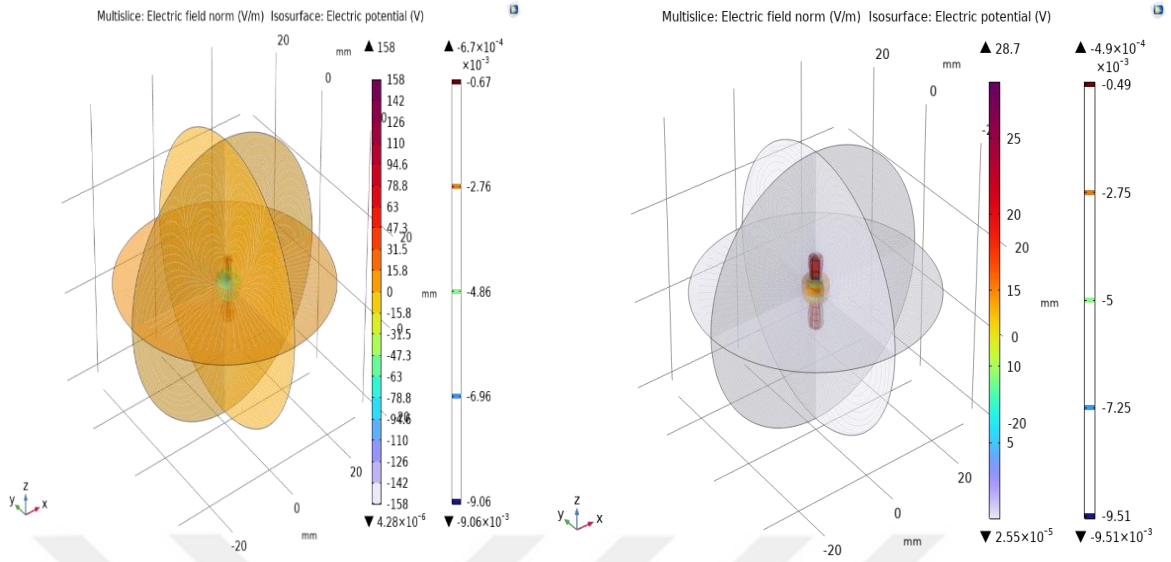
Şekil 6. 14. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

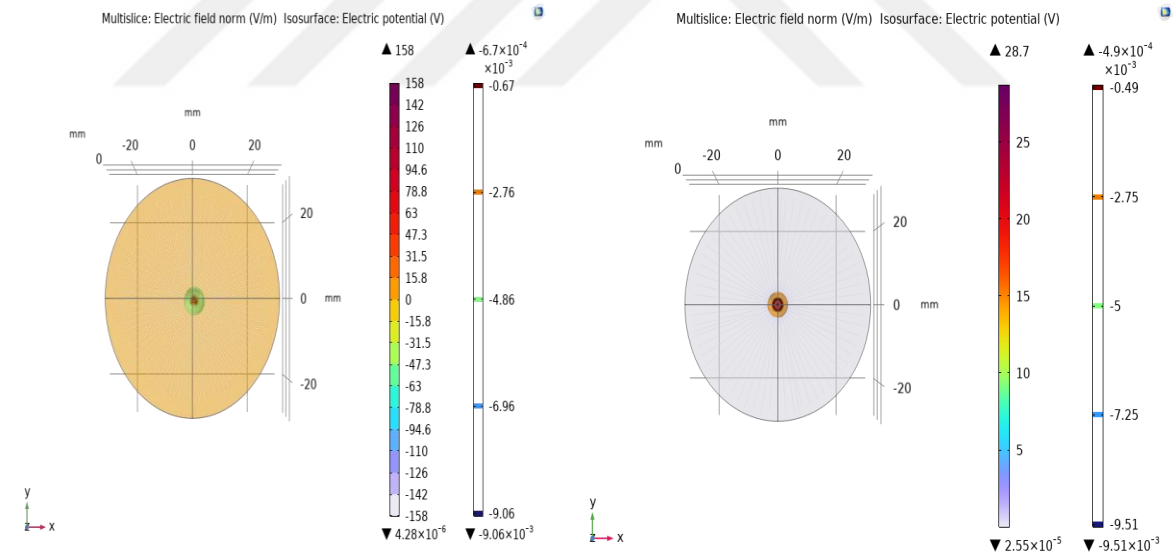
Şekil 6. 15. a. yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması



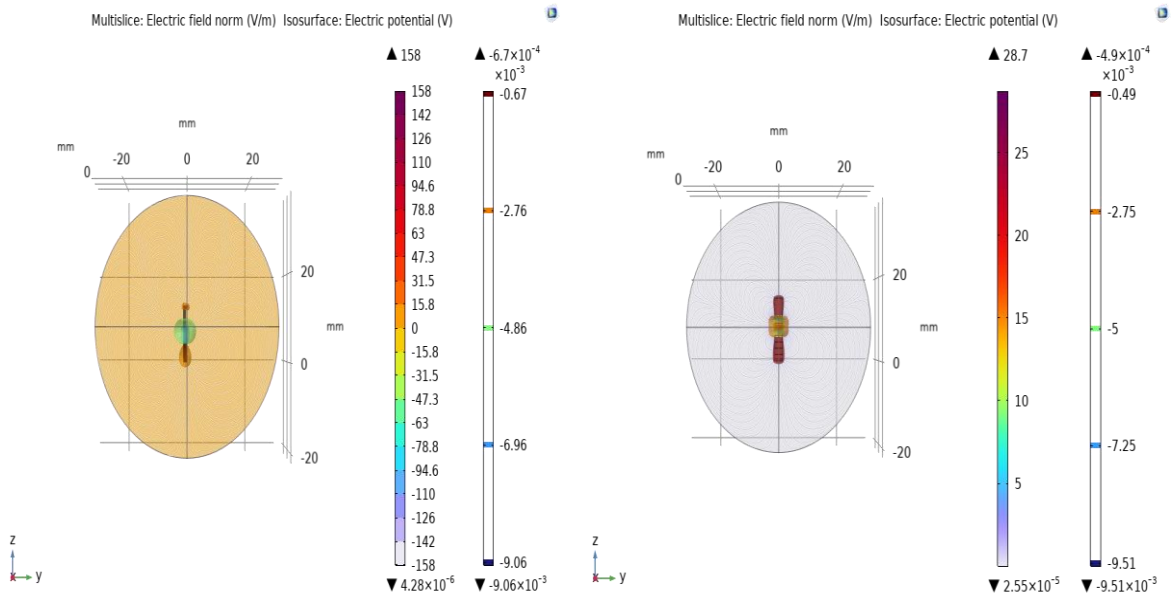
a **b**

Şekil 6. 16. a. 3D Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Tek kutuplu geometri (Monopolar) (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 17. a. xy Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Tek kutuplu geometri (Monopolar) (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 18. a. yz Tek kutuplu (Monopolar) geometri (-0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Tek kutuplu geometri (Monopolar) (-0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 3. Y-şekilli elektrot için veriler - Monopolar (-0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0047620	7.0644	0.72182

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 4. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Monopolar (-0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0020696	3.2782	1.3113

Elektrik alan (E): Y-şekilli kenarda yaklaşık 2.15× daha büyük (7.06 vs 3.28 V/m). Yani aynı noktada Y-şekilli daha fokal ve güçlü yerel alan üretiyor.

Akım yoğunluğu (J): Silindrik kenarda ~1.82× daha yüksek (1.31 vs 0.72 A/m²). Yani yüzey başına akım silindrikte daha fazla.

Doku hasarı (elektrokimyasal / termal):

Silindrik elektrotta J daha yüksek olduğundan, aynı aktif alana sahipseler silindrikte yüzey başına daha fazla charge birikebilir → elektrokimyasal hasar riski göreceli olarak artar.
Y-şekilli elektrot daha yüksek E üretirken J daha düşük: bu, hedefi daha etkili uyarıp yüzeyde daha az akım yoğunluğu bırakma potansiyeli verir — doku güvenliği açısından avantajlı olur.
Pil ömrü (enerji verimliliği):
Y-şekilli aynı hedef etkisini daha küçük toplam akımla veriyor pil için daha avantajlıdır.
Öte yandan silindrikte J daha yüksek olduğuna göre, bu yüksek J küçük bir yüzeyte yoğunlaşıtı için I total artabilir ve pil ömrü olumsuz etkilenebilir.

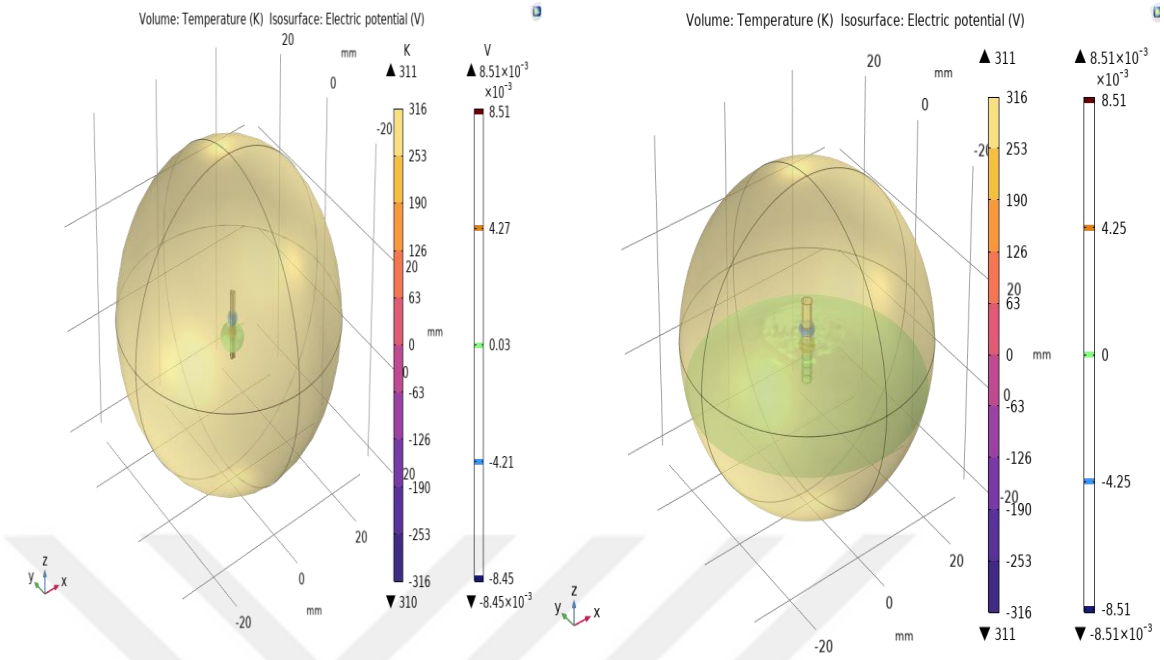
6.2 Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri Karşılaştırmalı

Çift kutuplu (Bipolar) geometri dört modelle oluşturuldu. Y-şekilli elektrot için; model-1: 9 katot -0.01V ve 9 anot +0.01V olan dar çift kutuplu (Bipolar) model (şekil 5.13.a), model-2: 9 anot +0.01V ve 9 katot -0.01V olan dar çift kutuplu (Bipolar) model (şekil 5.13.b), model-3: 9 katot -0.01V ve 9 anot +0.01V olan geniş çift kutuplu (Bipolar) model (şekil 5.13.c) ve model-4: 9 anot +0.01V ve 9 katot -0.01V olan geniş çift kutuplu (Bipolar) model (şekil 5.13.d) oluşturuldu.
Kullanımda mevcut elektrot için: yüzey voltajlarına sahip dar çift kutuplu (Bipolar) elektrot (-0.01V, +0.01V) (şekil 5.9.a, model-1), yüzey voltajlarına sahip dar çift kutuplu (Bipolar) elektrot (+0.01V, -0.01V) (şekil 5.9.b, model-2), yüzey voltajlarına sahip geniş çift kutuplu (Bipolar) elektrot (-0.01V, +0.01V) (şekil 5.9.c, model-3), yüzey voltajlarına sahip geniş çift kutuplu (Bipolar) elektrot (+0.01V, -0.01V) (şekil 5.9.d, model-4) oluşturuldu.

6.2.1 Dar Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (-0.01V, +0.01V)

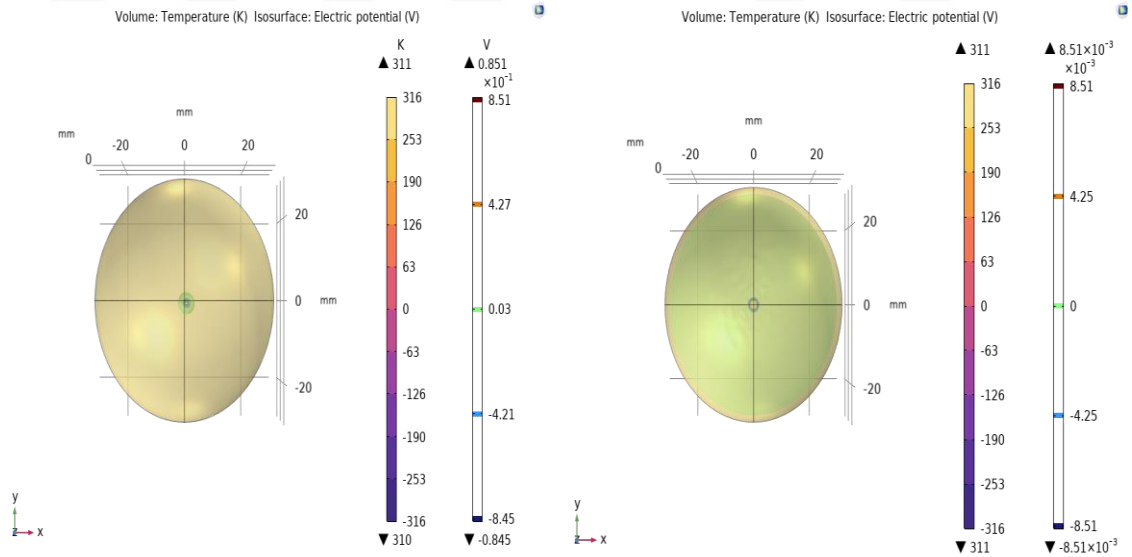
Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V), Y-şekilli elektrot için; 9 katot -0.01V ve 9 anot +0.01V olan dar çift kutuplu (Bipolar) mod (şekil 5.13.a), Kullanımda mevcut elektrot için; yüzey voltajlarına sahip dar çift kutuplu (Bipolar) elektrot (-0.01V, +0.01V) (şekil 5.9.a). Biyoısı transferi (ht) ve elektrik akımı çalışmaları yapıldı. Sıcaklık çalışması, elektrik potansiyeli çalışması ve elektrik alanı çalışması sonuçları iki elektrot için kaydedildi.

a. **Sıcaklık çalışması**



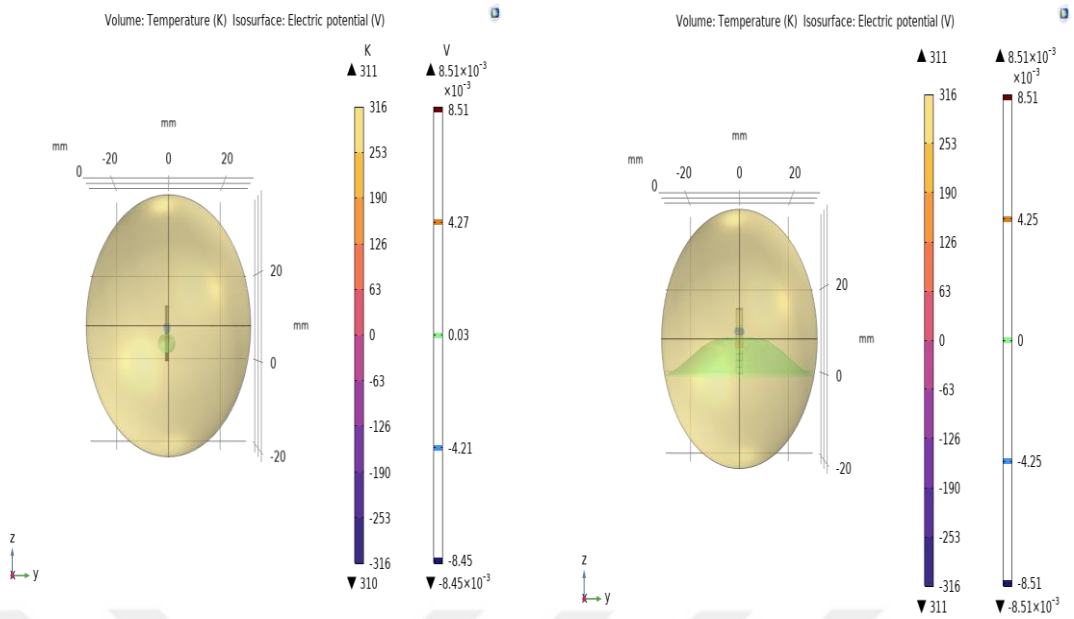
a **b**

Şekil 6. 19. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

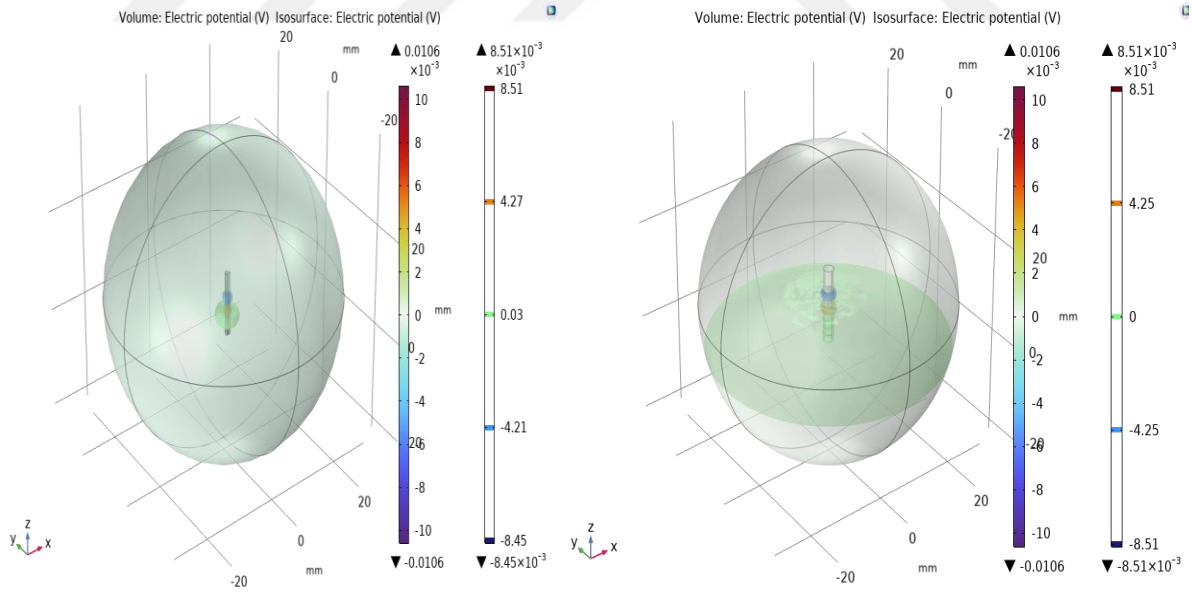
Şekil 6. 20. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

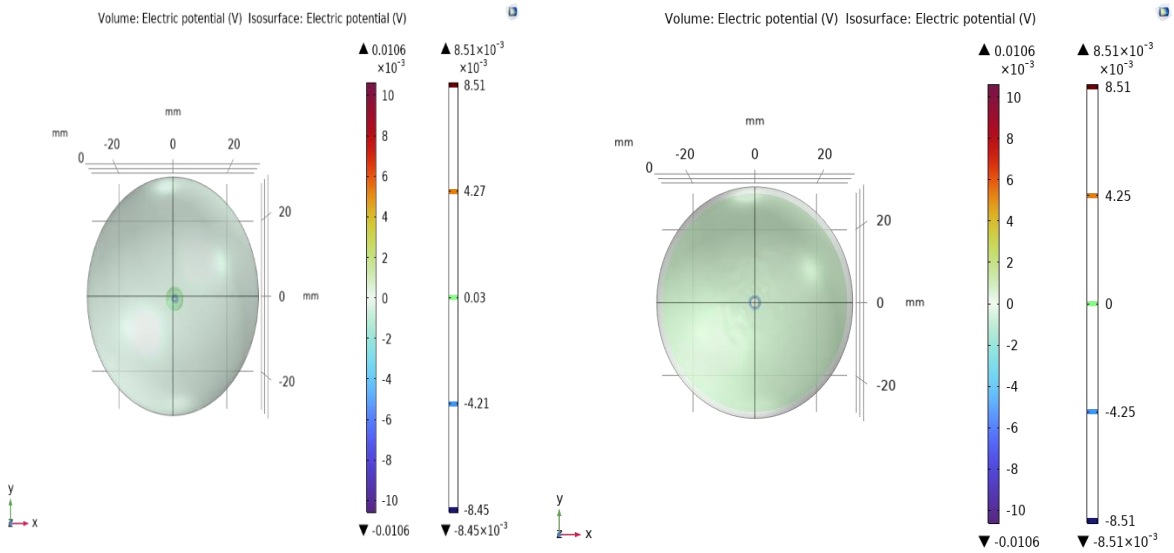
Şekil 6. 21. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

d. Elektrik potansiyeli çalışması



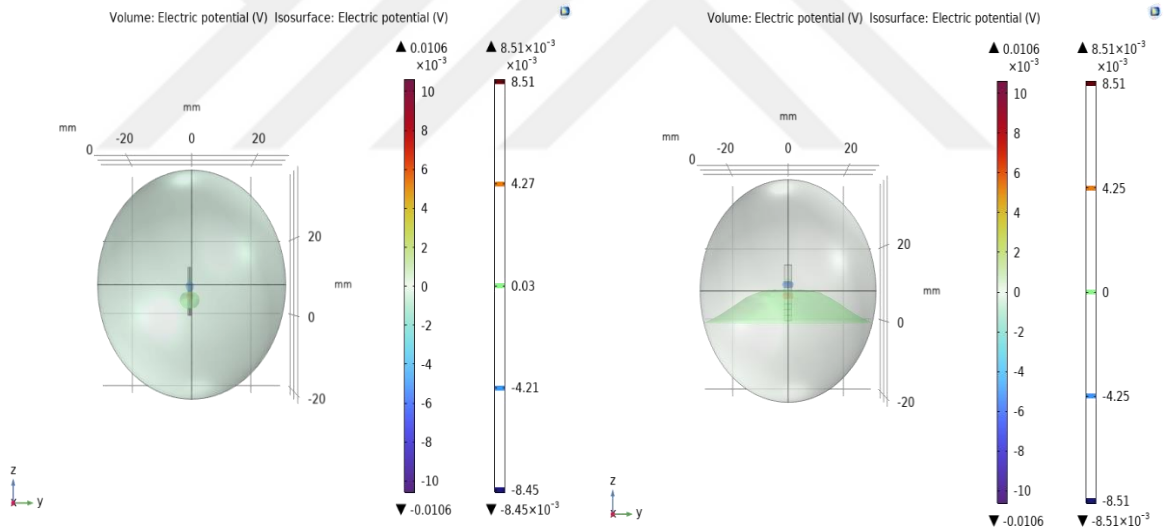
a **b**

Şekil 6. 22. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

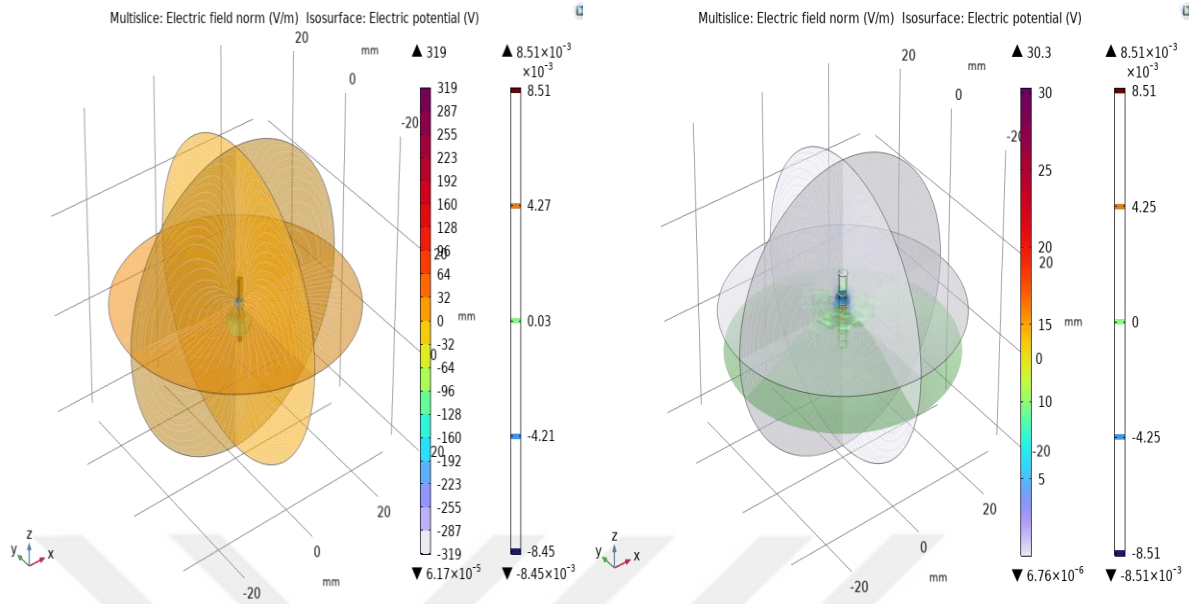
Şekil 6. 23. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

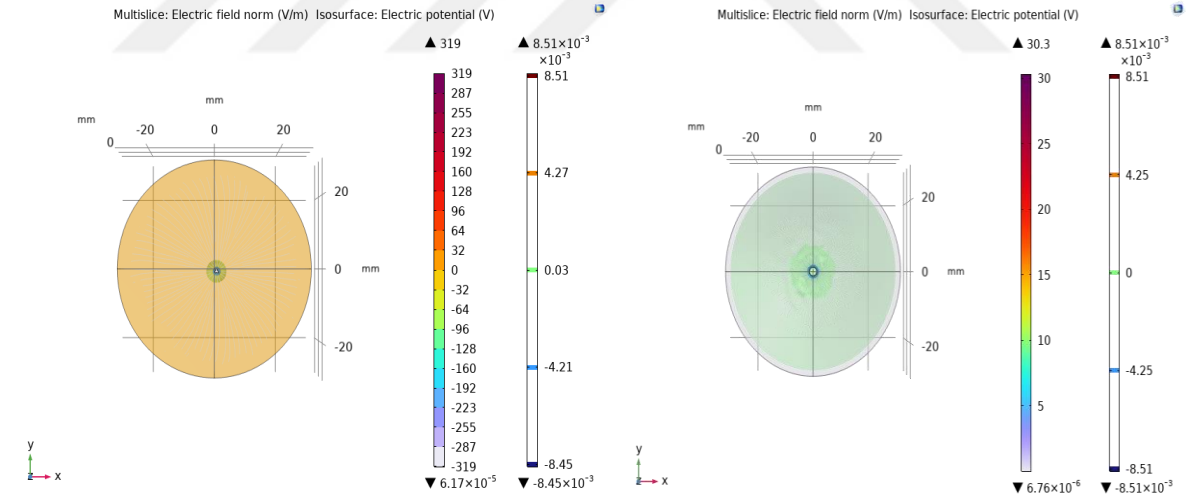
Şekil 6. 24. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

e. Elektrik alanı çalışması



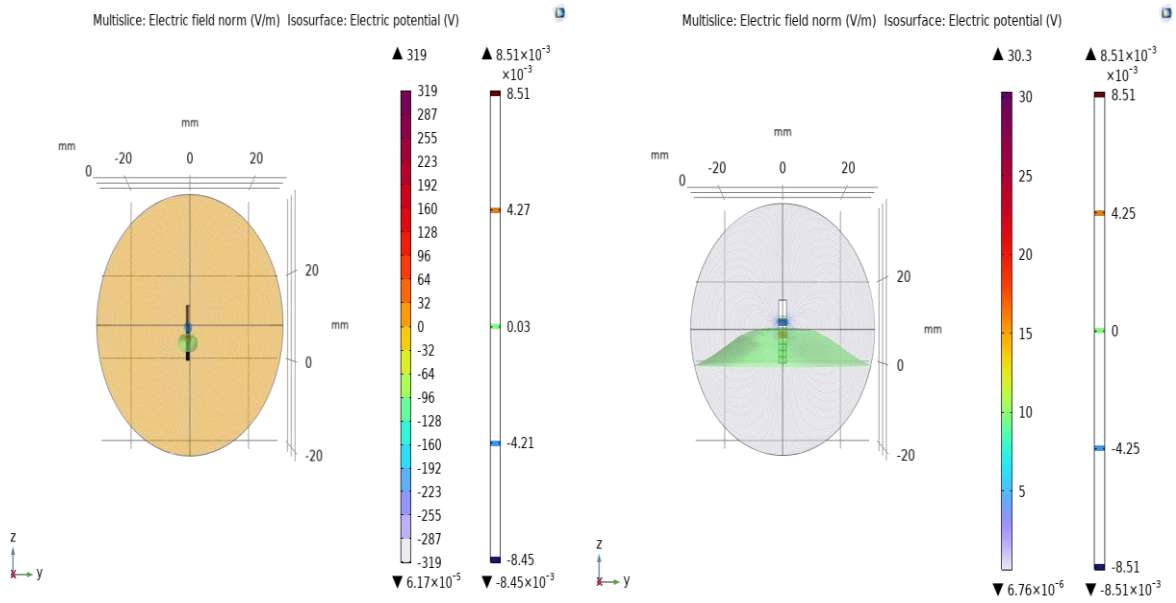
a **b**

Şekil 6. 25. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 26. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 27. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Dar çift kutuplu (Bia. polar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 5. Y-şekilli elektrot için veriler - Bipolar (-0.01V, +0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-7.4941E-4	10.932	1.1171

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 6. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Bipolar (-0.01V, +0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-1.8315E-5	3.0148	1.2059

E oranı = 10.932 / 3.0148 ≈ 3.63× (Y-şekilli kenarda elektrik alan ≈ 3.6 kat daha yüksek).

J oranı = 1.1171 / 1.2059 ≈ 0.93 (Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %7 daha düşük).

Fokal uyarım / hedef hassasiyeti:

Y-şekilli çok daha yüksek lokal E üretiyor → küçük, odaklı hedefleri aktive etmede daha etkili. Aynı hedef etkisini sağlamak için Y-şekilli, daha küçük hacim / daha az toplam enerji ile yetinebilir (dolayısıyla pil açısından avantajlı olur).

