

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİTKİLERİN PİEZOELEKTRİK ESASLI HAREKETİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf Tarık AKYÜZ

TEMMUZ 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİTKİLERİN PİEZOELEKTRİK ESASLI HAREKETİ

Yusuf Tarık AKYÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 06 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 10 / 07 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail KAYA

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Bitkilerin Piezoelektrik Esaslı Hareketi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail KAYA’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bir nevi bayrağı devraldığım, kendisi ile tanışma fırsatı bulamasam bile yaptığı çalışmalar ile kendisini tanıdığım merhume Arş.Gör.Dr. Yeşim ER hocama şükranlarımı sunarım.

Doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Hacer AKYÜZ ile babam Ahmet AKYÜZ’e ve kardeşlerime teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Başarılı olacağıma inancını asla yitirmeyen ve bana her zaman güç veren kıymetli eşim Sümeyye AKYÜZ’e, özellikle tez döneminde yeterince vakit ayıramadığım oğlum Emir Hamza’ya ve kızım Halide Nil’e şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki bitki işaretleri ölçüm üzerine yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Yusuf Tarık AKYÜZ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bitkilerin Piezoelektrik Esaslı Hareketi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail KAYA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/07/2024

Yusuf Tarık AKYÜZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	13
1.1. Bitkilerin Elektropotansiyel İşaretleri	15
1.1.1. Aksiyon Potansiyeli	16
1.1.2. Varyasyon Potansiyeli.....	18
1.1.3. Sistem Potansiyeli	20
1.2. Bitkilerin Hareketleri.....	21
1.2.1. Tropizmalar	22
1.2.2. Nastiler	23
1.3. Bitkilerin Temel Davranışı Olarak Biyopiezoelektrik	23
1.3.1. Piezoelektrik.....	24
1.3.2. Mekanosensitif İyon Kanalları.....	25
1.4. Bitki Elektropotansiyel İşaretlerinin Ölçümü.....	26
1.5. Bitki Titreşim İşaretlerinin Ölçümü	28
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	33
2.1. Simülasyon Çalışmaları.....	33
2.1.1. Bitkiler'in Piezoelektrik Esaslı Elektriksel Modeli ve Simülasyonu.....	33
2.1.2. Bitkilerin Elektrostatik Etkileşiminin Modellenmesi ve Analizi	36
2.2. Deneysel Çalışmalar	37
2.2.1. Bitki Elektropotansiyel ve Titreşim İşaretlerinin Takibi	38
2.2.2. Bitkiler Arası Piezoelektrik Esaslı Haberleşme İşaretlerinin Alınması	38
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
3.1. Simülasyon Ortamında Gerçekleştirilen Analizlerin Yorumlanması.....	40

3.1.1. Bitki Elektriksel Eşdeğer Modellemesine Göre Yapılan Analizin Değerlendirilmesi.....	40
3.1.2. Bitki Modelinin Elektrostatik Analizi.....	42
3.2. Yürütülen Deney Sonuçlarının Yorumlanması	44
3.2.1. Bitki Elektropotansiyel ve Titreşim İşaretlerine Dair Elde Edilen Sonuçlar	44
3.2.2. Piezoelektrik Esaslı Haberleşmeye Dair Bulgular	48
4. SONUÇLAR.....	52
5. ÖNERİLER.....	54
6. KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ.....	59



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BİTKİLERİN PİEZOELEKTRİK ESASLI HAREKETİ

Yusuf Tarık AKYÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail KAYA
2024, 60 Sayfa

Bitkiler tabiatları gereği nem, sıcaklık, temas, ışık, yerçekimi, toprak niteliği ve mineralleri, zararlı mantar istilası, otçullar ve böcek saldırıları gibi pekçok çevresel bileşenlerden; türlerine, ebatlarına ve yaprak dizimlerine bağlı olarak farklı boyutlarda etkilenirler. Bu çevresel uyartımlar bitki tarafından algılanmakta ve bir tepki üretilmektedir. Bu tepkiler kimyasal, elektriksel ve daha az bilinen şekliyle elektromekaniksel olabilmektedir. Bu tez çalışmasında bitkilerin ürettiği elektropotansiyel işaretler ve elektromekanik davranışlar piezoelektrik esaslı yaklaşımla, yapılan simülasyonlarla ve deneylerle incelenmiştir. Bitkilerin piezoelektrik davranışlarının araştırıldığı bu çalışma, ayrıca bitkilerin birbirleriyle etkileşimli piezoelektrik davranışlarını, haberleşme için kullandıklarının deneysel gerçekliliğini de içermektedir. Henüz bilinçli olarak bitkilerin bu haberleşmeleri yaptıkları açıklanamamış olmasına rağmen bitkilerin bu etkileşimi gösterilmiştir. Bu fenomen hem simülasyon hem deneysel çıktılar ile bu tez çalışmasında karşılaştırmalı olarak ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyopiezoelektrik, Bitki elektriksel davranışları, Bitki hareketleri, Bitki elektrofizyolojisi

Master Thesis

SUMMARY

PIEZOELECTRIC BASED MOVEMENT OF PLANTS

Yusuf Tarık AKYÜZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İsmail KAYA
2024, 60 Pages

Plants are inherently affected by many environmental components such as moisture, temperature, contact, light, gravity, soil quality and minerals, harmful fungal invasion, herbivores and insect attacks, to different extents depending on their species, size and leaf arrangement. These environmental stimuli are perceived by the plant and a response is produced. These reactions can be chemical, electrical and electromechanical. In this thesis study, the electropotential signals and electromechanical behaviors produced by plants were examined with simulations and experiments using a piezoelectric-based approach. This study, in which the piezoelectric behavior of plants is investigated, also includes the experimental reality that plants use their interactive piezoelectric behavior for communication. Although it has not yet been explained that plants make these communications consciously, this interaction of plants has been demonstrated. This phenomenon is expressed comparatively in this thesis study with both simulation and experimental results.

Key Words: Biopiezoelectricity, Plant electrical behavior, Plant movements, Plant electrophysiology

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Bitki elektropotansiyel işaretlerinin ölçülmesi	16
Şekil 2. Aksiyon potansiyeli işaretinin formu	17
Şekil 3. Gerçek zamanlı Alacalı Peperomya bitkisinden alınan AP işaretlerinin bir örneği.....	18
Şekil 4. Varyasyon potansiyeli işaretinin formu.....	19
Şekil 5. Gerçek zamanlı Alacalı Peperomya bitkisinden alınan varyasyon potansiyeli işaretlerinin bir örneği	20
Şekil 6. Sistem potansiyeli işaretinin formu	20
Şekil 7. Gerçek zamanlı Alacalı Peperomya bitkisinden alınan sistem potansiyeli işaretlerinin bir örneği	21
Şekil 8. Piezoseramik algılayıcıya ait mekanik ve elektrik eşdeğer devre	24
Şekil 9. Tepe yakalama algoritması ile çentik filtrenin başarımına ait kıyaslama	27
Şekil 10. Bitki elektropotansiyel işaretlerinin uzaktan takibi	28
Şekil 11. Yaprak yüzeyine piezoseramik algılayıcı yerleşimi ve Bitki titreşim işaretinin uzaktan alınması	29
Şekil 12. Lazer ve kamera kullanılarak bitki hareketlerinin temassız takibi için kurulan sistem.....	30
Şekil 13. Gerçek zamanlı elde edilen piksel bilgisinin yaprak hareketi olarak tespit edilmesi için kullanılan grafik.....	31
Şekil 14. Bitki hücresinin elektriksel davranışını gösteren Hudking ve Huxley modeli	34
Şekil 15. Bitkilerin elektriksel kuplaj yoluyla haberleşmesine ait model.....	35
Şekil 16. Elektrostatik simülasyon ortamında bitkinin 3D modeli	37
Şekil 17. Faraday kafesi içerisinde bitki etkileşiminin gözlemi için kurulan deney düzeneği.....	39
Şekil 18. Birbirine bağlı bitkilerin, etkileşimlerini gözlemlemek için kurulan deney sistemi	39
Şekil 19. Bitki elektriksel eşdeğer modelinin uyartım ile piezoelektrik hareketine dair sonuç grafiği	42
Şekil 20. Elektriksel kuplaj yoluyla bitkilerin hava ortamında etkileşimleri.....	43
Şekil 21. Bitkilerin elektrostatik etkileşimini gösteren elektrik alan grafiği.	44
Şekil 22. Bitkiye uygulanan fiziksel temas uyartımı sonucu elde edilen sonuç grafiği.....	45

Şekil 23.	Bitkiye uygulanan ikinci fiziksel temas uyartımı sonucu elde edilen sonuç grafiği	45
Şekil 24.	Bitkiye uygulanan üç elektriksel darbenin etkisine ait sonuç grafiği	46
Şekil 25.	Bitkiye uygulanan iki elektriksel darbenin etkisine ait sonuç grafiği.....	47
Şekil 26.	Piksel değişimlerinden bitki yaprak hareketinin kestirilmesi.....	47
Şekil 27.	Uyartım ile alıcı ve verici limon bitkilerinin arasındaki kuplaj etkileşimi	49
Şekil 28.	Uyartım ile alıcı ve verici malta eriği bitkilerinin arasındaki kuplaj etkileşimi.....	50
Şekil 29.	Farklı türde bitkilere ait senkronize işaretler	51
Şekil 30.	Farklı türde bitkilere ait senkronize işaretler	51



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Yaprak hareketi ile oluşan ışın yer değıştirmesi ve buna karşılık gelen piksel değeri.....	31
Tablo 2. Simölasyonda kullanılan HH model parametreleri.....	41
Tablo 3. Simölasyonda kullanılan bitki eşdeğer parametreleri.....	41
Tablo 4. Piezoelektrik model için kullanılan parametreler	41
Tablo 5. Uyarımlara bağı olarak malta eriğinin yaprak hareketleri.....	48



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EP	: Elektropotansiyel
AP	: Aksiyon potansiyeli
VP	: Varyasyon potansiyeli
SP	: Sistem potansiyeli
MP	: Membran (zar) potansiyeli
EMG	: Elektromyogram
ADC	: Analog dijital dönüştürücü
FPS	: Saniye başına aktarılan görüntü
Dpi	: İnç başına düşen nokta sayısı
Px	: Piksel
HH	: Hodgkin & Huxley modeli
d_{33}	: Piezoelektrik sabiti
m	: Kütle
$\ddot{x}(t)$	: Bağlı ivme
$\dot{x}(t)$	: Hız
$x(t)$	: Yer değiştirme
c	: Sönümlleme sabiti
k	: Yay sabiti
$V(t)$	: Piezoseramik algılayıcı çıkışı
G_{Na}	: Sodyum iletkenliği
G_K	: Potasyum iletkenliği
G_L	: Sızıntı iletkenliği
I_{Na}	: Sodyum iyon akımı
I_K	: Potasyum iyon akımı
I_L	: Sızıntı iyon akımı
C_m	: Membran (zar) kapasitesi
V_m	: Membran potansiyeli
I_{st}	: Uyartım akımı
I_{iyon}	: Toplam iyon akımı

1. GENEL BİLGİLER

Bitkiler tabiattaki yaşantılarını sürdürebilmek için pek çok algılayıcı donatısına sahip canlılardır. Bu donatılarla birlikte havadaki nem miktarı, yeraltı su kaynaklarının tespiti, ışık kaynağına yönelim, yerçekiminin algılanması ve kök üretimi gibi önemli yaşamsal ihtiyaçlarını tespit ederler. Ayrıca üreme, tozlaşma ve hayvanlarla iletişim kurma gibi faaliyetler yürütürler. Tüm bunlarla birlikte otçul hayvan saldırıları, böcek istilaları, kök mantarları, bitkinin fiziksel yapısını zedeleyecek davranışlar da bitki tarafından sezilmekte ve mücadele için gerekli kimyasal, elektriksel ve fiziksel önlemler yine bitki tarafından alınmaktadır. Bitkiler aldıkları verileri, dahili ve harici farklı haberleşme kanallarını kullanarak hem çevre bitkilere iletmekte hem de kendi gövdesi, kökleri ve dalları boyunca bu bilgileri aktarmaktadır. Bu yaşamsal faaliyetin tamamı bitkinin hareketliliğini göstermektedir.

Günümüzde ilerleyen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan algılayıcı ağırları pekçok farklı türde algılayıcıları içermektedir. İhtiyaç duyulan bu algılayıcıların bir çoğu da tarımsal faaliyetler için kullanılmaktadır. Tarımsal ürünlerin verim takibi, hastalık ve zararlı böcekçillerin etkisi, toprak mineral analizleri, hava durumu, nem ve güneşlenme seviyeleri, ürün miktarı gibi pek çok bileşen farklı algılayıcı çeşitleri kullanılarak takip edilmektedir. Algılayıcılar ile ölçülen bu veriler farklı haberleşme metodları kullanılarak analiz edilmek üzere ilgili data merkezlerine iletilmekte ve işlenip gerekli çıkarımlar yapılmaktadır. Bu şekilde kurgulanmış ve uygulamaya konulmuş pek çok sistem bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda tarımsal faaliyetin daha nitelikli hale getirilmesi amaçlanıyor olsa da, kurulan sistemler tasarımları ve üretim yöntemleri itibariyle dezavantajlara sahiptir. Bu sistemler algılayıcılar, haberleşme bileşenleri, bataryalar ve kontrol kartları gibi pekçok yapay elektronik komponent içermektedirler. Son yıllarda giderek artış gösteren algılayıcı ve diğer elektronik bileşenlerin üretimleri büyük bir maliyet oluşturmakta ve aynı zamanda üretildikleri sentetik malzemeler geri dönüştürülemede olduğundan doğaya ekstra zarar vermektedir (Volana Randriamandimbisoa vd., 2020).

Literatürde özellikle son yıllarda ilginin giderek arttığı bitki işaretleri üzerindeki çalışmalar artık sonuç vermeye başlamıştır. Bitkiler tarafından üretilen elektropotansiyel ve elektrokimyasal işaretler incelenerek gerekli çıkarımlar oluşturulmaya başlanmış ve bu çıkarımlara göre pekçok farklı sayıda faaliyetler geliştirilmiştir. Bitkilerin biyosensör olarak kullanılması ile birlikte tarımsal faaliyetlerde, orman yangınları, sel, heyelan, çevresel

aktiviteler gibi acil durumlarda gerekli olan aksiyonun alınması için algılayıcı teknolojilerine duyulan ihtiyaç ortadan kalkacaktır.

Bitkilerin biyosensör olarak davrandıkları ve etrafındaki sıcaklık, ışık, yerçekimi, hava ve toprak kirliliği, kuruluk, besin yokluğu veya fazlalığı, böcekçil ya da mantar saldırısının olup olmadığı gibi değişikliklere tepki verdikleri farklı çalışmalarda gösterilmiştir (Gurovich & Hermosilla, 2009; Mudrilov vd., 2021; Oyarce & Gurovich, 2010; Pachú vd., 2023; Volkov & Ranatunga, 2006; Zapata vd., 2021). Bitkilerin yine etrafındaki canlı aktivitesiyle etkileşime geçtiği, farklı hareket şekillerine göre farklı elektropotansiyel işaretler ürettiği uzun dönemli gözlemlere dayalı olarak elde edilmiştir (De La Cal vd., 2023). Değişken sıcaklık faktörüne bağlı olarak bitkilerin büyüme oranlarının, ürettikleri elektropotansiyel işaretlerin kullanılmasıyla ilişkilendirildiği ayrı bir çalışma da gösterilmiştir (Shang vd., 2023).

Bitkilerin piezoelektrik davranışları; onların algılayıcı olarak kullanılabilmesine ek olarak haberleşme potansiyellerini de ortaya koymaktadır. Bitkiler kimyasal, mikorizal, uçucu organik bileşenler, bitki rizosferi, kökler, ses dalgaları ve elektrostatik etkileşim kanalları ile birbirleri ile haberleşmektedirler (García-Servín vd., 2021; Volkov vd., 2019).

Yapılan bir çalışmada bitkilerin yaprak veya dal teması ile birbirleri ile elektriksel olarak haberleştiği belirtilmiştir. Özellikle nemli koşullar altında bir bitki anlık ve yüksek genlikli bir uyarıma maruz kaldığında bu bilginin yaprak veya dal temasıyla çevredeki diğer bitkilere aktarıldığı gösterilmiştir (Szechyńska-Hebda vd., 2022).

Bitkilerin yeraltı haberleşme kanalı olarak kök ağlarını kullandığı ve etraftan aldıkları uyarım bilgisini bu ağları kullanarak birbirlerine ilettiği yapılan çalışma da gösterilmiştir. Ayrıca bitkiler arası bu haberleşmenin, bitki fizyolojisine etkisinin araştırılmasına dair bir deney yöntemi sunulmuştur (Thomas & Cooper, 2022).

Bitkiler kendi hayat mücadelelerini sürdürürken ihtiyaç duydukları aktif haberleşme sistemleri bulunduğu gibi, bazı böceklerin ve otçulların bitkiyi haberleşme kanalı olarak kullandıkları ve bitkinin pasif olduğu durumlarda vardır. Yapılan çalışmalarda böceklerin bitki üzerinde birbirleriyle haberleşirken akustik ses dalgaları ve mekanik titreşim işaretlerini kullandığı ve bu haberleşmenin odunsu ve otsu bitkilerde uyarım şiddetine bağlı olarak farklı mesafelerde ve frekanslarda yayıldığı gösterilmiştir (Bell, 1980; Michelsen vd., 1982; Velilla vd., 2020).

Bitkiler de üzerlerinde bulunan böceklerin veya otçulların bu titreşim ve akustik haberleşmelerini anlamakta ve böcek türüne, saldırı şekline bağlı olarak tepkiler

üretmektedir. Bitkilerin bu tarz saldırılara maruz kaldıklarında hem etraftaki diğer bitkilerle iletişim kurmaları hem de çeşitli kimyasallar salgılayarak gerekli önemleri almaları farklı çalışmalarda gösterilmiştir (Appel & Cocroft, 2014; Pachú vd., 2023).

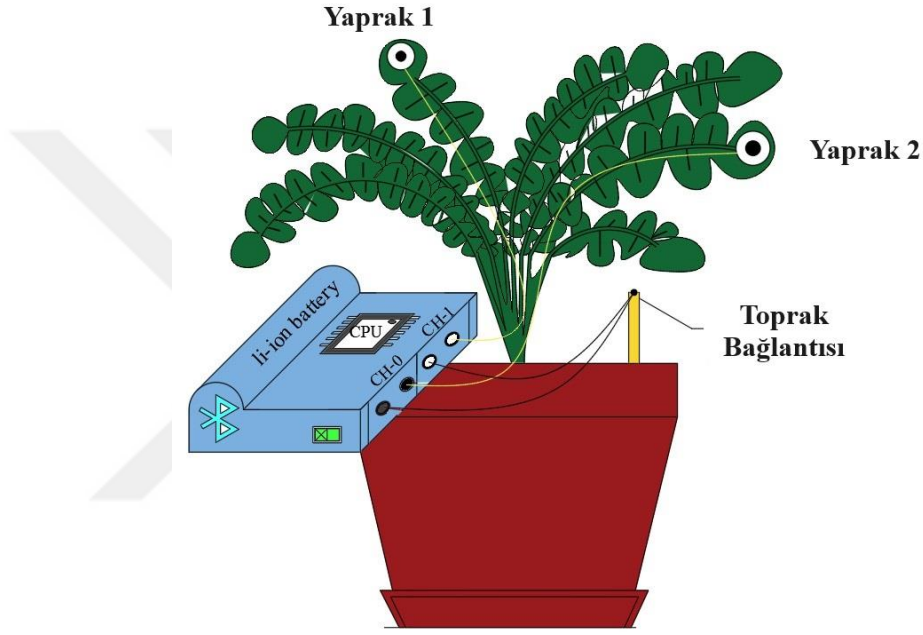
Bitkiler hayvanlar gibi merkezi sinir sistemine sahip canlılar değildirler. Fakat yine de bazı etçil bitkiler mevcut kısımlarının bir bölümünü anlık bir şekilde hareket ettirebilmektedirler. Bu hareket bitkide elektropotansiyel işaretlerin üretilmesine yol açar. Benzer biçimde bitkiye uygulanan elektriksel işaretin de mimoza gibi bitkilerde bir harekete sebep olduğu gösteren sınırlı sayıda araştırma mevcuttur (Chaudhary vd., 2018).