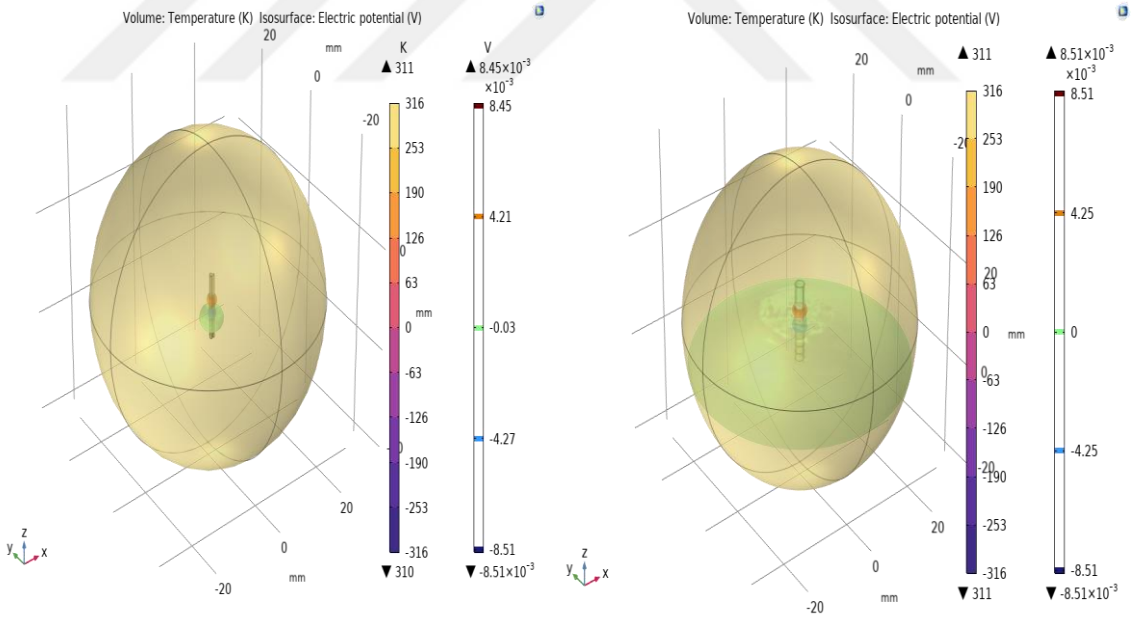
Doku zararı (elektrokimyasal / termal) riski: Y-şekilli E yüksek ama J tekil noktada biraz daha düşük. Bu iyi sonuç: yüksek E ile birlikte çok daha yüksek yüzey J yoksa elektrot-doku arayüzünde aşırı charge density oluşma riski daha az olur

Pil ömrü: Y-şekilli aynı hedef hacmi daha düşük I_total ile aktive ediyor → pil ömrü Y-şekilli ile daha iyi olur. Ancak eğer yüksek E küçük yerlerde çok yüksek akım taleplerine yol açıyorsa pil dezavantajı doğabilir.

6.2.2 Dar Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (+0.01V, -0.01V)

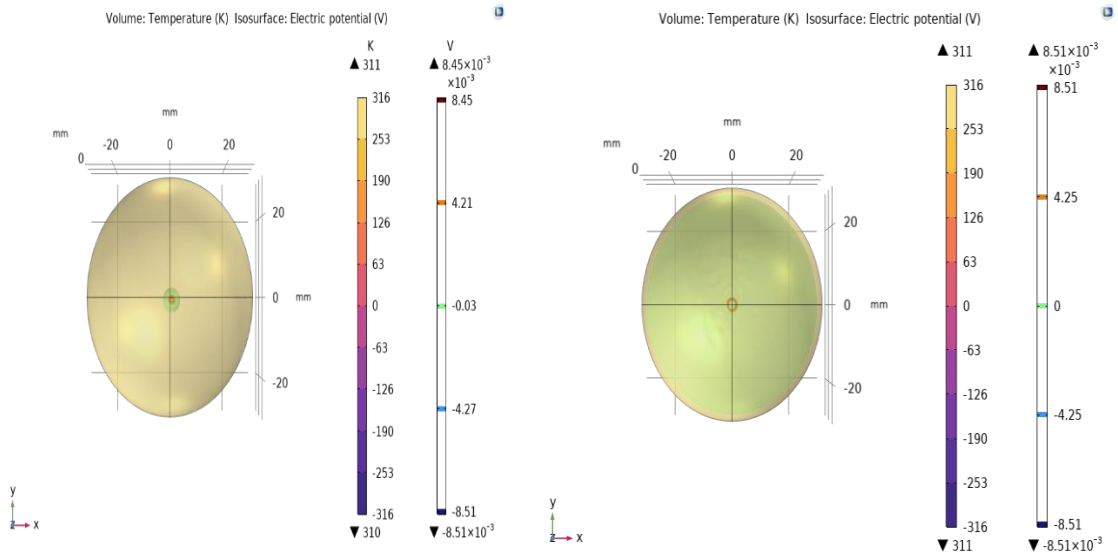
Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V), Y-şekilli elektrot için; model-1: 9 anot +0.01V ve 9 katot -0.01V olan dar çift kutuplu (Bipolar) model (şekil 5.13.b) ve kullanımda mevcut olan elektrot için ise model-2 de gösterildiği biçimle yüzey voltajlarına sahip dar çift kutuplu (Bipolar) elektrot (+0.01V, -0.01V) (şekil 5.9.b) olarak oluşturuldu [29]. Sıcaklık çalışması, elektrik potansiyeli çalışması ve elektrik alanı çalışması sonuçları iki elektrot için kaydedildi.

a. **Sıcaklık çalışması**



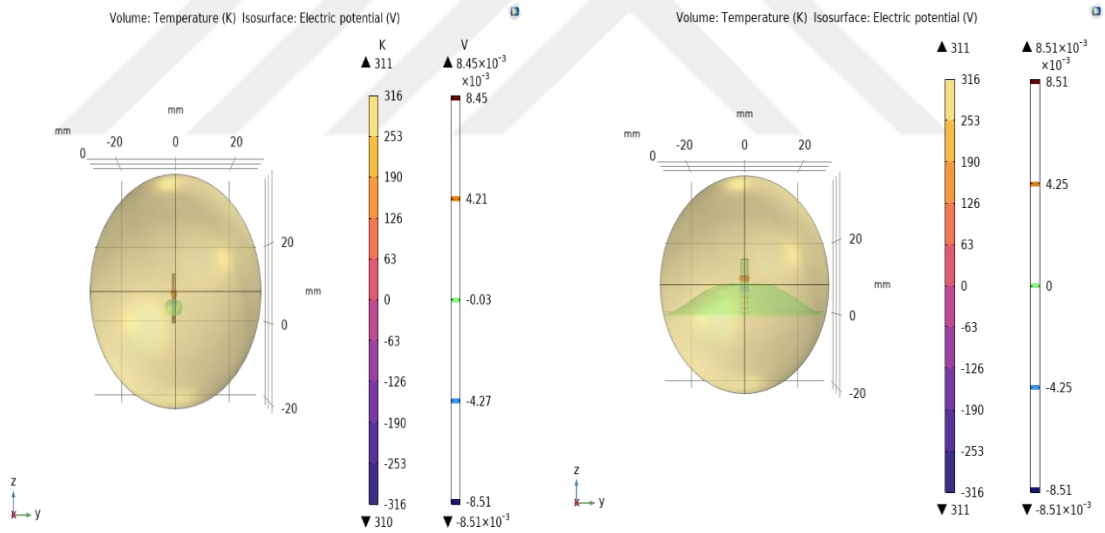
a **b**

Şekil 6. 28. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrodu için sıcaklık çalışması



a **b**

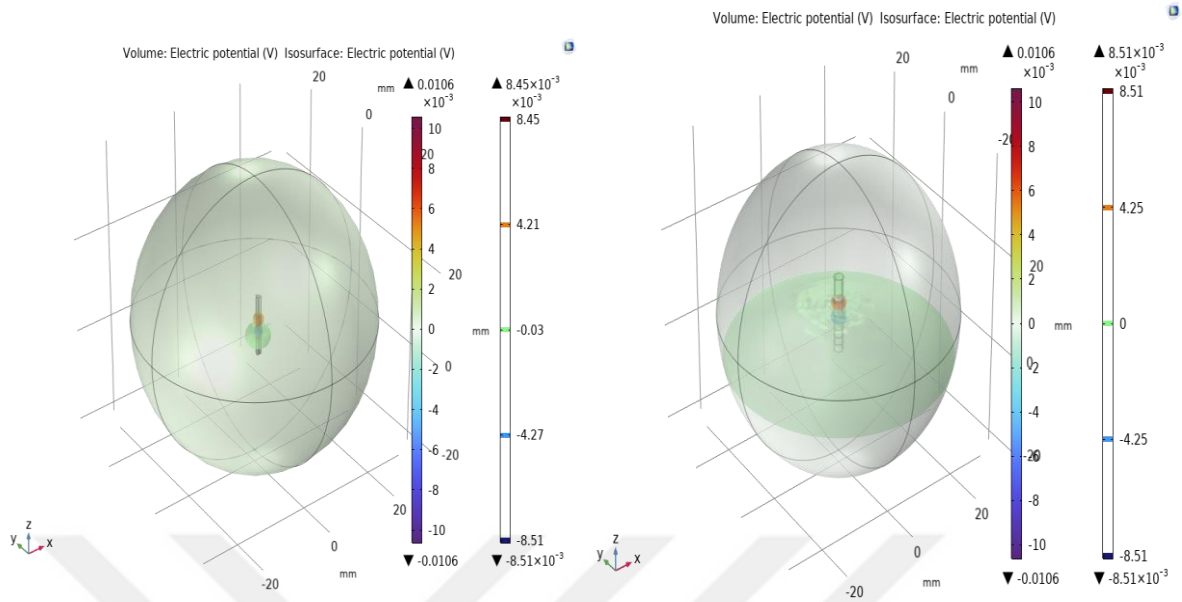
Şekil 6. 29. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrodu için sıcaklık çalışması



a **b**

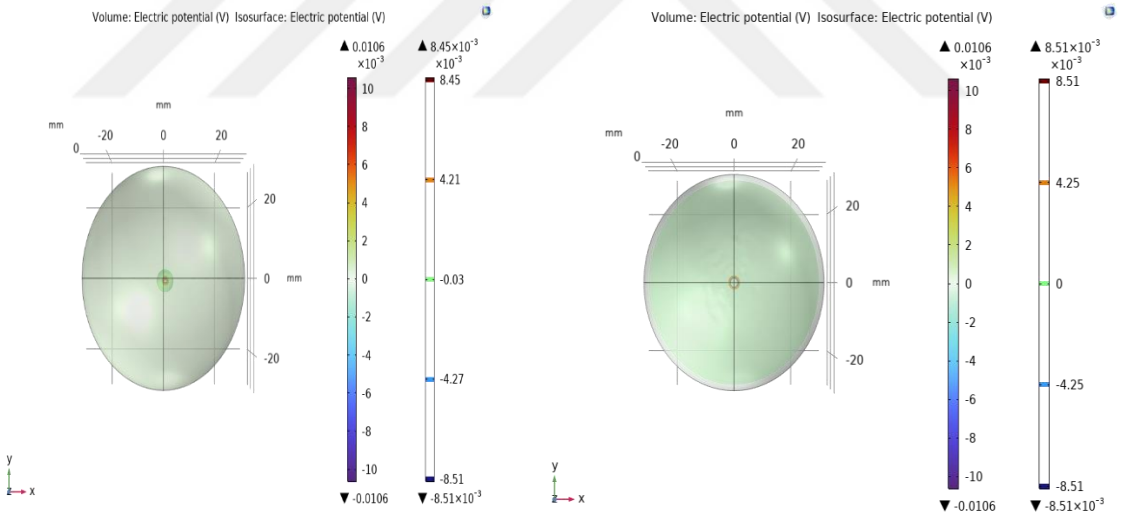
Şekil 6. 30. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrodu için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyeli çalışması



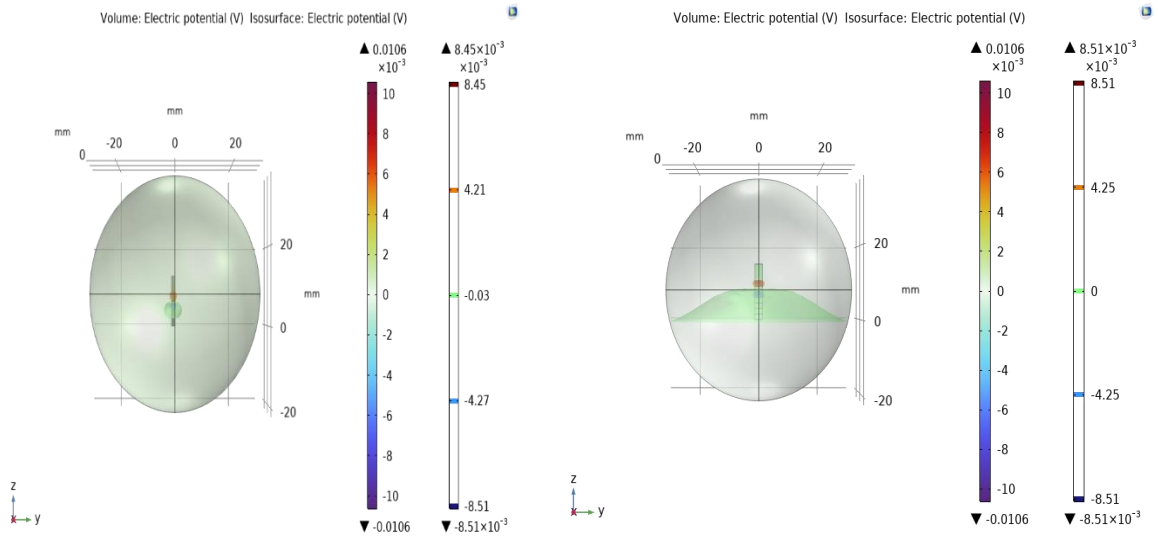
a **b**

Şekil 6. 31. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

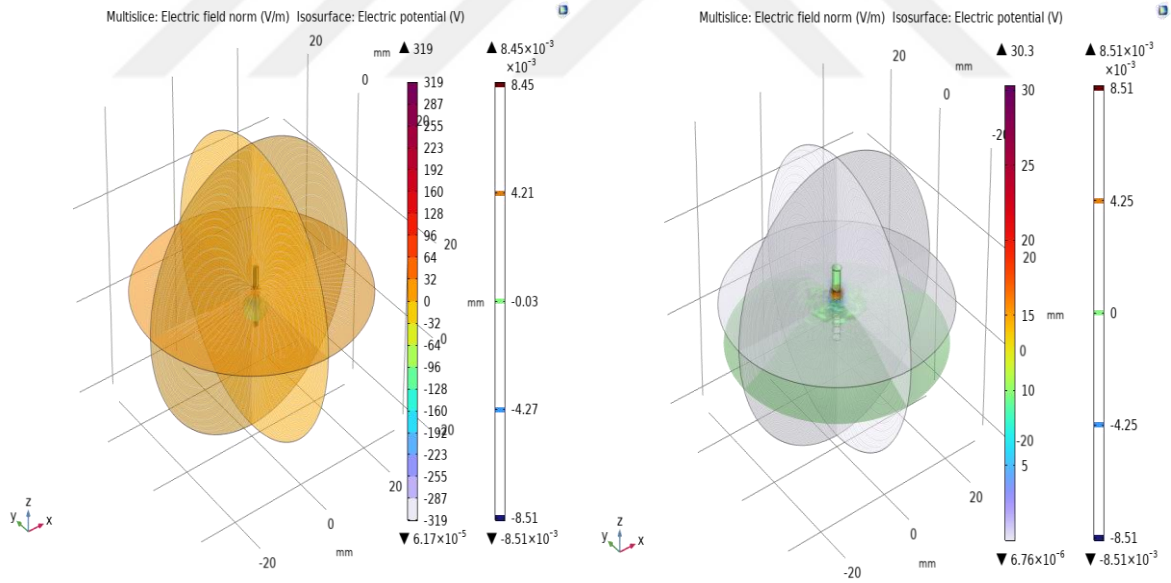
Şekil 6. 32. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

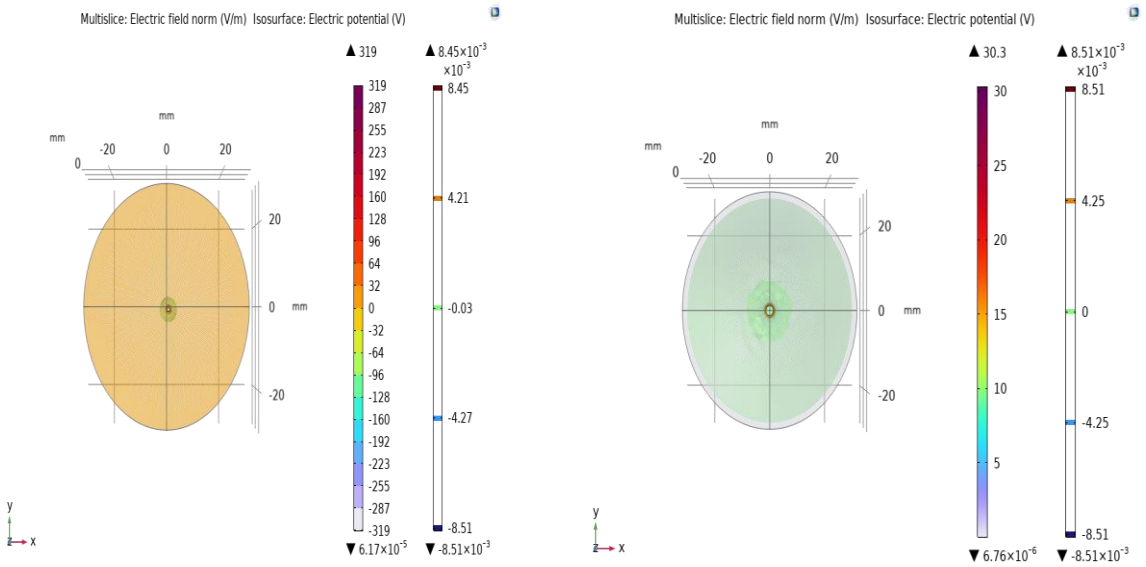
Şekil 6. 33. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması



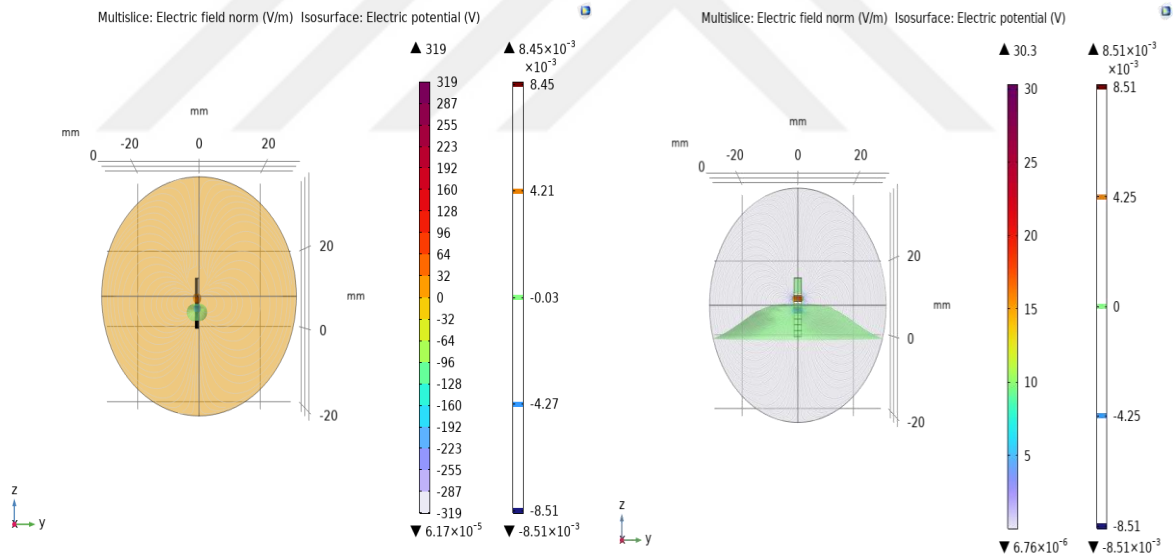
a **b**

Şekil 6. 34. a. 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 35. a. xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 36. a. yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Dar çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 7. Y-şekilli elektrot için veriler - Bipolar (+0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	7.4941E-4	10.932	1.1171

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 8. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Bipolar (+0.01V, -0.01V)

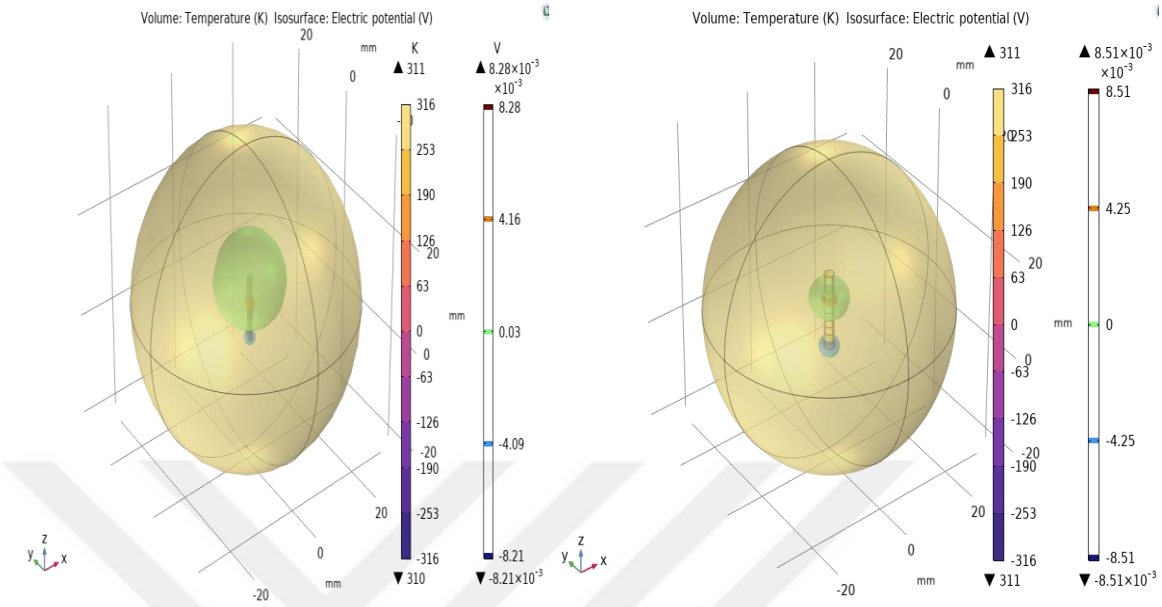
Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	1.8315E-5	3.0148	1.2059

E oranı = 10.932 / 3.0148 ≈ 3.63× (Y-şekilli kenarda elektrik alan ≈ 3.6 kat daha yüksek).
J oranı = 1.1171 / 1.2059 ≈ 0.93 (Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %7 daha düşük).
Fokal uyarım / hedef hassasiyeti:
Y-şekilli çok daha yüksek lokal E üretiyor → küçük, odaklı hedefleri aktive etmede daha etkili. Aynı hedef etkisini sağlamak için Y-şekilli, daha küçük hacim / daha az toplam enerji ile yetinebilir (dolayısıyla pil açısından avantajlı olur).
Doku zararı (elektrokimyasal / termal) riski: Y-şekilli E yüksek ama J tekil noktada biraz daha düşük. Bu iyi sonuç: yüksek E ile birlikte çok daha yüksek yüzey J yoksa elektrot-doku arayüzünde aşırı charge density oluşma riski daha az olur
Pil ömrü: Y-şekilli aynı hedef hacmi daha düşük I_total ile aktive ediyor → pil ömrü Y-şekilli ile daha iyi olur. Ancak eğer yüksek E küçük yerlerde çok yüksek akım taleplerine yol açıyorsa pil dezavantajı doğabilir.

6.2.3 Geniş Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (-0.01V, +0.01V)

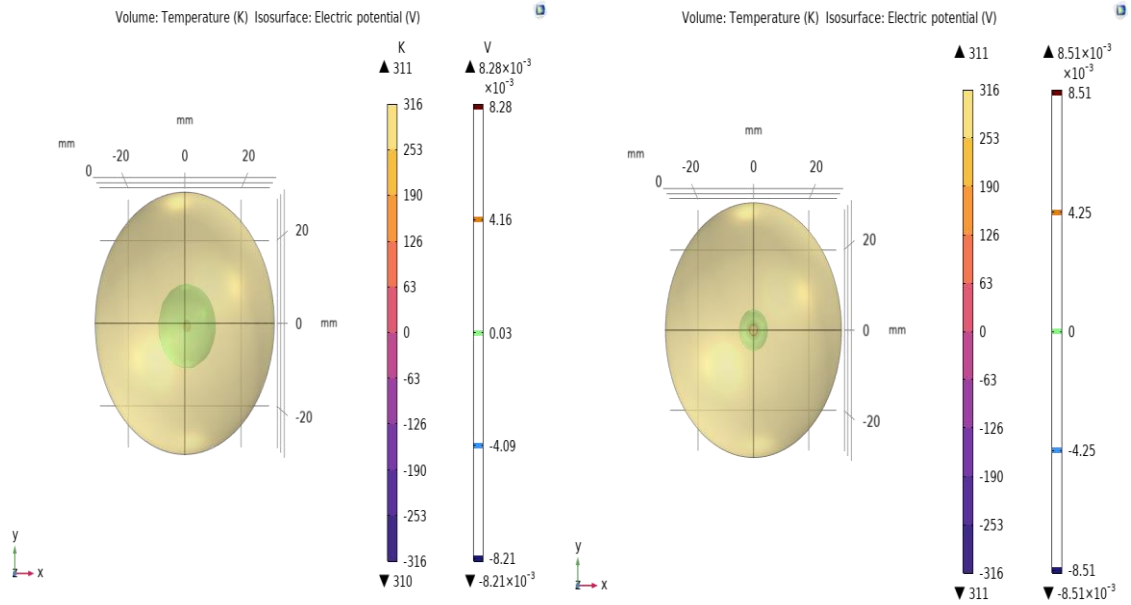
Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V), Y-şekilli elektrot için; 9 katot -0.01V ve 9 anot +0.01V olan geniş çift kutuplu (Bipolar) mod (şekil 5.13.c) ve kullanımda mevcut elektrot için; yüzey voltajlarına sahip geniş çift kutuplu (Bipolar) elektrot (-0.01V, +0.01V) (şekil 5.9.c) şeklinde oluşturuldu.

a. Sıcaklık çalışması



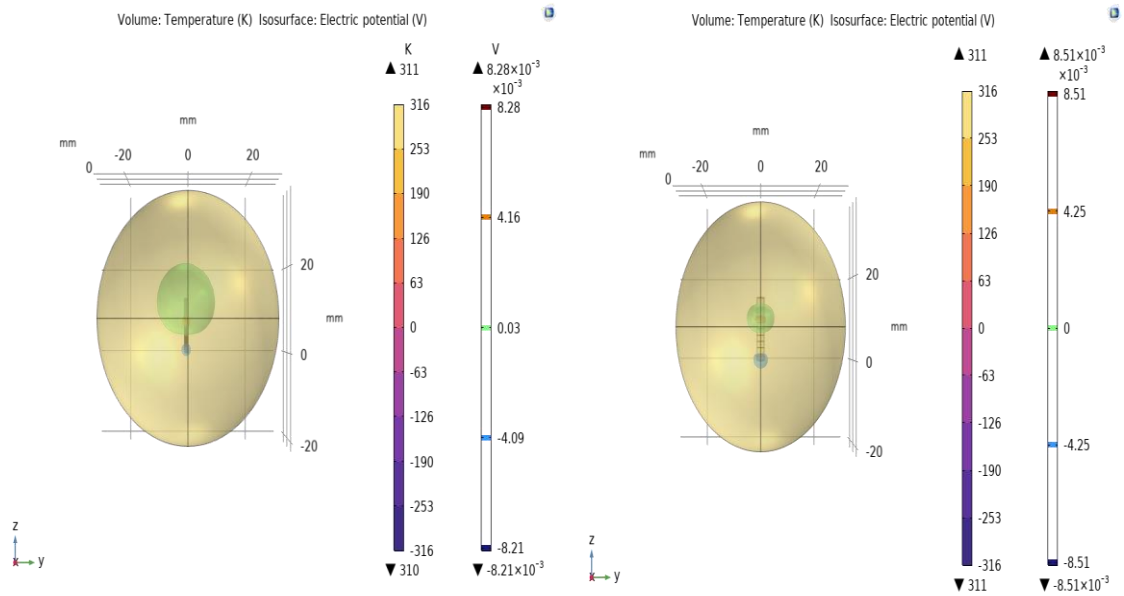
a **b**

Şekil 6. 37. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

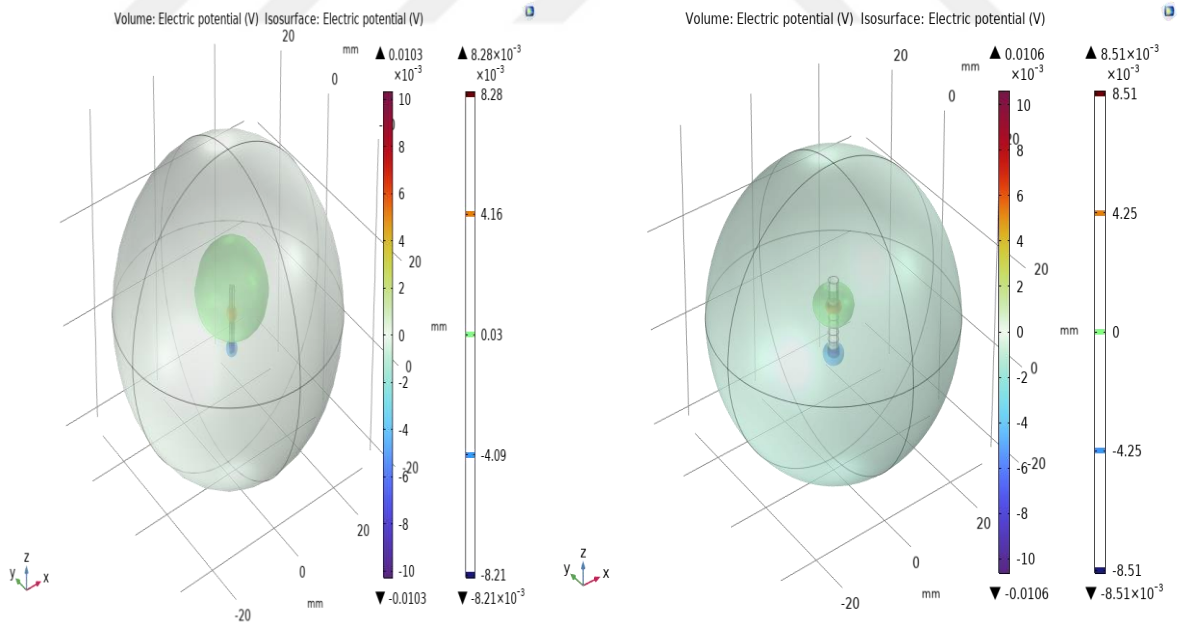
Şekil 6. 38. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