Bu tez çalışması, bitkilerin çevresinden algıladıkları fiziksel kuvvetlerin bitki üzerinde elektriksel kuvvete dönüştüğünü ve benzer şekilde elektriksel uyarımların da bitki hareketini tetiklediğini, bitkilere zarar vermeden ve doğal davranışlarını etkilemeden, farklı bitki türleri için göstermeyi amaçlamaktadır. Literatürden farklı olarak etçil ve anlık hareket yapabilen mimoza, sinekkapan gibi hareketi insan gözü ile algılanabilen bitkiler kullanılmamıştır. Öne sürülen hipotez tüm bitki türlerinin piezoelektrik esaslı davranışları sergileyebileceği yönündedir. Bu çalışmanın diğer bir amacı da bitkilerin birbirleri ile piezoelektrik esaslı etkileştikleri, haberleştiklerini göstermektir. Bu hedefler doğrultusunda bitkiler için eşdeğer prototipleme teknikleri kullanılarak hem simülasyon ortamında bitki davranışları modellenmiş hem de gerçek zamanlı bitki işaret takip cihazı ile farklı bitki türlerine ait ölçümler alınarak biyopiezoelektrik esaslı davranış açıklanmıştır.

1.1. Bitkilerin Elektropotansiyel İşaretleri

Bitkiler canlı varlıklar olduğundan ortamdaki olumlu ve olumsuz değişimleri takip ederler ve bu değişimlere karşı, elektrokimyasal olarak cevap üreterek bitki içi ve bitkiler arası haberleşme kanallarını kullanarak bilgi alışverişi yaparlar. Bu bilgi alışverişi bitki elektropotansiyel işaretlerindeki değişim ile yapılmaktadır. Literatürde bitki işaretleri aksiyon potansiyeli, varyasyon potansiyeli ve sistem potansiyeli olarak üç ana başlığa ayrılmıştır (Davies, 2006; Zimmermann vd., 2009). Bunlara ilaveten hızlı bileşen, elektrotonik potansiyel, mekanik duyarlı potansiyel, yüzey potansiyeli, eylemsizlik potansiyeli, zar potansiyeli, biyoelektrik işaretler ve lokal elektrik tepkisi gibi başlıklar da literatürde karşımıza çıkmaktadır. Bu başlıklar esasen aksiyon, varyasyon ve sistem potansiyellerini daha iyi anlamak ve detaylandırmak için kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında üç ana başlık irdelenecek ve diğer başlıklar ise kullanıldıklarında izah edilecektir.

Bitki elektropotansiyel işaretleri tanımlandıktan sonra laboratuvar ortamında bu işaret formlarına dair elde edilen örnekler verilmiştir. Gün ışığında Alacalı Peperomya adıyla bilinen ve literatürde “*peperomia obtusifolia*” olarak tanımlanan çiçekli bitkiden kablosuz ölçüm cihazı mıknatıslı yüzey elektrotları kullanılarak ölçümler alınmıştır. Tanımlanan elektropotansiyel işaretler, gerçek zamanlı ölçümlerle desteklenmiştir. Ölçüm ortamı Şekil 1’de gösterilmiştir.



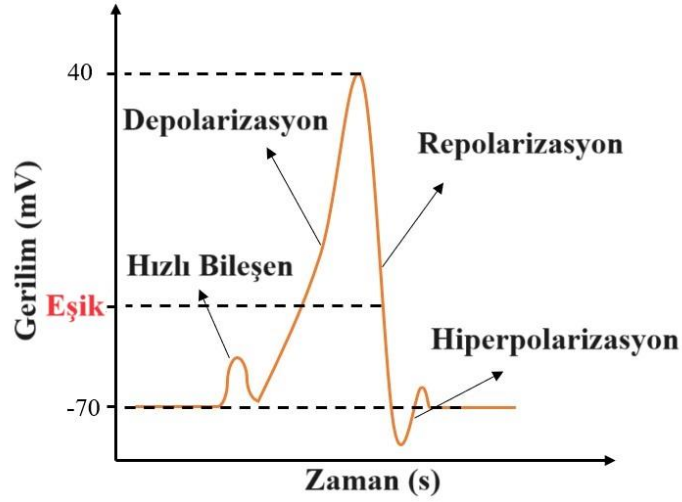
Şekil 1. Bitki elektropotansiyel işaretlerinin ölçülmesi

1.1.1. Aksiyon Potansiyeli

Bitkilerde aksiyon potansiyelleri zarar vermeyen uyaranlar sonucunda tetiklenmektedir. Bu uyaranlar sıcaklık, aydınlık ve karanlık, temas, dölleme, mekanik uyartım, termonastik hareket, stres etkisi veya elektriksel olabilmektedir (Król vd., 2010). Aksiyon potansiyelleri anlık bir tepe yapan forma sahiptir. Çevredeki uyaranlarda anlık bir değişim bitkide anlık bir tepkeye sebep olmaktadır. Bu etki bitki hücresinde “symplastik yol” adı verilen kanalda bir elektriksel işareti tetiklemektedir.

Bitki hücresi uyartımı aldığı esnada hücre zarı depolarizasyon sürecine girer. Aksiyon potansiyeli sodyum ve potasyum iyon kanallarının açılıp kapanması ile birlikte ortaya çıkmaktadır. Uyartım ile birlikte hücredeki sodyum kanalları (Na^+) açılır ve sodyum

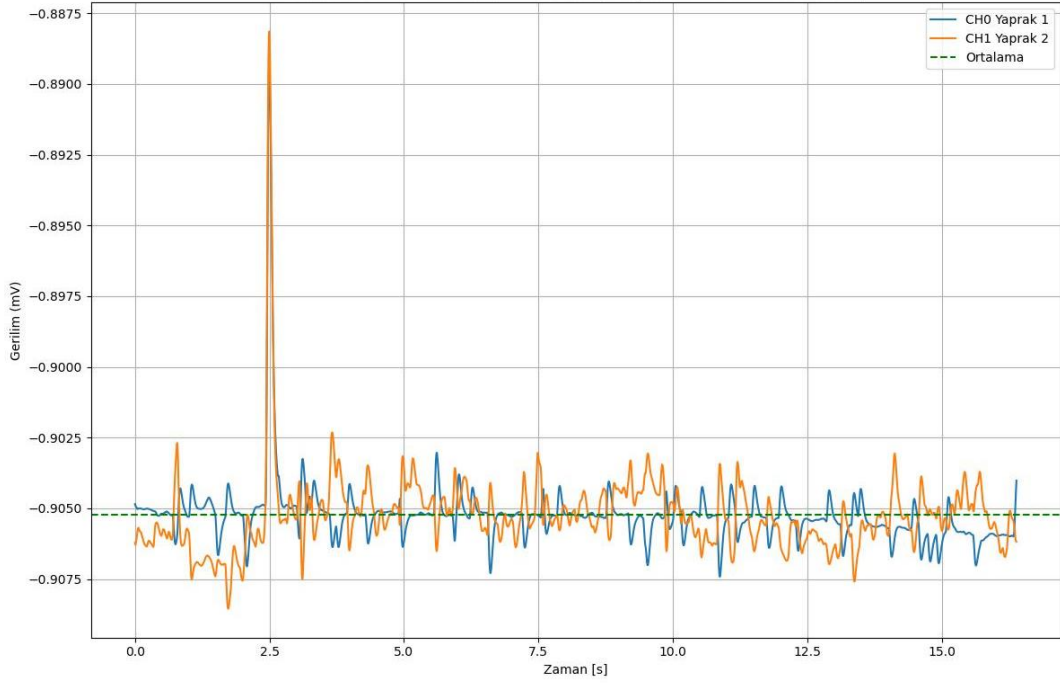
alımıyla birlikte zar potansiyeli yükselir. Eğer bu uyartım işaretinin gücü yeterli ise aksiyon potansiyeli eşik değerine ulaşıncaya kadar depolarizasyon süreci devam eder. Eşik değerine ulaşıldığında hücre zarı doyuma ulaşır ve aksiyon potansiyeli tetiklenir. Sonrasında sodyum girişi azalır ve potasyum(K^+) kanalları açılır. Bu durum repolarizasyon ve hiperpolarizasyon süreçlerini tetikler ve aksiyon potansiyeli işaretinin formu tamamlanır (Beilby, 2007). Aksiyon potansiyeline ait aşamalar Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Aksiyon potansiyeli işaretinin formu

Bir çalışmada aksiyon potansiyeli işaretinin gerçekleşmesinden hemen önce anlık, düşük genlikli bir tepe formu hızlı bileşen olarak isimlendirilmiş literatüre kazandırılmıştır. Şekil 2’de de gösterilen hızlı bileşen işareti aksiyon potansiyelinin öncü, tetikleyici bir işareti olarak görülebilse de yapılan deneyler, aksiyon potansiyelinin genliği ve yayılımı itibarıyla hızlı bileşeni örtbileceğini göstermiştir (Shimmen, 2002).

Aksiyon potansiyelleri belli bir eşik değerinin altında oluşmayacağı gibi bu eşik değerinin üzerine de çıkmaz. Diğer bir ifadeyle uyarının şiddeti artsa bile eşik değeri geçildiğinde AP’nin genliğine ve şekline etki etmez. Aksiyon potansiyeli oluşuktan sonra sabit ivmeyle tüm yönlerde bitki hücreleri arasında hızlı yayılım gösterir. Bu yayılım esnasında şeklinde ve formunda bir değişim olmaz. Esasen burada bitki işaretinin soymuk borusu üzerinden uzun mesafelerde aktarımı gerçekleşir. Bitki aldığı bu uyarı işaretini tüm yapraklarına ve kök uçlarına ileterek kendi savunma mekanizmasını harekete geçirmektedir. Bitkiye yapay herhangi bir uyartım verilmeden, farklı dalda bulunan yapraklarından alınan AP işareti Şekil 3’te görülmektedir.



Şekil 3. Gerçek zamanlı Alacalı Peperomya bitkisinden alınan AP işaretlerinin bir örneği

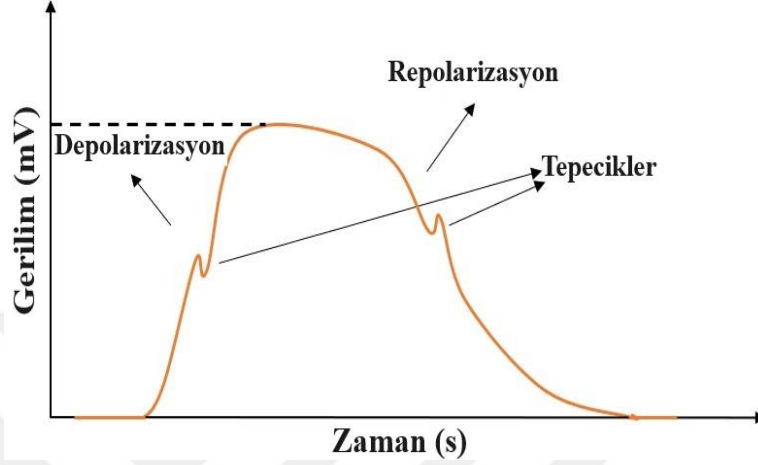
Aksiyon potansiyelinin kısa süreli olması, hızlı ve genliği değişmeden yayılımı bu grafikte de açıkça görülmektedir. Farklı dallara bağlı elektrotlardan alınan turuncu ve mavi işaretler normalizasyon işlemi ile üst üste örtüştürülmektedir. Aksiyon potansiyeli işaretlerinin zaman ekseninde herhangi bir kayma olmadan örtüştüğü işaretin doğasına uygun şekliyle gösterilmiştir.

1.1.2. Varyasyon Potansiyeli

Literatürde mekanik duyarlı potansiyel ya da yavaş dalga potansiyeli olarak bilinir (Awan vd., 2020; Huber & Bauerle, 2016). Bitkiler; böcek saldırısı, yaralanma, yanma etkisi ve kesilme gibi durumlara maruz kaldığında varyasyon potansiyeli dediğimiz elektriksel işareti üretirler. Varyasyon potansiyelleri bitki hücrelerinde alınan hasar sonrası, hücre içi su basıncının değişiminin oluşturduğu hidrolik ve kimyasal süreçlerden kaynaklanmaktadır (Vodeneev vd., 2015).

Varyasyon potansiyeli düzensiz bir dalga formuna sahiptir. Aksiyon potansiyelinin aksine depolarizasyon süreci zamana yaygın bir formu takip eder. Bu dakikalarca sürebilir. Varyasyon potansiyeli farklı genlik değerlerine sahip olabilir ve yayılım hızı düşüktür. İşaretin genliği uyartım noktasından uzaklaştıkça azalmaktadır. Ayrıca uyarının gücüne ve

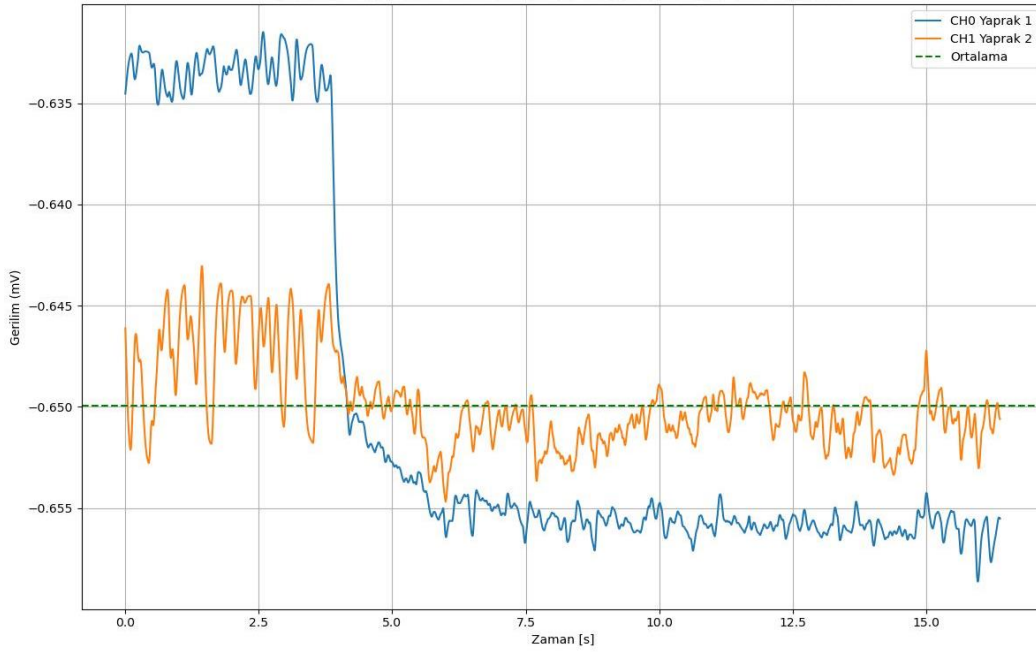
bitki türüne göre varyasyon potansiyeli, aksiyon potansiyeline benzer şekilde tepecikler içerebilmektedir (Sukhov vd., 2013). Varyasyon potansiyeline ait aşamalar Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Varyasyon potansiyeli işaretinin formu

Arpa, fasulye, tütün, mısır ve ayçiçeği gibi çok sayıda bitkide özellikle yanma etkisinin varyasyon potansiyelinin üretimini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Farklı çalışmalarda bitki dal, gövde veya kökünde uygulanan mekanik uyartımların da (kesme, koparma vb.) varyasyon potansiyelini ürettiği gözlemlenmiştir. Fakat mekanik uyartımlar bitki türüne göre farklılıklar içermektedir.

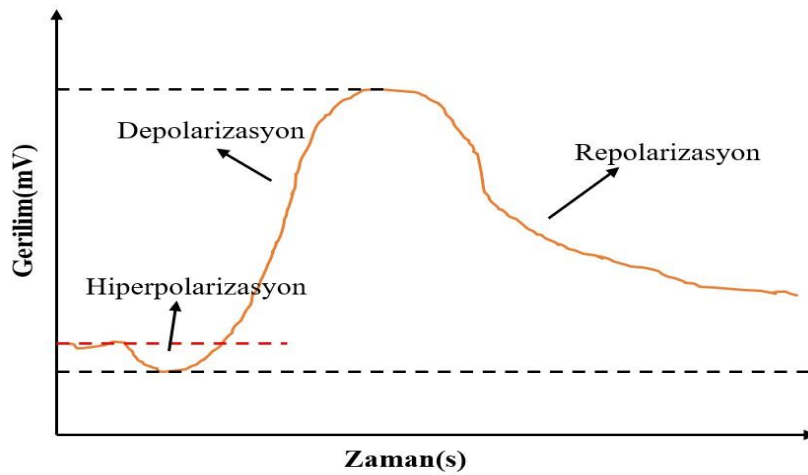
Varyasyon potansiyelinin peperomya bitkisinden ölçülmesi amacıyla bitkiye fiziki olarak yaprak kesme işlemi uygulanmıştır. Ölçüm cihazının elektrotları farklı yapraklara yerleştirildikten sonra 1.yaprağın bir kısmı kesilmiştir ki bu yaprağa ait işaret Şekil 5 'de mavi ile gösterilmiştir. Kesme uyartımı uygulandıktan sonra varyasyon potansiyeli bir süre boyunca devam etmiştir. Bu ölçümde VP işareti yaklaşık 40sn devam etmiştir. Grafikte gösterilen kısım işaretin sona erdiği bölümü ifade etmektedir. Şekil 5 'de görüldüğü üzere diğer yaprakta da daha düşük genlikli değişimler bulunmaktadır. Burada varyasyon potansiyelinin zamana yayılımı ve genliğinin uyartımın uygulandığı yaprakta daha yüksek olduğu diğer yapraklara fazla etki etmediği görülebilmektedir. VP potansiyeline ait ölçümler daha yüksek boyutlara sahip ve odunsu bitkilerde farklılıklar gösterecektir. Özellikle VP işaretinin diğer yaprakları etkilemesinin bir sebebi ölçüm bitkimizin saksı bitkisi olmasıdır.



Şekil 5. Gerçek zamanlı Alacalı Peperomya bitkisinden alınan varyasyon potansiyeli işaretlerinin bir örneği

1.1.3. Sistem Potansiyeli

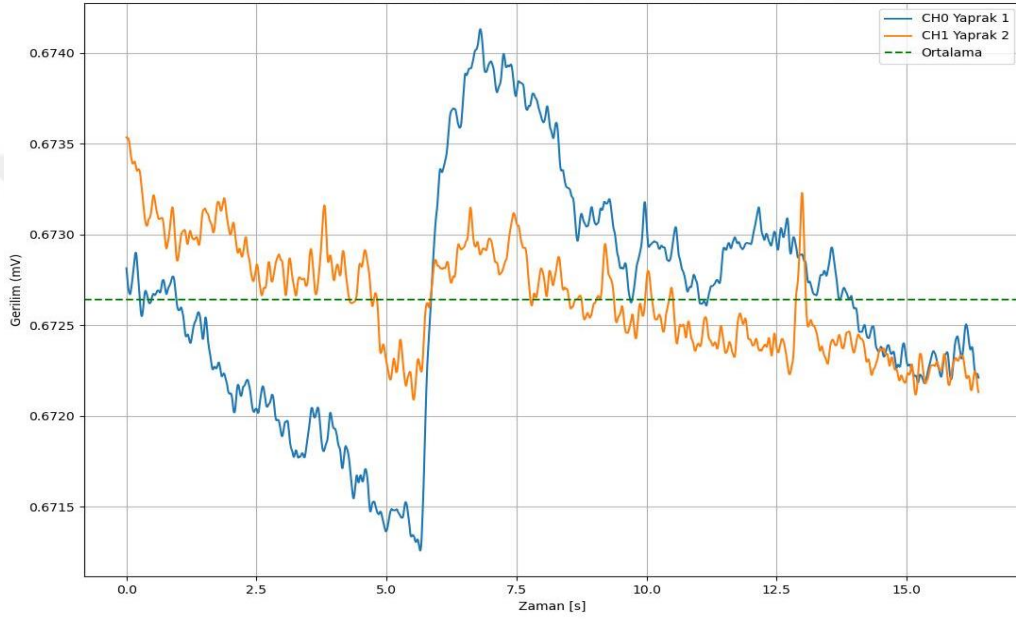
Sistem potansiyeli işareti bitkinin yaralanmasından kaynaklı ortaya çıkan bir elektropotansiyel işarettir. SP işaretinin varlığına ve yayılımına dair literatürdeki çalışmalar henüz yenidir (Mudrilov vd., 2021). AP'den bağımsız olarak uyarının şiddetine ve etki süresine bağlı olarak değişmekte ve tüm bitki gövdesi üzerinde yayılım göstermektedir. Sistem potansiyeline ait süreçler Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Sistem potansiyeli işaretinin formu

Sistem potansiyeli işaretinin hiperpolarizasyon süreci ile başlaması ve yayılım şekli itibariyle de varyasyon potansiyelinden ayrılmaktadır (Huber & Bauerle, 2016; Zimmermann vd., 2009).