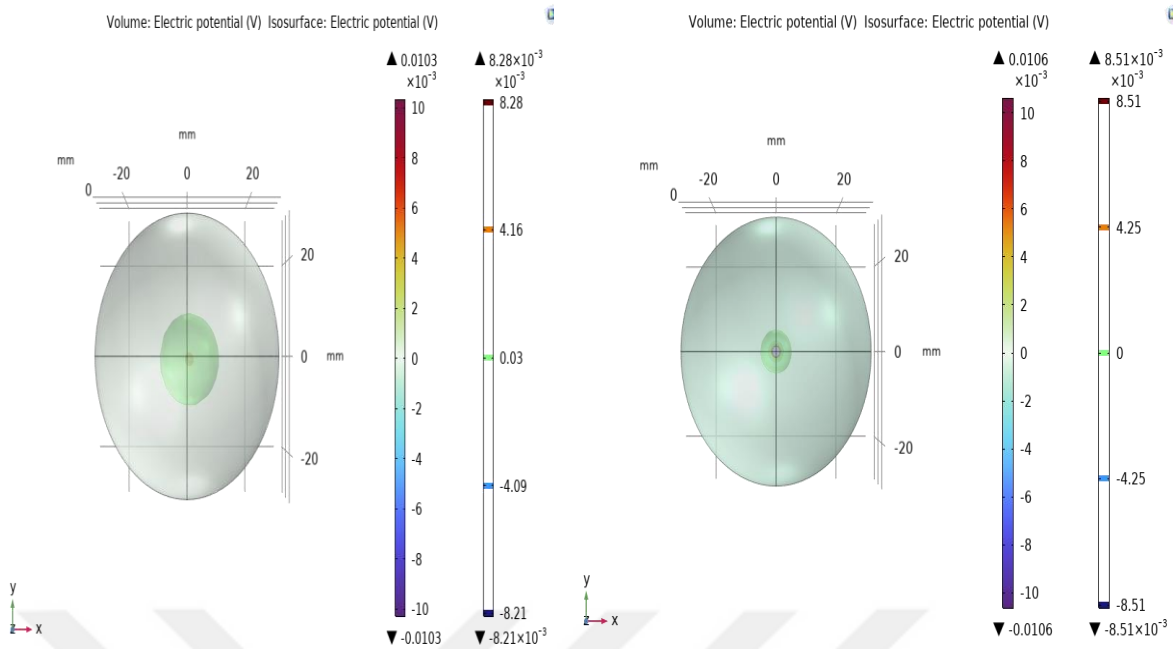
Şekil 6. 39. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyeli çalışması



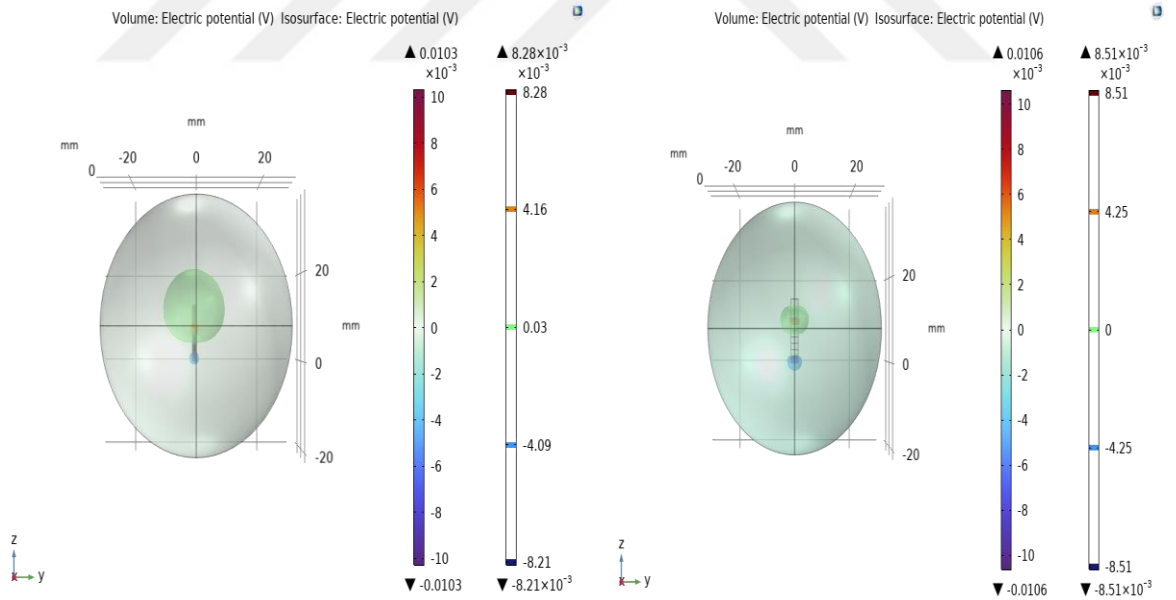
a **b**

Şekil 6. 40. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

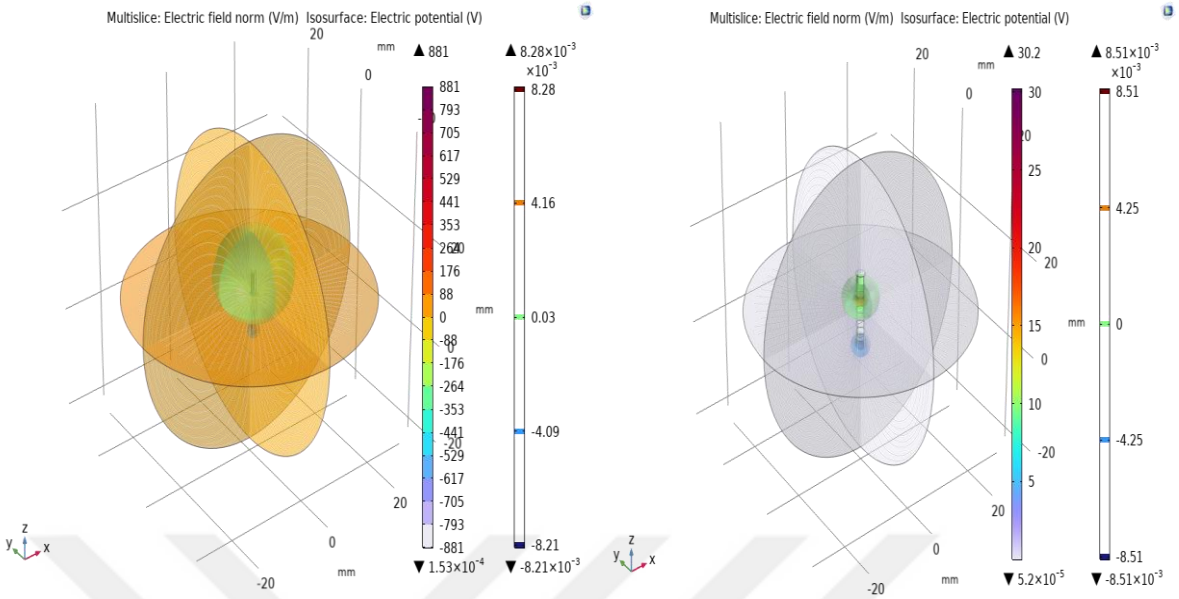
Şekil 6. 41. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

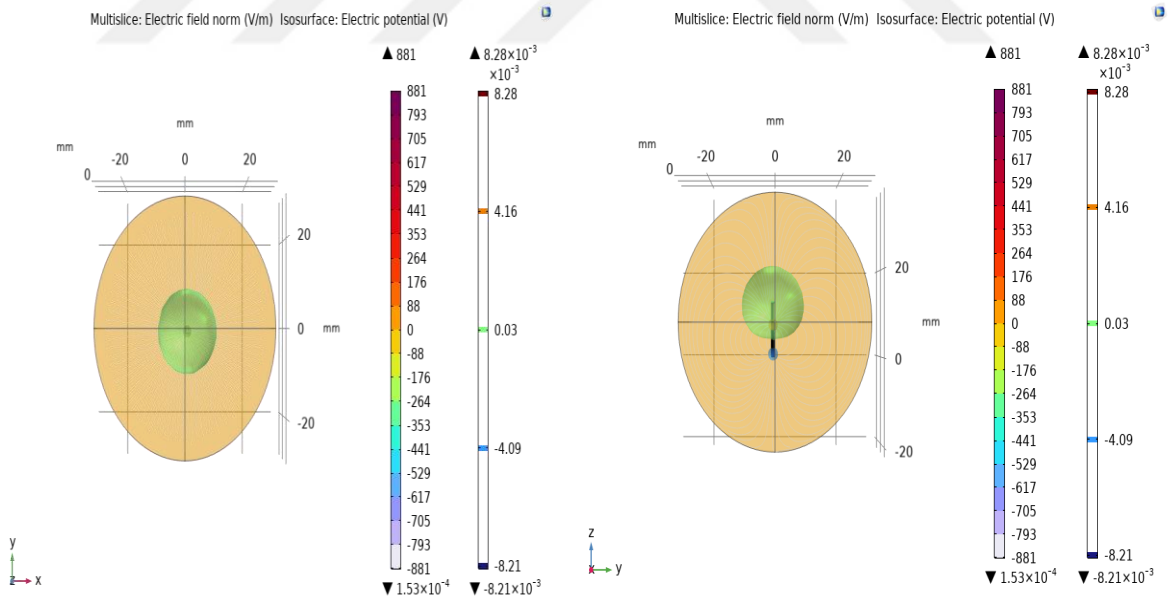
Şekil 6. 42. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

a. Elektrik alanı çalışması



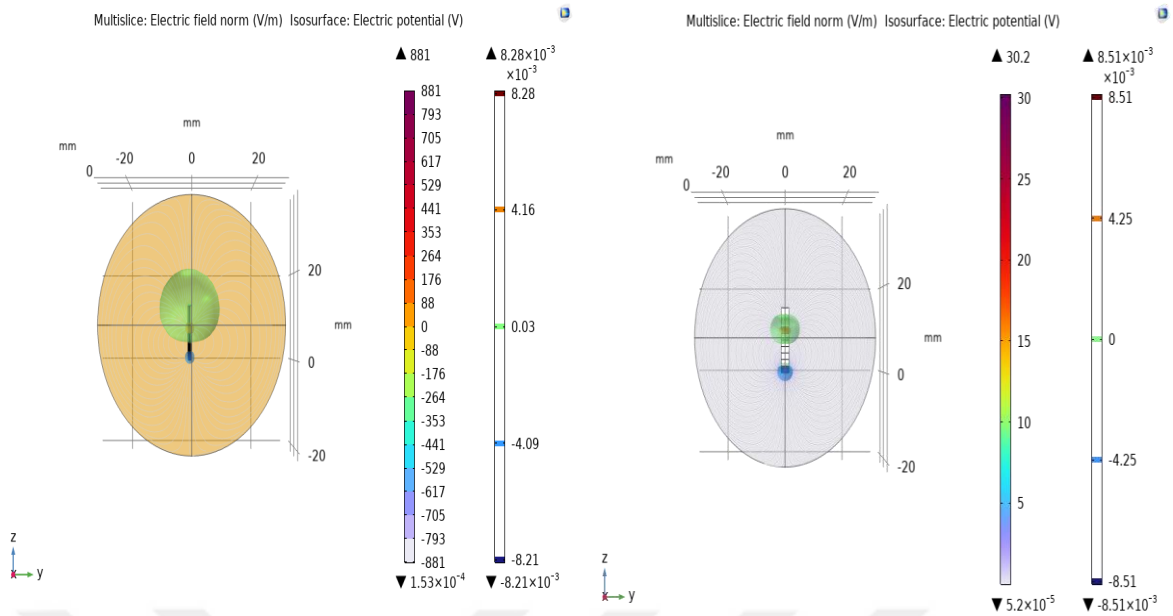
a **b**

Şekil 6. 43. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 44. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şe**kil 6. 45. a.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (-0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 9. Y-şekilli elektrot için veriler - Geniş Bipolar (-0.01V, +0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-7.0752E-4	8.9977	0.93251

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 10. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Geniş Bipolar (-0.01V, +0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-3.0525E-5	2.5426	1.0170

Elektrik alan oranı: E(Y) / E(silindrik) ≈ 8.9977 / 2.5426 ≈ 3.54× → Y-şekilli kenarda alan ~3.5 kat daha yüksek.

Akım yoğunluğu oranı: J(Y) / J(silindrik) ≈ 0.9325 / 1.0170 ≈ 0.92 → Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %8 daha düşük.

Fokal uyarım / etkinlik: Y-şekilli, kenarda çok daha yüksek E ürettiği için küçük hedefleri daha iyi ve daha fokal aktive edebilir. Bu genelde istenen bir özellikse Y-şekilli daha iyi.

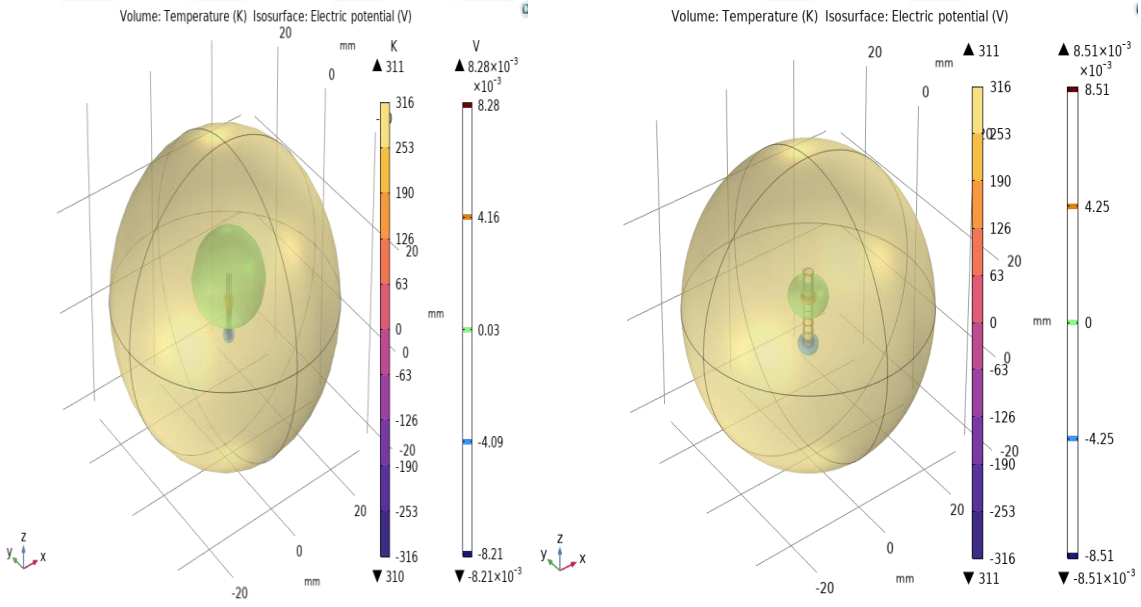
Doku hasarı riski: Y-şekilli tekil J değeri silindrike göre biraz daha düşük, bu olumlu. Ancak, elektrik alan dağılımı daha geniştir ve elektrotun üst kısmında küresel bir şekil bulunur; bu da doku hasarı riskini artırabilir.

Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli aynı hedefi daha düşük toplam akımla (I_total) sağlıyor, bu da pil açısından daha avantajlıdır. Ancak, daha büyük elektrik alan dağılımı, istenmeyen doku hasarı riskini artırır.

6.2.4 Geniş Çift Kutuplu (Bipolar) Geometri (+0.01V, -0.01V)

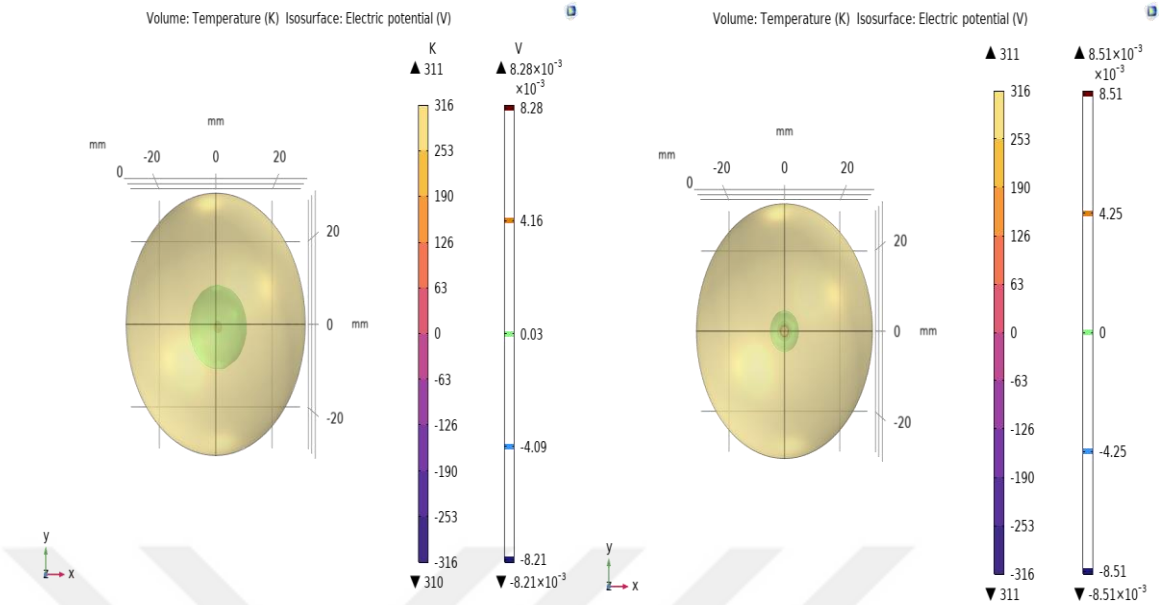
Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V), Y-şekilli elektrot için; 9 anot +0.01V ve 9 katot -0.01V olan geniş çift kutuplu (Bipolar) mod (şekil 5.13.d) olarak oluşturuldu. Kullanımda mevcut olan elektrot için: yüzey voltajlarına sahip geniş çift kutuplu (Bipolar) elektrot (+0.01V, -0.01V) (şekil 5.9.d).

b. Sıcaklık çalışması



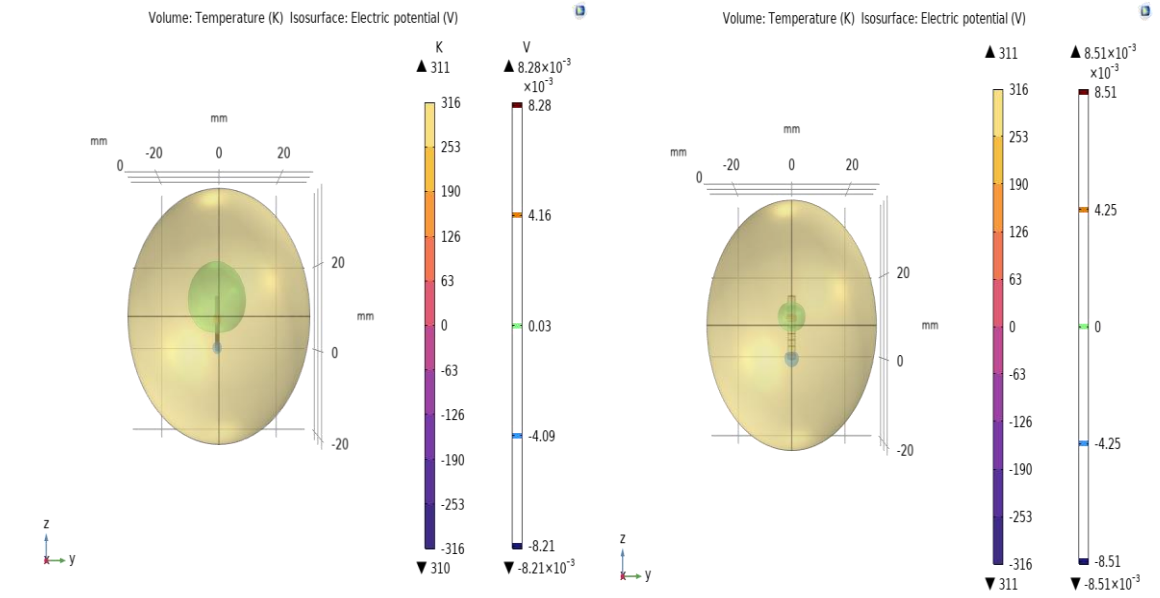
a **b**

Şekil 6. 46. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

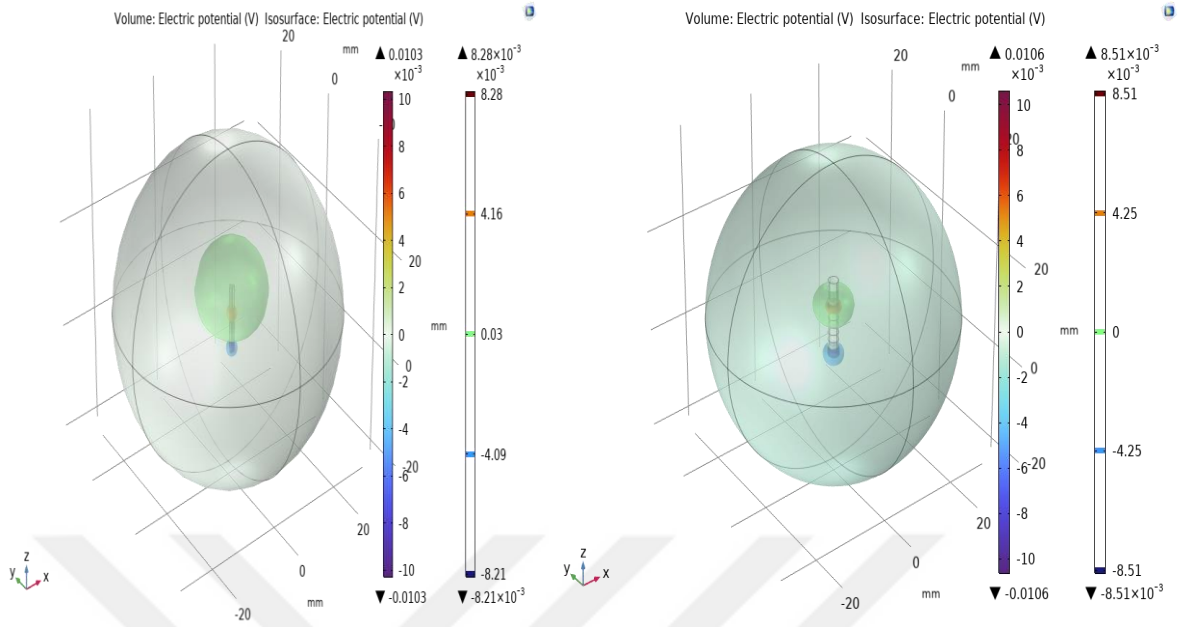
Şekil 6. 47. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

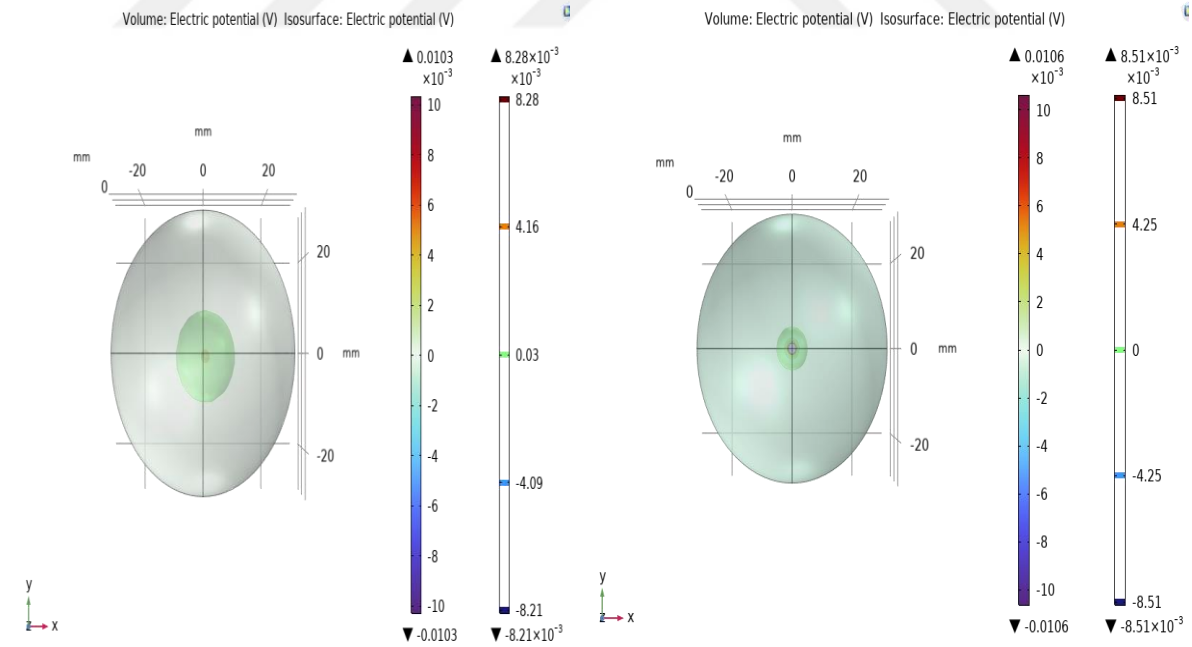
Şekil 6. 48. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

c. Elektrik potansiyeli çalışması



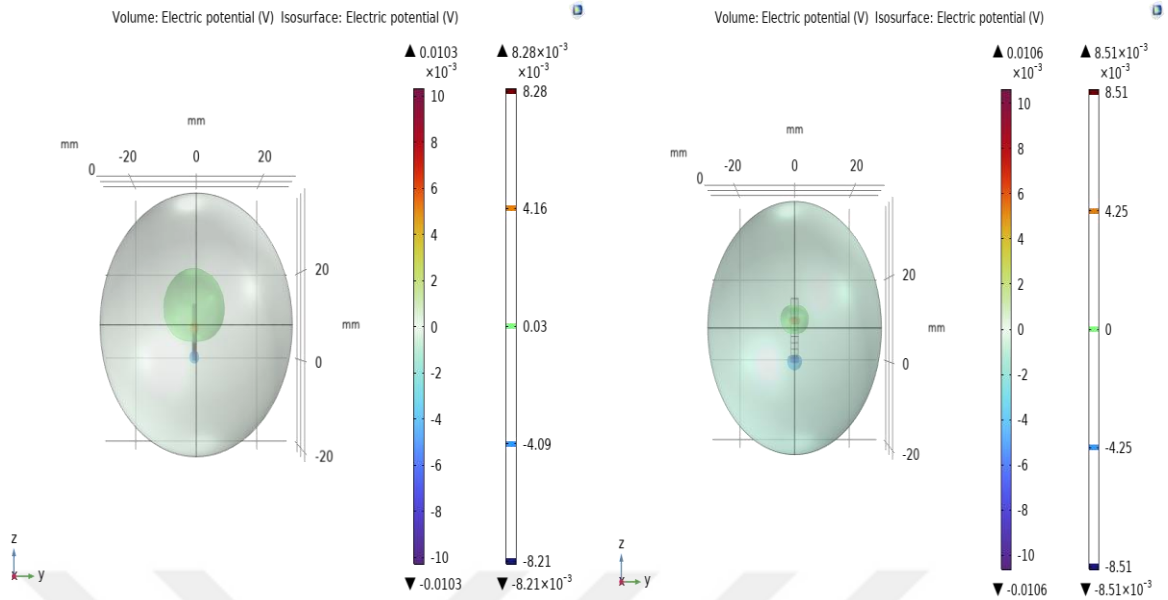
a **b**

Şekil 6. 49. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

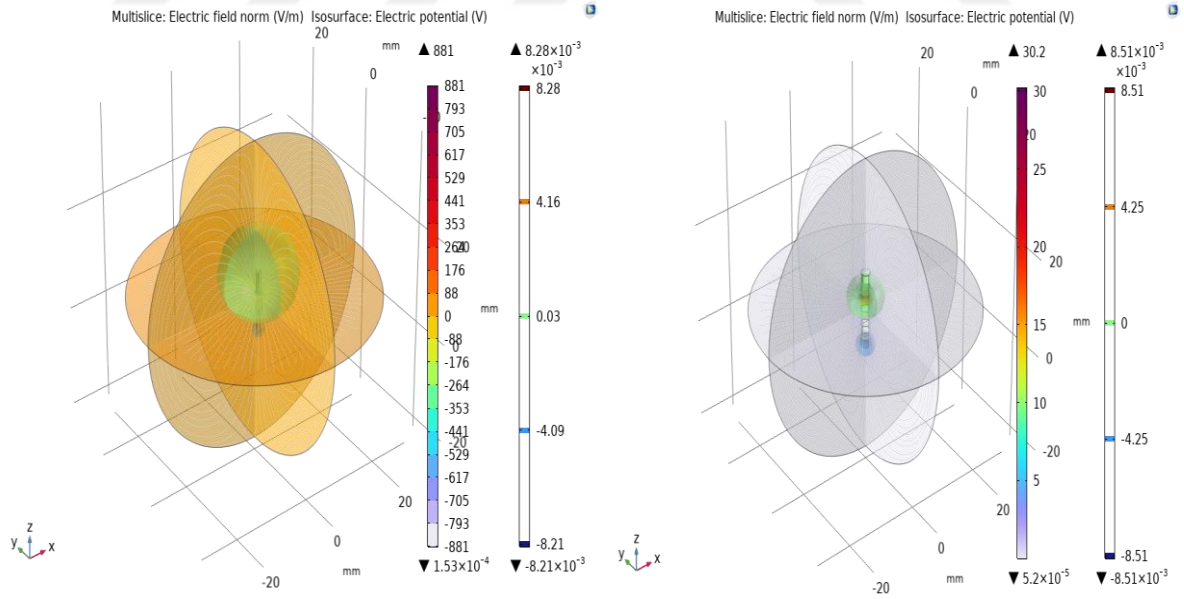
Şekil 6. 50. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

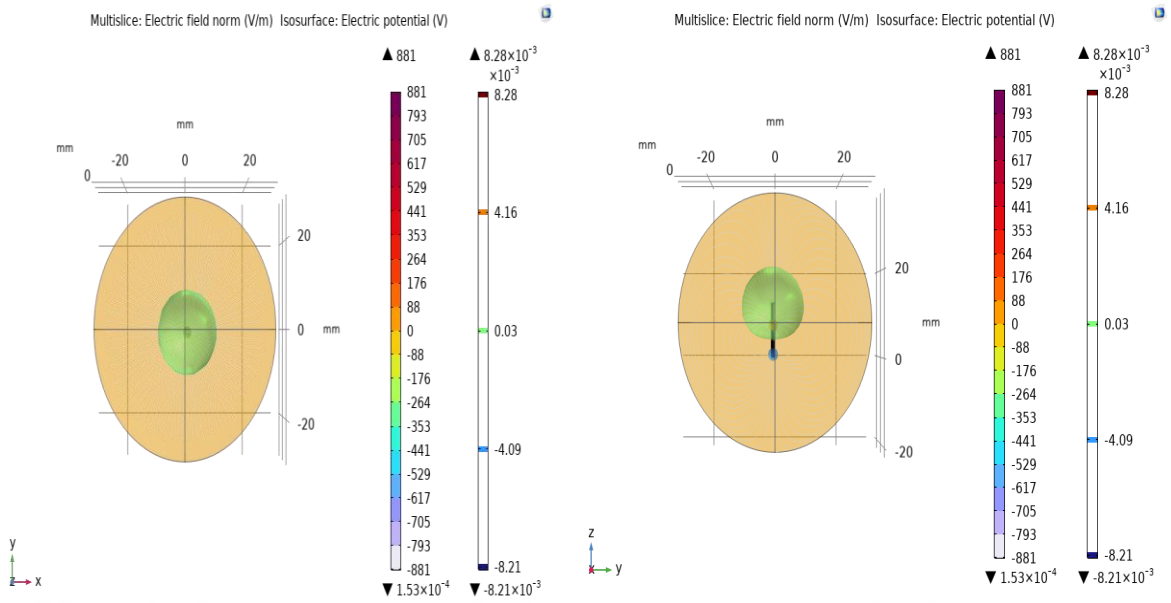
Şekil 6. 51. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

d. Elektrik alanı çalışması



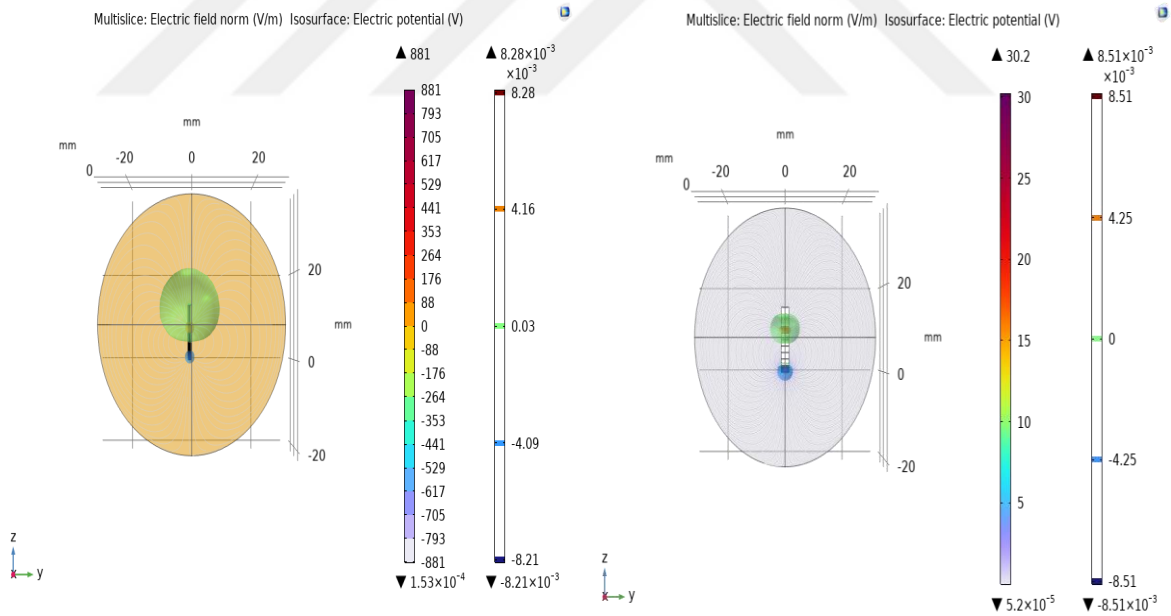
a **b**

Şekil 6. 52. a. 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 53. a. xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 54. a. yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Geniş çift kutuplu (Bipolar) geometri (+0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 11. Y-şekilli elektrot için veriler - Geniş Bipolar (+0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	7.0752E-4	8.9977	0.93251

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 12. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Geniş Bipolar (+0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	3.0525E-5	2.5426	1.0170

Elektrik alan oranı: E(Y) / E(silindrik) ≈ 8.9977 / 2.5426 ≈ 3.54× → Y-şekilli kenarda alan ~3.5 kat daha yüksek.