Sistem potansiyeline ait işaretin ölçümü yine varyasyon potansiyeline benzer şekilde bitkiye fiziksel zarar vererek alınmıştır. Burada farklı olarak bitki yaprak gövdesine iğne batırılarak uyarılmıştır. Şekil 7’de mavi ile görülen ölçüm uyartımın uygulandığı kısma, turuncu ise diğer bir yaprak grubuna ait işaretleri göstermektedir.



Şekil 7. Gerçek zamanlı Alacalı Peperomya bitkisinden alınan sistem potansiyeli işaretlerinin bir örneği

Sistem potansiyeli işaretinin doğasına uygun olarak öncelikle hiperpolarizasyon süreci başlamış ardından depolarizasyon süreci ile devam etmiştir. Hem hiperpolarizasyon hem depolarizasyon süreçleri düşük genlik farkları ile birlikte her iki yaprakta da görülmüştür.

1.2. Bitkilerin Hareketleri

Bitkiler bulundukları yere sabitlenip kök veren ve yaşamlarını bu şekilde sürdüren canlılardır. Fakat literatürde bitkilerin durum değiştirme hareketleri yaptıkları bilinmektedir. Durum değiştirme hareketleri bitkilerin çevresel etmenlerden etkilenmelerine karşı verdiği tepkilerin bütünüdür. Bu tepkisel hareketler uyartımın yönüne bağlı olup olmama

durumuna göre tropizmalar (büyüme asimetrisi) ve nastiler (turgor asimetrisi) olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Hart, 1990).

1.2.1. Tropizmalar

Bitkinin apikal meristem denilen kök yahut dal uç kısımları gibi büyüme noktalarında bulunan oksin hormonlarının homojen yahut heterojen dağılımından kaynaklı bitki hareketleridir. Bu hormonların homojen dağılımının bozulması büyüme yönünü etkileyebilmektedir. Işık, sıcaklık, nem, yerçekimi, temas, yaralanma, su ve mineralin varlığı gibi faktörler bu oksin hormonunun homojen dağılımının bozulmasına sebep olur. Uyarının olduğu yöne doğru hareket pozitif, aksi yönde hareket ise negatif tropizma olarak isimlendirilir. Tropizmalar literatürde şu başlıklar altında çalışılmıştır.

- Fototropizma; oksin hormonunun ışığa verdiği tepkidir. Toprak üstündeki bitki dokularında pozitif, toprak altındaki dokularda ise negatif olarak ortaya çıkar.
- Gravitropizma; yerçekimine karşı verilen tepkidir. Toprak üstünde negatif, toprak altında ise pozitif olarak görülür (Correll & Kiss, 2002).
- Tigmotropizma; oksin hormonunun temas uyarımına verdiği tepkidir (Esmon vd., 2005).
- Travmatropizma; bitki dokusundaki yaralanmaya karşı verilen tepki olup, genellikle negatif olarak ortaya çıkmaktadır.
- Hidrotropizma; bitki köklerinin su kaynağına yönelmesi eğilimidir.
- Kemotropizma; toprak altındaki minerallere karşı yönelimdir.

Literatürde bitkinin tropizma hareketleri ile birlikte ürettiği elektropotansiyel işaretler merak konusu olmuş ve araştırmalar yürütülmüştür. Fototropizma hareketinin bitkinin elektropotansiyel işaret üretmesine sebep olduğu ispatlanmıştır. Yapılan çalışmada, kapalı ortamda soya fasulyesine uyartım olarak uygulanan ışık ve soya fasulyesinin tepkisi ve aksiyon potansiyeli formunda elektropotansiyel işaret üretmesi gösterilmiştir (Volkov vd., 2005). Bitkiye etkiyen yerçekimi uyartımlarının gravitropizmik hareketlere sebep olduğu bu durumda bitki elektrofizyolojik yapısını etkilediği ve elektriksel işaret ürettiği ve bu konunun detaylandırıldığı bir çalışma bitki gravitropizmasının elektrofizyolojisi başlığı altında ele alınmıştır (Volkov, 2006).

1.2.2. Nastiler

Bitkilerin nasti hareketleri uyartımın yönünden bağımsız olarak gelişen ve tropizmik hareketlere kıyasla daha hızlı gerçekleşen hareketlerdir. Bu hareketler bitki dokusundaki turgor değişimine bağlı olarak ortaya çıktığından turgor asimetrisi olarakta bilinir. Nasti hareketleri türleri ile sınıflandırılmış olup ilgili çalışmalar üç başlık altında toplanmıştır.

- Fotonasti; ışığa bağlı olarak değişen turgor basıncının bitki yapraklarının açılıp kapanmasına sebep olması olayıdır. Akşam sefası bitkisi buna örnek verilebilir.
- Tigmonasti (sismonasti); temas yada sarsıntı sonucu yaprak tabanındaki turgor basıncının değişmesi sebebiyle ortaya çıkan hareket türüdür. Mimoza pudika bitkisi bu hareket türünü sergiler.
- Termonasti; sıcaklığın etkisi ile görülen nasti türüdür. Lale çiçeği bu nasti türü için örnek verilebilir.

Özellikle tigmonastik hareketlerin bitki de elektropotansiyel işaret olarak AP işaretini tetiklediği farklı çalışmalarda gösterilmiştir (Chaudhary vd., 2018; Sibaoka, 1991).

1.3. Bitkilerin Temel Davranışı Olarak Biyopiezoelektrik

Bitkiler sahip oldukları yapı itibariyle çevresinden algıladıkları fiziksel uyarılar sonucunda biyopiezoelektrik yapıları itibariyle elektropotansiyel işaret üretirler. Bu işaretleri hem kendileri için hemde çevresinde bulunan bitkilere iletmek için haberleşme bilgisi olarak kullanırlar. Bitkilerin biyopiezoelektrik davranışları ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Buna rağmen birkaç çalışmada bu davranışlarına atıf vardır.

Canlı olmayan ahşap, ipek gibi doğal malzemelerde piezoelektrik etki farklı çalışmalarda ispatlanmıştır. Fakat canlı organizmalarda bu çalışmaların sayısı oldukça azdır. Zambak ve bambu yapraklarının koparıldıktan hemen sonra henüz canlılığını kaybetmeden piezoelektrik karakteristikleri üzerinde bir çalışma yürütülmüş ve bu yaprakların doğrudan piezoelektrik davranış gösterdiği ispatlanmıştır. Ayrıca ters piezoelektrik davranış gösterebilecekleri de belirtilmiştir (Yamashiro, 1995).

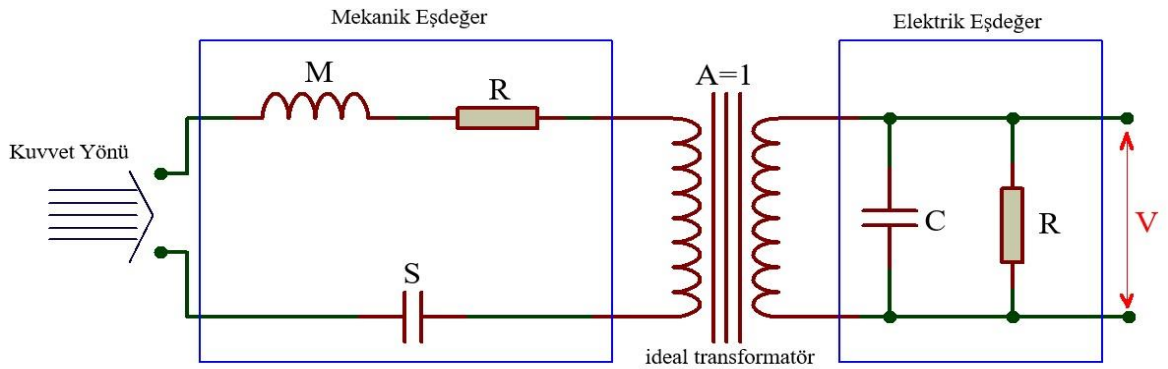
Piezoelektrik malzemelerinin kristal geometrileri ile benzerlik gösteren bitki hücre duvarını oluşturan iletim demetlerinin piezoelektrik özellik taşıdığı gösterilmiştir. Canlı dokusunu oluşturan iletim demetleri polimerik fiber yapısında olduğu ve bitkilerde bu fiberlerin selülozdan oluştuğu bilinmektedir. Bitkilerin hücre duvarları selülozdan oluşur ve

bitki iç yapısını dış etmenlerden korur. Bitki dokusundaki piezoelektrik etki hücre duvarında bulunan selüloz fibrillerinin dizilimi ile ilintili olduğu düşünülmektedir (Wojnar, 2012). Ayrıca yapılan bir çalışmada bitkisel dokuya ait piezoelektrik sabitin, kuvars kristaline ait piezoelektrik sabit ile kıyaslaması yapılmış ve piezoelektrik özelliği gösterilmiştir (V.A. Bazhenov, 1961).

Selülozun algılayıcı ve aktüatör olarak kullanıldığı bir çalışmada; yüksek çıkış genliği, kuru ortamlarda çalışma verimliliği ve sürdürülebilirliğe katkı sağladığı gösterilmiş ve bu piezoelektrik davranışından faydalanılarak elektroaktif kağıt aktüatörü tasarlanmıştır (Kim vd., 2007).

1.3.1. Piezoelektrik

Piezoelektrik malzemeler mekanik uyartımları elektriksel işarete, elektriksel uyartımları da mekanik titreşime dönüştüren elemanlardır. İlk piezoelektrik etki 1880 yılında Curie kardeşler tarafından kuartz kristalinin mekanik uyartım altında elektriksel olarak kutuplanması şeklinde gözlemlenmiştir. Sonrasında özellikle algılayıcı ve aktüatör olarak kullanılabilme potansiyeli görülünce malzeme teknolojilerinin ilerlemesi ile birlikte daha nitelikli dönüştürme oranlarına sahip piezoelektrik bileşikler geliştirilmiştir (Brahim vd., 2023). Piezoelektrik malzemeler kuvvet, basınç, ivme ve titreşim gibi mekanik enerjileri elektrik enerjisine dönüştürme de algılayıcı olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanımına doğrudan piezoelektrik etki denmektedir. Yine piezoelektrik malzemeye elektrik enerjisi uygulandığında elde edilen mekanik enerji hoparlör, buzzer gibi aktüatör olarak kullanıldığında buna ters piezoelektrik etki denmektedir (Gao & Wang, 2021; Lijing & Liping, 2011). Piezoseramik algılayıcıya ait eşdeğer devre Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Piezoseramik algılayıcıya ait mekanik ve elektrik eşdeğer devre

Piezoseramik algılayıcıların modellemesinde hem mekanik hem elektrik malzemeleri kullanılmaktadır (Brahim vd., 2023). Şekil 8’de görülebildiği gibi doğrudan piezoelektrik etki kuvvet yönündeki mekanik sönümlleme katsayısı ‘S’ ile, kütle ‘M’ ile ve mekanik direnç ‘R’ ile temsil edilmiştir. Üretilen enerji ideal bir transformatör ile çıkışa gönderilmiştir.

Sisteme ait diferansiyel denklem denklem (1)’de verilmiştir.

$$m * \ddot{x}(t) + c * \dot{x}(t) + k * x(t) = d_{33}V(t) \quad (1)$$

Denklem (1) ’de m kütleyi, $\ddot{x}(t)$ bağıl ivmeyi, c sönümlleme sabitini, $\dot{x}(t)$ hızı, k yay sabitini, $x(t)$ yer değişimini, d_{33} mekanik stresin bir fonksiyonu olarak üretilen elektrik alanına bağlı piezoelektrik sabitini ve $V(t)$ ise uygulanan veya üretilen gerilimi ifade etmektedir.

Benzer şekilde ters piezo elektrik etki uygulandığında paralel kapasite ‘C’ ve iç direnç ‘R’ ile piezoseramik davranış gösterilmiştir. Kapasite piezoseramik algılayıcının enerji depolama yeteneğini gösterirken direnç ise kayıpları temsil etmektedir.

1.3.2. Mekanosensitif İyon Kanalları

Mekanosensitif iyon kanalları hücre duvarına etkiyen mekanik kuvvetlere bağlı olarak iyonların harekete geçmesini sağlayan kanallardır. Bitkiye uygulanan dokunma, yer çekimi, titreşim ve ozmotik basınç değişimi gibi fiziksel uyartımlar bu kanalların aktif hale gelmesini sağlar. Bitki dışardan aldığı bu etkilere bağlı olarak, elektropotansiyel ya da kimyasal işaretler üretirler (Basu & Haswell, 2017; Martinac, 2012).

Bitkilerle birlikte yapılan pekçok çalışma da verilen mekanik uyartımların veya yaralamaların elektropotansiyel işaretleri tetiklediği gösterilmiştir (Volana Randriamandimbisoa vd., 2020; Volkov & Haack, 1995; Volkov & Ranatunga, 2006). Ayrıca mekanosensitif kanalların piezoelektrik davranış gösterdiği ve bitkilerin bu etkiyi hücresel boyutta farklı amaçlar için kullandığı belirtilmiştir (Hamilton vd., 2015).

Bitkilerin piezoelektrik esaslı davranışına, mekanosensitif iyon kanalları önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu kanallar bir dönüştürücü olarak davranarak uygulanan fiziksel bir kuvveti elektriksel kuvvete dönüştürmektedir. Benzer şekilde bitki çevresinden algıladığı etkin bir engelle veya değişime karşı bir elektropotansiyel işaret üretmekte ve bu işaret bitki dal veya yapraklarında tropizmik veya nastik hareketlere sebep olmaktadır.

1.4. Bitki Elektropotansiyel İşaretlerinin Ölçümü

Bitki işaretleri düşük frekanslarda ve milivolt mertebesinde genliklere sahip işaretlerdir. Özellikle elektromiyogram (EMG) işareti ile kıyaslandığında bitki işaretleri gürültü tabanına yakın ve geniş periyotlara sahip olan veya anlık tepe yapabilen, uyartımın şiddetine, zamanına, bitki türüne göre değişkenlik gösterebilen işaretlerdir. Bu anlık ve hassas işaretleri yakalayabilmek için, 24 bit çözünürlükte ADC'ye sahip MSP430I2040 işlemcisi tercih edilmiştir. Ayrıcı işlemci içerisinde dahili kazanç yükselteci bulunduğundan mikrovolt ve daha düşük mertebelerde ölçüm yeteneğine sahiptir.

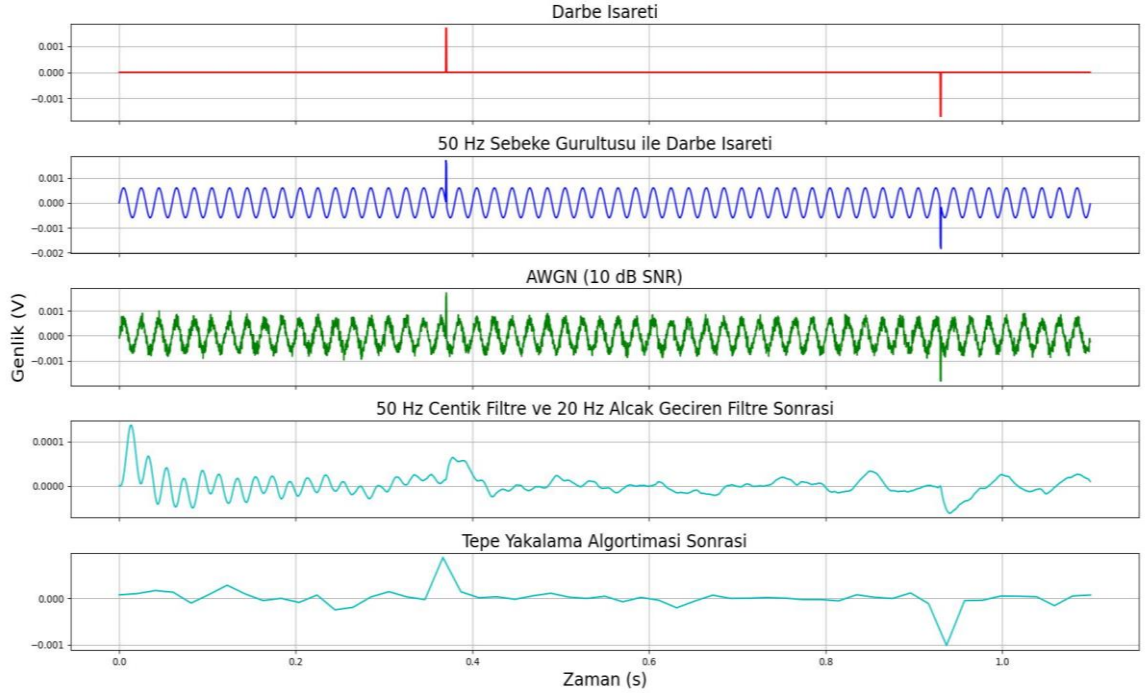
Doğal ortamında bitkiler farklı gürültülere maruz kalabilirler. Özellikle şebeke frekansı girişimi, toprak gürültüsü, karasal gürültü gibi etki kaynakları bitki işaretlerinin gözlemlenmesini zorlaştırmaktadır. Şebeke girişiminden kaçınmak için bitki işaretlerinin alınmasında kablosuz bir yöntem tercih edilmiştir. 3500mAh bataryaya sahip ölçüm cihazı iki gün boyunca kesintisiz veri aktarımı yapabilmektedir.

Her ne kadar şebeke frekansına galvanik bir bağlantı olmasa da kullanılan cihaz bitkinin bulunduğu ortama bağlı olarak farklı seviyelerde şebeke gürültüsüne maruz kalmaktadır. Şebeke gürültüsünü bastırmak için bant durduran filtre kullanılabilir. Fakat bu durumda bitkinin doğal işaretlerinde de kayıp yaşanmaktadır. Bu durumu aşmak için bir tepe yakalama algoritması tasarlanmıştır. Kod parçacığı Algoritma 1'de verilmiştir.

Algoritma 1. Tepe yakalama algoritmasına ait kod parçacığı.

Adım 1.	if(ppeak < x[k]) ppeak = x[k];	// pozitif tepeyi bul.
Adım 2.	if(npeak > x[k]) npeak = x[k];	// negatif tepeyi bul.
Adım 3.	mean = mean+x[k]; k++;	// örnek indeksini arttır.
Adım 4.	if(k == period_lenght) {	
Adım 5.	peak = (ppeak+npeak)/2;	// tepe değeri.
Adım 6.	k=0;	// sonraki peryoda başla.
Adım 7.	mean = mean/period_lenght;	// sonraki iterasyon sorgusu.
Adım 8.	ppeak = mean;	// sonraki peryod için.
Adım 9.	npeak = mean; }	// sonraki peryod için.

Bu algoritma 50 Hz şebeke frekansının bir periyodundaki maksimum ve minimum tepeleri yakalar ve sonuçta o periyotta yakalanan en büyük iki değeri pozitif ve negatif olmak üzere çıktı olarak verir. Bu durumda 50 Hz'lik şebeke frekansının ve harmoniklerinin bastırılmasına gerek kalmadan bitki elektropotansiyel işaretleri yakalanmaktadır. Şekil 9'da tepe yakalama algoritmasının bant durduran filtre ile kıyaslaması yapılmıştır.



Şekil 9. Tepe yakalama algoritması ile çentik filtrenin başarımına ait kıyaslama

Elde edilen çıktıya göre tepe yakalama algoritması gürültü kaynağından daha az etkilenecek maksimum noktaları yakalamada yüksek başarımlı göstermiştir.