Akım yoğunluğu oranı: J(Y) / J(silindrik) ≈ 0.9325 / 1.0170 ≈ 0.92 → Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %8 daha düşük.

Fokal uyarım / etkinlik: Y-şekilli, kenarda çok daha yüksek E ürettiği için küçük hedefleri daha iyi ve daha fokal aktive edebilir. Bu genelde istenen bir özellikse Y-şekilli daha iyi.

Doku hasarı riski: Y-şekilli tekil J değeri silindrike göre biraz daha düşük, bu olumlu. Ancak, elektrik alan dağılımı daha geniştir ve elektrotun üst kısmında küresel bir şekil bulunur; bu da doku hasarı riskini artırabilir.

Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli aynı hedefi daha düşük toplam akımla (I_total) sağlıyor, bu da pil açısından daha avantajlıdır. Ancak, daha büyük elektrik alan dağılımı, istenmeyen doku hasarı riskini artırır.

6.3 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri Karşılaştırmalı

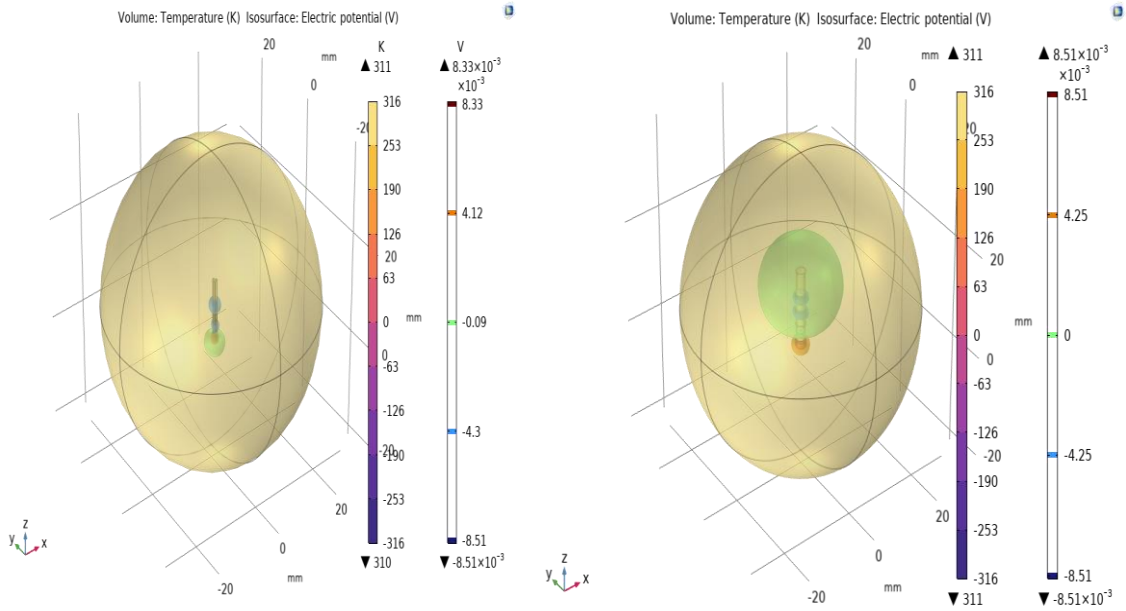
Kullanımda mevcut elektrot için, üç kutuplu (Tripolar) geometrisi dört farklı modelle oluşturuldu. Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (a) (-0.01V, -0.01V, +0.01V), Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (b) (+0.01V, +0.01V, -0.01V), Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (c) (-0.01V, +0.01V, -0.01V), Yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (d) (+0.01V, -0.01V, +0.01V) (Şekil 5.10).

Y- şekilli elektrot için, üç kutuplu (Tripolar) geometri dört modelle oluşturuldu. Model 1 (a) : (−0.01V, −0.01V, +0.01V), 18 temas noktası katot olarak tanımlanmış (−0.01 V) ve bunların yanında konumlandırılan 9 temas noktası anot olarak tanımlanmıştır (+0.01 V). Model 2 (b) : (+0.01V, +0.01V, −0.01V): 18 temas noktası anot (+0.01 V), 9 temas noktası ise katot (−0.01 V) olarak tanımlanmıştır. Model 3 (c) : (−0.01V, +0.01V, −0.01V): 18 temas noktası katot (−0.01 V) ve 9 temas noktası anot (+0.01 V) olarak belirlenmiştir. Model 4 (d) : (+0.01V, −0.01V, +0.01V): Bu modelde, 18 temas noktası anot (+0.01 V) olarak, 9 temas noktası ise katot (−0.01 V) olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.14). Biyoısı transferi (ht) ve elektrik akımı çalışmaları yapıldı. Sıcaklık çalışması, elektrik potansiyeli çalışması ve elektrik alanı çalışması sonuçları iki elektrot için kaydedildi.

6.3.1 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (-1V, -1V, +1V)

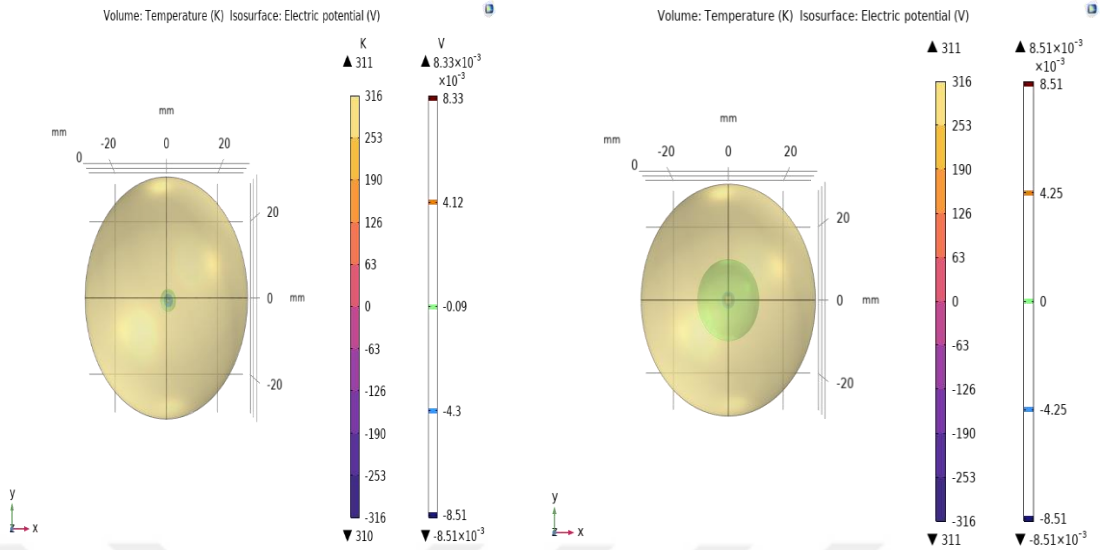
Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V), Y-şekilli elektrot 18 katotlu üç kutuplu (Tripolar) mod -0.01V ve 9 anotlu +0.01V (şekil 5.14.a) ve kullanımda mevcut olan elektrot için: yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (-0.01V, -0.01V, +0.01V) (şekil 5.10.a) [29] olacak biçimde uyarılmıştır.

a. Sıcaklık çalışması



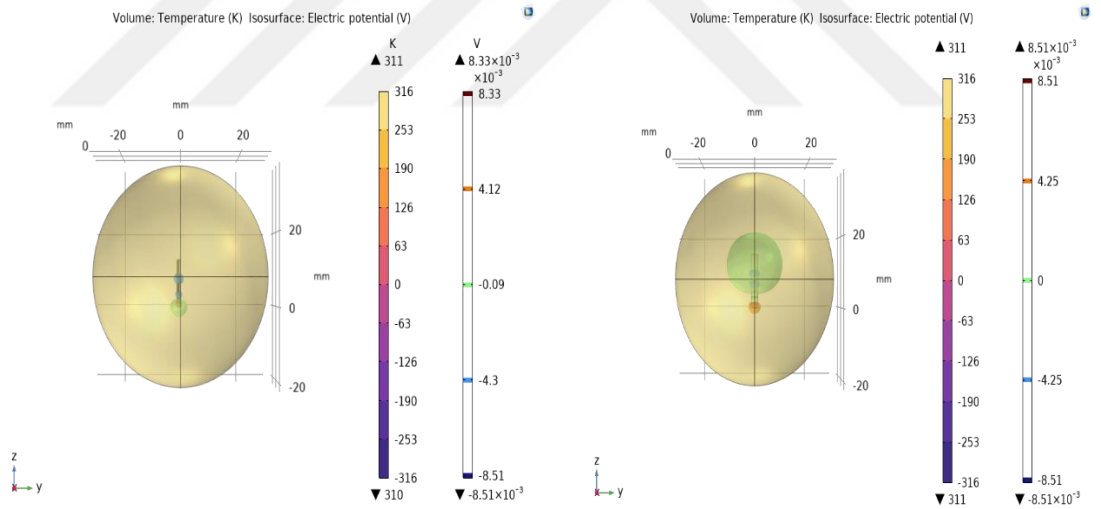
a **b**

Şekil 6. 55. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

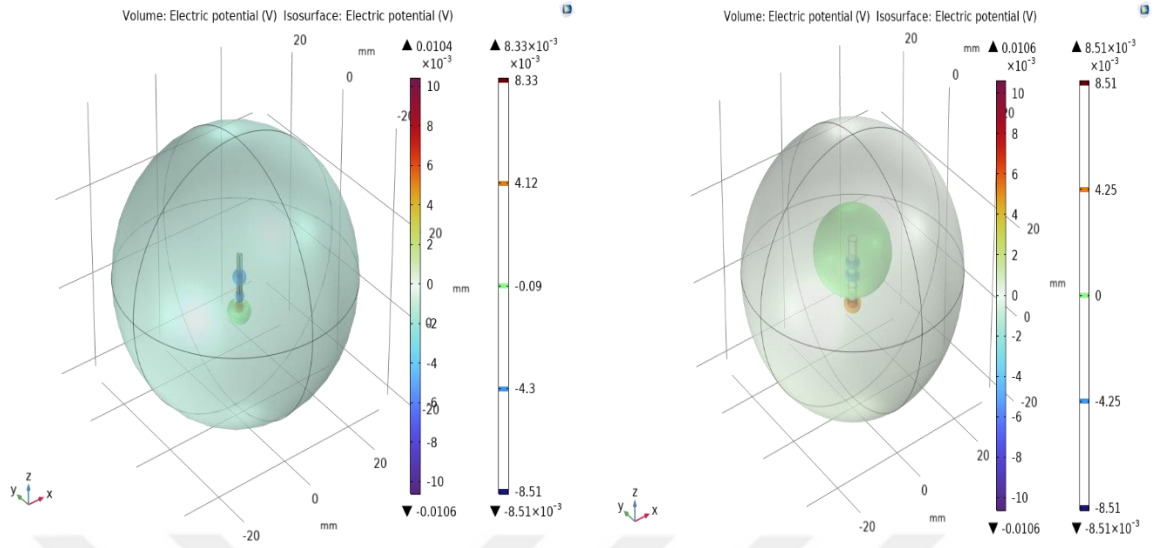
Şekil 6. 56. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

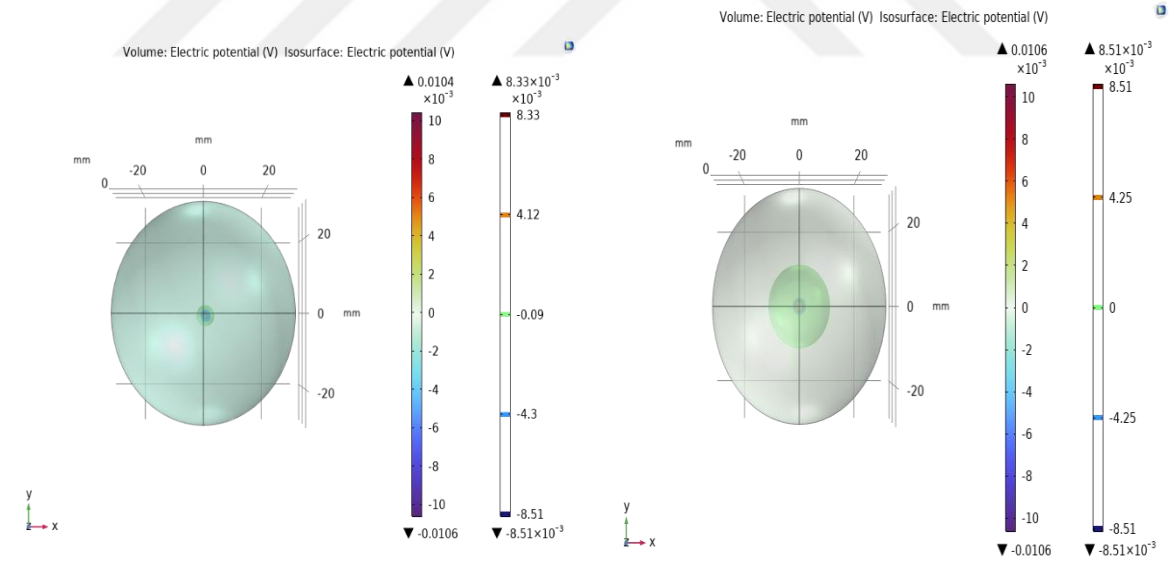
Şekil 6. 57. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyel çalışması



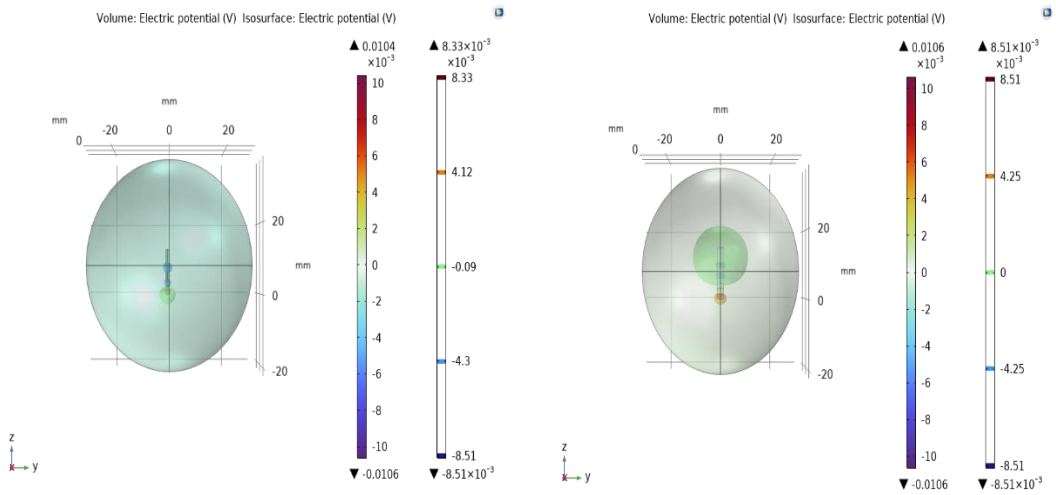
a **b**

Şekil 6. 58. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

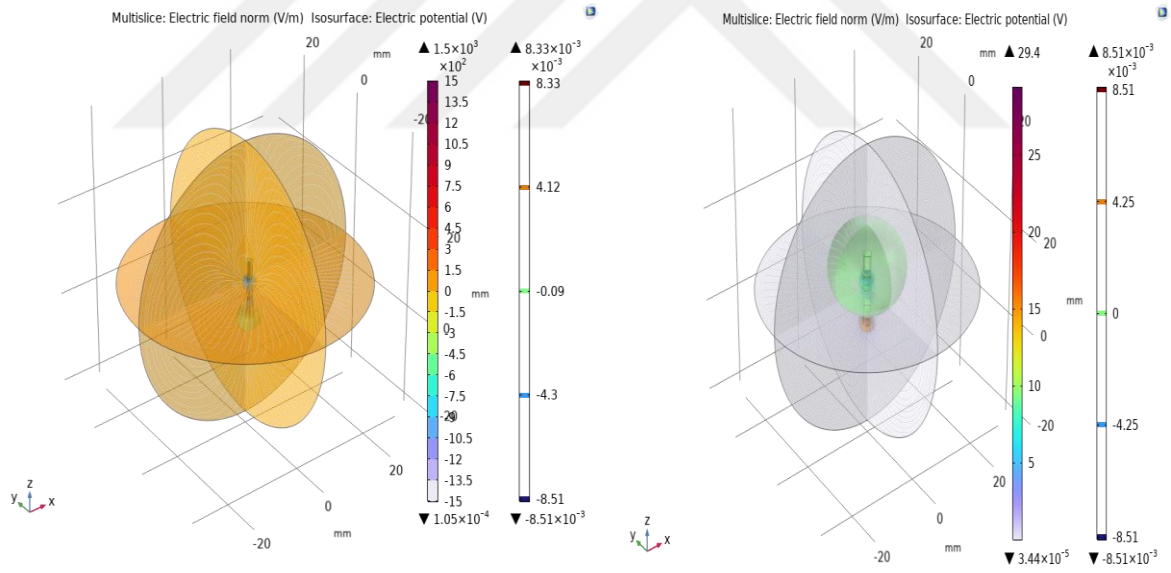
Şekil 6. 59. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

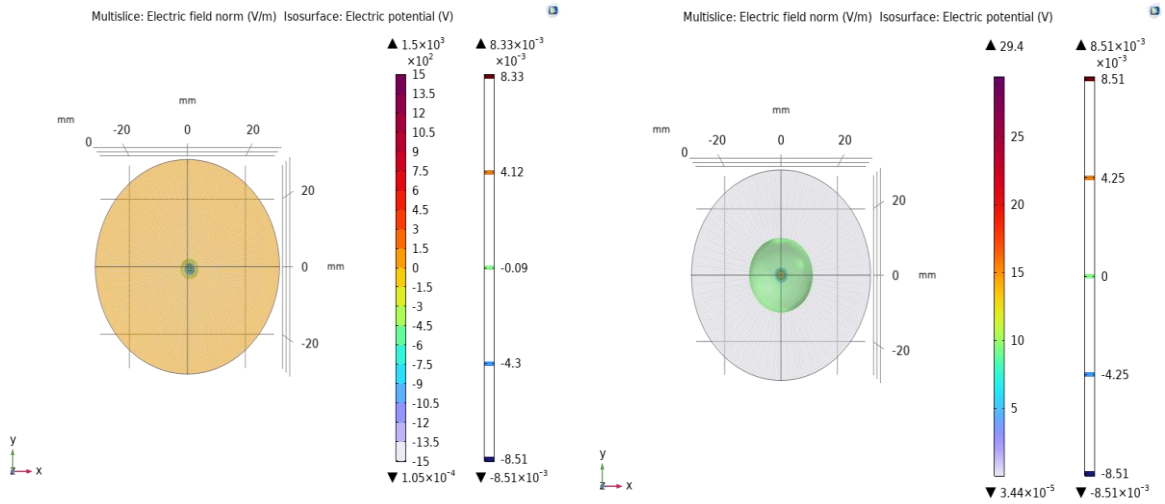
Şekil 6. 60. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması



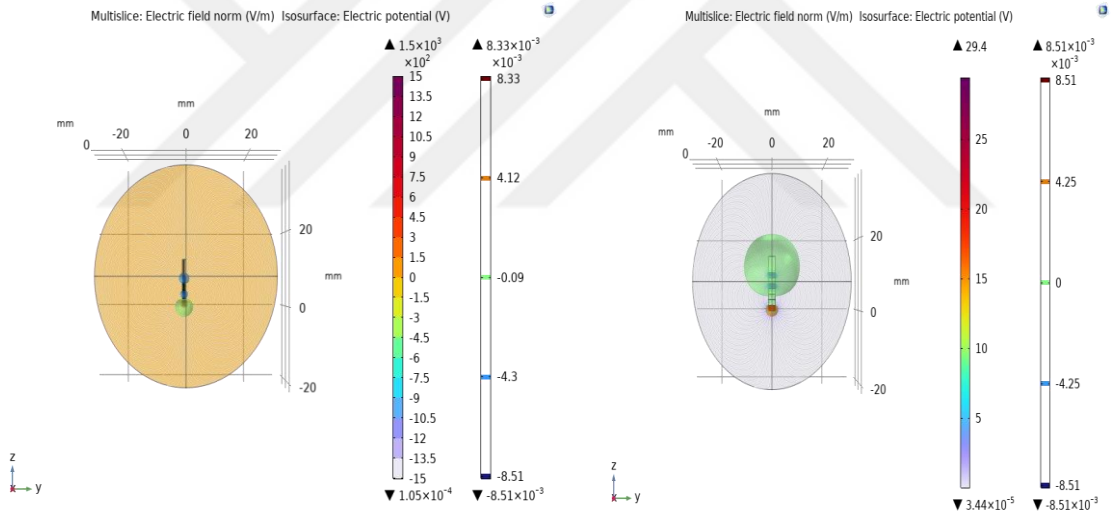
a **b**

Şekil 6. 61. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 62. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 63. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 13. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, -0.01V, +0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0026090	16.036	1.6351

Kullanımda mevcut elktrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 14. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, -0.01V, +0.01V)

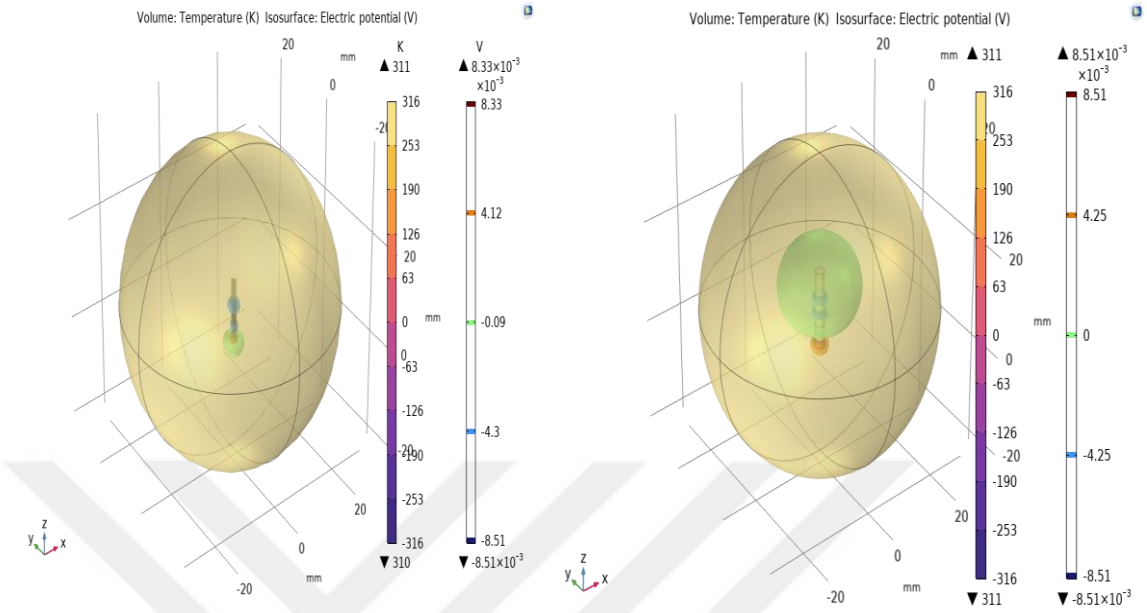
Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0010562	3.9678	1.5871

Elektrik alan (E): Y-şekilli kenarda ≈4.0× daha yüksek (16.0 vs 3.97 V/m). Y-şekilli geometrinin kenarında çok daha güçlü lokal alan oluşuyor.
Akım yoğunluğu (J): İki durumda yakın (1.635 vs 1.587 A/m²) — yani yüzey akım yoğunluğu hemen hemen aynı.
Potansiyel & sıcaklık: İkisi de pratik olarak aynı düzeyde, ısı artışı görünmüyor (310.5 K sabit).
Fokal aktivasyon / etkililik: Y-şekilli daha iyi: çok daha yüksek lokal E, küçük hedefleri daha kolay aktive etme potansiyeli sağlar (fokal uyarımda avantaj).
Doku zarar riski (elektrokimyasal ve termal): Yüksek E tek başına zarar demek değildir; Y-şekilli elektrot zarar riski göstermiyor. Bunlara ist,naden Y-şekilli avantajlıdır.
Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli aynı hedefi daha düşük I_total ile aktif ediyor, pil için daha iyi.