Bir diğer zorluk ise bitki işaretlerinin alınmasında kullanılacak olan elektrot sistemidir. Literatürde elektrot sistemleri en genel sınıflandırma ile ikiye ayrılır. İnvasif ve invazif olmayan bu yöntemlerle bitki işaretleri alınabilmektedir. Fakat invazif yöntemler bitki dokusunun bütünlüğüne zarar verdiğinden tercih edilmemektedir. İnvasif olmayan yöntemlerde ise özellikle elektromyogram ölçümlerinde tercih edilen jel tabanlı yapışkanlı yamaların bitki yapraklarını zedelediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple elektropotansiyel işaretler alınırken yüksek empedanslı, mıknatıslı elektrot sistemi tercih edilmiştir. Ayrıca invazif ve invazif olmayan elektrot sistemlerinin, yapılan empedans ölçümlerinde sadece mıknatıslı ve yüksek empedanslı ölçüm sistemi kararlılık göstermiş ve zamana bağlı olarak

empedansı değişmemiştir. Diğer tüm elektrot sistemleri uzun dönemli bitki işaret takibi için uygun olmadığı gösterilmiştir (DURĞUT, Z., 2023).

Şekil 10'da bitkilerin EP işaret takibinde kullanılan kablosuz cihaz ve denek bitki görülmektedir. EP işaret ölçümünde elektrotlardan biri ölçüm aynının yüzeye mıknatıs ile iliştirilmektedir. Diğer elektrot ise bitkinin köklerinin bulunduğu kısma yakın bir bakır iletken çubuğa bağlanmaktadır.



Şekil 10. Bitki elektropotansiyel işaretlerinin uzaktan takibi

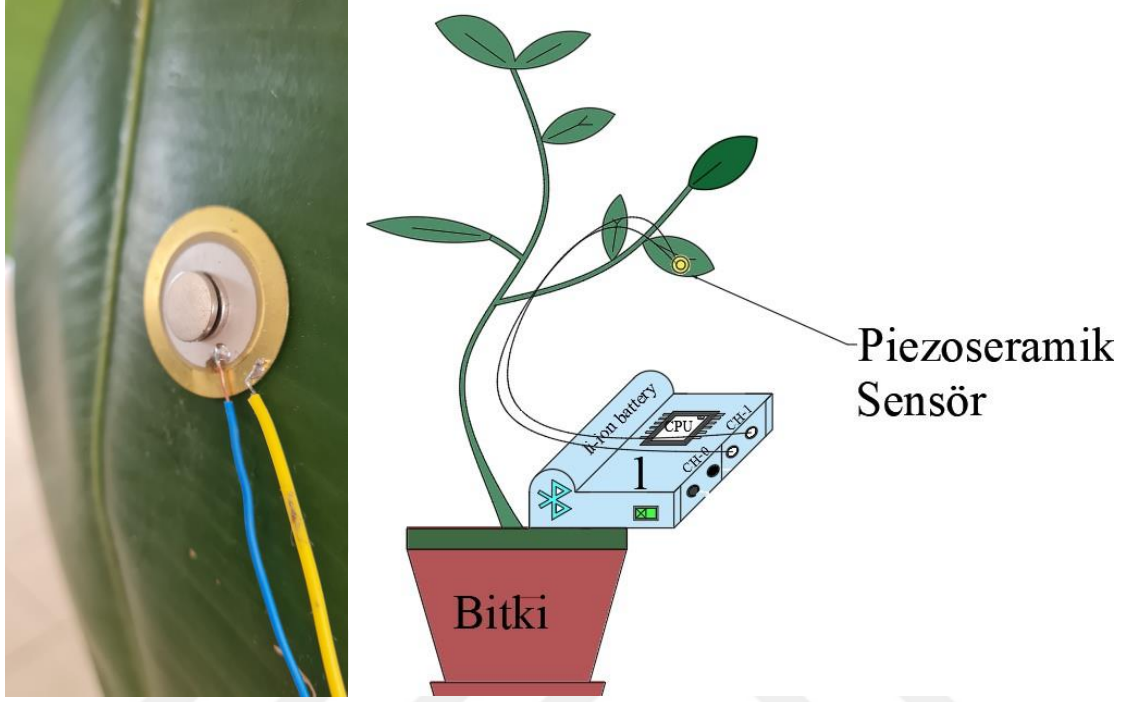
Ölçülen işaretler kablosuz veri yoluyla alındıktan sonra bilgisayar ortamında python programları kullanılarak eş zamanlı olarak çizidirmekte ve analiz edilmektedir.

1.5. Bitki Titreşim İşaretlerinin Ölçümü

Bitki titreşim işaretlerinin ölçümünde bu tez çalışmasında iki farklı yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemler, bitki titreşim işaretlerine odaklanıldığında, genel tabirle invasif ve invasif olmayan ölçüm yöntemleri olarak isimlendirilebilir.

İnvazif olarak tasarlanan yöntemde piezoseramik algılayıcı kullanan bir elektrot tasarlanmış ve kablosuz EP işaret ölçüm cihazının bir kanalı kullanılarak ölçümler alınmıştır.

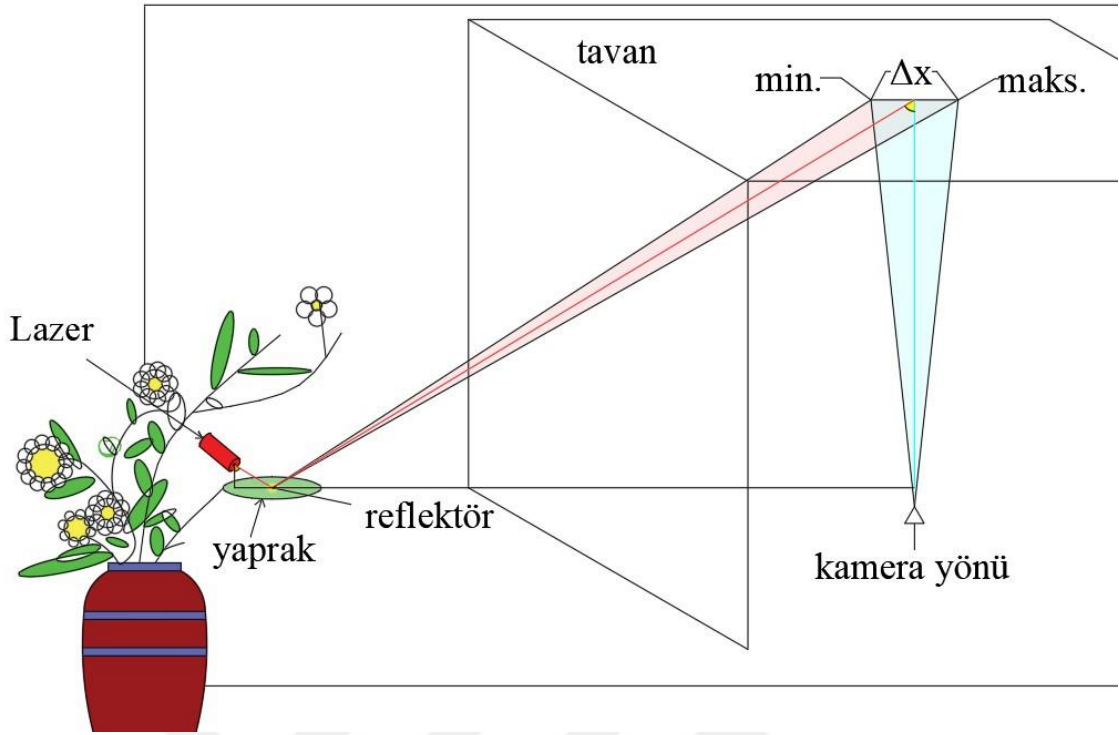
Yapılan bağlantı Şekil 11’ de gösterilmiştir. Piezoseramik algılayıcının iki çıkışı bulunmaktadır. Bu çıkışlar doğrudan ölçüm cihazının bir kanalına bağlanarak titreşim bilgisi alınmaktadır.



Şekil 11. Yaprak yüzeyine piezoseramik algılayıcı yerleşimi ve Bitki titreşim işaretinin uzaktan alınması

Bitki titreşim işaretlerinin alınması için tasarlanan ikinci yöntemde ise lazer, kamera ve reflektör bileşenleri kullanılmıştır. Sisteme ait detaylar Şekil 12’de gösterilmiştir. Bu yöntemde bitki yaprağına etkiyen herhangi bir kuvvet yoktur. Dolayısıyla bitkinin doğal titreşim davranışı ölçüm alınırken herhangi bir etkiye maruz kalmamaktadır. Bundan dolayı bu model invazif olmayan bir ölçüm modeli olarak isimlendirilebilir.

Ölçüm yöntemi; lazer ışınının, ölçüm alınmak istenen yaprak üzerine yerleştirilen hafif reflektör üzerinden tavana yansmasıyla birlikte, tavanda oluşturduğu ışın hareketinin kamera aracılığı ile alınıp bilgisayarda işlenmesi prensibiyle çalışmaktadır. Alınan görüntüyü kaydeden görüntü işleme algoritması, veriyi filtrelendikten sonra lazer ışınının yer değişimini piksel sayısına bağlı olarak grafiğe dökmektedir.



Şekil 12. Lazer ve kamera kullanılarak bitki hareketlerinin temassız takibi için kurulan sistem

Kurgulanan deney sisteminde lazer ışınının çıkış noktasının yaprak yüzeyi ile yaptığı açı, reflektörden yansıyan ışının tavan yüzeyi ile yaptığı açı, kamera ile yaprak arası ve kamera ile tavan arası mesafe gibi uzaklık ölçümleri alınmıştır. Ardından kullanılan kameranın çözünürlüğü de hesaba katılarak öngörülen maksimum ve minimum yaprak hareketlerine göre oluşabilecek, lazer ışınına ait piksel değişimine bağlı parametre tablosu oluşturulmuştur. Tablo 1’de verilen bu parametreler kullanılarak Şekil 13 elde edilmiştir.

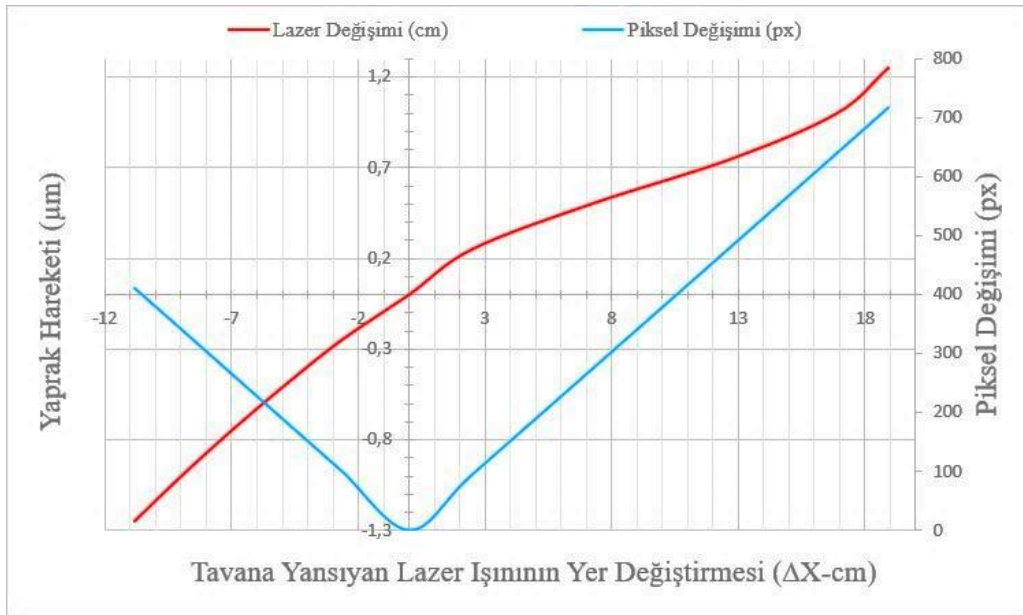
Gerçek zamanlı ölçülen piksel değişimleri bu grafik kullanılarak bitki hareketinin hesaplanması sağlanmaktadır. Bitkilerin tropizmik ve nastik hareketleri lazer kamera sistemi sayesinde bitki doğasına etki etmeden temassız bir şekilde ölçülebilmektedir.

Tavana yansıyan ışın demeti 96 dpi çözünürlükte görsel ile kayıt altına alınmaktadır. Ölçülen piksel sayısının kaç santimetreye tekabül ettiği bulunurken denklem (2) kullanılmıştır.

$$1 \text{ px} = \frac{2,54 \text{ cm}}{96} = 0,026458333 \text{ cm} \quad (2)$$

Tablo 1. Yaprak hareketi ile oluşan ışın yer değıştirmesi ve buna karşılık gelen piksel değeri

Yaprak Hareketi (μm)	Tavana Yansıyan Lazer Işınının Yer Değıştirmesi ($\Delta X\text{-cm}$)	Piksel Değışimi (px)
1.25	18.947	716
1.0	16.916	639
0.75	12.768	482
0.5	7.210	272
0.25	2.488	94
0.0	0.0	0
-0.25	-2.665	100
-0.5	-4.914	185
-0.75	-7.025	265
-1.0	-9.0	340
-1.25	-10.859	410



Şekil 13. Gerçek zamanlı elde edilen piksel bilgisinin yaprak hareketi olarak tespit edilmesi için kullanılan grafik

Şekil 13’de verilen grafikte iki farklı dikey eksen bulunmaktadır. Bunlardan sol tarafta bulunan, yaprak hareketini mikrometre mertebesinde sunmaktadır. Diğer dikey eksen ise piksel değişiminin kaç santimetrelik yerdeğiştirmeye tekabül ettiğini hesaplamak için yerleştirilmiştir. Yatay eksen ise tavana yansıyan ve görüntüsü kaydedilen lazer ışın demetinin yer değiştirme bilgisini temsil etmektedir. Kırmızı ile gösterilen işaret hesaplamalara bağlı olarak, öngörülen yaprak hareketine mukabil oluşan lazer ışın demetinin değişimini vermektedir. Mavi ile gösterilen çizgi ise piksel değişimini santimetre cinsinden mesafeye bağlı olarak göstermektedir.

Teorik hesaplaması yapılan bu grafik daha sonra gerçek zamanlı alınan titreşim ölçümlerinin analizinde kullanılacaktır.

Her iki yöntem arasında temel farklılıklar vardır. Bunlardan en önemlisi bitki doğal davranışını etkileme durumudur. Piezoseramik algılayıcı bitki üzerinde yaklaşık 1 gr. ağırlığında baskı oluşturmaktadır. Lazer, reflektör ve kamera sisteminde ise bitki üzerinde miligram seviyesinde bir reflektör plaka bulunmaktadır. Bu fark sayesinde bitkinin doğal davranışını etkilemeden ve piezoseramik algılayıcı kullanmadan titreşim ölçümleri alınabilmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması hem bitki biyopiezoelektrik davranışlarının teoriye ve modellemeye bağlı bir simülasyonunu, hem de gerçek zamanlı bitki EP ve titreşim ölçümlerinin analizine dair çıktıları sunmaktadır.

2.1. Simülasyon Çalışmaları

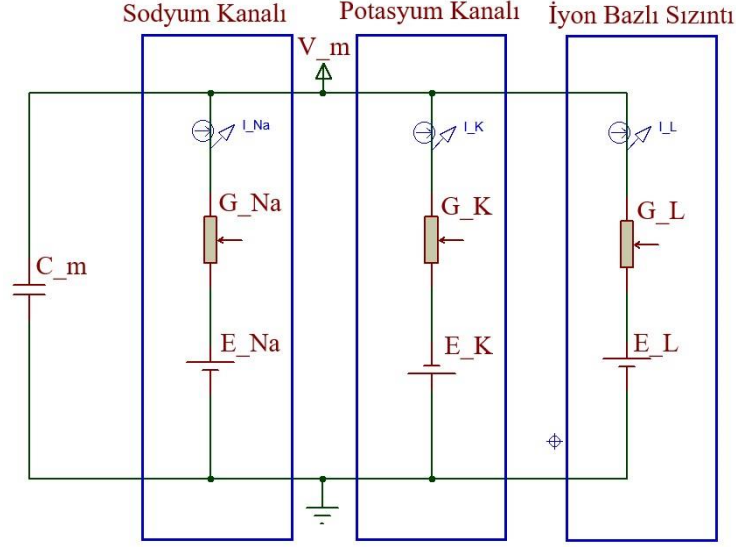
Simülasyon kısmı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk kısımda literatürde yer alan bitkilerin elektropotansiyel işaretlerinin üretilmesi teknikleri kullanılmıştır. Bitkilerin piezoelektrik davranışlarını da temsil eden elektriksel modellemeleri yapılarak, Kirşof yasalarına göre matematiksel analizine ulaşılmıştır. Simülasyonun bu kısmında piezoelektrik esaslı bitki modeli üzerinde aksiyon potansiyeli uygulanmış ve çıktıları gözlemlenmiştir.

Simülasyonun ikinci kısmında ise, bitkilerin üç boyutlu modellemesi yapılmış ve elektrostatik etki altında nasıl davranış sergilediği ve diğer bitkilere nasıl etki ettiği başka bir ifadeyle bitkilerin elektriksel olarak nasıl haberleştiği modellenmiş ve analiz edilmiştir.

2.1.1. Bitkilerin Piezoelektrik Esaslı Elektriksel Modeli ve Simülasyonu

Çalışmanın bu kısmında bir bitkinin çevresel uyartımdan etkilenip elektropotansiyel işaret ürettiği ve titreştiği ardından bu EP'nin diğer bir bitki tarafından algılandığı ve o bitkinin de uyartıma istinaden piezoelektrik yapısına uygun olarak titreştiği senaryosu modellenmiştir.

Dijital ortamda aksiyon potansiyeli işaretinin üretimi için literatüre yerleşmiş ve bilinen bir model kullanılmıştır. Hodgkin-Huxley modeli kullanılarak bitki AP'leri üretilmiş ve uyartım işareti olarak bitki modeline giriş olarak verilmiştir. HH modeli Şekil 14'de verilmiştir. Bu modelde iyonların akışı için hücre duvarının geçirgenliği sodyum (I_{Na}), potasyum (I_K) ve düşük seviyeli sızıntı akımlarıyla (I_L) temsil edilmiştir. Şekil 14'de gösterilen değişken dirençler (G_{Na} , G_K , G_L) gerilime bağlı iletkenlikleri gösterirler. Hücrenin içi ve dışı arasındaki kapasitans C_m ile gösterilmiştir. Buna membran yani zar kapasitesi de denilir. MP (V_m) hücrenin dış yüzey potansiyelini göstermektedir. Ayrıca ortam şartlarına, çevresel etkilere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.



Şekil 14. Bitki hücresinin elektriksel davranışını gösteren Hudking ve Huxley modeli

Bir hücre zarı boyunca toplam iyon akışı denklem (3)'de verilmiştir. Kapıların geçirgenliği iletenlikle ifade edildiğinden denklem (4) kullanılmaktadır. İyon transferine ait fonksiyon denklem (5)'te açık halde yazılmıştır. Hücre etrafından bir uyarım aldığında oluşacak I_{st} akımı da zar kapasitesine ve toplam iyon akışı miktarına bağlı olarak denklem (6)'da verilmiştir.

$$I_{iyon} = \sum_n I_n = \sum_n G_n * (V_m - E_n) \quad (3)$$

$$G_n = \frac{1}{R_n} \quad (4)$$

$$I_{iyon} = G_{Na} * (V_m - E_{Na}) + G_K * (V_m - E_K) + G_L * (V_m - E_L) \quad (5)$$

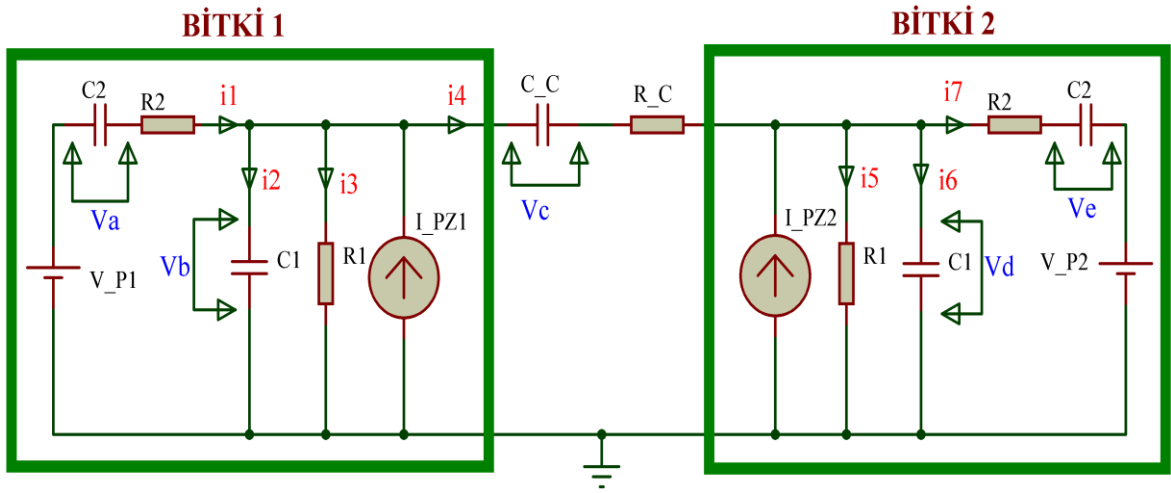
$$I_{st} = C_m \frac{dV_m}{dt} + I_{iyon} \quad (6)$$

Değişken dirençlerle temsil edilen Sodyum ve Potasyum kanallarının geçirgenlikleri HH modelinde farklı katmanlara ayrılmıştır. Bu katmanlara verilen ampirik katsayılar değiştirilerek dirençlerin değerleri ayarlanmaktadır. Dolayısıyla üretilen aksiyon potansiyellerinin genlikleri ve zamana yayılımları değiştirilebilmektedir (Hodgkin & Huxley, 1952).

Bitkiler kök, gövde, dal ve yaprak bileşenlerinden oluşan canlılardır. Literatürde daha önceden yapılmış bitki modellemelerinde, gövde kısmı seri kapasite ve direnç ile; dal ve yapraklar ise paralel kapasite ve direnç ile modellenmiştir. Kapasite birimleri bölgesel

elektropotansiyeli temsil etmekte dirençler ise membran direncini belirtmektedir (G. Volkov vd., 2016).

Bu tez çalışması bitkilerin piezoelektrik esaslı hareketine odaklandığından dolayı, modelleme bitkiler arası elektriksel etkileşimi ya da haberleşmeyi esas alan bir yaklaşımla yapılmıştır. Bölüm 1.3.1’de gösterildiği gibi bitki yaprak modeli piezoseramik model ile birebir örtüşmektedir. Dolayısıyla burada bitki yaprağı ile piezoseramik eşdeğer ortak bir direnç ve kapasite ile modellenmiştir. Bitki eşdeğer modeli Şekil 15’de verilmiştir.



Şekil 15. Bitkilerin elektriksel kuplaj yoluyla haberleşmesine ait model

Bu modelde iki ayrı bitki eşdeğeri arada kuplaj kondansatörü (C_c) ve direnci (R_c) ile birlikte birbirine bağlanmıştır. Bitkilerin yaprak kısımları piezoelektrik davranışı belirtmek için piezoelektrik eşdeğer ile birlikte modellenmiş ve paralel olarak (R_1 ve C_1) konumlandırılmıştır. Bitkilerin odunsu kısımları literatürdeki modellere benzer şekilde seri direnç (R_2) ve kapasite (C_2) olarak modellenmiştir.

Eşdeğer model devre analiz yöntemleri kullanılarak matematiksel olarak denklemlere dökülmüş ve matrisel forma geçirilmiştir. Burada kirşofun akımlar ve gerilimler kanunu ile ohm yasası kullanılmıştır. Bu yasalara göre elde edilen eşitlikler denklem (7), (8) ve (9) 'da verilmiştir.

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4 \quad , \quad i_4 = i_5 + i_6 + i_7 \quad (7)$$

$$i_1 = C_2 \frac{dV_a(t)}{dt} \quad , \quad i_2 = C_1 \frac{dV_b(t)}{dt} \quad , \quad i_3 = \frac{V_b}{R_1} \quad , \quad i_4 = C_c \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (8)$$

$$i_5 = \frac{V_d}{R_1} , \quad i_6 = C_1 \frac{dV_d(t)}{dt} , \quad i_7 = C_2 \frac{dV_e(t)}{dt} \quad (9)$$

Elde edilen eşitliklerle birlikte devre analiz yöntemleri ile denklemler oluşturulmuştur. Çok fazla matematiksel aşama içerdiğinden analiz aşamaları burada verilmemiştir. Sonuç olarak denklem (10)'da elde edilen durum matrisi görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_a(t)}{dt} \\ \frac{dV_b(t)}{dt} \\ \frac{dV_c(t)}{dt} \\ \frac{dV_d(t)}{dt} \\ \frac{dV_e(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{R_2 C_2} & \frac{-4}{R_2 C_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{4}{R_2 C_1} & \frac{2}{R_1 C_1} & \frac{2}{R_2 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{R_2 C_1} & 0 \\ 0 & \frac{4}{R_2 C_1} & 0 & -\frac{2}{R_2 C_1} & \frac{2}{R_1 C_1} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{R_2 C_2} & -\frac{2}{R_2 C_2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \end{bmatrix} + \dots \quad (10)$$

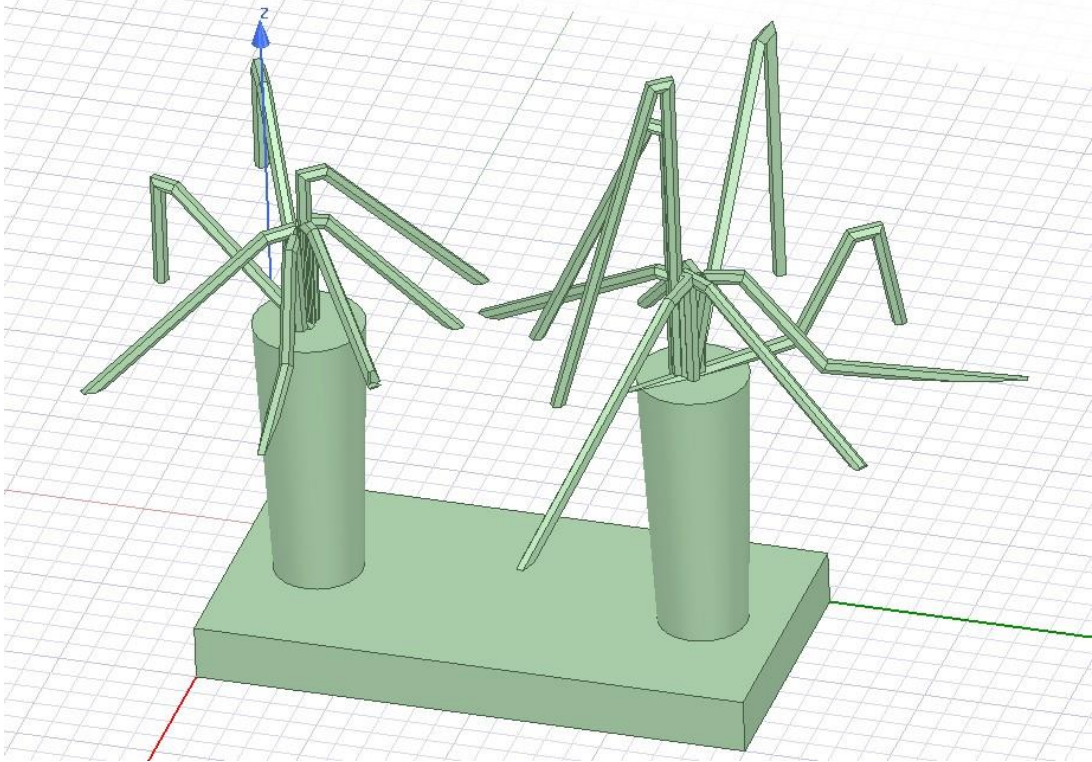
$$\dots + \begin{bmatrix} \frac{V_{p_1}}{R_2 C_2} \\ \frac{V_{p_1}}{R_2 C_1} + \frac{V_{z_1}}{R_1 C_1} \\ 0 \\ -\frac{V_{p_2}}{R_2 C_1} + \frac{V_{z_2}}{R_1 C_1} \\ -\frac{V_{p_2}}{R_2 C_2} \end{bmatrix}$$

Bitkilerin eşdeğer modellemesine ait olan bu sonuç matrisi, piezoelektrik denklem ve HH modeline ait denklemler kullanılarak bitki tepkisi bilgisayarda python ortamında gözlemlenmiştir.

2.1.2. Bitkilerin Elektrostatik Etkileşiminin Modellenmesi ve Analizi

Bitkilerin piezoelektrik esaslı davranışlarının bitkiler arası etkileşimde önemli rol oynadığı bilinmektedir. Bitki hareketlerinin elektropotansiyel işaretlere dönüşmesi ve bu işaretlerin bitkinin elektrostatik davranışlarını değiştirmesi sebebiyle bitki çevresindeki statik alan da değişime uğramaktadır.

Bu simülasyonda bitkilerin elektrostatik davranışlarını tespit etmek ve bitkiler arası yük dağılımını görmek amacıyla; üç boyutlu ortamda bitki modeli tasarlanmış ve uygulanan elektrostatik etki ile birlikte davranışı gözlemlenmiştir. Şekil 16’da iki ayrı bitkiye ait model görülmektedir. Bitkiler doğal ortamlarında oldukları gibi toprak üzerinden birbirlerine bağlıdır.



Şekil 16. Elektrostatik simülasyon ortamında bitkinin 3D modeli

ANSYS ortamında bitkilerin malzeme türleri, aradaki mesafe, bitki boyları, bitki yapısı ve uyartım türü gibi parametreler ayarlanmış ve çıktılar analiz edilmiştir.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar simülasyon çalışmalarını doğrulamak ve gerçek zamanlı olarak bitki piezoelektrik esaslı hareketlerini ve birbirleri ile etkileşimlerini tespit etmek için detayları bölüm 1.4 ve 1.5’de açıklanan yöntemler kullanılarak, farklı uyartım ve deney ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler farklı türde bitkiler kullanılmış ve davranışları karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir.

2.2.1. Bitki Elektropotansiyel ve Titreşim İşaretlerinin Takibi

Bu bölümde kurgulanan deneyde, saksıda yetiştirilmiş 70 cm boyunda literatürde *eriobotrya japonica* adıyla bilinen geniş yapraklı malta eriği bitkisi kullanılmıştır. Bu deney sisteminde karşılaştırmalı analiz için bitkiden; EP işaretleri, piezoseramik algılayıcı ile titreşim işaretleri ve lazer kamera sistemi ile hareket bilgisi olmak üzere üç farklı bilgi eş zamanlı olarak toplanmıştır.

Ölçüm sırasında saksı zeminden yalıtılmıştır. Çevredeki fiziksel ve elektriksel gürültü kaynakları da izole edilmiştir. Özellikle bitkinin rüzgar vb. çevresel titreşim gürültüsünden etkilenmemesi için ölçümler kapalı ortamda alınmıştır. Bitki EP işaretleri ve piezoelektrik tabanlı titreşim işaretleri, yüzey elektrodu ve piezoseramik algılayıcı ile ölçülmüş ve iki kanallı kablolu ölçüm sistemi ile bilgisayara gönderilmiştir. Deney sisteminde, ayarlanabilir bir güç kaynağı ile beslenen 3 mW'lık bir kırmızı lazer kullanılmıştır. Yansıma ışını kayıtları 30 FPS kamera tarafından alınmış ve bilgisayara kablolu bağlantı ile aktarılmıştır.

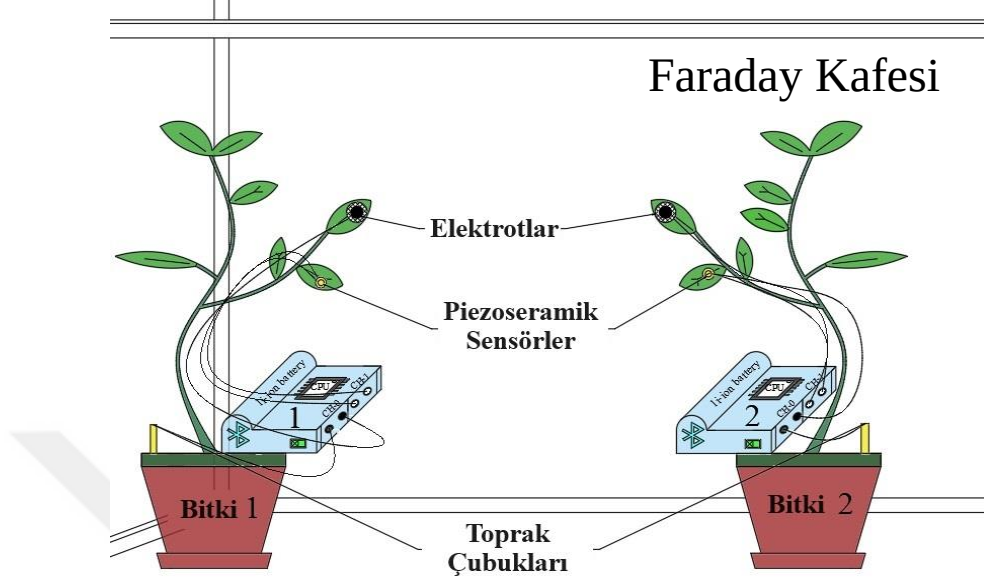
Titreşim deneyi için bitkiye iki farklı uyartım uygulanmıştır. İlk olarak bitkiye fiziki temas ile çok hafif bir uyartım verilmiş ve etkisi gösterilmiştir. İkinci olarak bitkinin bulunduğu saksıdaki toprağa 4 mt. uzunluğunda bakır bir kablo ile 12V'luk iki darbe uygulanmış ve çıktıları gözlemlenmiştir. Deneyler her iki yöntem için de iki kere tekrar edilmiş sonuçlar analiz edilmiştir.

2.2.2. Bitkiler Arası Piezoelektrik Esaslı Haberleşme İşaretlerinin Alınması

Bitkilerin elektrostatik etkileşimine dair deneyler ortak toprakta ve ayrı toprakta olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Bu deneyler hem malta eriği hem limon bitki çiftleriyle ayrı ayrı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

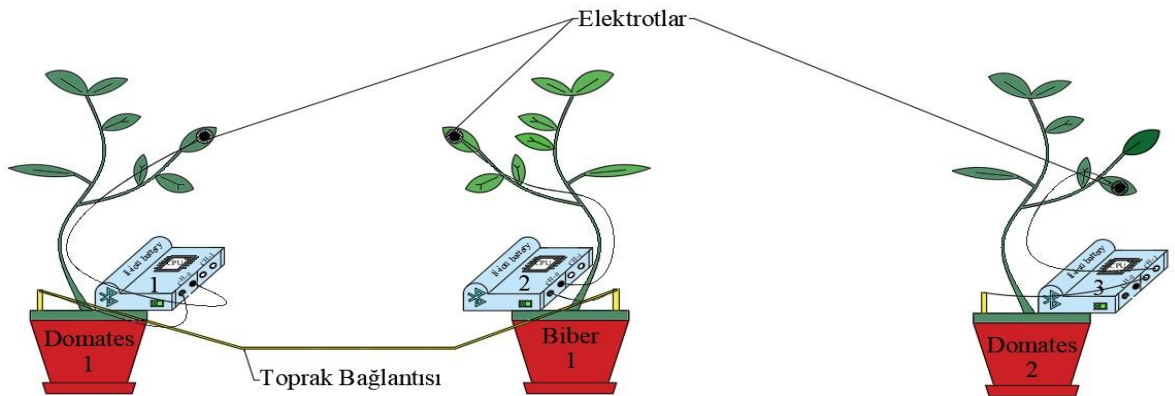
Deneylerin ilkinde ayrı topraklarda bulunan bitkiler faraday kafesi içine yerleştirilmiştir. Bitkiler çevresel koşullardan izole edilmiş, gün ışığında ve oda sıcaklığında tutulmuştur. Bitkilerin kökler veya mikorizal ağlar aracılığıyla iletişim kurmasını önlemek amacıyla iki ayrı saksı tercih edilmiştir. Karşılaştırmalı analiz amacıyla, EP işaretleri ile birlikte yaprak titreşimleri de ölçülmüş ve tüm ölçümler kaydedilmiştir. EP işaret ölçümleri, yüksek empedanslı miknatıslı yüzey elektrotları kullanılarak alınmıştır. Titreşim ölçümleri

ise piezoseramik algılayıcı ile alınmıştır. Alınan ölçümler, gerçek zamanlı olarak bilgisayara gönderilmiş ve görselleştirilmiştir. Şekil 17’de deney ortamı görülmektedir.



Şekil 17. Faraday kafesi içerisinde bitki etkileşiminin gözlemi için kurulan deney düzeneği

Bitkilerle yapılan elektrostatik deneylerin ikinci kısmında dönemlik yetişen iki domates ve bir biber bitkisi kullanılmıştır. Domateslerden bir tanesi ile biber toprakları üzerinden iletken bakır kablo ile birbirine bağlanmıştır. Diğer bir domates ise diğerleriyle aynı şekilde aralarında galvanik bağlantı olmadan yerleştirilmiştir. Deney kurgusuna ilişkin görsel Şekil 18’de verilmiştir. Bu deneyde bitkiler dış ortamda şebeke geriliminde izole bir şekilde ve herhangi bir uyarım verilmeden güneş ışığı altına bırakılmıştır. Bitki EP işaretleri üç farklı cihaz ile mıknatıslı yüzey elektrotları kullanarak alınmıştır.



Şekil 18. Birbirine bağlı bitkilerin, etkileşimlerini gözlemlemek için kurulan deney sistemi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde bitkilerin piezoelektrik esaslı hareketleri ve elektriksel olarak haberleşmeleri ile ilgili yürütülen deneylerde elde edilen veriler sunulmaktadır. Bu veriler python ortamında görselleştirilmiştir. Hem simülasyon verileri hem deneysel bulgular detaylıca irdelenerek analiz edilmiştir.

3.1. Simülasyon Ortamında Gerçekleştirilen Analizlerin Yorumlanması

Simülasyon bölümünde yapılan testler bitkilerin simülasyon ortamında davranışlarının incelenebilmesi ve yapılacak gerçek zamanlı deneylerin önceden test edilerek potansiyel çıktılarının önceden gözlemlenebilmesi açısından önemlidir.

3.1.1. Bitki Elektriksel Eşdeğer Modellemesine Göre Yapılan Analizin Değerlendirilmesi

HH modeli, piezoseramik algılayıcı modeli ve bitki eşdeğer devre matrisi kullanılarak adi diferansiyel denklem sistemine entegre edilmiş ve uygulanan parametrelere göre sistemin çıkışı gözlemlenmiştir. Burada HH modeli aksiyon potansiyelini ifade edecek şekilde 100mV genliğe sahip 5 adet darbe üretmektedir. Üretilen bu işaret birinci bitkide üretilip onun fonksiyonuna dahil edilmiştir. Bu bitkinin çevreden bir uyartım aldığını gösteren bir test işaretidir. Bölüm 2.1.1’de bulunan Şekil 15’te de gösterildiği üzere $VC1(V_b)$ ve $VC2(V_d)$ sırasıyla birinci bitki ve ikinci bitki yaprakları ifade eden kapasitelere ait gerilimleridir. Üretilen elektriksel uyartımın bitki yaprakları üzerindeki etkisi açıkça belli olmaktadır. Bitkilerin bu elektriksel uyartıma karşı ürettikleri hareketin gösterilmesi için piezoelektrik model kullanılmıştır. Üretilen işaret piezoelektrik modelin gerilim girişine uygulanmış ve piezoseramik malzemenin hareketi bölüm 1.3.1’deki denklem (1) ile hesaplanarak grafiğe çizdirilmiştir. Grafikte hem uyartım verilen bitkinin hem de etkileşime uğrayan diğer bitkinin hareket bilgisi sırasıyla verilmiştir.