6.3.2 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V)

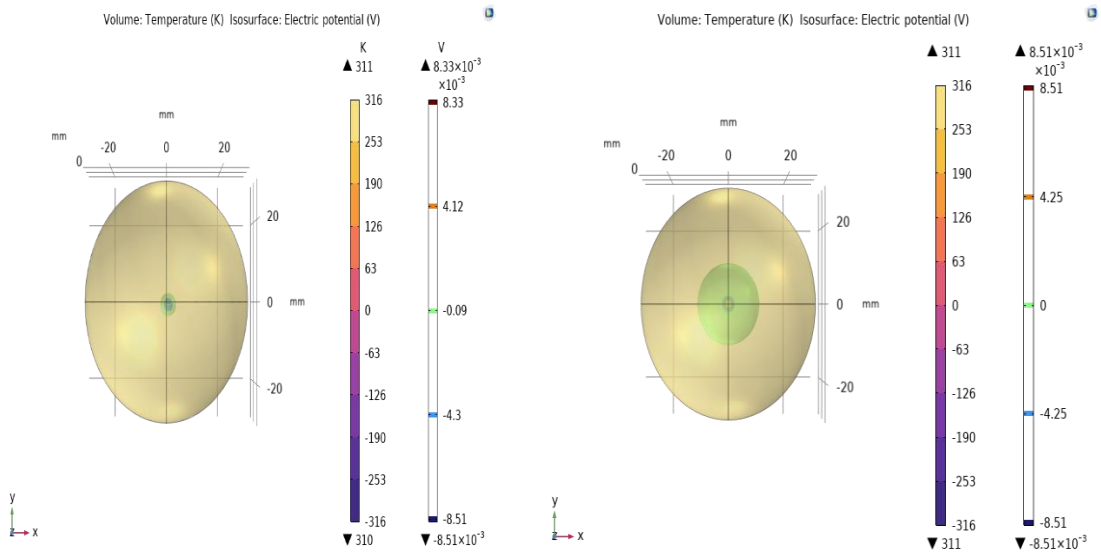
Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V), Y-şekilli elektrot 9 katotlu üç kutuplu (Tripolar) mod -0.01V ve 18 anotlu +0.01V (şekil 5.14.b) ve kullanımda mevcut olan elektrot için: yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (+0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.10.b) oluşturulmuştur.

a. Sıcaklık çalışması



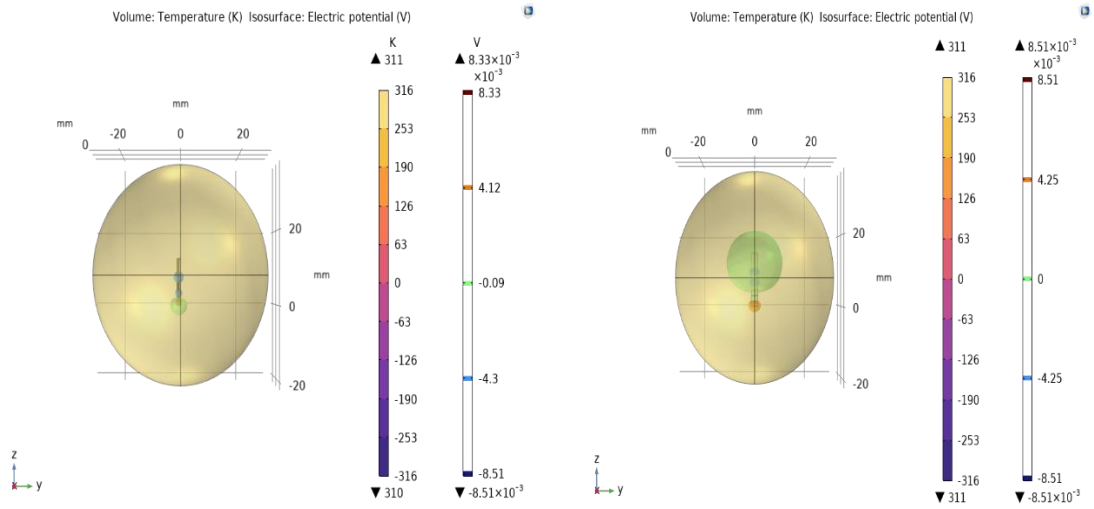
a **b**

Şekil 6. 64. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

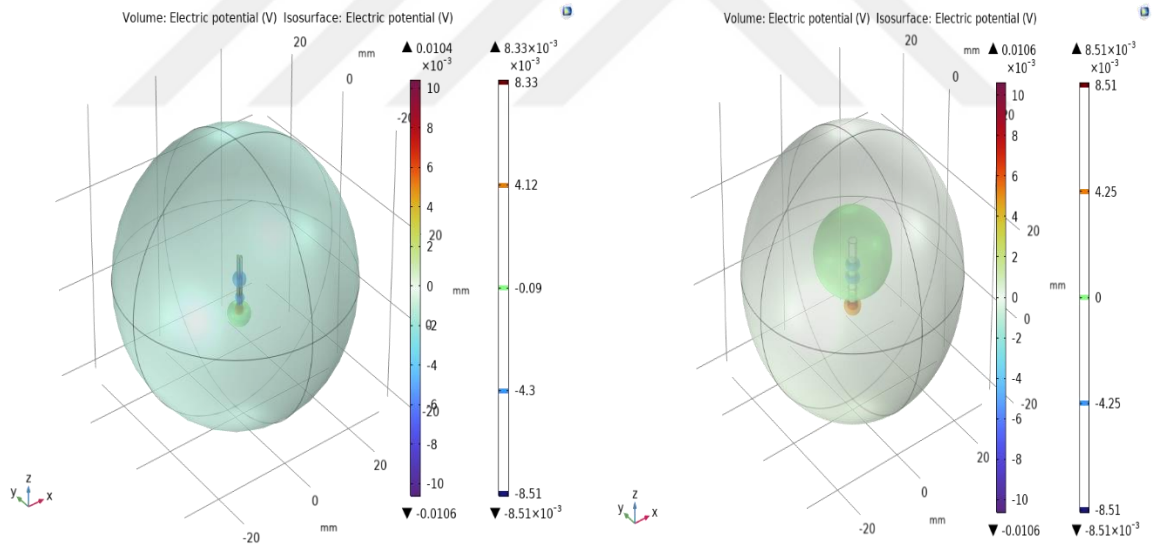
Şekil 6. 65. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

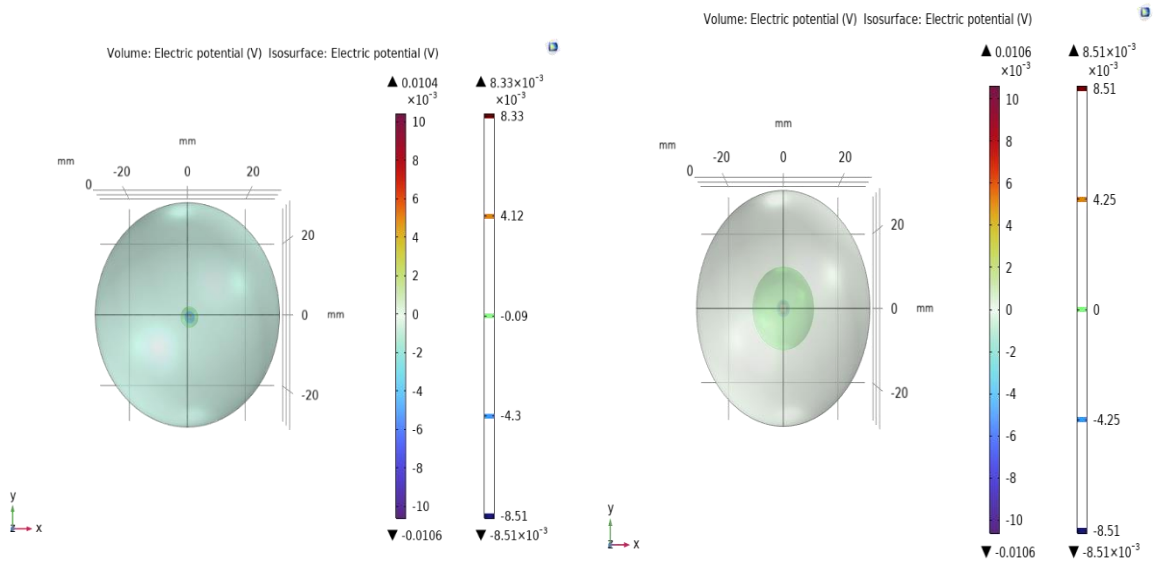
Şekil 6. 66. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyel çalışması



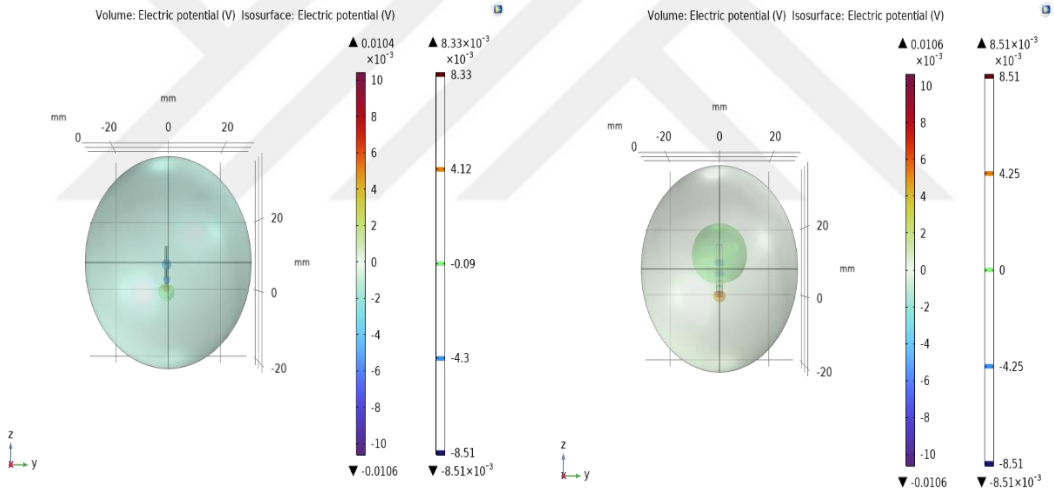
a **b**

Şekil 6. 67. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

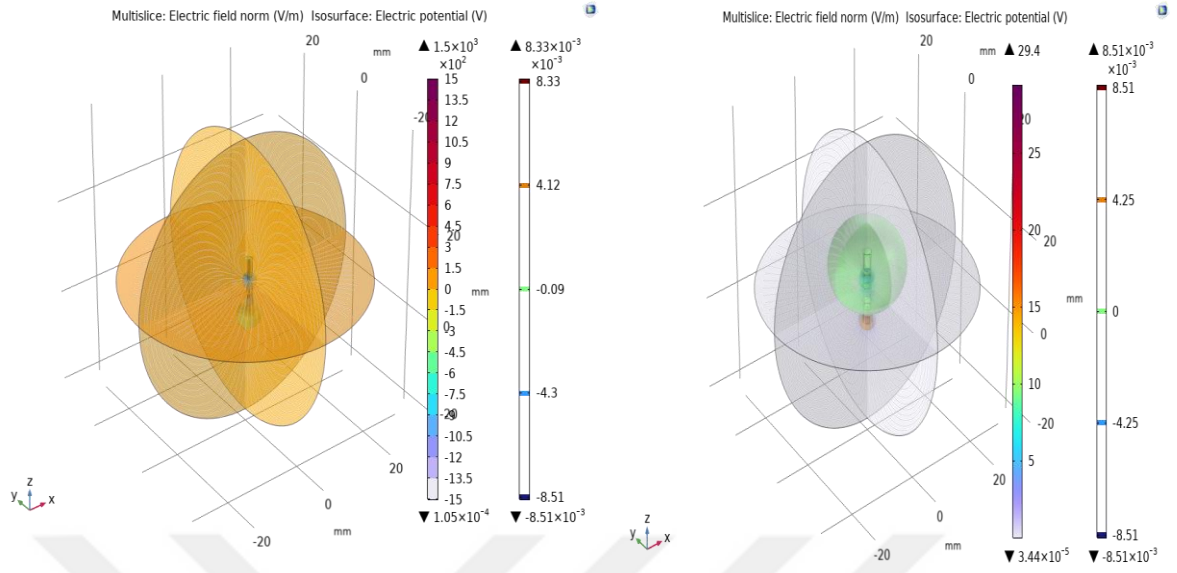
Şekil 6. 68. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

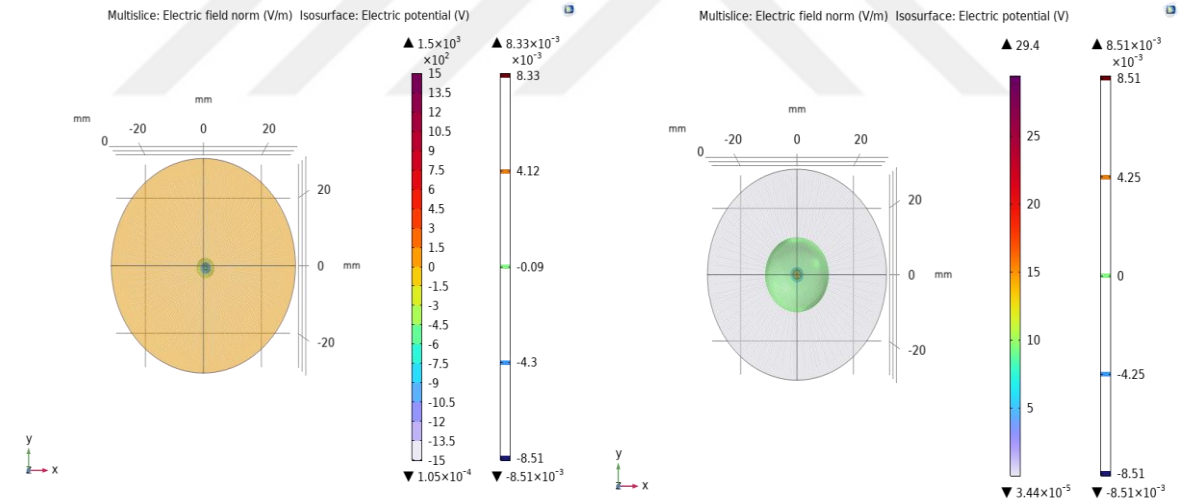
Şekil 6. 69. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması



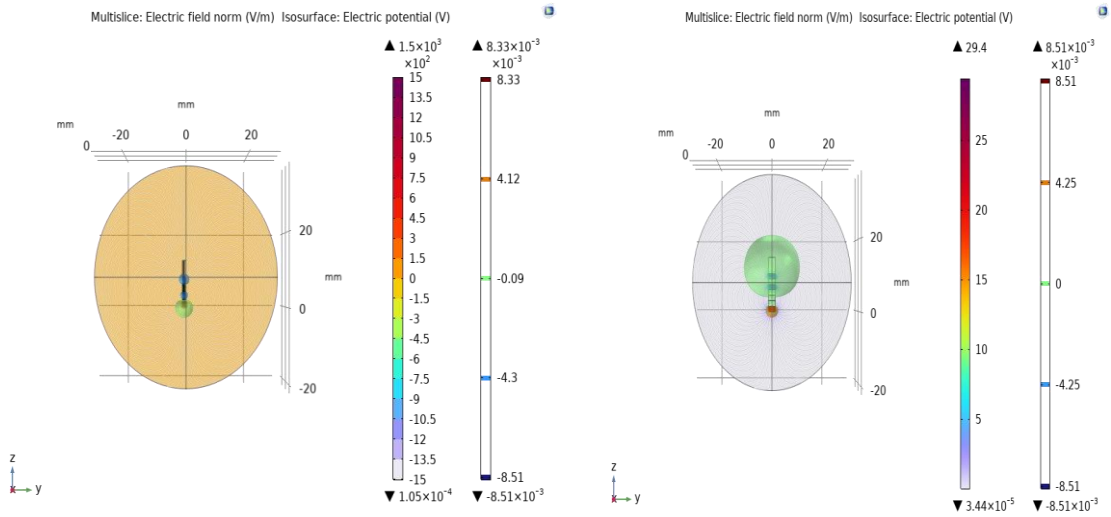
a **b**

Şekil 6. 70. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 71. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 72. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 15. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, +0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0026090	16.036	1.6351

Kullanımda mevcut elktrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 16. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, +0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0010562	3.9678	1.5871

Elektrik alan (E): Y-şekilli kenarda ≈4.0× daha yüksek (16.0 vs 3.97 V/m). Y-şekilli geometrinin kenarında çok daha güçlü lokal alan oluşuyor.

Akım yoğunluğu (J): İki durumda yakın (1.635 vs 1.587 A/m²) — yani yüzey akım yoğunluğu hemen hemen aynı.

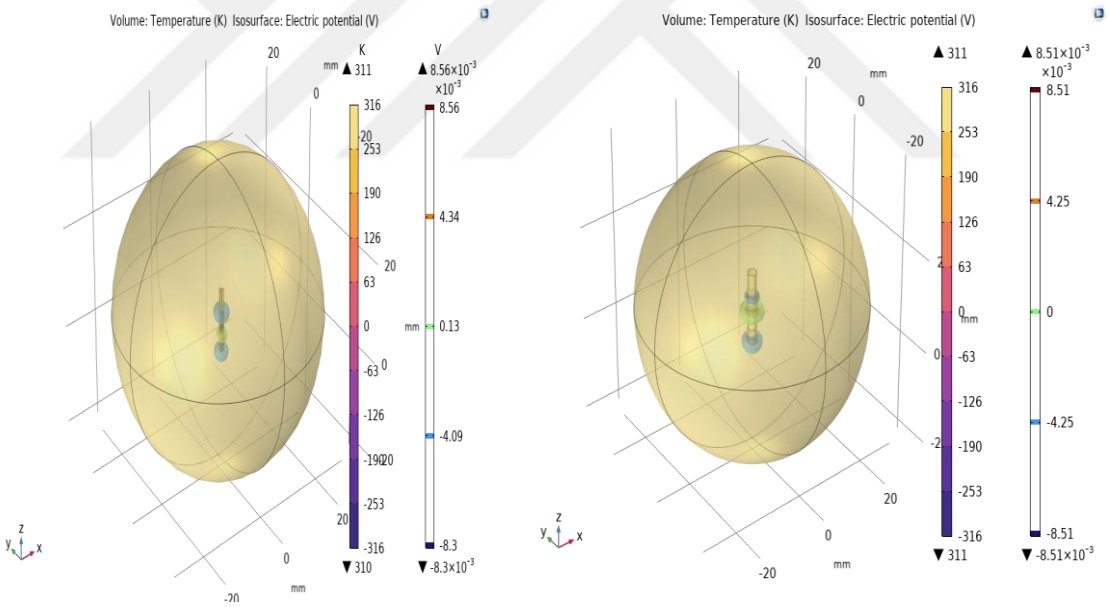
Potansiyel & sıcaklık: İkisi de pratik olarak aynı düzeyde, ısı artışı görünmüyor (310.5 K sabit).

Fokal aktivasyon / etkililik: Y-şekilli daha iyi: çok daha yüksek lokal E, küçük hedefleri daha kolay aktive etme potansiyeli sağlar (fokal uyarımda avantaj).
Doku zarar riski (elektrokimyasal ve termal): Yüksek E tek başına zarar demek değildir; Y-şekilli elektrot zarar riski göstermiyor. Bunlara istinaden Y-şekilli avantajlıdır.
Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli aynı hedefi daha düşük I_total ile aktif ediyor, pil için daha iyi.

6.3.3. Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V)

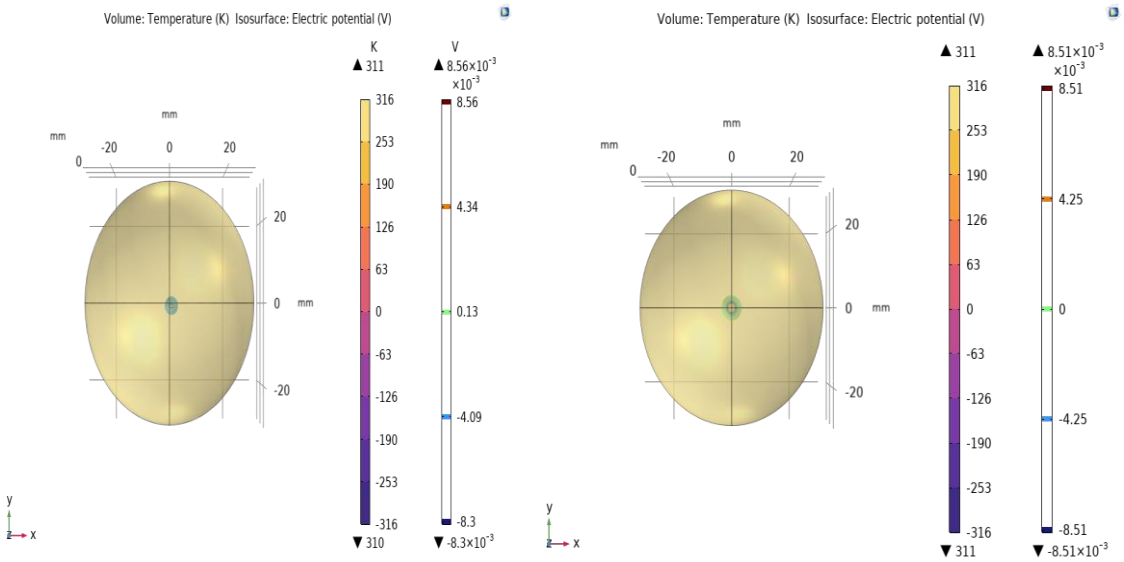
Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V), Y-şekilli elektrot 18 katotlu üç kutuplu (Tripolar) mod -0.01V ve 9 anotlu +0.01V (şekil 5.14.c) ve kullanımda mevcut olan elektrot için: yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (-0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.10.c) oluşturulmuştur.

a. Sıcaklık çalışması



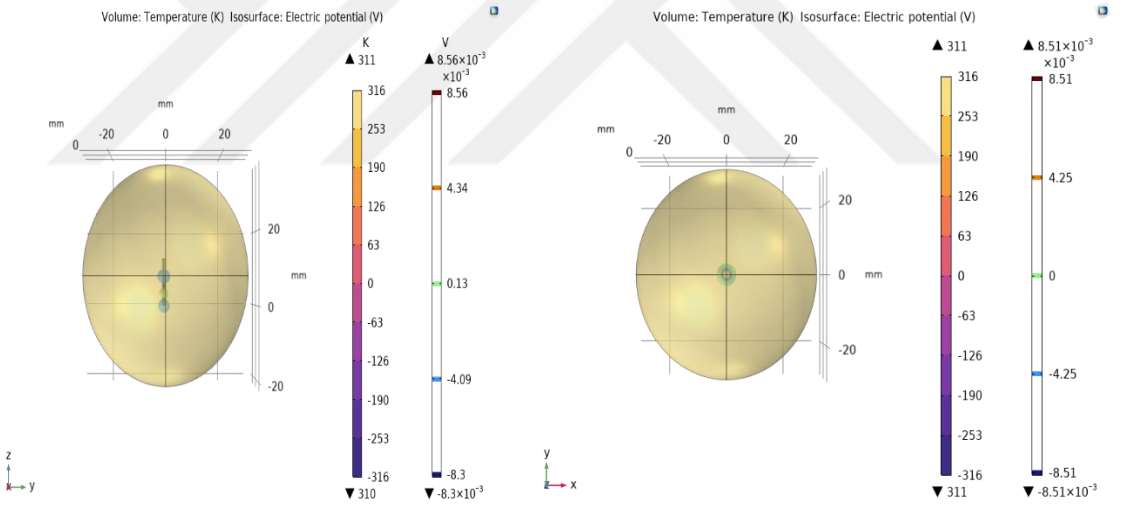
a **b**

Şekil 6. 73. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

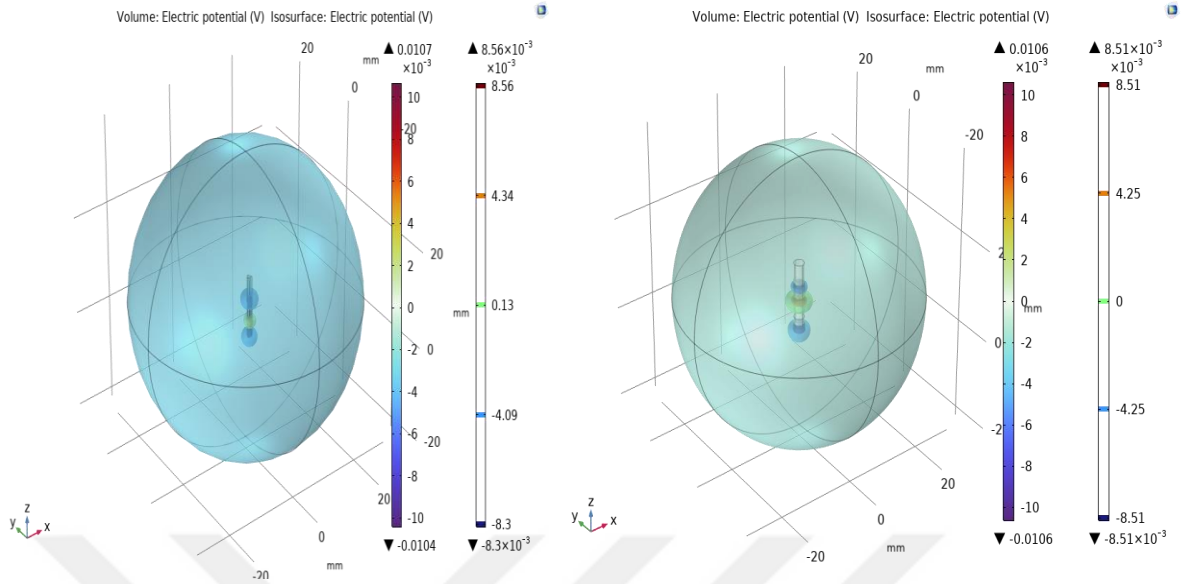
Şekil 6. 74. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

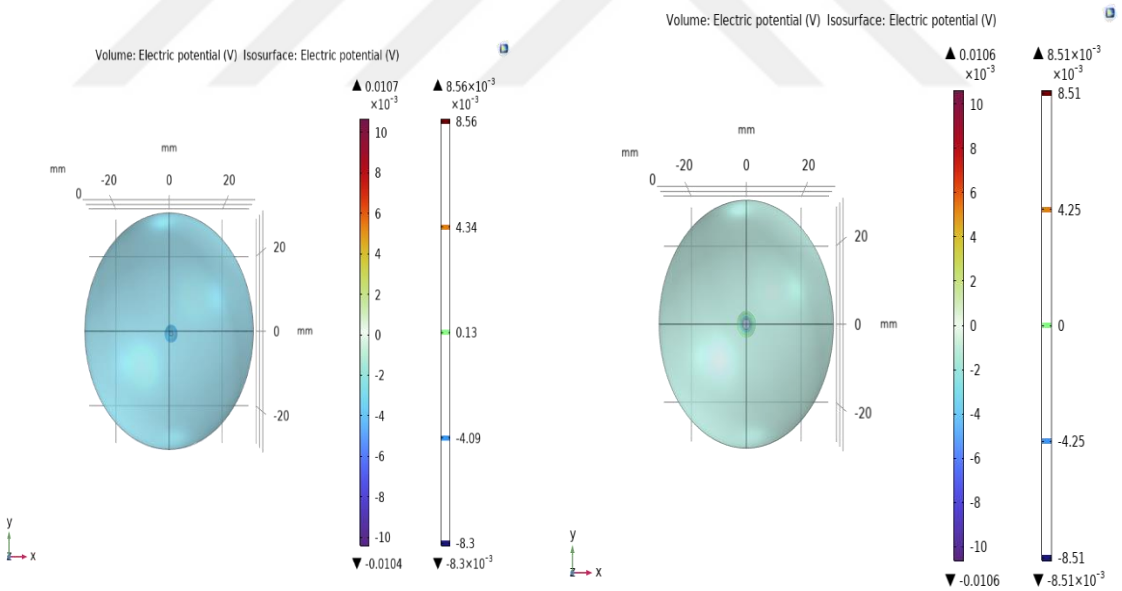
Şekil 6. 75. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyel çalışması



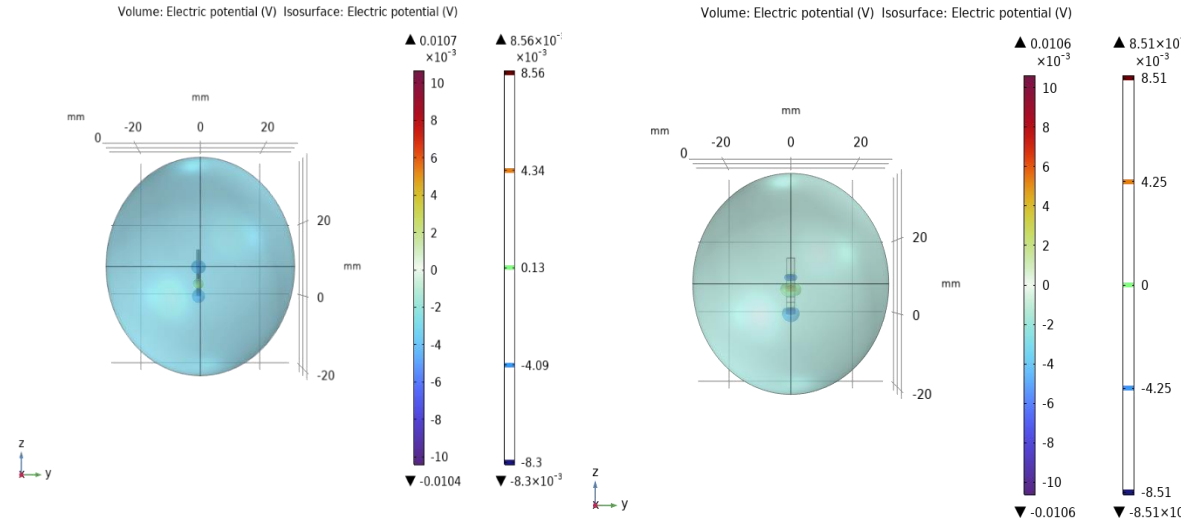
a **b**

Şekil 6. 76. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

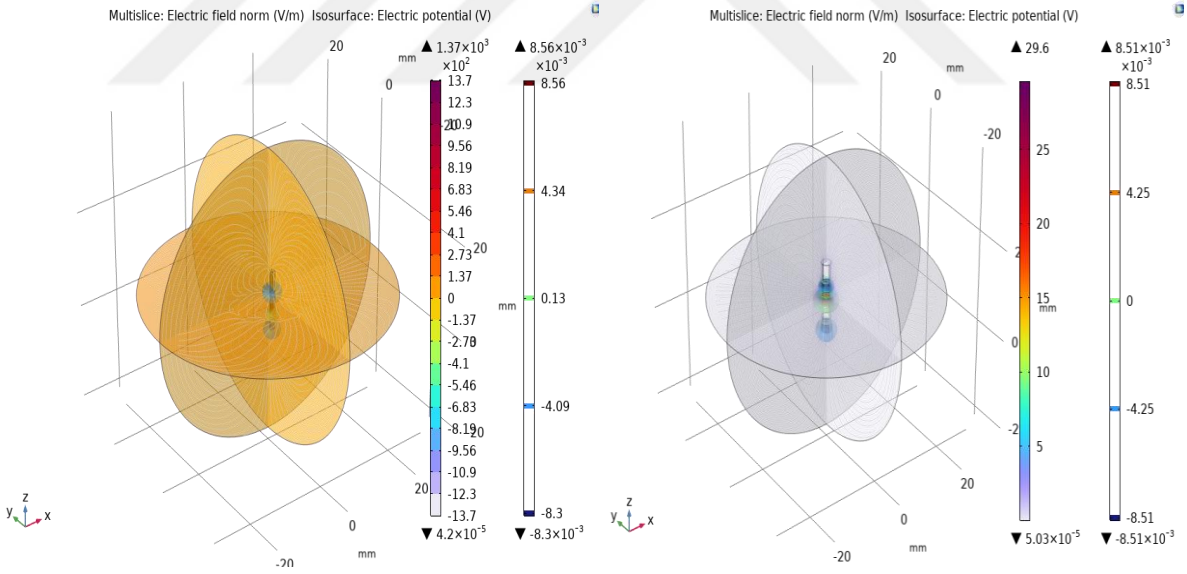
Şekil 6. 77. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