Simülasyon sırasında her üç model de parametre girdisine ihtiyaç duymaktadır. Simülasyon ortamında parametreler; HH modeli için literatüre bağlı kalınarak uygun değerler kullanılmış, bitki modeli için bitki üzerinden alınan empedans ölçümlerinin sonuçları kullanılmış ve piezoseramik modelde ise her iki bitki için farklı katsayılar tercih

edilmiştir. Piezoseramik modelde farklı katsayıların tercih sebebi her bitkinin yaprak kalınlığı, büyüklüğü, taşıdığı su miktarı gibi temel farklılıklarını hesaba katmaktır. Her üç model için uygulanan girdi parametreleri sırasıyla Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 2. Simülasyonda kullanılan HH model parametreleri

C_m (μF)	G_{Na} (mS)	G_K (mS)	G_L (mS)	E_{Na} (mV)	E_K (mV)	E_L (mV)
1.0	200.0	80.0	0.2	160.0	-170.0	-55.387

Tablo 3. Simülasyonda kullanılan bitki eşdeğer parametreleri

	Direnç (Ω)	Kapasite (μF)
Bitki 1	65000	1.502
Kuplaj (Hava)	1	0.033
Bitki 2	65000	1.502

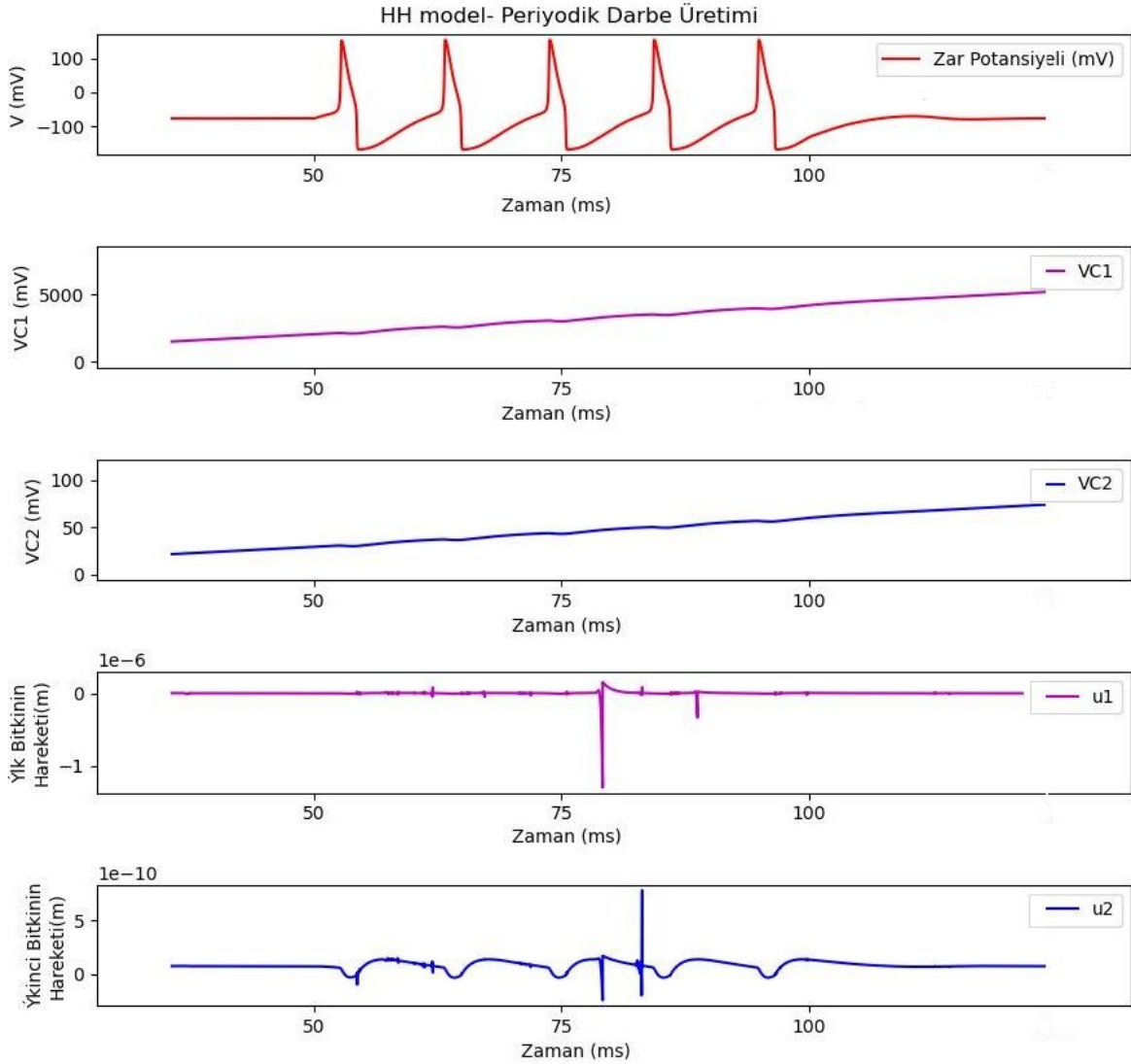
Tablo 4. Piezoelektrik model için kullanılan parametreler

	m (gr)	k (yay sabiti)	c (sönümleme sabiti)	d_{33} (piezo katsayısı)
Bitki 1	0.5	26.5	24.33	$387 * 10^6$
Bitki 2	0.5	19.35	20.1	$387 * 10^6$

Şekil 19'da yapılan simülasyona ait sonuç grafiği verilmiştir. Tablo 2'de verilen parametreler ile üretilen periyodik darbe işaretleri grafikte en üste kırmızı ile gösterilmiştir. Burada 5 tane periyodik darbe bitki uyarımını sembolize etmektedir.

Sistemin grafikte sırasıyla 2. ve 3. Sırada yer alan VC1 ve VC2 değerleri birinci ve ikinci bitkiye ait karakteristik kondansatörlerdir. Bitki hareketlerine dair sonuç çıktısı 4. Ve 5. Sıradaki grafiklerde görülmektedir. Burada üretilen işaretin bir çıktısı olarak ilk bitkinin hareketi 1 μm seviyelerinde gözlemlenmiştir. İkinci bitkide de hareket üretilmiş fakat

hareketin değişimi 0.5 nm seviyelerinde olmuştur. Burada bitkilerin hem piezoelektrik esaslı davranışları simüle edilmiş hem de birbirleri arasında kuplaj etkisi ile bir etkileşim olduğu gösterilmiştir.

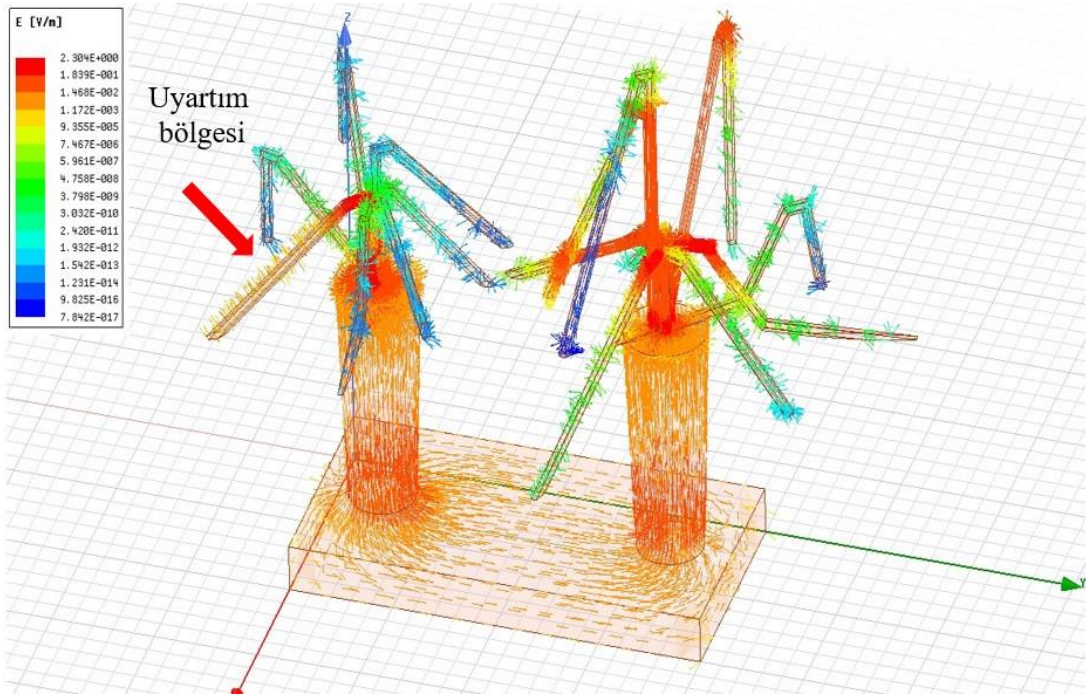


şekil 19. Bitki elektriksel eşdeğer modelinin uyartım ile piezoelektrik hareketine dair sonuç grafiği

3.1.2. Bitki Modelinin Elektrostatik Analizi

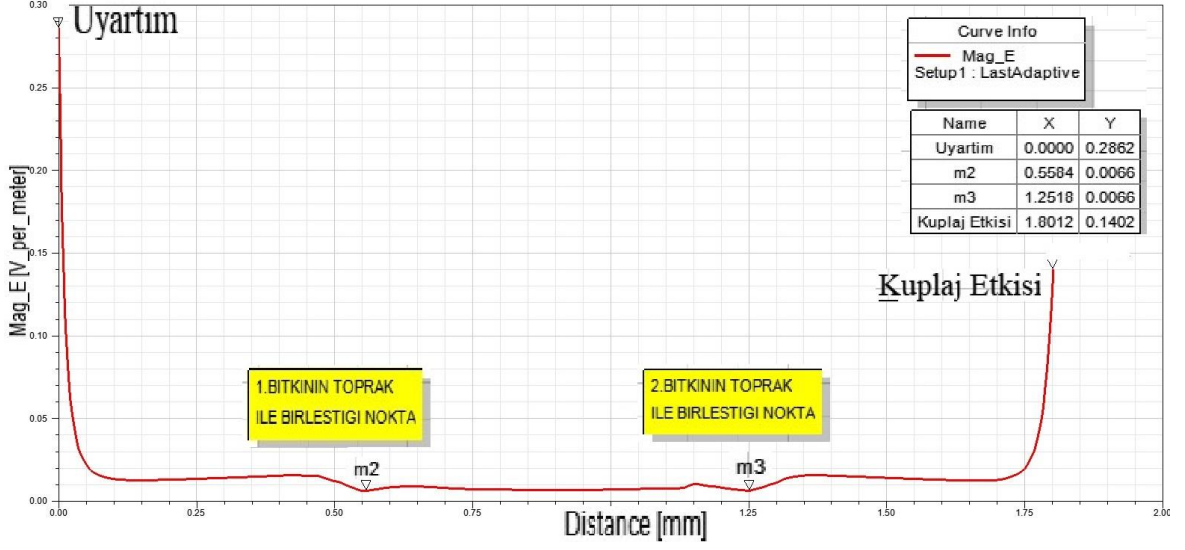
Bölüm 2.1.2’de 3D ortamda bitki benzer model çizilmiştir. Elektrostatik analiz için modellenen bitkiye bir dalından 12V’luk bir darbe uygulanmaktadır. Tasarlanan modelde

bitkiler doğal ortamlarında olduğu gibi toprak ile birbirlerine bağlı olup aynı zamanda kapalı yüzeylerle çevrilmiş hava ortamında bulunmaktadır. Bitkilerin uyartım şiddetine bağlı olarak kuplaj yoluyla etkileşime girdiği gösterilmiştir. Simülasyonda akım yönleri yüzeye bağlı olarak belirtilebilmektedir. Bu simülasyonda bitki 1'in bir dalından uyartım uygulanmış, bitki 2'nin birkaç dalı çıkış olarak belirtilmiştir. Toprak, canlı bitki dokusu ve hava farklı iletkenlik katsayılarıyla belirtilmiştir. Elektrik alan dağılımı Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Elektriksel kuplaj yoluyla bitkilerin hava ortamında etkileşimleri

Sıcaklık haritası şeklinde gösterilen elektrik alan dağılımı, her iki bitkiye ait dalların ve gövdenin uyartımdan etkilendiğini göstermektedir. Çıkış olarak belirtilmeyen bitki 1'e ait dallarda elektrik alan şiddeti oldukça düşük seviyelerdedir ve dolayısıyla mavi renkle gösterilmiştir. 3D analizi yapılan bitkilerin elektriksel kuplaj yoluyla etkileşime girdiğini daha iyi göstermek için Şekil 21'de verilen grafik incelenmelidir. Bu grafik bitki gövdeleri arasına çizilen, bir iletkenin üzerindeki elektrik alan dağılımını göstermektedir. Uyartım verilen noktada elektrik alan şiddetinin maksimum olduğu ve bitkilerin toprakla birleştiği m1 ve m2 noktalarında elektrik alanın neredeyse sıfıra yaklaştığı ve yine diğer bitkinin akım çıkış ucundaki noktada uyartım şiddetine kıyasla daha az ama en az yarısı mertebesinde etkilendiği görülmektedir.



Şekil 21. Bitkilerin elektrostatik etkileşimini gösteren elektrik alan grafiği.

3.2. Yürütülen Deney Sonuçlarının Yorumlanması

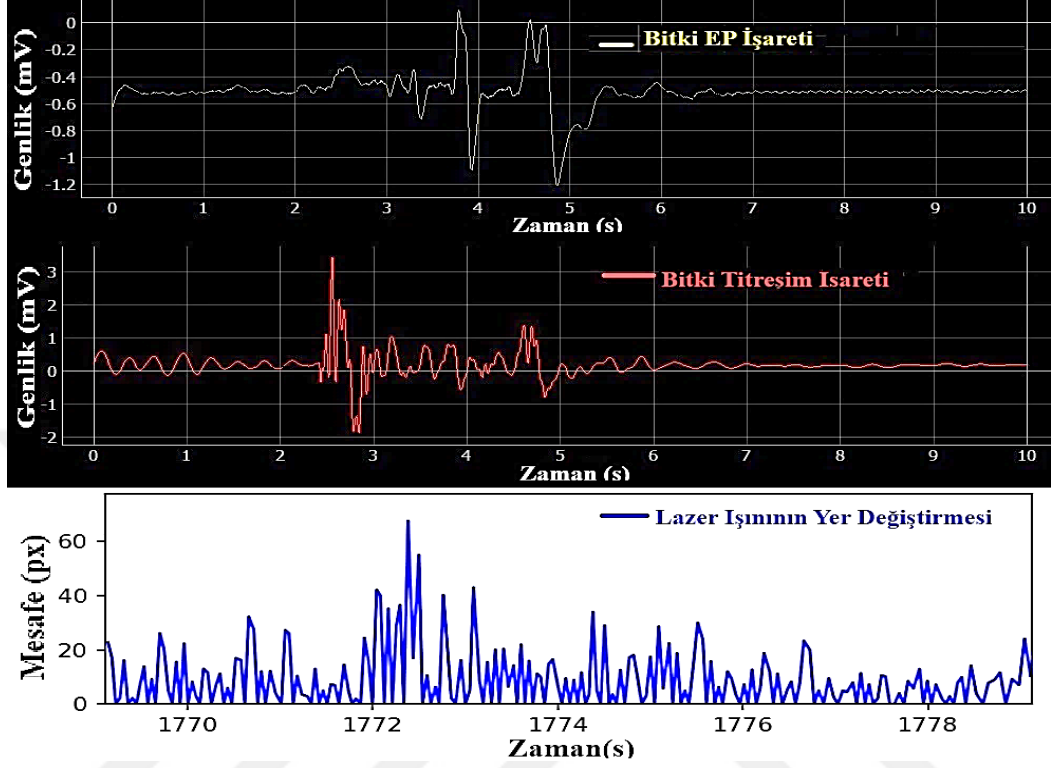
Gerçek zamanlı olarak ölçülen bitki işaretlerinin ve tepkelerinin analizleri burada verilmektedir. Bitkilerin piezoelektrikesaslı hareketleri ve etkileşimlerine dair bulgular simülasyonlar ile elde edilen çıktıları doğrular niteliktedir.

3.2.1. Bitki Elektropotansiyel ve Titreşim İşaretlerine Dair Elde Edilen Sonuçlar

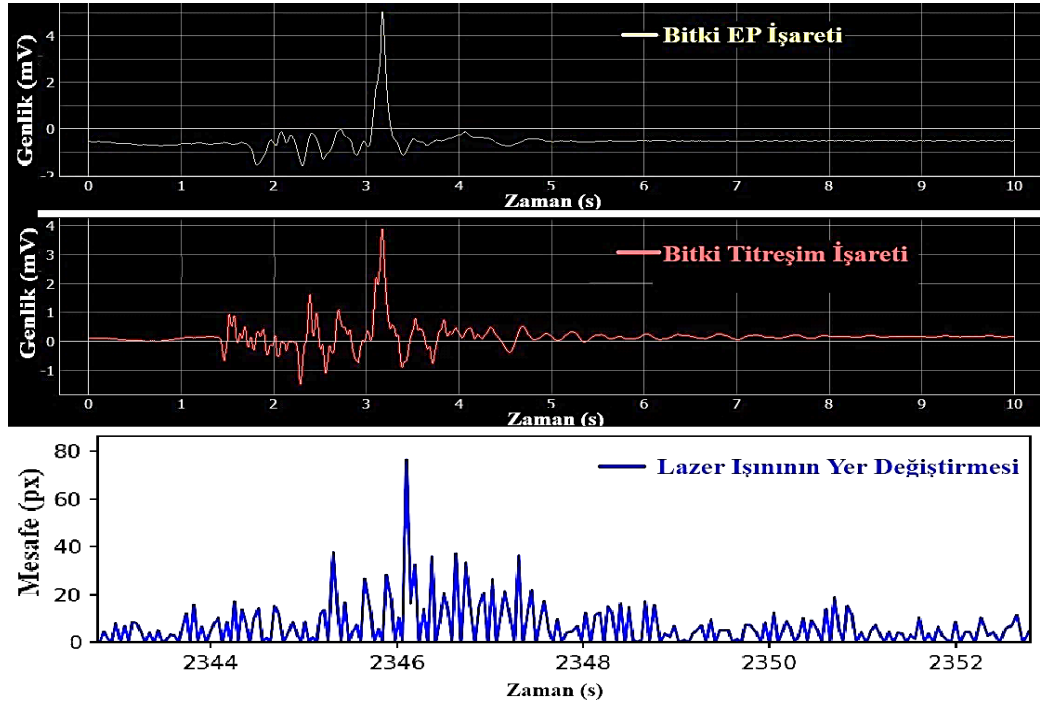
Bitkilerin piezoelektrik esaslı davranışlarına dair yapılan deneylerde bitki EP işareti, titreşim işareti ve bitki hareketi olmak üzere üç farklı ölçüm sonucu elde edilmiştir. Piezoseramik algılayıcı ve EP işaretler gerilim çıktısı vermektedir. Kullanılan lazer kamera sistemi ise bitkinin ne kadarlık bir hareket ürettiğini göstermekte ve piksel cinsinden bitki hareket miktarını söylemektedir.

Şekil 22’de ve Şekil 23’de verilen grafiklerde farklı zamanlarda da bitkiye fiziksel temas uyartımı çok hafif bir şekilde uygulanmıştır. Üç farklı algılayıcı sisteminin herbiri farklı bir yaprağa yerleştirilmiştir. Uygulanan uyartımlar da algılayıcılarla bağlantısı olmayan diğer bir yaprağa yapılmıştır. Her iki çıktıda da EP işaretlerin değişimi ile piezoseramik algılayıcının çıkışı ani bir değişimle uyartımı tespit etmiştir. Geliştirilen lazer ve kameralı sistem ise bir miktar gecikme ile hareket bilgisini yakalamıştır. Temas uyartımlarında bitkiden elde edilen yer değiştirme ve hareket çıktısı birbirlerine yakın

değerlere sahiptir. 60 ve 80 piksel değerlerinde ölçülen ışın yer değiştirmesinin gösterdiği yaprak hareketinin miktarı Tablo 5’te verilmiştir.

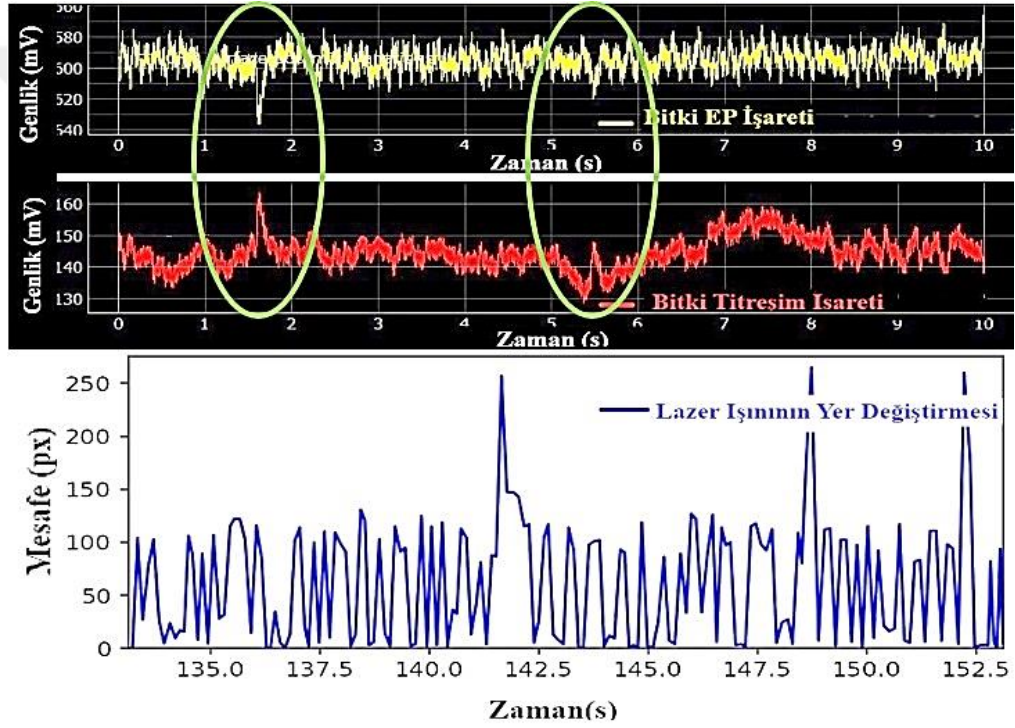


Şekil 22. Bitkiye uygulanan fiziksel temas uyartımı sonucu elde edilen sonuç grafiği



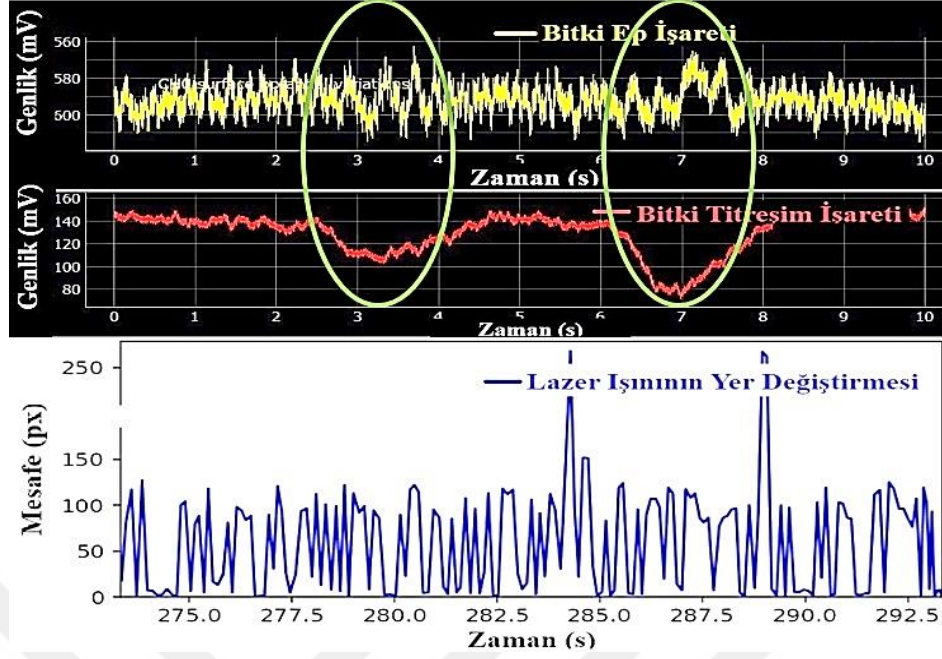
Şekil 23. Bitkiye uygulanan ikinci fiziksel temas uyartımı sonucu elde edilen sonuç grafiği

Malta eriği bitkisine uygulanan bir diğer uyartım ise 12V'luk elektriksel darbedir. Bitkinin saksına uygulanan bu darbe ile bitki hareketleri gözlemlenmiştir. Şekil 24'de verilen çıktıda bitkinin bulunduğu saksıya 3 kere elektriksel darbe verilmiştir. Bu elektriksel darbenin sonucu olarak hep EP işaretlerindeki değişim hemde piezoseramik algılayıcı değişimi temas uyartımına benzer olarak aniden ortaya çıkmıştır. Lazer ve kamera sistemi ise yine gecikmeli olarak yer değişimini ölçmüştür. Burada dikkat çekici olan husus verilen 3.elektriksel darbenin sadece lazer kamera sistemi ile gözlemlendiğidir. Bitki EP işareti 3.darbeyi kısa süreli hafıza özelliğinden dolayı görmemiş olabileceği düşünülmektedir.



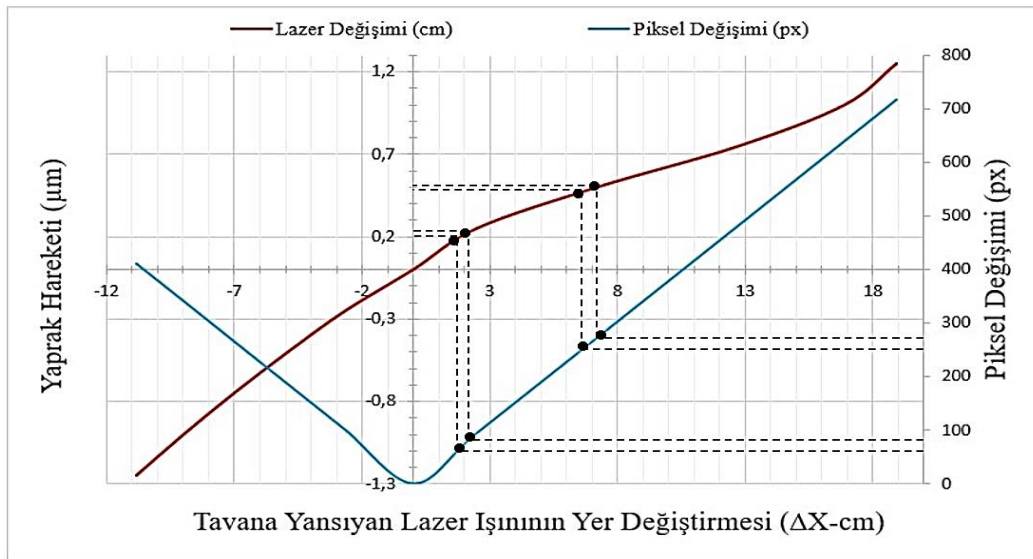
Şekil 24. Bitkiye uygulanan üç elektriksel darbenin etkisine ait sonuç grafiği

Şekil 25'te sonuçları verilen ikinci elektriksel uyartım deneyinde ise 2 elektriksel darbe uygulanmış ve çıktıları gözlemlenmiştir. Lazer kamera sistemi yer değişimini gecikmeli olarak ölçmekle birlikte, temas uyartımına kıyasla çok daha büyük bir piksel değişimini yakalamıştır. Bu da bitkinin elektriksel uyartıma verdiği hareket tepkisinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yine piezoseramik algılayıcının çıkışı da temas uyartımına kıyasla daha büyük bir elektriksel çıktıyı sunmuştur. Buradaki piksel değişiminin ne kadarlık bir yaprak hareketine tekabül ettiği Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 25. Bitkiye uygulanan iki elektriksel darbenin etkisine ait sonuç grafiği

Sonuçlar analiz edildiğinde, yaprak empedansı ve uyartım şiddetinin değişmesiyle üretilen EP sinyallerinin bitki hareketlerini tetiklediği gözlemlenmiştir. Bu hareketler hem piezoelektrik algılayıcı hem de önerilen lazer sistemi kullanılarak tespit edilebilmektedir. Çıktılar karşılaştırıldığında, EP işaretlerle tetiklenen hareketlerin yaklaşık 4 saniyelik gecikmelerle gözlemlendiği görülmüştür. Ancak, temas uyartımı ve mekanik hareketlerden kaynaklanan EP işaretlerde herhangi bir gecikme gözlenmemiştir.



Şekil 26. Piksel değişimlerinden bitki yaprak hareketinin kestirilmesi

Tablo 5. Uyarımlara bağı olarak malta eriğinin yaprak hareketleri

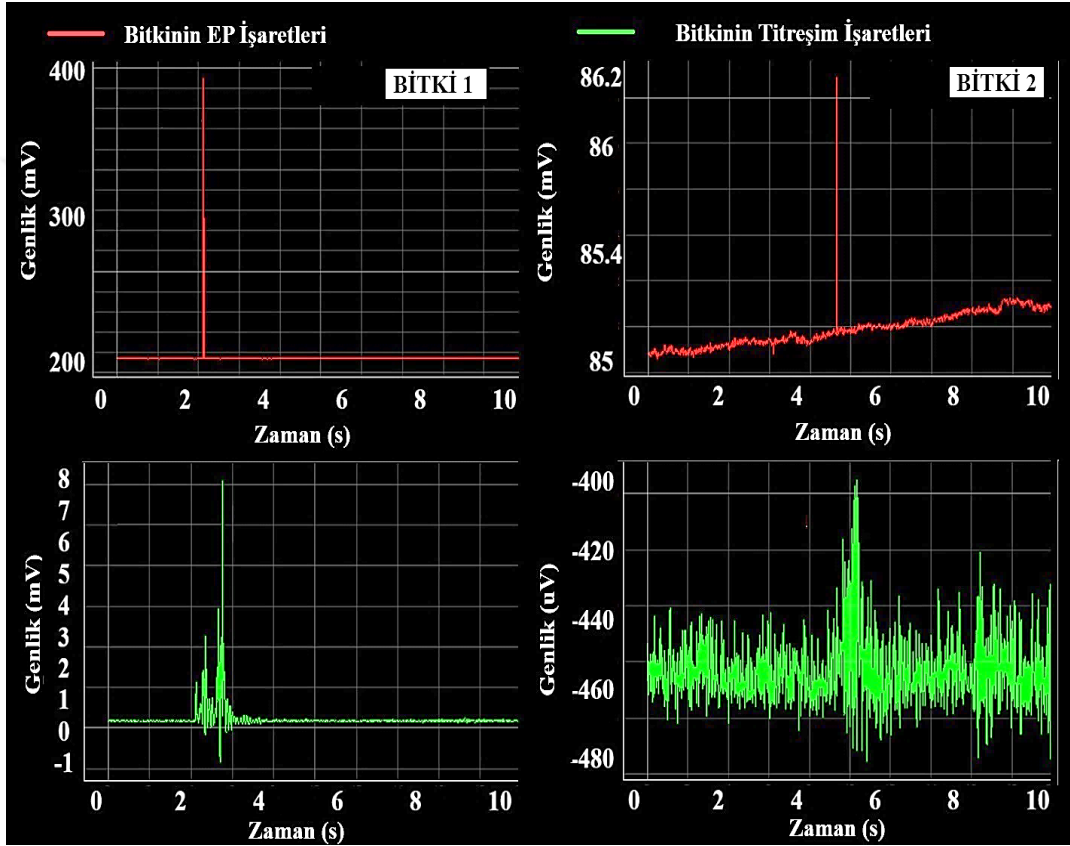
Deney No	Bitki	Uyarım Şekli	Işının Tavan Yüzeyindeki Hareketi (cm)	Harekete bağı ölçülen piksel sayısı (px)	Hesaplanan Yaprak Hareketi (μm)
1	Malta Eriği	Fiziksel Temas	2	60	0.21
2	Malta Eriği	Fiziksel Temas	2.6	80	0.27
3	Malta Eriği	Elektriksel	6.5	250	0.49
4	Malta Eriği	Elektriksel	7.2	260	0.51

Ölçümlerden elde edilen grafiklerin karşılaştırılması sonucunda lazer kamera sisteminin, piezoseramik ölçüm yönteminden daha az etkili olduğu görülmektedir. Bunun sebebi lazer ışını izlemek için kullanılan 30 FPS kare hızına sahip kameranın bu ölçümler için yetersiz olmasıdır. Ayrıca, görüntü işleme algoritmamızın neden olduğu 4 saniyelik gecikme, bitkinin hızlı tepkilerinin gözlemlenmesini önemli ölçüde engellemektedir. Bilimsel olarak, gelişmiş yüksek kare hızına sahip kameralarla birlikte özel bir görüntü işleme algoritmasının kullanılması, sonuçları önemli ölçüde iyileştirecektir. Bu sınırlamalarla birlikte mevcut bulgular, kablolu yüzey elektrotu veya piezoseramik algılayıcının bir yaprağa yerleştirilmesi bitkinin doğal davranışını etkilemektedir. Bitki tepkisinin gecikmesinin ve zamana yayılmasının temel sebebi bu kablolardan kaynaklanan kapasitif etkilerdir. Diğer bir dezavantaj ise bitki yaprağına fiziki temasın bitkinin doğal hareketini kısıtlamasıdır. Her iki yöntem de bitki işaretlerinin alınmasında uzun dönemli olarak kullanıma elverişlidir. Lazer kamera sistemi bitkinin doğal aktivitesini daha iyi doğrulukla sunarken, piezoseramik algılayıcı esaslı sistem ise hızlı ve maliyet açısından çok daha uygundur.

3.2.2. Piezoelektrik Esaslı Haberleşmeye Dair Bulgular

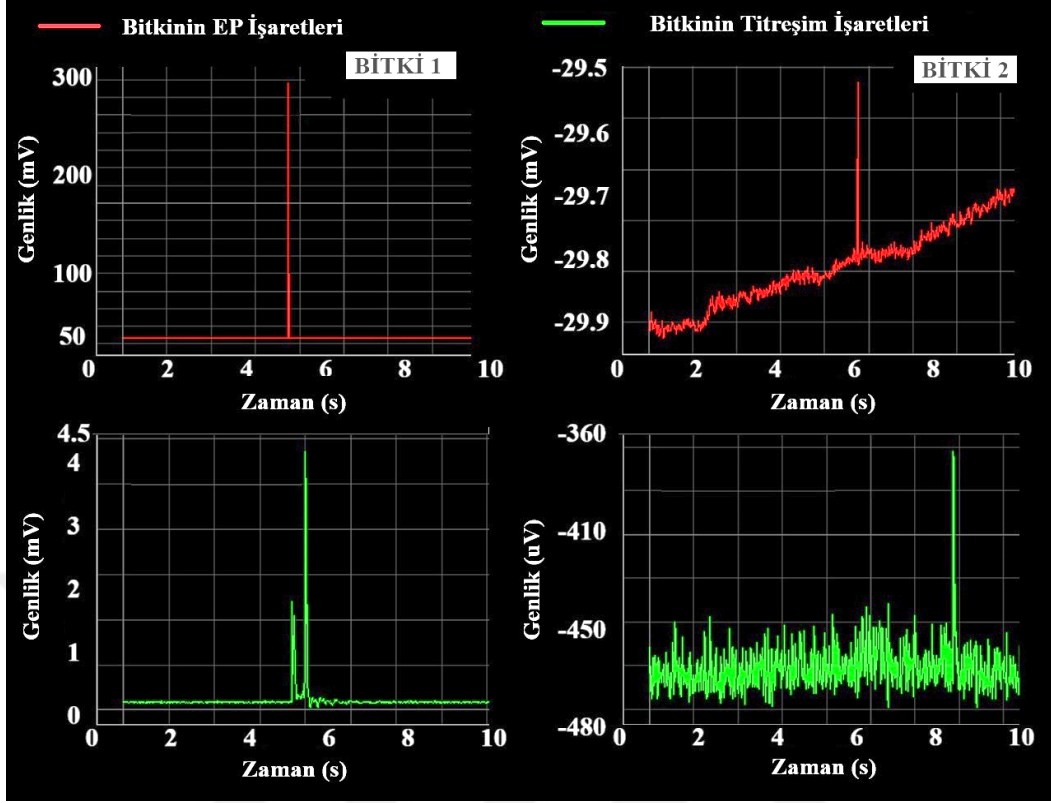
Şekil 27’de faraday kafesi içerisine yerleştirilen limon bitkileriyle yapılan deneye ait çıktılar bulunmaktadır. Burada bitkiler ayrı saksılarda bulunmakta ve saksılar arasında herhangi bir galvanik bağlantı bulunmamaktadır. Bitkiler günün farklı saatlerinde etraftan farklı sebeplerden kaynaklanan uyarım işaretleri algılayabilirler. Fakat deney ortamında piezoelektrik esaslı etkileşimin gösterilmesi için hem EP işaret hem de titreşim grafikleri

Şekil 27’de verilmiştir. Deneyde sol tarafta işaretleri gösterilen limon bitkisine, kafes dışından iletken olmayan bir tel ile uyartım verilmiştir. En yakın yaprağının 50cm mesafede bulunduğu diğer limon bitkisinden hem EP işaret hem de titreşim bilgisi düşük bir gecikme ile ölçülmüştür. Uyartılan yani verici bitki de üretilen 200 mV genliğe sahip elektriksel işaret 50 cm mesafedeki alıcı bitkide 1.2 mV genliğinde bir kuplaj etkisi oluşturmuştur. Her iki işaretinde bitki hareketlerini tetiklediği yerleştirilen piezoseramik algılayıcı ile ölçülmüştür.



Şekil 27. Uyartım ile alıcı ve verici limon bitkilerinin arasındaki kuplaj etkileşimi

Limon bitkileriyle yapılan deneyin birebir aynısı malta eriği bitkisi ile de yapılmıştır. Bu deneye ait sonuçlar Şekil 28’de verilmiştir. Verici bitkiye uygulanan temas uyartımı ile bitkide 250 mV genliğe sahip bir EP işaret üretilmiş ve bu işaret 50 cm mesafede bulunan alıcı bitkiye kuplaj yoluyla iletilmiştir. Alıcı bitkide 0.4 mV’luk bir EP işaret üretilmiştir. Her iki işaretin bu bitkide de titreşim karşılıkları ölçülmüştür.



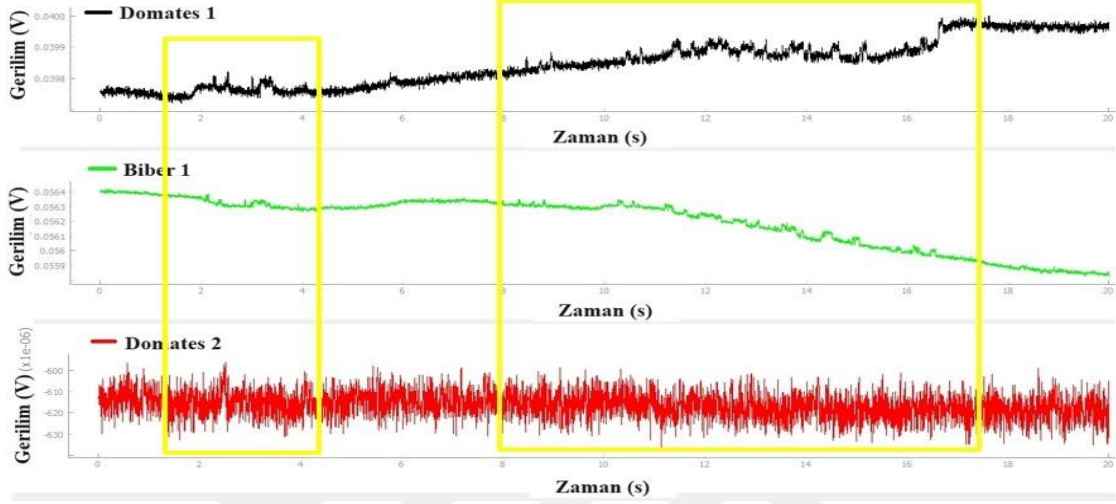
Şekil 28. Uyartım ile alıcı ve verici malta eriği bitkilerinin arasındaki kuplaj etkileşimi

Bitkilerden elektrostatik deney ortamında ölçümler alınırken dikkat çeken noktalardan biri, özellikle ardışık uyartımlarda bitkilerin tepki verme oranında azalma gözlemlenmesidir. Deneyler 15 dakikalık bekleme süresinden sonra tekrarlandığında, aynı EP değişimleri gözlemlenebilmiştir. Bu, bitkilerin kısa süreli bir hafızaya sahip olduğunu göstermektedir.