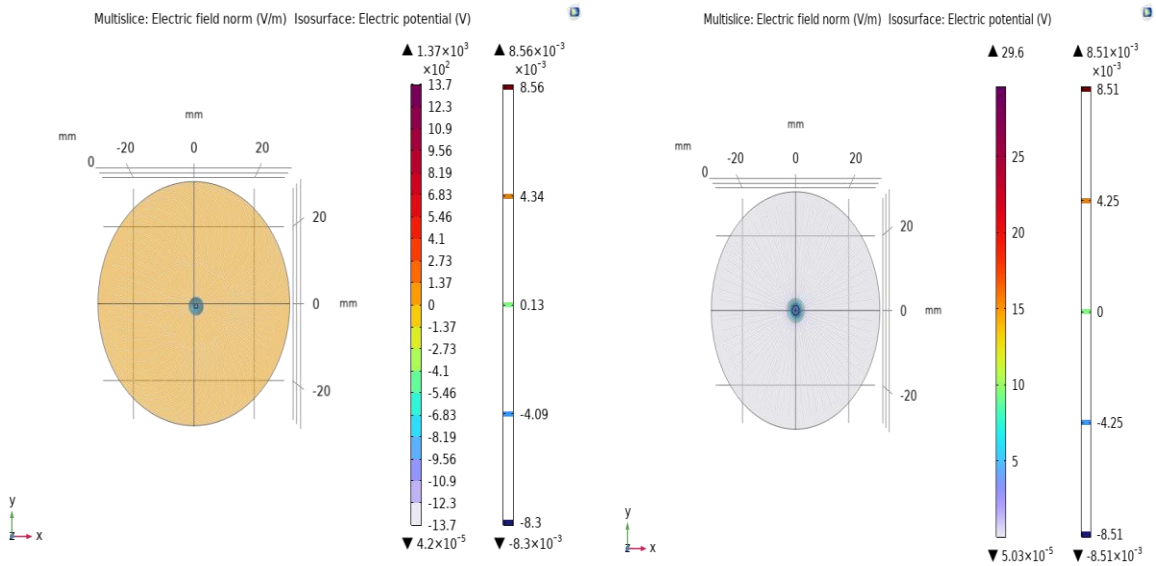
Şekil 6. 78. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması



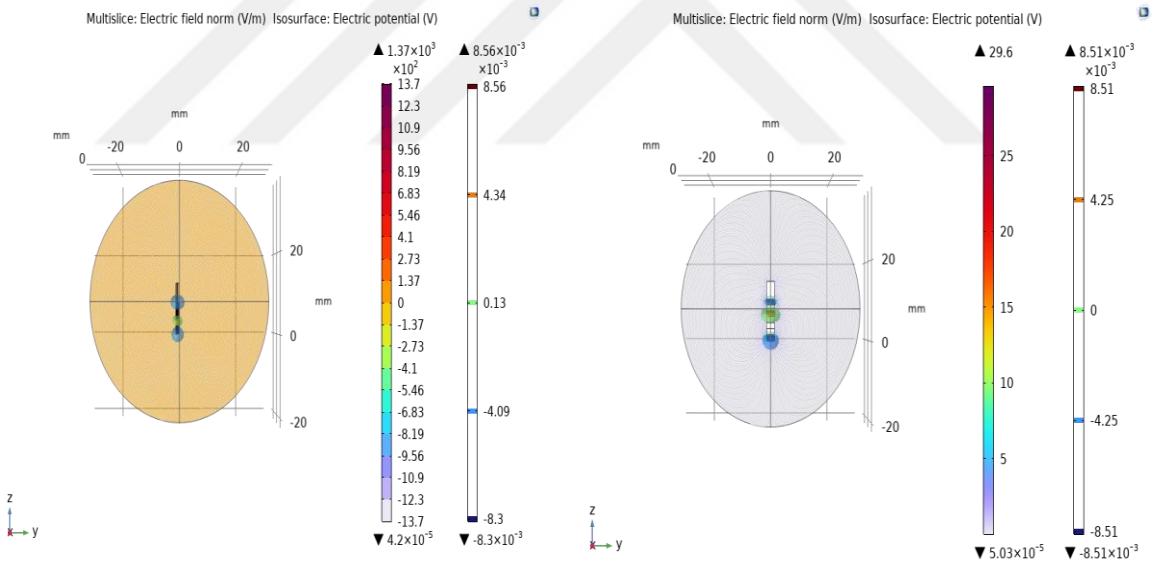
a **b**

Şekil 6. 79. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 80. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 81. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 17. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, +0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0029024	15.062	1.5364

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 18. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (-0.01V, +0.01V, -0.01V)

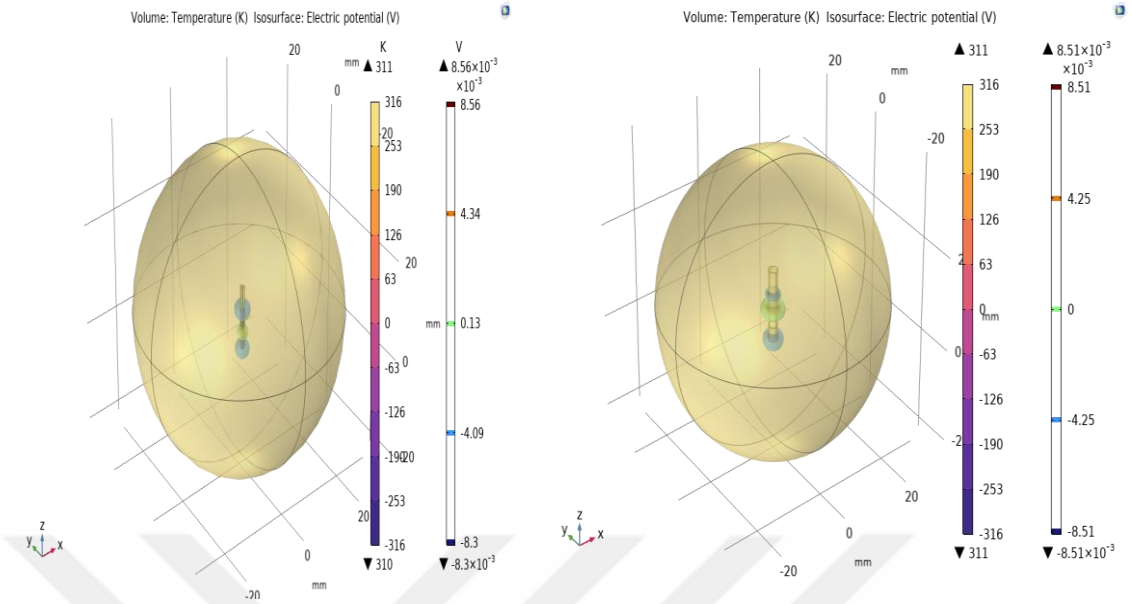
Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0010317	4.0252	1.6101

E oranı: 15.062 / 4.0252 ≈ 3.74× → Y-şekilli kenarda elektrik alan ≈ 3.7 kat daha büyük.
J oranı: 1.5364 / 1.6101 ≈ 0.95× → Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %5 daha düşük (neredeyse aynı).
Fiziksel / uygulama yorumu:
Etkililik (fokal hedefler): Y-şekilli açıkça daha avantajlı. Çok daha yüksek lokal E sayesinde küçük hedefleri daha kolay ve daha fokal aktive edebilir.
Doku hasarı riski: Tekil J değerleri birbirine çok yakın; Y-şekilli J biraz daha düşük. Bu tekil verilere göre Y-şekilli doku hasarı riski daha yüksek değil, hatta biraz daha iyi görünüyor.
Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli daha verimli olabilir çünkü aynı hedefi daha düşük hacim/enerjiyle aktive etme potansiyeli var.

6.3.4 Üç Kutuplu (Tripolar) Geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)

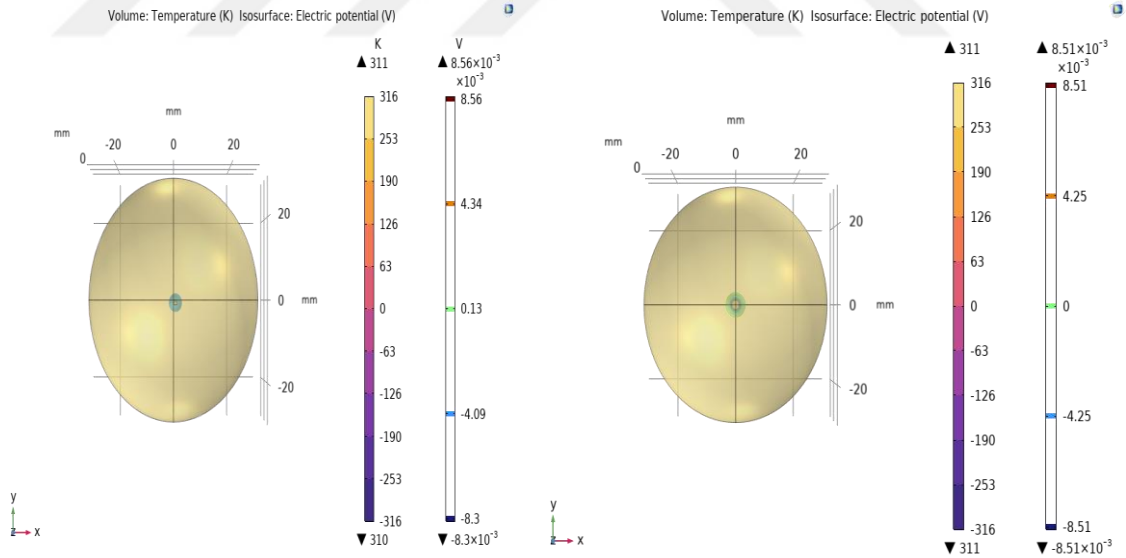
Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V), Y-şekilli elektrot 18 katotlu üç kutuplu (Tripolar) mod -1V ve 9 anotlu +0.01V (şekil 5.14.d) ve kullanımda mevcut olan elektrot için: yüzey voltajlarına sahip üç kutuplu (Tripolar) elektrot (+0.01V, -0.01V, +0.01V) (şekil 5.10.d) oluşturulmuştur.

a. Sıcaklık çalışması



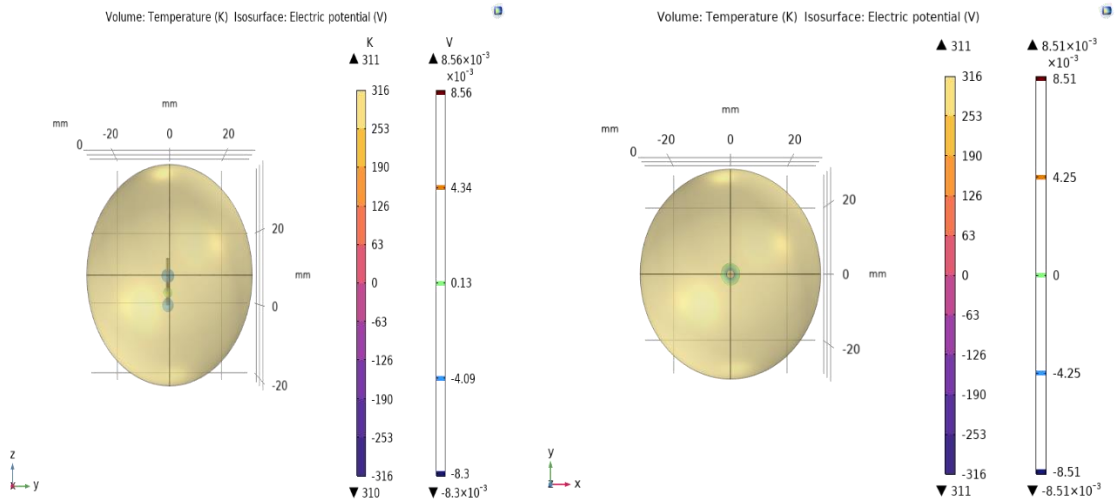
a **b**

Şekil 6. 82. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

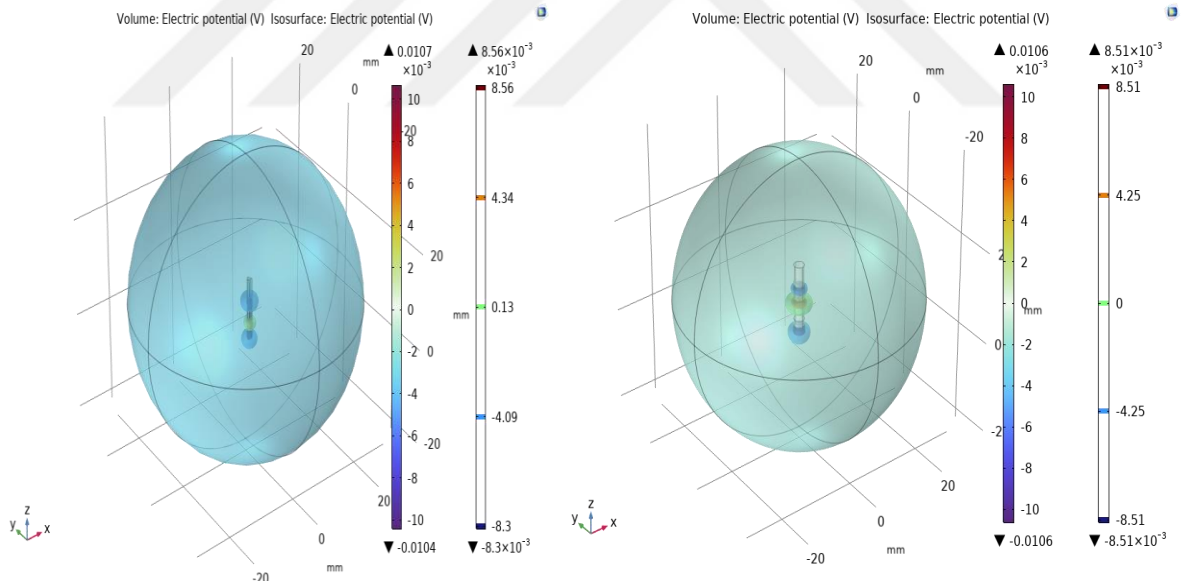
Şekil 6. 83. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

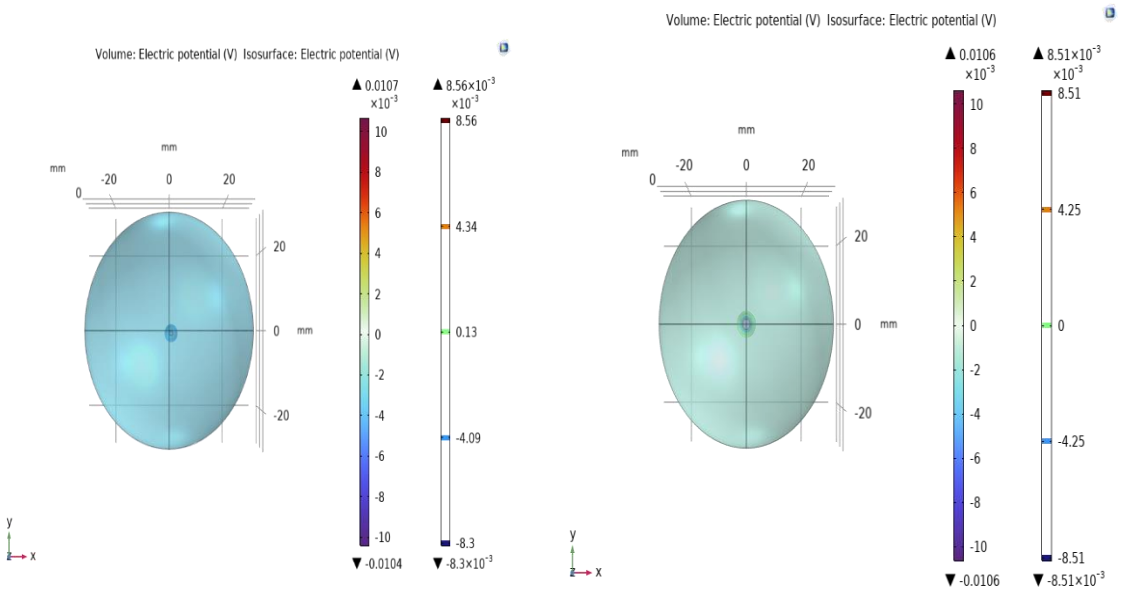
Şekil 6. 84. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

d. Elektrik potansiyel çalışması



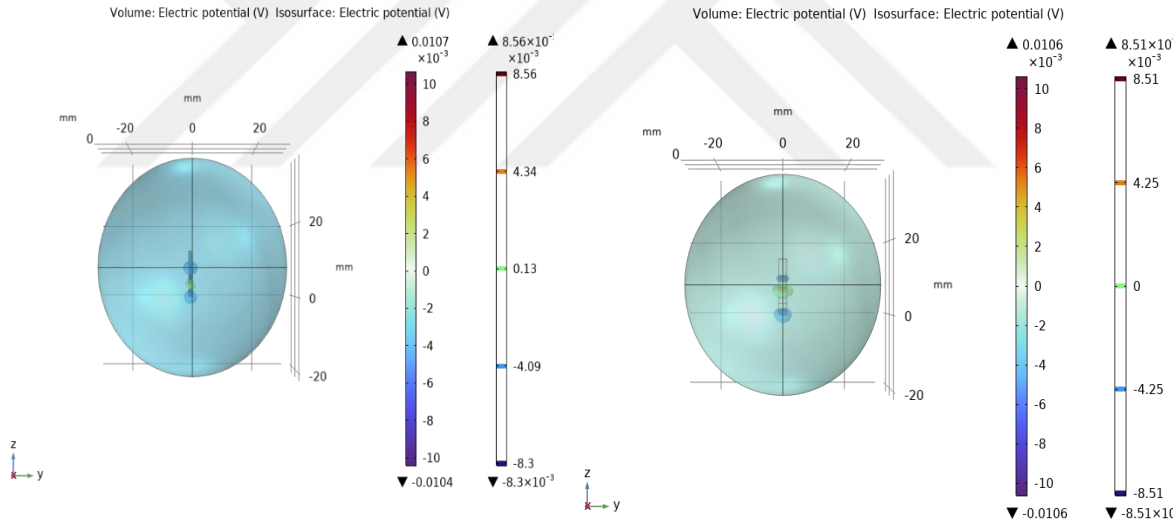
a **b**

Şekil 6. 85. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

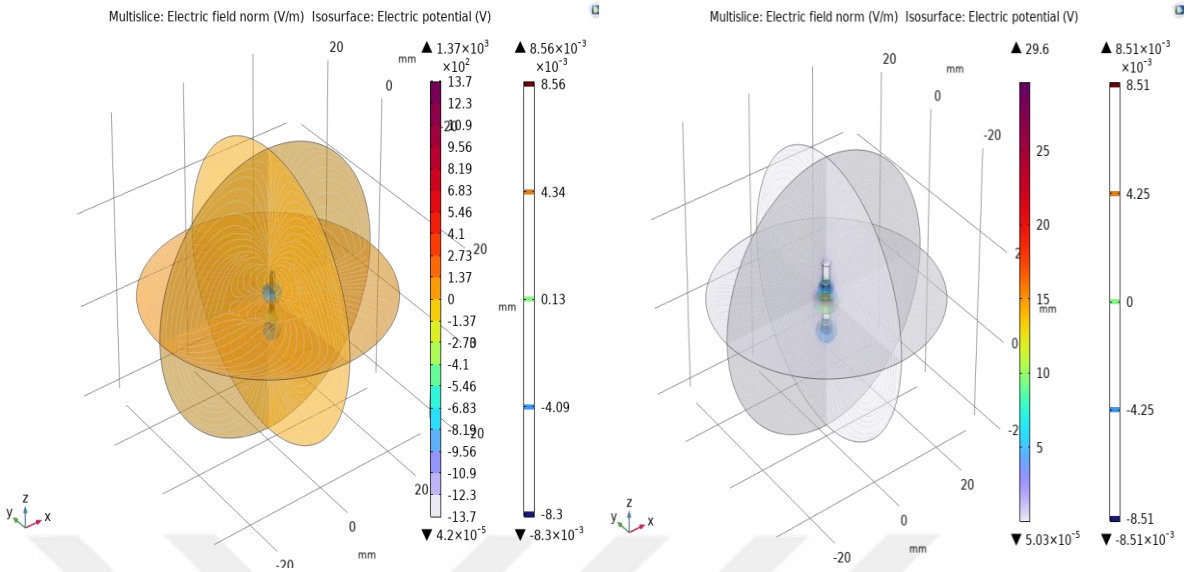
Şekil 6. 86. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

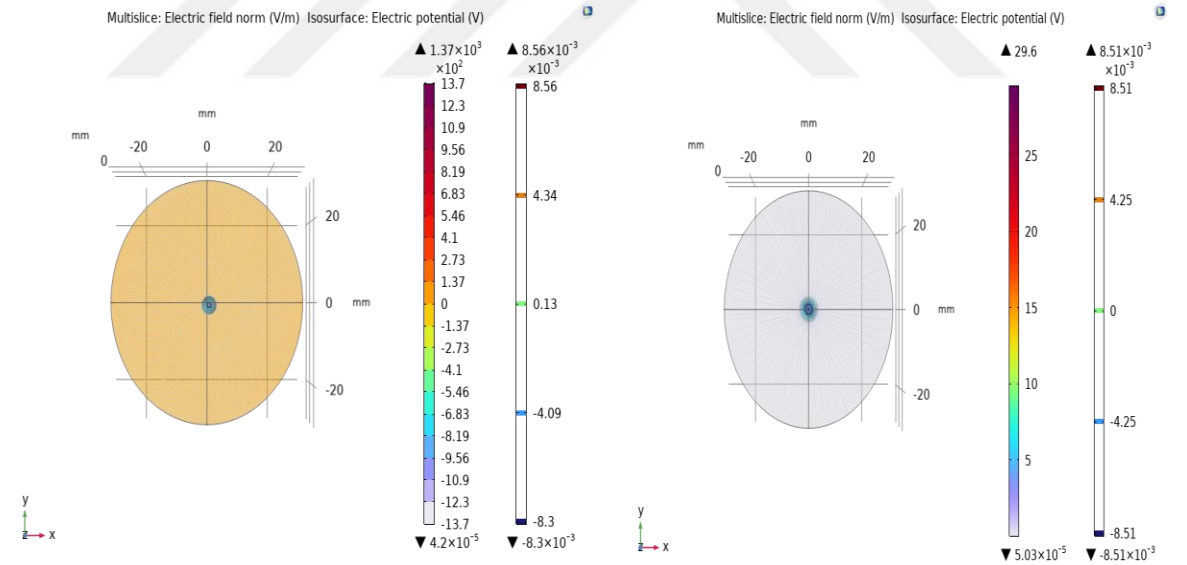
Şekil 6. 87. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

e. Elektrik alanı çalışması



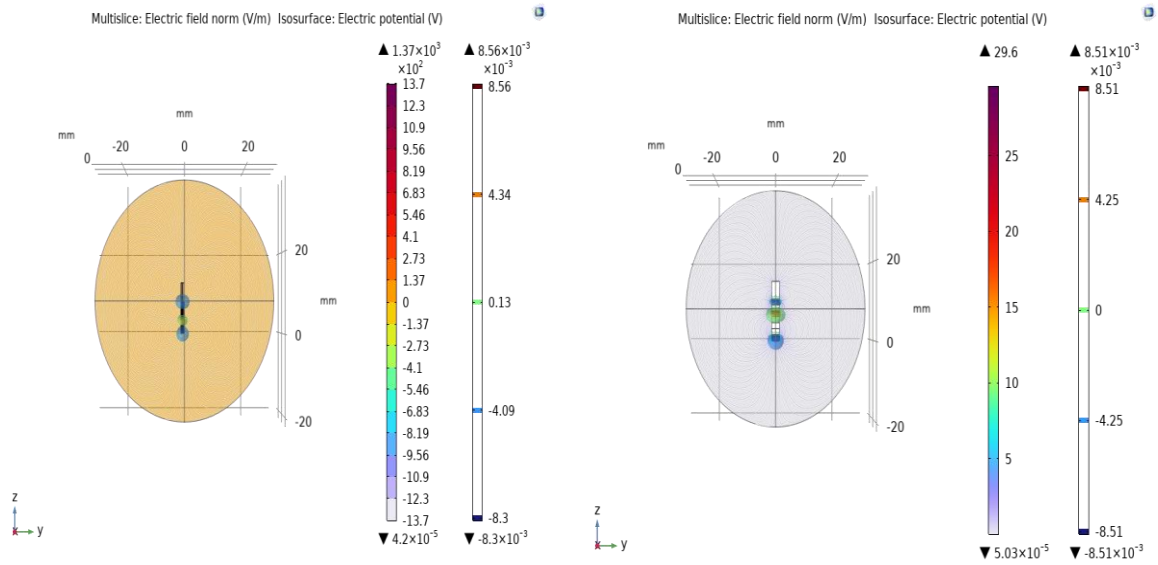
a **b**

Şekil 6. 88. a. 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 89. a. xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 90. a. yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Üç kutuplu (Tripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 19. Y-şekilli elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0029024	15.062	1.5364

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 20. Kullnımda mevcut elektrot için veriler - Tripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-0.0010317	4.0252	1.6101

E oranı: 15.062 / 4.0252 ≈ 3.74× → Y-şekilli kenarda elektrik alan ≈ 3.7 kat daha büyük.

J oranı: 1.5364 / 1.6101 ≈ 0.95× → Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %5 daha düşük (neredeyse aynı).

Fiziksel / uygulama yorumu:

Etkililik (fokal hedefler): Y-şekilli açıkça daha avantajlı. Çok daha yüksek lokal E sayesinde küçük hedefleri daha kolay ve daha fokal aktive edebilir.

Doku hasarı riski: Tekil J değerleri birbirine çok yakın; Y-şekilli J biraz daha düşük. Bu tekil verilere göre Y-şekilli doku hasarı riski daha yüksek değil, hatta biraz daha iyi görünüyor.
Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli daha verimli olabilir çünkü aynı hedefi daha düşük hacim/enerjiyle aktive etme potansiyeli var.

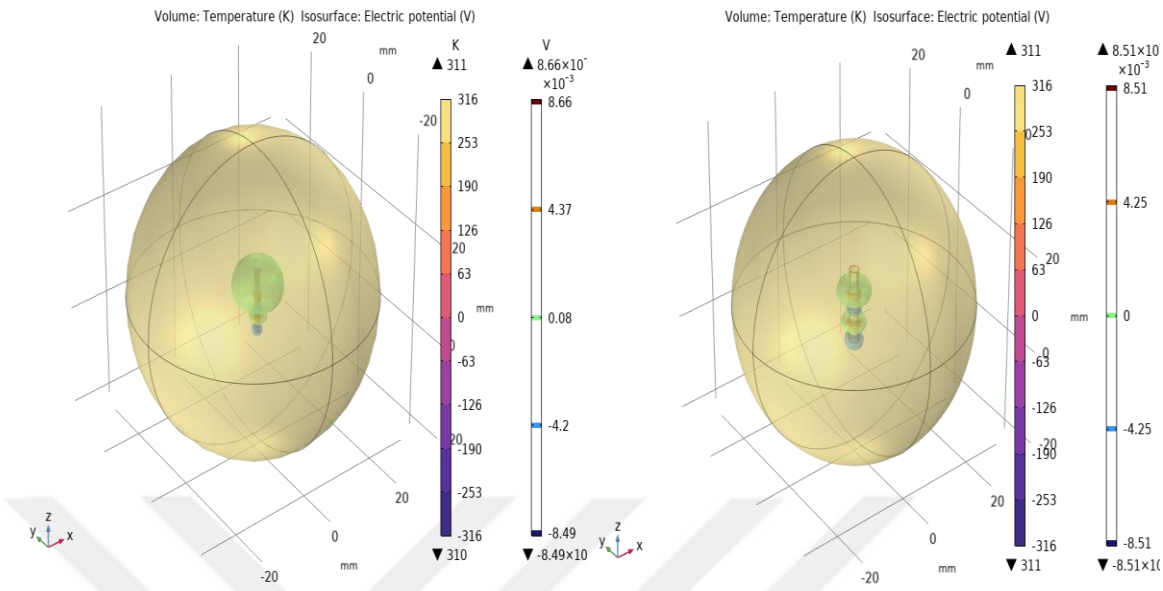
6.4 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri Karşılaştırmalı

Dört kutuplu (Quadripolar) geometri iki modelle oluşturuldu. Model-1: 18 katotlu dört kutuplu (Quadripolar) mod -1V ve 18 anotlu +0.01V (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.15.a) ve Model-2:18 katotlu Dört kutuplu (Quadripolar) mod -0.01V ve 18 anotlu +0.01V (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.15.b) şeklinde oluşturulmuştur. Kullanımda mevcut elektrot içinse yüzey voltajlarına sahip dört kutuplu (Quadripolar) elektrot (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.11.a), yüzey voltajlarına sahip dört kutuplu (Quadripolar) elektrot (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.11.b) [29] biçiminde oluşturulmuştur. Biyoısı transferi (ht) ve elektrik akımı çalışmaları yapıldı. Sıcaklık çalışması, elektrik potansiyeli çalışması ve elektrik alanı çalışması sonuçları iki elektrot için kaydedildi.

6.4.1 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V)

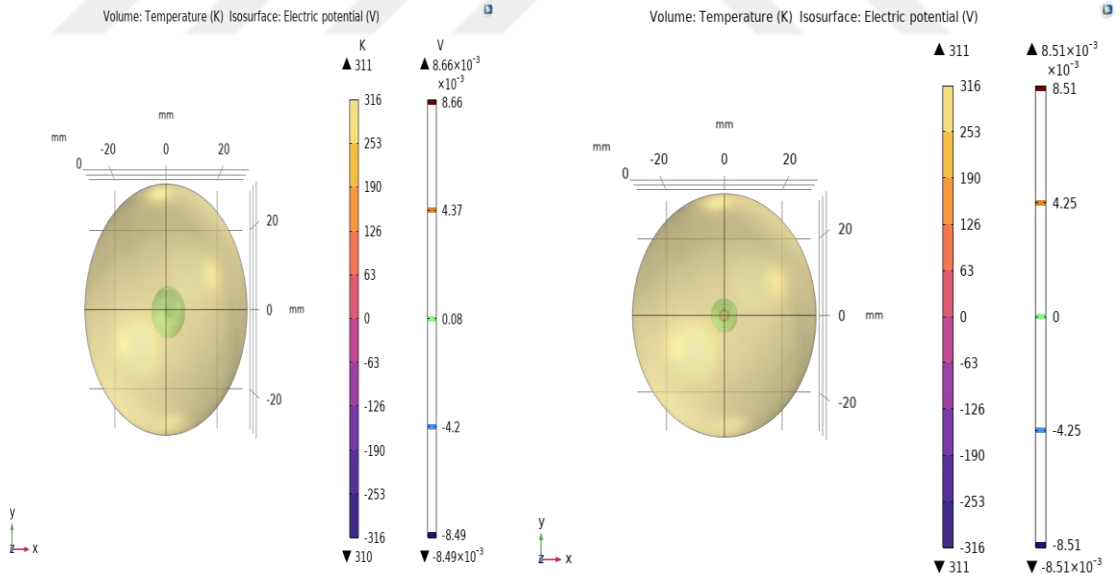
Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V), Y-şekilli elektrot için 18 katotlu dört kutuplu (Quadripolar) mod -0.01V ve 18 anotlu +0.01V (şekil 5.15.a). Kullanımda mevcut elektrot yüzey voltajlarına sahip dört kutuplu (Quadripolar) elektrot (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.11.a) [29].

a. Sıcaklık çalışması



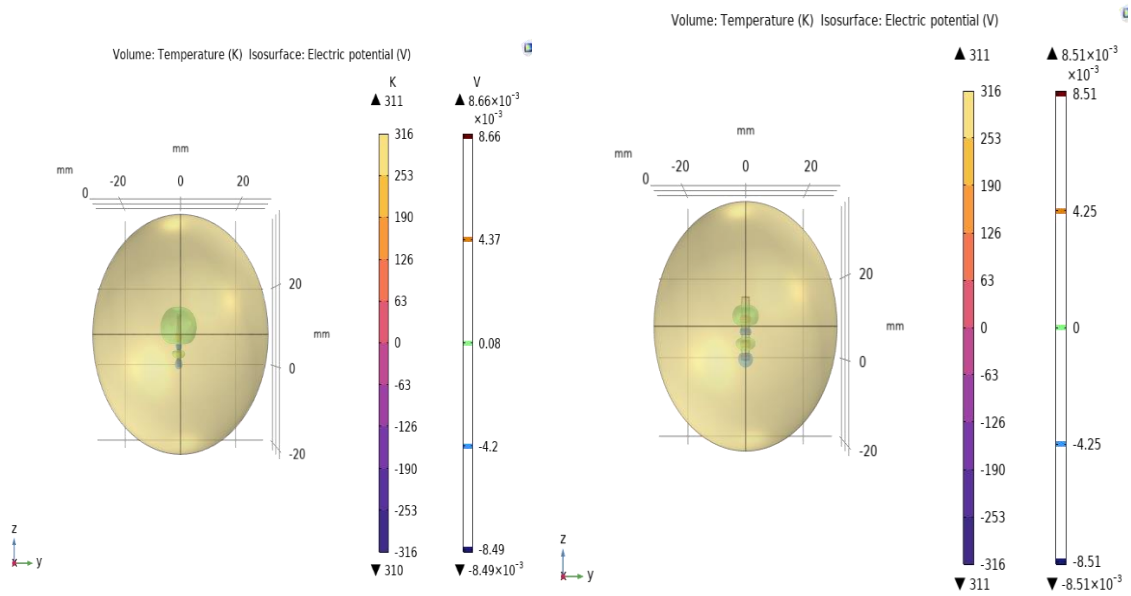
a **b**

Şekil 6. 91. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

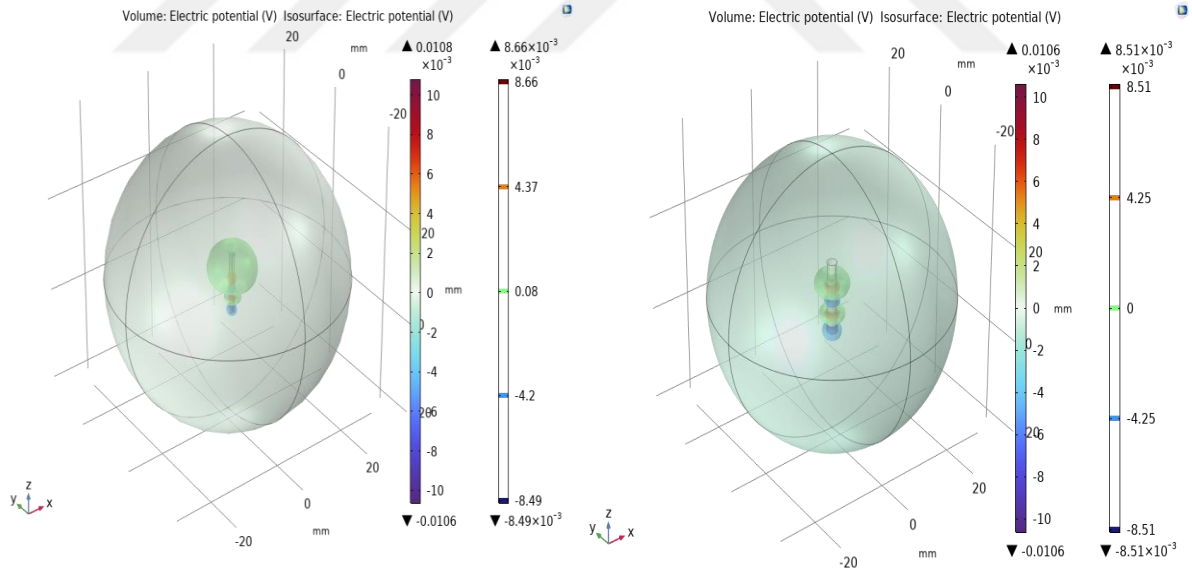
Şekil 6. 92. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

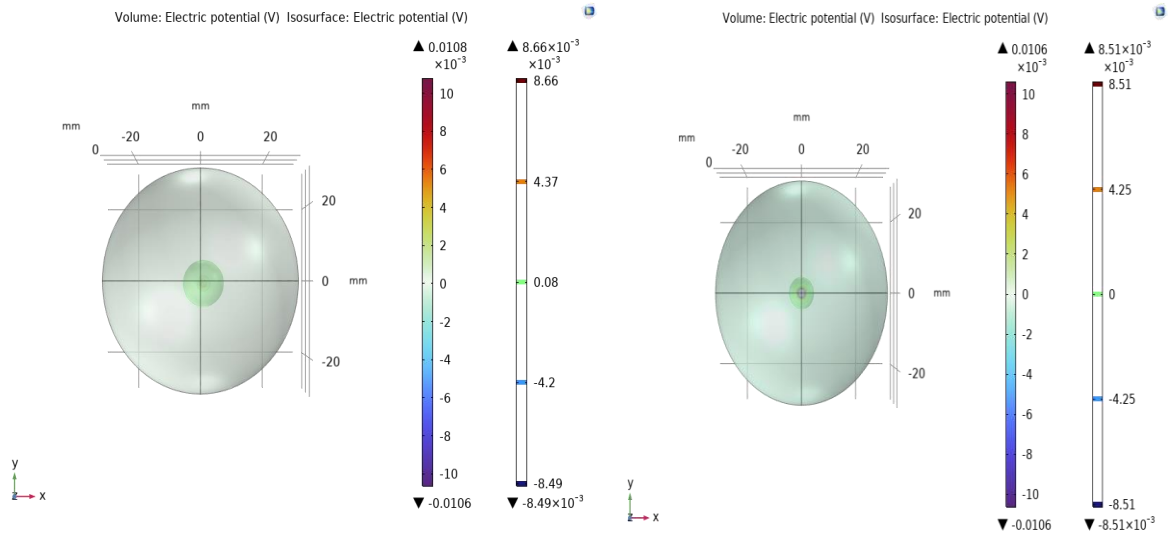
Şekil 6. 93. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. Elektrik potansiyeli çalışması



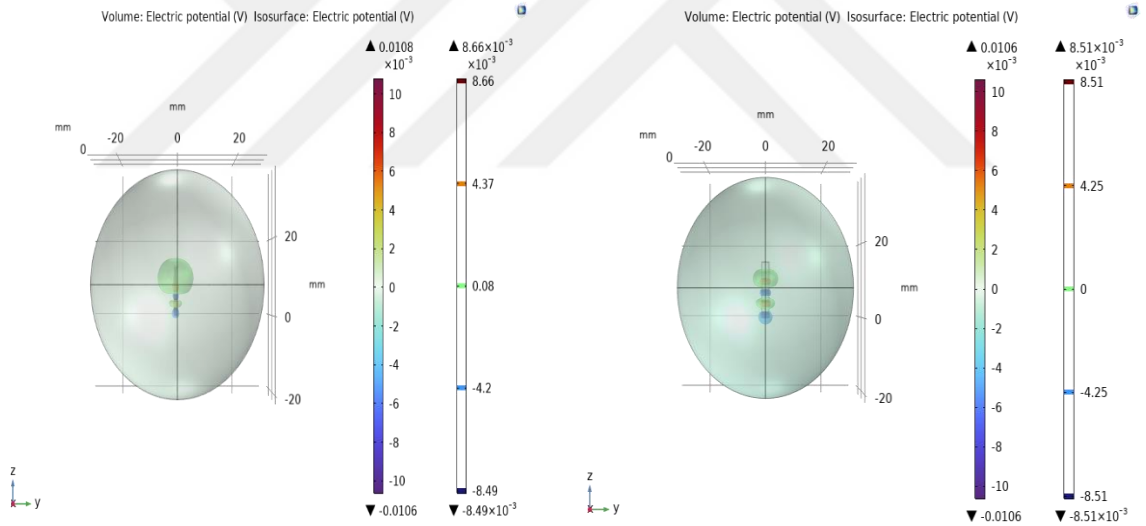
a **b**

Şekil 6. 94. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

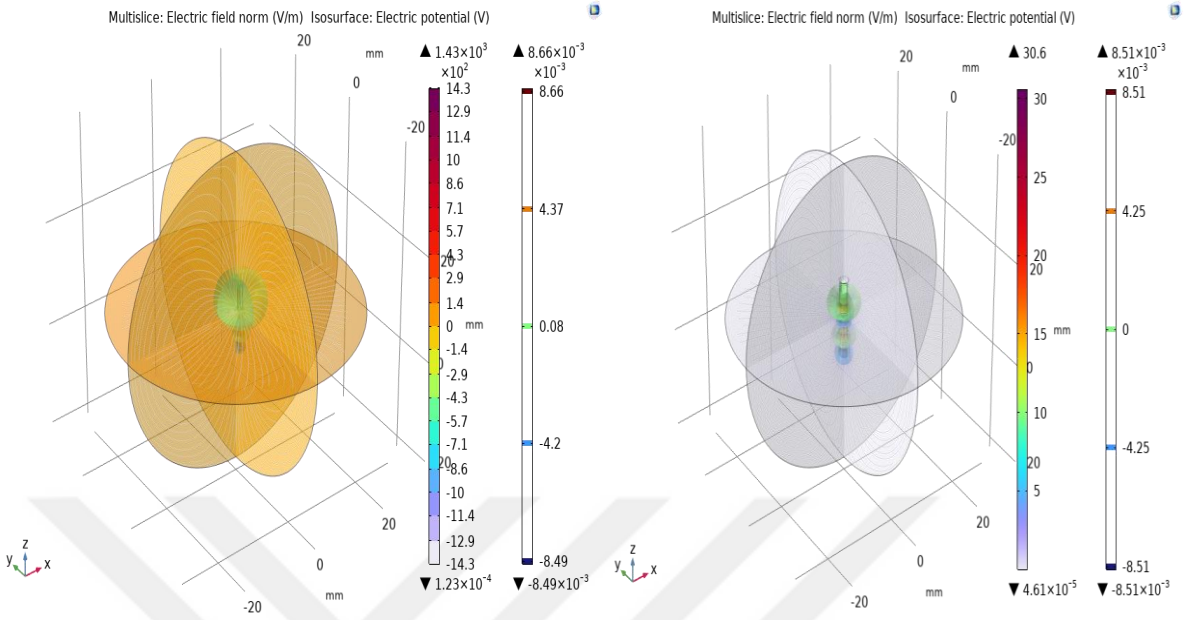
Şekil 6. 95. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

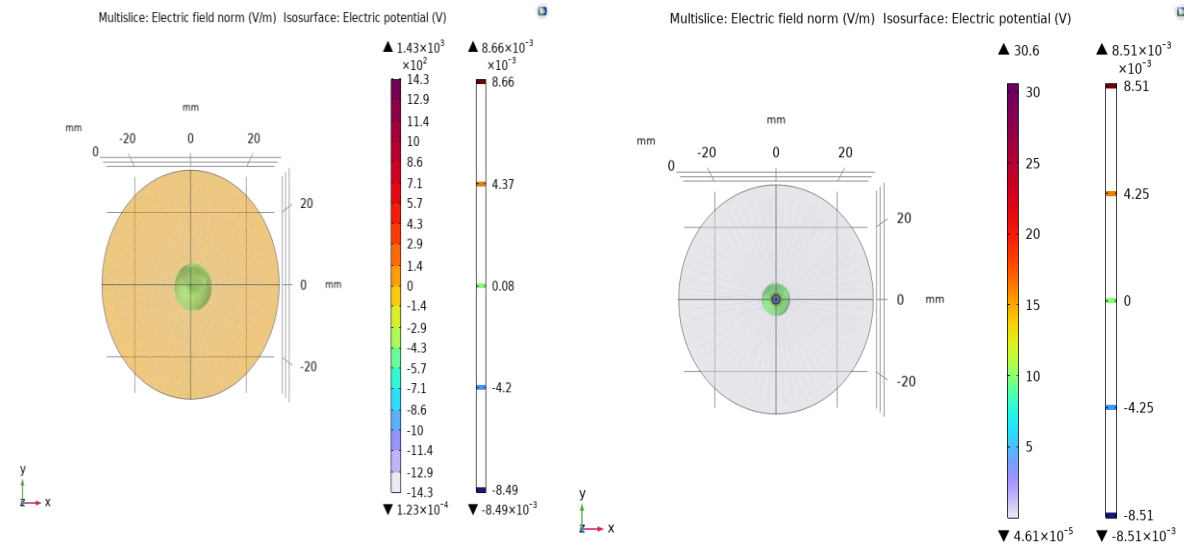
Şekil 6. 96. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması



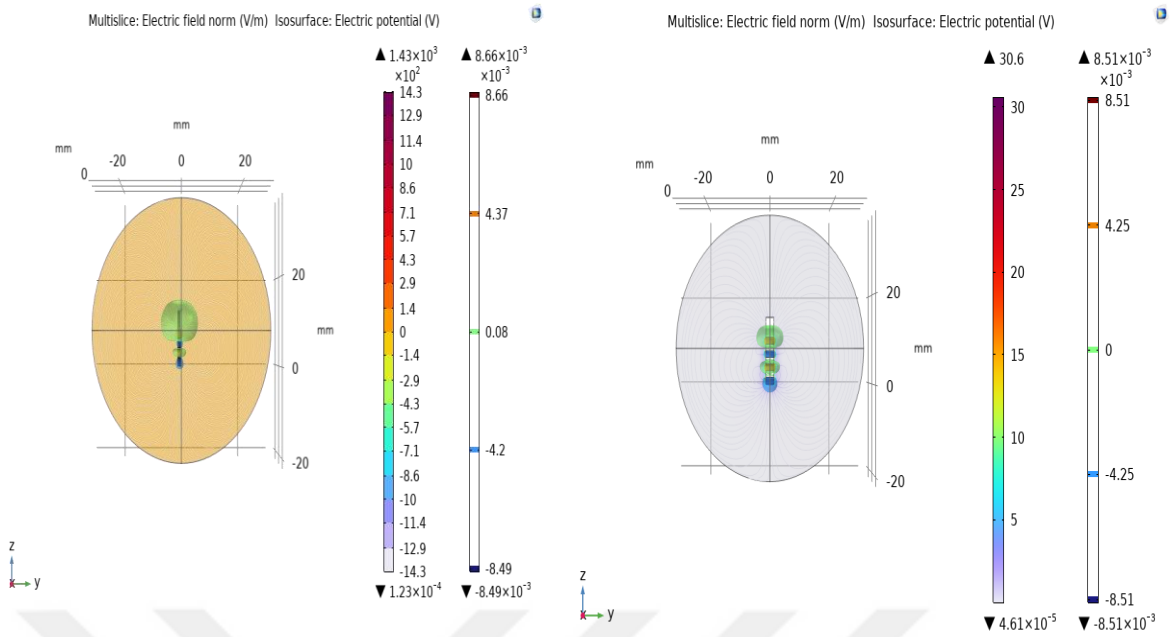
a **b**

Şekil 6. 97. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 98. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 99. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 21. Y-şekilli elektrot için veriler - Quadripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	6.0268E-4	21.850	2.2309

Kullanımada mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 22. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Quadripolar (+0.01V, -0.01V,+-0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-2.0452E-4	4.9851	1.9940

Elektrik alan (E): E(Y) / E(silindrik) ≈ 21.85 / 4.985 ≈ 4.38× → Y-şekilli kenarda alan ~4.4 kat daha büyük.

Akım yoğunluğu (J): J(Y) / J(silindrik) ≈ 2.23 / 1.994 ≈ 1.12× → Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %12 daha yüksek.

Etkililik / hedefleme: Y-şekilli çok daha yüksek lokal E üretiyor; bu, küçük ve çok odaklı hedefleri aktive etmede büyük avantaj. Quadripolar konfigürasyonun yönlendirme/steering imkânı da ek fayda sağlar.

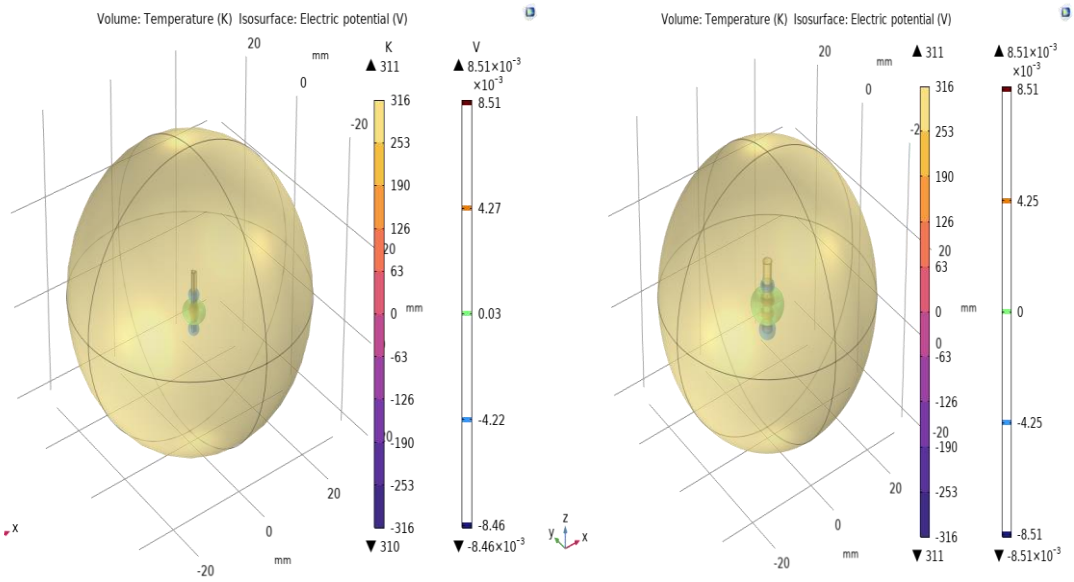
Doku hasarı riski: Hem E hem de J Y-şekilli için daha yüksek. Özellikle J yüzey akım yoğunluğu ~%12 daha yüksek olması elektrot–doku arayüzünde daha fazla charge birikimi/elektrokimyasal etki ve termal risk anlamına gelebilir.

Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli yüksek E sayesinde hedefi daha düşük I_total ile aktive edebiliyorsa pil için avantajlı olabilir. Fakat J ve muhtemel akım talepleri artarsa pil tüketimi de artabilir.

6.4.2 Dört Kutuplu (Quadripolar) Geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)

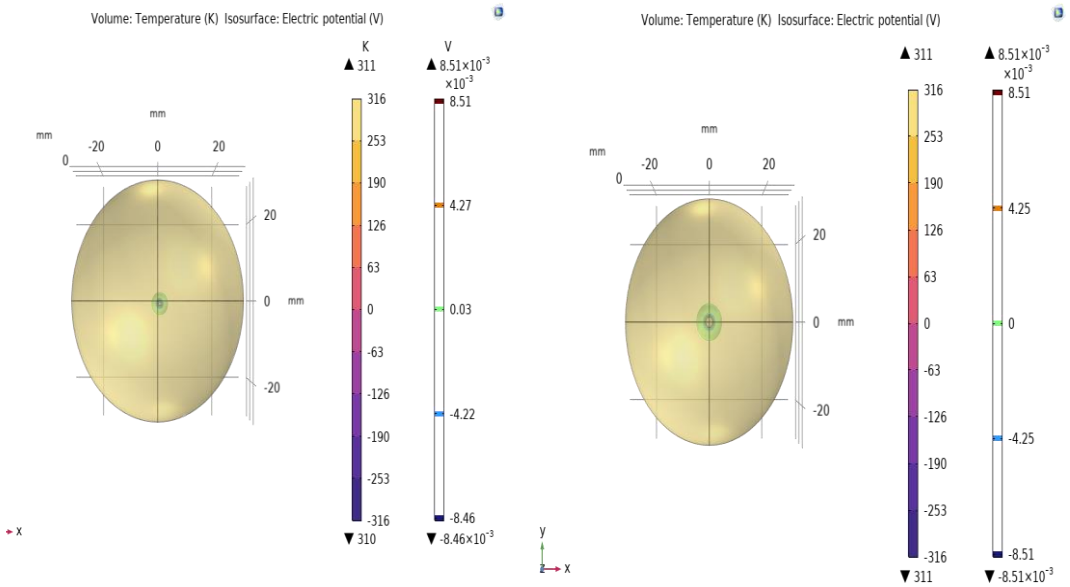
Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V), Y-şekilli elektrot için 18 katotlu dört kutuplu (Quadripolar) mod -0.01V ve 18 anotlu +0.01V (şekil 5.15.b) ve kullanımda mevcut elektrot yüzey voltajlarına sahip dört kutuplu (Quadripolar) elektrot (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) (şekil 5.11.b) [29] oluşturulmuştur.

a. Sıcaklık çalışması



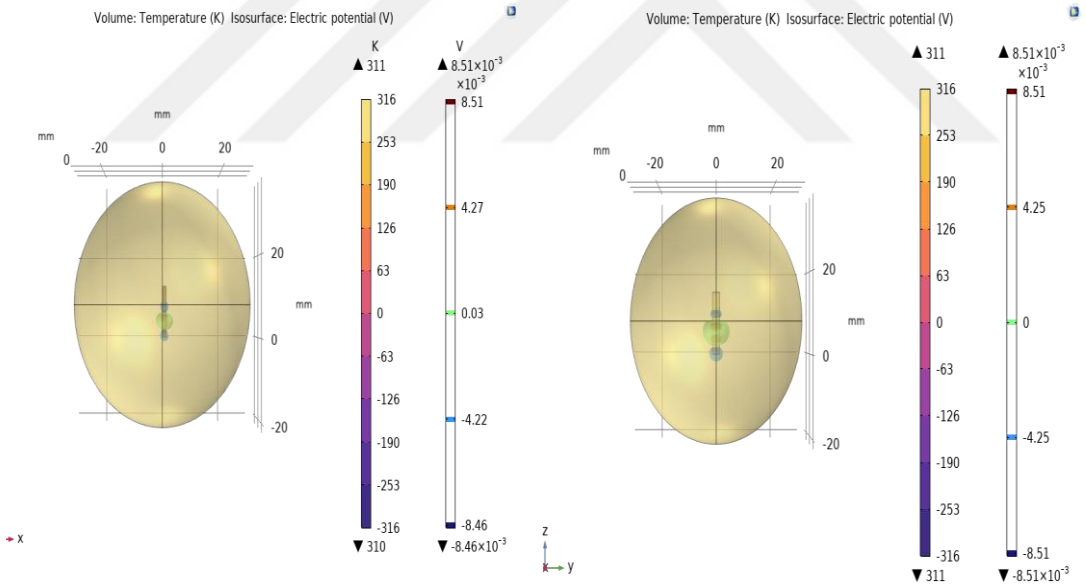
a **b**

Şekil 6. 100. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

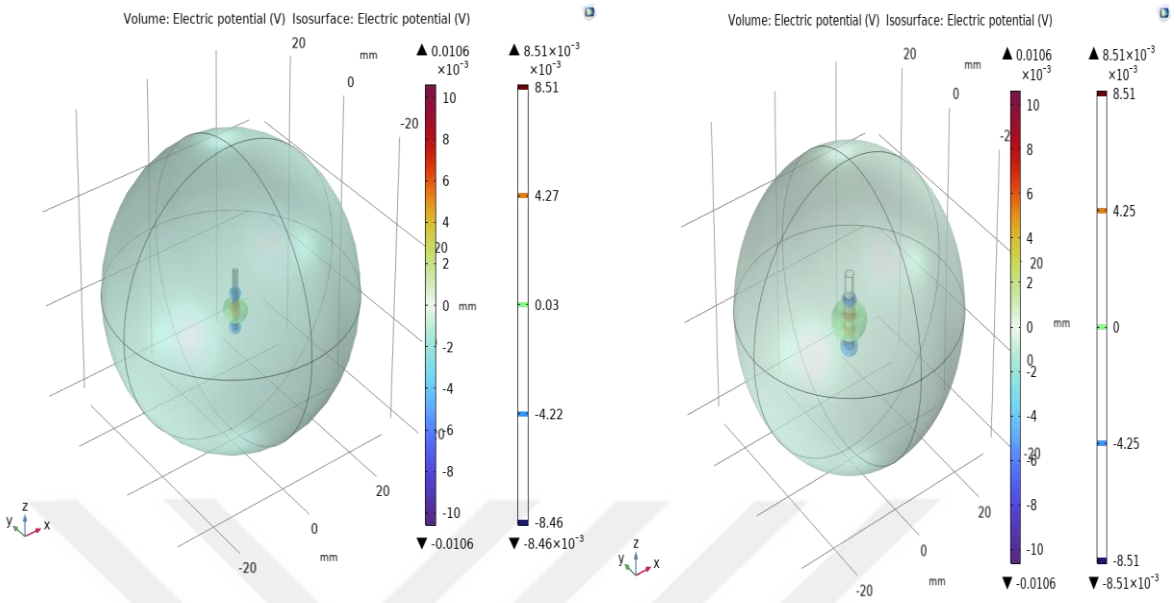
Şekil 6. 101. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması



a **b**

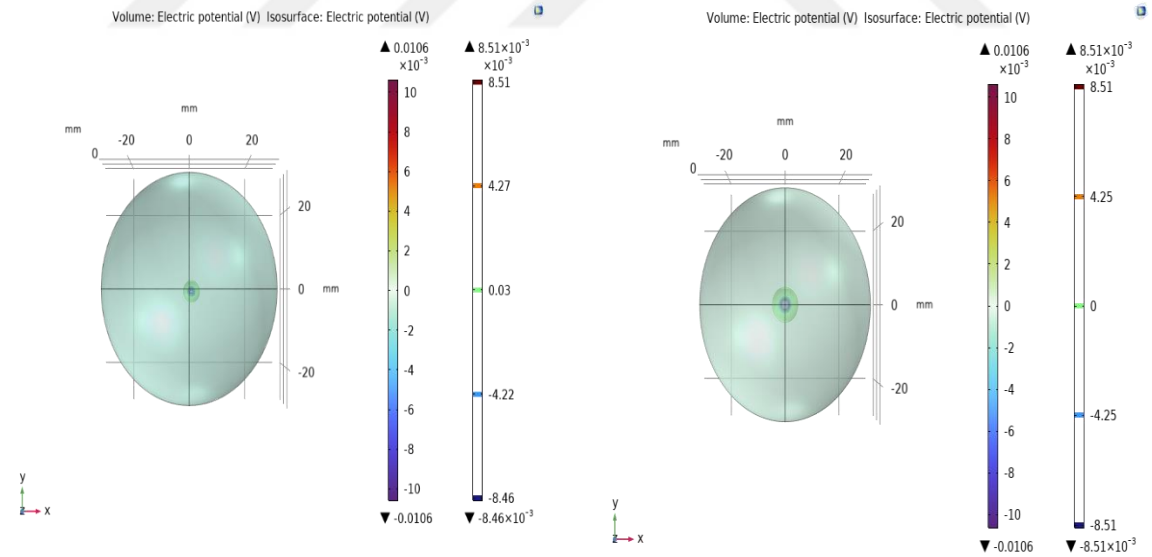
Şekil 6. 102. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için sıcaklık çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için sıcaklık çalışması

b. **Elektrik potansiyeli çalışması**



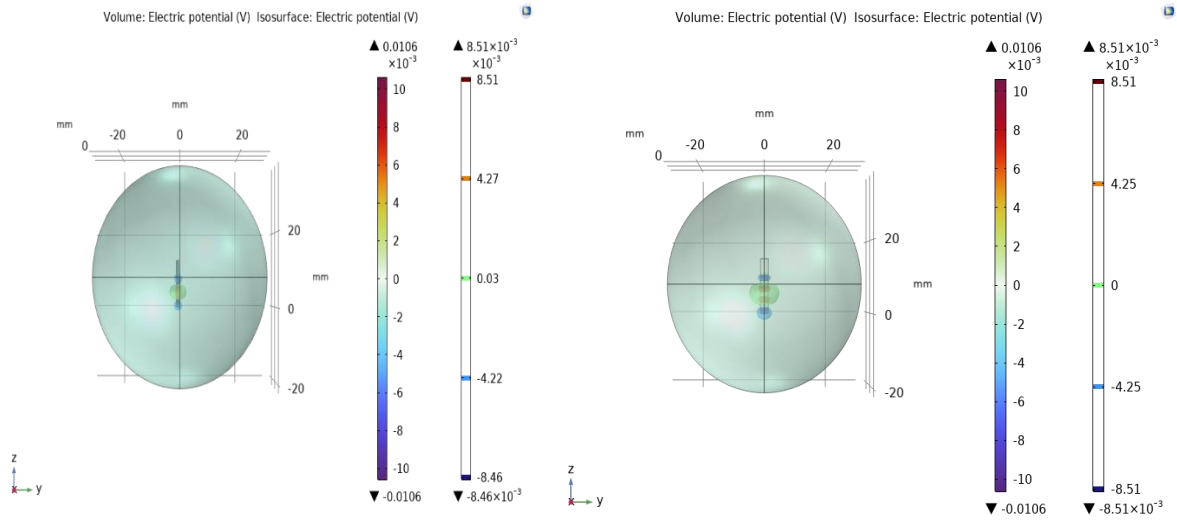
a **b**

Şekil 6. 103. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

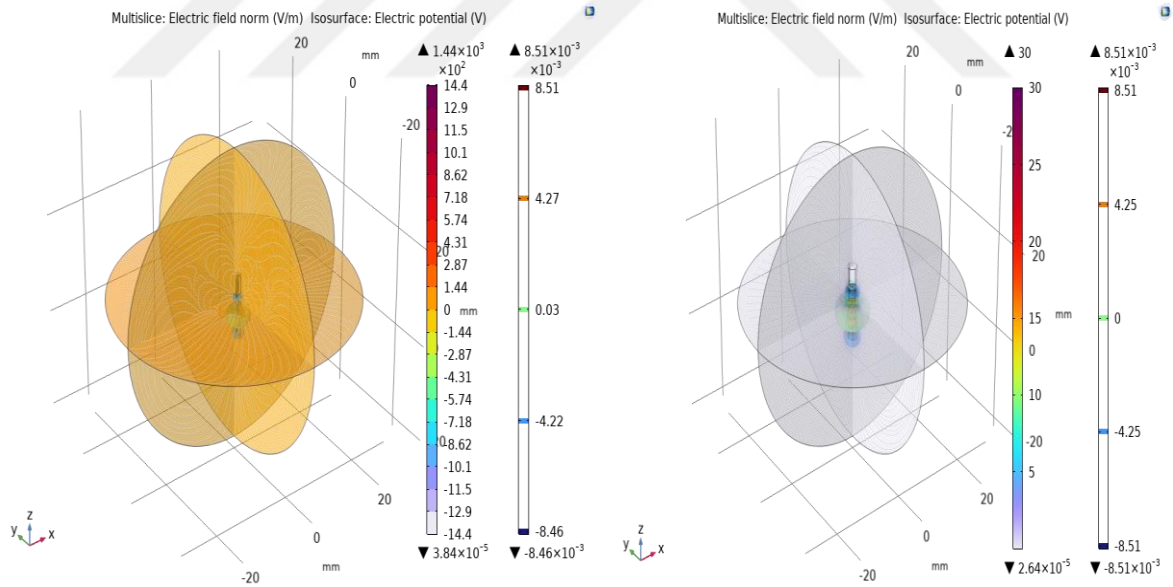
Şekil 6. 104. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması



a **b**

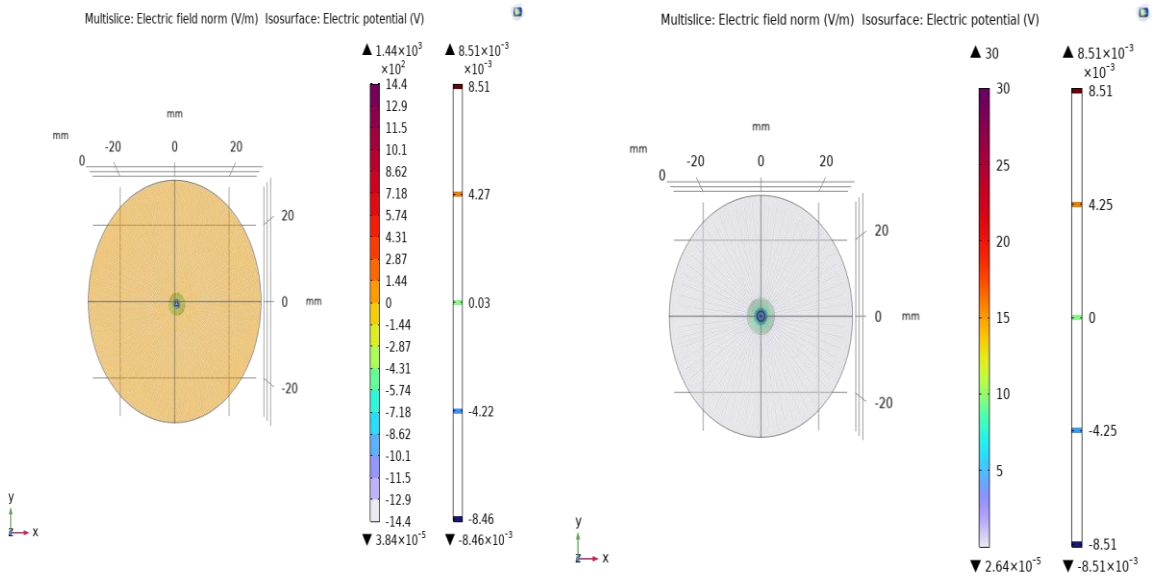
Şekil 6. 105. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

c. Elektrik alanı çalışması



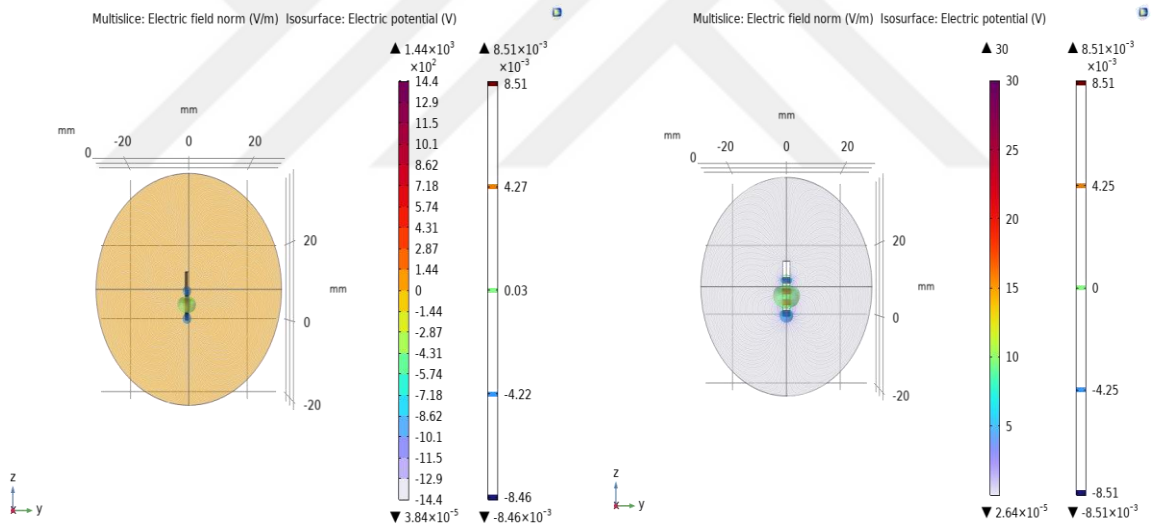
a **b**

Şekil 6. 106. a. 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması, **b.** 3D Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 107. a. xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik alanı çalışması, **b.** xy Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik alanı çalışması



a **b**

Şekil 6. 108. a. yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)Y-şekilli elektrot için elektrik potansiyel çalışması, **b.** yz Dört kutuplu (Quadripolar) geometri (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V) kullanımda mevcut elektrot için elektrik potansiyel çalışması

Y-şekilli elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 23. Y-şekilli elektrot için veriler - Quadripolar (-0.01V, +0.01V,+-0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-8.9614E-4	18.793	1.9095

Kullanımda mevcut elektrot için, sonlu eleman modelleme programından elde edilen veriler:

Tablo 6. 24. Kullanımda mevcut elektrot için veriler - Quadripolar (-0.01V, +0.01V,+-0.01V, -0.01V)

Temperature (K)	Electric potential (V)	Electric field norm (V/m)	Current density norm (A/m^2)
310.50	-2.4115E-4	5.0932	2.0373

E oranı ≈ 18.793 / 5.0932 ≈ 3.69× → Y-şekilli kenarda elektrik alan ≈ 3.7 kat daha büyük.
J oranı ≈ 1.9095 / 2.0373 ≈ 0.94× → Y-şekilli yüzey akım yoğunluğu ≈ %6 daha düşük (neredeyse aynı).
Etkililik / hedefleme: Y-şekilli: çok daha yüksek lokal E → küçük, fokal hedefleri aktive etmede daha etkin. Quadripolar düzenleme yönlendirme/steering avantajı da ek fayda sağlar.
Doku hasarı riski: Tekil J değeri Y-şekilli için hafifçe daha düşük; bu iyi bir işaret. Pratik olarak: Y-şekilli çok daha yüksek E üretirken J benzer veya biraz düşük olduğundan — tekil verilere göre — Y-şekilli doku zarar riski açısından dezavantaj değil, hatta avantajlı olur.
Pil ömrü / enerji verimliliği: Y-şekilli aynı hedefi daha düşük I_total ile gerçekleştirebiliyorsa pil için daha avantajlı olur. Tekil J'ler yakın olduğundan tekil değerden pil farkı beklenmez.

7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Y-şekilli elektrot ve kullanımda mevcut elektrodun, sonlu eleman modelleme program ile 4 farklı geometride elektrik çalışması ve biyoısı çalışması (ht) uygulandı. Toplam 10 simülasyon çalışma yapıldı, her simülasyon çalışması için 3 sonuç (sıcaklık çalışması, elektrik potansiyel çalışması ve elektrik alanı çalışması) kaydedildi. Toplam 30 sonuç elde edildi ve kaydedildi. Bu sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterildi.

Tablo 7. 1. Sonuçlar tablosu (+) daha iyi sonuç (-) daha kötü sonuç

Geometri	Y-şekilli elektrot			Kullanımda mevcut elektrot		
	Sıcaklık çalışması	Elektrik potansiyeli çalışması	Elektrik alanı çalışması	Sıcaklık çalışması	Elektrik potansiyeli çalışması	Elektrik alanı çalışması
Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V)	+	+	+	+	-	-
Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V, -0.01V)	+	+	+	+	-	-
Dar Çift kutuplu (Bipolar) (-0.01V, +0.01V)	+	+	+	+	-	-
Dar Çift kutuplu (Bipolar) (+0.01V, -0.01V)	+	+	+	+	-	-
Geniş Çift kutuplu (Bipolar) (-0.01V, +0.01V)	+	-	-	+	+	+
Geniş Çift kutuplu (Bipolar) (+0.01V, -0.01V)	+	-	-	+	+	+
Üç kutuplu (Tipolar) (-0.01V, -0.01V, +0.01V)	+	+	+	+	-	-
Üç kutuplu (Tipolar) (+0.01V, +0.01V, -0.01V)	+	+	+	+	-	-
Üç kutuplu (Tipolar) (+0.01V, -0.01V, +0.01V)	+	+	+	+	+	+
Üç kutuplu (Tipolar) (-0.01V, +0.01V, -0.01V)	+	+	+	+	+	+
Dört kutuplu (Quadripolar) (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V)	+	-	-	+	+	+
Dört kutuplu (Quadripolar) (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)	+	+	+	-	-	-

+ işareti: bu geometrideki bu elektrodun daha iyi sonuçlar verdiğini, - işareti: bu geometrideki bu elektrodun daha kötü sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tablo 7. 2. Y-şekilli elektrot, Kullanımda mevcut elektrot geometrilere göre karşılaştırmalı

Geometri	Y-şekilli elektrot			Kullanımda mevcut elektrot		
	Temas nokta sayısı	Elektrik alan normu (V/m)	akım yoğunluğu normu (A/m^2)	Temas nokta sayısı	Elektrik alan normu (V/m)	akım yoğunluğu normu (A/m^2)
Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V)	9	5.9594	0.60839	1	1.7409	0.69638
Tek kutuplu (Monopolar) (-0.01V, -0.01V)	18	7.0644	0.72182	2	3.2782	1.3113
Dar Çift kutuplu (Bipolar) (-0.01V, +0.01V)	18	10.932	1.1171	2	3.0148	1.2059
Dar Çift kutuplu (Bipolar) (+0.01V, -0.01V)	18	10.932	1.1171	2	3.0148	1.2059
Geniş Çift kutuplu (Bipolar) (-0.01V, +0.01V)	18	8.9977	0.93251	2	2.5426	1.0170
Geniş Çift kutuplu (Bipolar) (+0.01V, -0.01V)	18	8.9977	0.93251	2	2.5426	1.0170
Üç kutuplu (Tipolar) (-0.01V, -0.01V, +0.01V)	27	16.036	1.6351	3	3.9678	1.5871
Üç kutuplu (Tipolar) (+0.01V, +0.01V, -0.01V)	27	16.036	1.6351	3	3.9678	1.5871
Üç kutuplu (Tipolar) (+0.01V, -0.01V, +0.01V)	27	15.062	1.5364	3	4.0252	1.6101
Üç kutuplu (Tipolar) (-0.01V, +0.01V, -0.01V)	27	15.062	1.5364	3	4.0252	1.6101
Dört kutuplu (Quadripolar) (+0.01V, -0.01V, +0.01V, -0.01V)	36	21.850	2.2309	4	4.9851	1.9940
Dört kutuplu (Quadripolar) (-0.01V, +0.01V, +0.01V, -0.01V)	36	18.793	1.9095	4	5.0932	2.0373

Sonuçların özeti:

- Tüm incelenen geometrilerde, kullanımda mevcut elektrot ile yeni tasarlanan Y-şekilli elektrotun ısıl davranışları arasında anlamlı bir fark gözlenmemiştir

- elektrik alan dağılımı çalışmasında, yeni tasarlanan Y-şekilli elektrot, aşağıdaki uyarım konfigürasyonlarında mevcut elektrottan daha verimli bir şekilde elektrik alanı yaymıştır:

- Tek kutuplu (Monopolar): bütün modleri
- Dar Çift kutuplu (Bipolar): (-0.01V, +0.01V) ve (+0.01V, -0.01V)
- Üç kutuplu (Tripolar): bütün modleri
- Dört kutuplu (Quadripolar): (-0.01V +0.01V +0.01V, -0.01V)

- Tüm geometrilerde, yeni tasarlanan Y-şekilli elektrot daha yüksek enerji yoğunluğu elektrik alanı iletebildiğini gözlemlendi. Bu sonuca dayanarak, Y-şekilli elektrot tasarlaması ile enerji tasarrufu elle edebildiğini söyleyebiliriz.

Bu tez kapsamında, yeni tasarlanan Y-şekilli elektrot Tinkercad çevrimiçi platformu kullanılarak tasarlanmış ve modellenmiştir. Daha sonra bu model, sonlu elemanlar analiz programına aktarılmış ve üzerinde Elektrik Akımı ve Biyoısı Transferi (ht) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analizler, dört farklı elektrot geomteri altında yürütülmüştür: Tek kutuplu (Monopolar), Çift kutuplu (Bipolar), Üç kutuplu (Tripolar) ve Dört kutuplu (Quadripolar).

Yapılan tüm analizlerin sonuçları, klinik uygulamalarda halihazırda kullanılan elektrotların performansları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, Y-şekilli elektrotun mevcut elektrotlara kıyasla birçok açıdan daha avantajlı özelliklere sahip olduğunu göstermektedir.

Y-şekilli elektrotun kesit alanı oldukça küçüktür (1.056 mm^2), kesit alanının küçülmesi, beynin yapısal bütünlüğünü koruma açısından önemlidir. Bu bulgu, McIntyre ve Grill (2000) [44] tarafından vurgulanan, daha ince elektrotların çevresel hasarı azaltabileceği yönündeki sonuçlarla göstermektedir. Oysa mevcut elektrotların kesit alanı (5.064 mm^2) olup, daha geniş bir hacme sahiptir.

Ayrıca, Y-şekilli elektrot 36 adet temas noktasına sahiptir. Temas noktası sayısının artırılması, stimülasyonun uzaysal çözünürlüğünü yükseltmektedir. Buna karşın kullanımda mevcut elektrotlar yalnızca 4 veya 8 temas noktası ile sınırlıdır. Bu temas noktalarının her biri dikdörtgen şeklindedir (1.8 mm uzunluk, 0.4 mm genişlik). Oysa mevcut elektrotlardaki temas yüzeyleri silindirik formda ve genellikle 1.5 mm uzunluğa sahiptir.

Y-şekilli elektrotun dikdörtgen ve ayrık temas noktaları, elektrik alanın dikey yönde daha fazla yayılmasını sağlamaktadır. Sahip olduğu 36 adet bağımsız temas noktası, sistemin hem esnekliğini hem de hedeflenen beyin alanlarına ulaşma başarısını artırmaktadır. Ayrıca temas noktalarının birbirinden ayrı konumlandırılması sayesinde hem "ring-mode" (halka modu) hem de "directional-mode" (yönlü mod) stimülasyon uygulanabilmektedir. Bu durum, yönlü stimülasyon teknolojileri ile uyumlu olup, Pollo ve ark. (2014) [45] tarafından bildirilen directional lead teknolojilerinin etkinliğini desteklemektedir.

Elektrotun elektrik alan dağılımı yönünden yapılan değerlendirmede, elde edilen simülasyon sonuçları elektrik alanın daha dar ve hedefe yönlendirilmiş şekilde yayıldığını göstermiştir. Bu durum, Butson ve McIntyre (2007) [46] çalışmasında bildirilen hedef dışı stimülasyonun neden olduğu advers etkilerin azaltılması gerekliliğine doğrudan çözüm üretmektedir.

Gerçekleştirilen tüm testlerde, Y-şekilli elektrot çevre dokulara daha yüksek enerji yoğunluğunda elektrik alanı iletmeyi başarmıştır. Bu da, DBS uygulamalarında kullanılan İmplante Edilmiş Pulse Üreteçleri açısından enerji tasarrufu sağlayabilecek potansiyel bir avantaj sunmaktadır.

Ayrıca, şekli, boyutları ve küçük temas noktaları sayesinde Y-şekilli elektrotun çevredeki dokularda neden olduğu ısı artışı da daha düşüktür. Bu durum, Kuncel ve Grill (2004) [47] tarafından elektrot ısısının doku güvenliği üzerindeki etkisi bağlamında bildirilen riskleri azaltabilir. Tüm bu özellikler değerlendirildiğinde, Y-şekilli elektrot tasarımı, derin beyin stimülasyonunda ortaya çıkan istenmeyen yan etkilerin azaltılmasına yönelik etkili bir çözüm olabilir.

Literatürde yer alan çoğu klasik DBS elektrot tasarımı (örneğin Medtronic 3387/3389, Boston Scientific Vercise, Abbott Infinity) genellikle silindirik, sınırlı sayıda temas noktasına sahip ve dairesel uyarım sağlayan yapıdadır. Bu yapıların dezavantajı, stimülasyonun kontrolsüzce yayılması ve hedef dışı nöral alanları etkilemesidir. Y-şekilli elektrotun sunduğu yönlendirilmiş uyarım ve yüksek temas sayısı bu dezavantajları ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak; bu tezde geliştirilen Y-şekilli elektrot:

- Daha hassas uyarım sağlamakta,
- Daha az enerji tüketmekte,
- Daha fazla yönlü kontrol sunmaktadır.

Bu yönleriyle, literatürde yer alan birçok elektrot modeline göre hem mühendislik tasarımı hem de biyomedikal performans açısından ileri bir seviyeye ulaşmıştır.

Y-şekilli elektrotun sunduğu modüler, yönlü ve yüksek yoğunluklu stimülasyon avantajları ile gelecekteki akıllı beyin arayüzleri için umut verici bir tasarım olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında, tasarımın ileri üretim teknolojileri, biyouyumlu malzeme kullanımı, akıllı elektronik sistemler ve kişiselleştirilmiş stimülasyon stratejileri ile desteklenmesi hem tedavi etkinliğini artıracak hem de hasta konforunu iyileştirecektir.

Yeni tasarlanan Y-şekilli elektrot klinik uygulamalarda kullanması artırmak amacıyla birkaç stratejileri önerilebilir. Örnek olarak; MEMS teknolojileriyle daha küçük, daha hassas ve biyouyumlu elektrotlar geliştirilebilir. Kapalı-Çevrim Stimülasyon Sistemleri: Elektrot hem sinyal algılama hem de stimülasyon yapabilecek şekilde tasarlanarak, gerçek zamanlı geri bildirimli kontrol sistemleriyle entegre edilebilir [48]. Kablolu sistemlerin yerini alabilecek, hareket serbestliği sağlayan kablosuz enerji ve kontrol sistemleriyle donatılabilir [49].

Elektrotun çok sayıda bağımsız temas noktası, farklı beyin bölgelerine eş zamanlı veya sıralı uyarım yapılmasına olanak tanıyabilir. Termal yükü azaltmak adına mikro soğutma yapıları ya da ısıyı dağıtan özel malzemelerle desteklenebilir [50, 51].

Y-şekilli elektrot tasarımı, DBS teknolojisinin gelecekteki evrimine katkı sunabilecek yenilikçi bir yaklaşımı temsil etmektedir. Elektrotun sunduğu yüksek çözünürlüklü, yönlü ve enerji verimli stimülasyon yetenekleri, nörolojik hastalıkların daha etkili, güvenli ve kişiye özel tedavisinin önünü açmaktadır. İlerleyen süreçte biyomalzeme mühendisliği, mikrosistem teknolojileri ve sinirbilim alanlarının entegrasyonu ile bu tasarımın klinik ortama aktarılabilirliği daha da geliştirilebilir.

8. KAYNAKLAR

[1]. Olanow, CW. 2000, The role of deep brain stimulation as a surgical treatment for Parkinson's disease, Europe PMC, 55(12 Suppl 6):S60-6

[2]. Hariz, M. 2014, Deep brain stimulation: new techniques, Elsevier, 20S1 (2014) S192–S196

[3]. Alexander, J. 2022, Novel targets in deep brain stimulation for movement disorders, Springer, Volume 45, pages 2593–2613

[4]. Pycroft, L. Stein, J. Aziz, T. 2018, Deep brain stimulation: An overview of history, methods, and future developments, Brain and Neuroscience Advances, Volume 2: 1-6, pages 1–2

[5]. Albe Fessard, D. Arfel, G. Guiot, G. et al. (1963) Characteristic electric activities of some cerebral structures in man. Annales de chirurgie 17: 1185–1214.

[6]. Miocinovic, S. Somayajula, S. Chitnis, S L. Vitek, J. 2013, History, Applications, and Mechanisms of Deep Brain Stimulation. JAMA NEUROL/VOL 70 (NO. 2).

[7]. Krauss, J K. Lipsman, N. Aziz, T. Boutet, A. Brown, P. Chang, J W. Davidson, B M. Grill, W. I. Hariz, M. Horn, A. Schulder, M. Mammis, A A. Tass, P. Volkmann, J M. Lozano, A. 2021, Technology of deep brain stimulation: current status and future directions. Nat Rev Neurol. 2021 February 01; 17(2): 75–87. doi:10.1038/s41582-020-00426-z.

[8]. Gardner, J. 2013, History of deep brain stimulation: Technological innovation and the role of clinical assessment tools. Social Studies of Science 43(5) 707 –728.

[9]. Chou, KL. Grube, S. Patil, PG. 2012, Deep Brain Stimulation: A New Life for People with Par kinson’s, Dystonia and Essential Tremor. New York: Demos Medical Publishing.

[10]. Taghva, A. Corrigan JD and Rezai AR (2012) Obesity and brain addiction circuitry: Implications for deep brain stimulation. Neurosurgery 71(2): 224–238.

[11]. Nowinski, W. L. 2011, Introduction to Brain Anatomy, Biomechanics of the Brain, Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering, DOI 10.1007/978-1-4419-9997 9_2, © Springer Science+Business Media, LLC 2011

[12]. Thompson, E J. 1995, Cerebrospinal fluid, Journal of neurology, neurosurgery and psychiatry, 1995;59:349-357. Department of neuroimmunology, Institute of neurology, Queen square, London, WC1N 3BG, UK

[13]. Bloem, B R. Okun, M S. Klein, S. 2021, Parkinson’s disease, The Lancet, Seminar, Volume 397, Issue 10291p2284-2303June 12, 2021

[14]. Dexter, D T. Jenner, P. 2013, Parkinson disease: from pathology to molecular disease mechanisms, Elsevier, Volume 62, September 2013, Pages 132-144

[15]. Poewe, W. Seppi, K. Tanner, C M. Halliday G M, Brundin P, Volkmann J, Schrag A-E, Lang A E, 2017, Parkinson disease, *Nature Reviews Disease Primers* volume 3, Article number: 17013 (2017)

[16]. Okun, M.S. Foote, K. D. 2010, Parkinson's disease DBS: what, when, who and why? The time has come to tailor DBS targets, NIH Public Access, PMC PubMed Central 2011 October 1, 10(12): 1847–1857.

[17]. Whitestone, J. Salih, A. Goswami, T. 2023, Investigation of a Deep Brain Stimulator (DBS) System, MDPI, Bioengineering Volume 10 Issue 110.3390/bioengineering10101160.

[18]. Sarica, C. Iorio-Morin, C. Aguirre-Padilla, D.H. Najjar, A. Paff, M. Fomenko, A. Yamamoto, K. Zemmar, A. Lipsman, N. Ibrahim, G.M. et al. 2021, Implantable Pulse Generators for Deep Brain Stimulation: Challenges, Complications, and Strategies for Practicality and Longevity. Front. Hum. Neurosci. 2021, 15, 708481. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

[19]. Machado, A. Rezai, A R. Kopell, B H. Gross, R E. Sharan, A D. Benabid, A-L. 2006, Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease: Surgical Technique and Perioperative Management, Movement Disorders Vol. 21, Suppl. 14, 2006, pp. S247–S258 © 2006 Movement Disorder Society

[20]. Dougherty, D D. 2018, Deep Brain Stimulation—Clinical Applications, Elsevier, Volume 41, Issue 3, September 2018, Pages 385-394,

[21]. Richter, EO. Hoque, T. Halliday, W. Lozano, AM. Saint-Cyr, JA. 2004, Determining the position and size of the subthala mic nucleus based on magnetic resonance imaging results in patients with advanced Parkinson disease. J Neurosurg, 100, 541-546.

[22]. Daniluk, S. G. Davies, K. Ellias, SA. Novak, P. Nazzaro, JM. 2010, Assessment of the variability in the anatomical posi tion and size of the subthalamic nucleus among patients with advanced Parkinson's disease using magnetic resonance imaging. Acta Neurochir (Wien), 152, 201-210; discussion, 210.

[23]. Steigerwald, F. Matthies, C. Volkmann, J. 2018, Directional Deep Brain Stimulation, Springer Nature, Volume 16, pages 100–104,

[24]. Anderson, DN. Osting, B. Vorwerk, J. Dorval, AD. Butson, CR. 2018, Optimized programming algorithm for cylindrical and directional deep brain stimulation electrodes. J Neural Eng. 2018;15(2): 026005

[25]. Contarino, MF. Bour, LJ. Verhagen, R. Lourens, MA. De Bie, RM. van den Munckhof, P. et al, 2014, Directional steering: A novel approach to deep brain stimulation. Neurology. 2014;83(13):1163–9.

[26]. Pollo, C. Kaelin-Lang, A. Oertel, MF. Stieglitz, L. Taub, E. Fuhr, P. et al, 2015, Directional deep brain stimulation: an intraoperative doubleblind pilot study. Brain. 2014;137(Pt 7):2015–26.

[27]. Rebelo, P. Green, AL. Aziz, TZ. Kent, A. Schafer, D. Venkatesan, L. et al, 2018, Thalamic Directional Deep Brain Stimulation for tremor: Spend less, get more. Brain Stimul. 2018.

[28]. Sarica, C. Iorio-Morin, C. Aguirre-Padilla, D H, Najjar, A. Paff, M. Fomenko, A. Yamamoto, A. Zemmar, A. Lipsman, N. M. Ibrahim, G. Hamani, C. Hodaie, M. M. Lozano, A. P. Munhoz, R. Fasano, A. K. Kalia, S. 2021, Implantable Pulse Generators for Deep Brain Stimulation: Challenges, Complications, and Strategies for Practicality and Longevity. Front. Hum. Neurosci. 26 August 2021. Sec. Brain Imaging and Stimulation. Volume 15 - 2021

[29]. Sathi, K A. Hosain, K. 2020, Modeling and simulation of deep brain stimulation electrodes with various active contacts, Springer, Research on Biomedical Engineering

[30]. Wei, X. Benmassaoud, M. Meller, M. Kuchibhatla, S. Novel fractal planar electrode design for efficient neural stimulation. In: 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC): IEEE; 2016. p. 1802–5.

[31]. Kuncel, AM. Grill, WM. 2004, Selection of stimulus parameters for deep brain stimulation. Clin Neurophysiol. 2004;115:2431–41. [32]. McIntyre, CC. Grill, WM. Sherman, DL. Thakor, NV. 2004, Cellular effects of deep brain stimulation: model-based analysis of activation and inhi bition. J. Neurophysiol. 2004;91:1457–69.
[33]. Maggio, F. Liberti, M. Paffi, A. Apollonio, F. Parazzini, M. Ravazzani, P. et al, 2009, A three dimensional electromagnetic model for the DBS ap plication. In: 4th International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering (NER2009). Antalya: IEEE; 2009.

[34]. Vidya, M. Sharat Divya, M. Priyadarshini, N. Rajkumar, ER. 2014, Computational modelling and analysis of thermal characteristics of DBS electrode in application to Parkinson's disease. In: International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE): IEEE; 2014, 2014. p. 1–4.

[35]. Newman, J. 1966. Current distribution on a rotating disk below the limiting current. J Electrochem Soc. 1966;113(12):1235–41.

[36]. Coenen, V A. Prescher, A. Schmidt Th. Picozzi, P. Gielen, F. 2008. What is dorso-lateral in the subthalamic Nucleus (STN)? A topographic and anatomical consideration on the ambiguous description of today's primary target for deep brain stimulation (DBS) surgery. Springer natüre link. Volume 150, pages 1163–1165, (2008)

[37]. Willsie, A. Dorval, A. 2015. Fabrication and initial testing of the μDBS: a novel Deep Brain Stimulation electrode with thousands of individually controllable contacts. Springer Science. Biomed Microdevices (2015) DOI 10.1007/s10544-015-9961-x

[38]. Ramesh, A. Arachchige, A. 2023. Depletion of dopamine in Parkinson's disease and relevant therapeutic options: A review of the literature. PMC PubMed Central. 2023 Aug 14;10(3):200–231. doi: 10.3934/Neuroscience.2023017

[39]. Ludwig KA, et al. 2011. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) polymer coatings facilitate smaller neural recording electrodes. Journal of Neural Engineering. 2011 Feb;8(1):014001. doi: 10.1088/1741-2560/8/1/014001

[40]. Herrington, T. M. Cheng, J. J. Eskandar, E. N. (2016). Mechanisms of deep brain stimulation. Journal of Neurophysiology, 115(1), 19–38.

[41]. Lo, M. C. Widge, A. S. (2017). Closed-loop neuromodulation systems: next-generation treatments for neurological illnesses. International Review of Psychiatry, 29(2), 191–204.

[42]. Grill, W. M. Mortimer, J. T. (1995). Electrical properties of implant encapsulation tissue. *Annals of Biomedical Engineering*, 23(4), 467–477.

[43]. McIntyre, C. C. Richardson, A. G. Grill, W. M. (2002). Modeling the excitability of mammalian nerve fibers: influence of afterpotentials on the recovery cycle. *Journal of Neurophysiology*, 87(2), 995–1006.

[44]. McIntyre, C. C. Grill, W. M. (2000). Selective microstimulation of central nervous system neurons. *Annals of Biomedical Engineering, 28(3)*, 219–233. https://doi.org/10.1114/1.281

[45]. Pollo, C. Kaelin-Lang, A. Oertel, M. F. Stieglitz, L. H. Taub, E. Fuhr, P. Schüpbach, M. (2014). Directional deep brain stimulation: an intraoperative double-blind pilot study. *Brain, 137*(7), 2015–2026.

[46]. Butson, C. R. McIntyre, C. C. (2007). Role of electrode design on the volume of tissue activated during deep brain stimulation. Journal of Neural Engineering, 3(1), 1–8.

[47]. Kuncel, A. M. Grill W. M. (2004). Selection of stimulus parameters for deep brain stimulation. *Clinical Neurophysiology, 115(11)*, 2431–2441.

[48] Rosin, B. et al. (2011). Closed-loop deep brain stimulation is superior in ameliorating parkinsonism. *Neuron*, 72(2), 370–384.

[49] Lee, B. Lee, H. Kim, J. Yoo, H. J. (2016). A Wireless Power Transmission System for High-Performance Implantable Medical Devices. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 10(2), 335–344.

[50] Elwassif, M. M. Datta, A. Bikson, M. (2012). Temperature control at DBS electrodes using heat sinks: experimentally validated FEM model of DBS lead architecture. *J Med Devices*, 3(2), 027534.

[51] Elwassif, M. Kong, Q. Vazquez, M. Bikson, M. (2006). Bio-heat transfer model of deep brain stimulation-induced temperature changes. *IEEE EMBS Conference Proceedings*.