Bitkilerle yapılan elektrostatik deneylerin ikinci kısmında; birbirileri arasında galvanik bağlantı bulunan bitkilerden alınan EP işaretler, galvanik bağlantı bulunmayan bitkiden alınan EP işaret ile karşılaştırılmıştır. Bitkilerin gün boyu ürettiği doğal işaretler ölçülmüş ve özellikle dikkat çekici olanlardan iki tanesi sonuç olarak paylaşılmıştır. Sırasıyla Şekil 29 ve Şekil 30'da verilen grafiklerde ilk iki işaret birbirlerine iletken bakır tel ile bağlı olan domates ve biber bitkilerine aittir. Üçüncü sıradaki işaret ise eşit mesafede bulunan fakat bağlantısı olmayan domates bitkisine aittir.

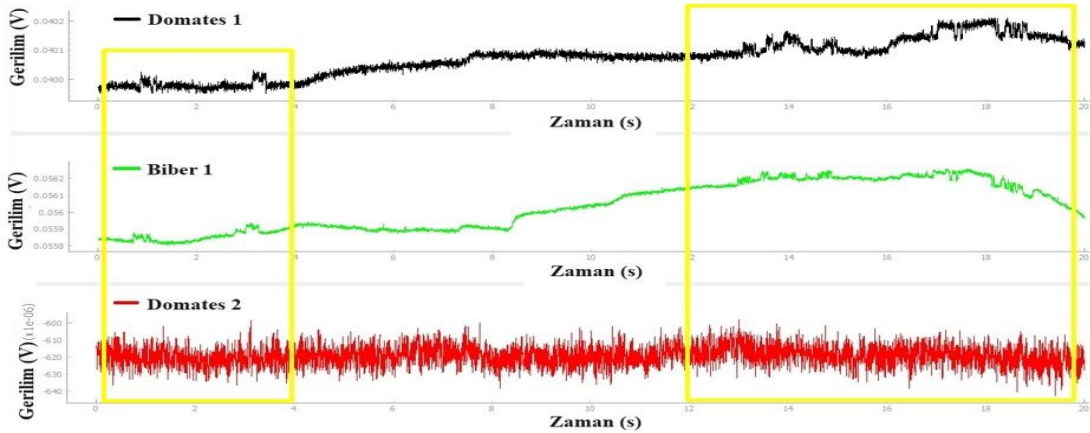
Şekil 29'da sarı dikdörtgen içerisinde alınan işaretler gece saat 04:23:32'de alınan ölçümlerde gözlemlenen izlerdir. Bu işaretlerde birbirlerine tel ile bağlı biber ve domates bitkilerinin senkronize olduğu ve henüz anlamının ne olduğu bilinmeyen bir tür etkileşime girdiği görülmektedir. Günün belli saatlerinde güneş konumuna bağlı olarak bitkilerin bilgi alışverişi yaptığı düşünülmektedir. Birbirlerine bağlı bu iki bitki de bu işaretler

gözlemlenirken aynı anda bağlı olmayan diğer domates bitkisinde ise bir değişim söz konusu olmamıştır. Bu ise bitkilere ait bu değişimin çevresel uyarımlardan ziyade bitkilerin kendi hayat döngüsü içerisinde ürettikleri bir işaret olduklarını göstermektedir.



Şekil 29. Farklı türde bitkilere ait senkronize işaretler

Şekil 30'da benzer bir ölçüm yine aynı deney ortamında ve şartlarında elde edilmiştir. Burada da bağlı olmayan domateste herhangi bir değişim olmazken, birbirlerine bağlı bitkiler senkronize bilgi alışverişinde bulunmaktadır. Burada bitkilere ait zar potansiyelleri farklı olmasına rağmen etkileşimi gösteren senkronizasyon işaretleri ise zar potansiyelinin üzerine binmektedir. Burada bir tür modülasyon işlemi gerçekleşmektedir.



Şekil 30. Farklı türde bitkilere ait senkronize işaretler

4. SONUÇLAR

Bitki elektropotansiyel işaretlerinin incelenmesi ile ilgili yürütülen çalışmalar bu işaretlerin varlığından ve çeşitli çevresel aktivitelerin sonucu olarak üretildiğini söylemekten öteye geçmemektedir. Benzer şekilde literatürde ayrı ayrı sınıflandırılan bitki hareketlerinin de bitki dokusundaki elektriksel karşılıkları üzerine az sayıda çalışma mevcuttur. Bitkilerin durgun doğası sebebiyle biyopiezoelektrik davranış detaylıca incelenmemiştir. Literatüre girmiş bitki hareketleri ve elektropotansiyel işaretleri birlikte inceleyen çalışmalar ise mimoza ve sinekkapan venüs gibi bitkilere odaklanmış ve bu bitkilerle sınırlı kalmıştır. Bu tez çalışmasın da ise hareketleri insan gözüyle çokta iyi seçilemeyen gündelik hayatta karşılaşılabildiğimiz bitki türleri kullanılmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalarda canlı bitki dokularındaki biyopiezoelektrik etki hakkında sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Yapılan bu sınırlı sayıda çalışmalarda bitkilerin moleküler düzeyde, selüloz kaynaklı biyopiezoelektrik karakterlere sahip oldukları belirtilmektedir. Bu tez çalışmasında ise gerek kullanılan ölçüm yöntemleri gerek yapılan simülasyonlarda elde edilen sonuçlar bitkilerin biyopiezoelektrik davranışlarına geniş çerçeveden ışık tutmaktadır.

Yürütülen bu çalışmada bitkilerin piezoelektrik esaslı davranışları ikisi simülasyon ikisi deneysel olmak üzere dört farklı metod ile analiz edilmiştir.

Bu tez çalışmasının önemli bir çıktısı yapılan bitki eş değer devre modellemesi ile birlikte bitkinin matematiksel modeline ulaşılmış olmasıdır. Elde edilen model piezoelektrik model ve HH modeli ile entegre edilmiş ve bitki hareketleri deterministik bir şekilde hesaplanabilmiştir. Modele ait girdi parametreleri değiştirilerek farklı senaryolar ve farklı bitki türleri için yeni simülasyonlar yapılabilir.

Benzer şekilde ANSYS ortamı kullanılarak bitkinin 3D modellemesi yapılarak bitkinin doğal ortamında elektrostatik etki altındaki davranışları ve birbirleri arasındaki etkileşimi de simüle edilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak burada iki bitkinin etkileşimi incelenmiş ve piezoelektrik etkiye vurgu yapılmıştır.

Elde edilen bulgular iki ana başlık altında ele alınabilir. Bunlardan ilki bitkilerin piezoelektrik esaslı davranışdır. Bitkilerin çevrelerinden uyartım aldıklarında elektropotansiyel işaret ürettikleri ve bu EP işaretin sonucu olarak yapraklarını hareket ettirdikleri benzer şekilde, yaprakları bir uyartım neticesinde hareket ettiğinde bunun bitki üzerinde EP işaretleri tetiklediği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasının ikinci çıktısı ise bitkilerdeki piezoelektrik davranışın; çevresel etmenlerin tetiklemesiyle ortaya çıkan elektrostatik alanların bitkiler arasında etkileşime, bir tür haberleşmeye sebep olmasıdır.

Bitkilerin çevresel etkileşimler ve dokularının piezoelektrik yapısı tarafından etkilenen elektropotansiyel işaretleri, elektrik alan değişimlerine karşı duyarlılıklarını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, anten teknolojisini iyileştirmedeki rolüne benzer şekilde piezoelektrik malzemenin, bitkilerin duyuşal sistemlerini ve çevresel ipuçlarına verdikleri tepkileri nasıl geliştirdiğini vurgulamaktadır. Biyopiezoelektrik davranış bitki etkileşiminin ve haberleşmesinin temel bir bileşeni görölmektedir.



5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, bitkilerin tüm diğer canlı varlıklar gibi çevresel etkileri anladıkları ve çevreyle etkileşime girdikleri gösterilmiştir. Bu çalışmanın çıktılarından en önemlisi bitkilerin biyopiezoelektrik davranışa sahip olduğunun gösterilmesidir. Bitkiler bu özellikleri sayesinde hem kendi yaşamlarını hemde yakın çevresinde bulunan diğer bitkilerin yaşamlarını kolaylaştırmakta ve aynı zamanda elektriksel haberleşme yeteneklerini kullanabilmektedirler.

Bitki işaretlerinin alınmasında kablosuz ve uzun dönemli ölçüm sistemlerinin bitkilerin elektriksel davranışını ve günlük rutinini anlamada çok önemli olduğu gösterilmiştir.

Bitkiler çeşitlilikleri itibarıyla dünya üzerinde en fazla nüfusa sahip varlıklardır. Onların biyoelektrik davranışlarının daha detaylı analizi için benzer çalışmalar yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında sunulan biyopiezoelektrik davranış, özellikle bitkilerin elektriksel davranışlarının analizine giden yolu açmaktadır.

Öngörülen çalışmalar, bitki EP işaretlerinin kaynağının anlamlandırılması, bitkilerin günlük döngüde ürettikleri EP işaretlerinin benzerliği, bitkilerin algılayıcı potansiyellerinin değerlendirilmesi ve bitkiler arası haberleşme sisteminin çözümlenmesi gibi problemlere odaklanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Appel, H. M., & Cocroft, R. B. (2014). Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing. *Oecologia*, 175(4), 1257-1266. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-2995-6>
- Awan, H., Zeid, K., Adve, R. S., Wallbridge, N., Plummer, C., & Eckford, A. W. (2020). Communication in Plants: Comparison of Multiple Action Potential and Mechanosensitive Signals With Experiments. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 19(2), 213-223. <https://doi.org/10.1109/TNB.2019.2951289>
- Basu, D., & Haswell, E. S. (2017). Plant mechanosensitive ion channels: An ocean of possibilities. *Current Opinion in Plant Biology*, 40, 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.07.002>
- Beilby, M. J. (2007). Action Potential in Charophytes. İçinde *International Review of Cytology* (C. 257, ss. 43-82). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(07\)57002-6](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(07)57002-6)
- Bell, P. D. (1980). Transmission of Vibrations along Plant Stems: Implications for Insect Communication. *Journal of the New York Entomological Society*, 88(3), 210-216.
- Brahim, K., Telmçani, A., Chiba, Y., & Henini, N. (2023). Piezoelectric Energy Conversion and Its Applications: Sensors and Actuators. *2023 2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement (IC2EM)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/IC2EM59347.2023.10419649>
- Chaudhary, A., Bala, K., Thakur, S., Kamboj, R., & Dumra, N. (2018). Plant defenses against herbivorous insects: A Review. *International Journal of Chemical Studies*.
- Correll, M. J., & Kiss, J. Z. (2002). Interactions Between Gravitropism and Phototropism in Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 21(2), 89-101. <https://doi.org/10.1007/s003440010056>
- Davies, E. (2006). Electrical Signals in Plants: Facts and Hypotheses. İçinde *Plant electrophysiology*. (ss. 407-422). https://doi.org/10.1007/978-3-540-37843-3_17
- De La Cal, L., Gloor, P. A., & Weinbeer, M. (2023). Can Plants Sense Humans? Using Plants as Biosensors to Detect the Presence of Eurythmic Gestures. *Sensors*, 23(15), 6971. <https://doi.org/10.3390/s23156971>
- DURĞUT, Z. (2023). *Bitki İşaretlerinin Yüzey Potansiyelleri Yöntemiyle Ölçüm ve Analizi* [Yüksek Lisans Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Esmon, C. A., Pedmale, U. V., & Liscum, E. (2005). Plant tropisms: Providing the power of movement to a sessile organism. *The International Journal of Developmental Biology*, 49(5-6), 665-674. <https://doi.org/10.1387/ijdb.052028ce>

- G. Volkov, A., B. Shtessel, Y., & 1 Department of Chemistry, Oakwood University, Huntsville, AL 35896, USA. (2016). Propagation of electrotonic potentials in plants: Experimental study and mathematical modeling. *AIMS Biophysics*, 3(3), 358-379. <https://doi.org/10.3934/biophy.2016.3.358>
- Gao, W., & Wang, Q.-M. (2021). Piezoelectric Pressure Sensors as Switching Devices. *2021 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISAF51943.2021.9477348>
- García-Servín, M. Á., Mendoza-Sánchez, M., & Contreras-Medina, L. M. (2021). Electrical signals as an option of communication with plants: A review. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 33(2), 125-139. <https://doi.org/10.1007/s40626-021-00203-3>
- Gurovich, L. A., & Hermosilla, P. (2009). Electric signalling in fruit trees in response to water applications and light–darkness conditions. *Journal of Plant Physiology*, 166(3), 290-300. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.06.004>
- Hamilton, E. S., Schlegel, A. M., & Haswell, E. S. (2015). United in Diversity: Mechanosensitive Ion Channels in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 66(1), 113-137. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114700>
- Hart, J. W. (1990). *Plant Tropisms: And other Growth Movements*. Springer Science & Business Media.
- Hodgkin, A. L., & Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, 117(4), 500-544. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764>
- Huber, A. E., & Bauerle, T. L. (2016). Long-distance plant signaling pathways in response to multiple stressors: The gap in knowledge. *Journal of Experimental Botany*, 67(7), 2063-2079. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw099>
- Kim, J., Wang, N., Chen, Y., Lee, S.-K., & Yun, G.-Y. (2007). Electroactive-paper actuator made with cellulose/NaOH/urea and sodium alginate. *Cellulose*, 14(3), 217-223. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9111-6>
- Król, E., Dziubińska, H., & Trębacz, K. (2010). What do plants need action potentials for. *Action Potential: Biophysical and Cellular Context, Initiation(Phases and Propagation)*, 1-26.
- Lijing, W., & Liping, S. (2011). Simulation of the self-sensing actuators based on multi-piezoelectric effects of piezoelectric crystal. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 1876-1879. <https://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6023404>
- Martinac, B. (2012). Mechanosensitive ion channels: An evolutionary and scientific tour de force in mechanobiology. *Channels*, 6(4), 211-213. <https://doi.org/10.4161/chan.22047>

- Michelsen, A., Fink, F., Gogala, M., & Traue, D. (1982). Plants as transmission channels for insect vibrational songs. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 11(4), 269-281. <https://doi.org/10.1007/BF00299304>
- Mudrilov, M., Ladeynova, M., Grinberg, M., Balalaeva, I., & Vodeneev, V. (2021). Electrical Signaling of Plants under Abiotic Stressors: Transmission of Stimulus-Specific Information. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(19), 10715. <https://doi.org/10.3390/ijms221910715>
- Oyarce, P., & Gurovich, L. (2010). Electrical signals in avocado trees: Responses to light and water availability conditions. *Plant Signaling & Behavior*, 5(1), 34-41. <https://doi.org/10.4161/psb.5.1.10157>
- Pachú, J. K. S., Macedo, F. C. O., Malaquias, J. B., Ramalho, F. S., Oliveira, R. F., Godoy, W. A. C., & Salustino, A. S. (2023). Electrical signalling and plant response to herbivory: A short review. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2277578. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2277578>
- Shang, C., Tian, L., Li, M., Wang, Y., Cui, X., & Han, H. (2023). Research on the relationship between electrical signal and growth state of plants based on temperature factor. *2023 IEEE 3rd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*, 809-814. <https://doi.org/10.1109/ICIBA56860.2023.10165515>
- Shimmen, T. (2002). Electrical Perception of “Death Message” in Chara: Analysis of Rapid Component and Ionic Process. *Plant and Cell Physiology*, 43(12), 1575-1584. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcf182>
- Sibaoka, T. (1991). Rapid plant movements triggered by action potentials. *The Botanical Magazine Tokyo*, 104(1), 73-95. <https://doi.org/10.1007/BF02493405>
- Sukhov, V., Akinchits, E., Katicheva, L., & Vodeneev, V. (2013). Simulation of Variation Potential in Higher Plant Cells. *The Journal of Membrane Biology*, 246(4), 287-296. <https://doi.org/10.1007/s00232-013-9529-8>
- Szechyńska-Hebda, M., Lewandowska, M., Witoń, D., Fichman, Y., Mittler, R., & Karpiński, S. M. (2022). Aboveground plant-to-plant electrical signaling mediates network acquired acclimation. *The Plant Cell*, 34(8), 3047-3065. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac150>
- Thomas, M. A., & Cooper, R. L. (2022). Building bridges: Mycelium-mediated plant-plant electrophysiological communication. *Plant Signaling & Behavior*, 17(1), 2129291. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2129291>
- V.A. Bazhenov (Ed.). (1961). *Piezoelectric properties of wood*. Consultants Bureau. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19610601091>
- Velilla, E., Polajnar, J., Virant-Doberlet, M., Commandeur, D., Simon, R., Cornelissen, J. H. C., Ellers, J., & Halfwerk, W. (2020). Variation in plant leaf traits affects transmission and detectability of herbivore vibrational cues. *Ecology and Evolution*, 10(21), 12277-12289. <https://doi.org/10.1002/ece3.6857>

- Vodeneev, V., Akinchits, E., & Sukhov, V. (2015). Variation potential in higher plants: Mechanisms of generation and propagation. *Plant Signaling & Behavior*, 10(9), e1057365. <https://doi.org/10.1080/15592324.2015.1057365>
- Volana Randriamandimbisoa, M., Manitra Nany Razafindralambo, N. A., Fakra, D., Lucia Ravoajanahary, D., Claude Gatina, J., & Jaffrezic-Renault, N. (2020). Electrical response of plants to environmental stimuli: A short review and perspectives for meteorological applications. *Sensors International*, 1, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100053>
- Volkov, A. G. (Ed.). (2006). *Plant electrophysiology: Theory and methods*. Springer.
- Volkov, A. G., Dunkley, T. C., Labady, A. J., & Brown, C. L. (2005). Phototropism and electrified interfaces in green plants. *Electrochimica Acta*, 50(21), 4241-4247. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.02.094>
- Volkov, A. G., & Haack, R. A. (1995). *Bioelectrochemical Signals in Potato Plants*. 42(1).
- Volkov, A. G., & Ranatunga, D. R. A. (2006). Plants as Environmental Biosensors. *Plant Signaling & Behavior*, 1(3), 105-115. <https://doi.org/10.4161/psb.1.3.3000>
- Volkov, A. G., Toole, S., & WaMaina, M. (2019). Electrical signal transmission in the plant-wide web. *Bioelectrochemistry*, 129, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.05.003>
- Wojnar, R. (2012). Piezoelectric Phenomena in Biological Tissues. İçinde G. Ciofani & A. Menciassi (Ed.), *Piezoelectric Nanomaterials for Biomedical Applications* (ss. 173-185). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28044-3_6
- Yamashiro, T. (1995). Piezoelectric effect of plant leaf. *Ferroelectrics*, 171(1), 211-215. <https://doi.org/10.1080/00150199508018433>
- Zapata, R., Oliver-Villanueva, J.-V., Lemus-Zúñiga, L.-G., Fuente, D., Luzuriaga, J. E., & Moreno Esteve, J. C. (2021). Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. In Mediterranean forests in dependence on climatic conditions. *Plant Signaling & Behavior*, 16(10), 1948744. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1948744>
- Zimmermann, M. R., Maischak, H., Mithöfer, A., Boland, W., & Felle, H. H. (2009). System Potentials, a Novel Electrical Long-Distance Apoplastic Signal in Plants, Induced by Wounding. *Plant Physiology*, 149(3), 1593-1600. <https://doi.org/10.1104/pp.108.133884>

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf Tarık AKYÜZ, ilk ve orta öğrenimini Trabzon'da Kanuni İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini İstanbul'da Handan Hayrettin Yelkikanat Anadolu Teknik Lisesi'nde tamamladı. Sonrasında Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nu birincilikle tamamladı. Ardından Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde lisans eğitimine devam etti ve 2020 yılında mezun oldu. Sonrasında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans programına başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır. Yabancı dili İngilizce'dir.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulguların bir kısmı "Research on Surface Electropotential Signal and Vibration Measurements of Plants for Long-Term Remote Monitoring" adlı konferans bildirisinde, 2024 yılı Mayıs ayında 6.ICHORA (6th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications) yüzyüze ve İngilizce olarak sunulmuştur.