

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**KIRMIZI IŞIK SOĞURMA ORANI ÖLÇÜM YÖNTEMİ İLE SEBZE
TOHUMLARININ KALİTE AYRIMININ YAPILMASI**

Gözde ŞAHİN

BAHÇE BİTKİLERİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2025**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

KIRMIZI IŞIK SOĞURMA ORANI ÖLÇÜM YÖNTEMİ İLE SEBZE TOHUMLARININ KALİTE AYRIMININ YAPILMASI

Gözde ŞAHİN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İbrahim DEMİR

Bu çalışma kırmızı ışık soğurma oranı (KISO) ile 14 adet biber ve domates, 11 adet hıyar, 13 adet patlıcan tohum partisinde tohum çimlenmesi ve tohum gücü (hızlı yaşlandırma sonrası çimlendirme) ile ilişkisini saptamak amacıyla yürütülmüştür. Geliştirilen KISO cihazı ile tohum partileri 660 nm dalga boyunda ışığa maruz bırakılmış ve kırmızı ışık absorpsiyon değerleri mikrosaniye (μ s) cinsinden ölçülmüştür. Tohum çimlenmesi ISTA (2022) kurallarına göre yapılmıştır. KISO değerleri biberde 545 ile 575 μ s, domateste 600 ile 850 μ s , hıyarda 392 ile 447, patlıcanda ise 605 ile 645 arasında değişmiştir. Yaşlandırma testi öncesi, toplam ve normal çimlenme değerleri sırasıyla biberde %62-100 ve %55-95, domateste %56-97 ve %39-97, hıyarda %88-100 ve %88-99, patlıcanda ise %92-100 ve %83-98 olarak saptanmıştır. Ortalama çimlenme zamanı biberde 2.6 ile 5.1 gün, domateste 3 ile 7.4 gün, hıyarda 2.5 ile 3 gün patlıcanda ise 3.5 ile 6 gün arasında değişmiştir. Biberde regresyon analizleri sırasıyla yaşlandırma öncesi $R^2=0.473-0.685$;; sonrası $R^2=0.569-0.702$, ($p<0.01-0.001$) olarak tespit edilmiştir. Domateste yaşlandırma öncesi $R^2=0.46-0.90$ sonrası $R^2=0.56-0.77$; hıyarda ise hızlı yaşlandırma öncesi $R^2=0.70-0.72$ ve sonrası $R^2=0.72-0.73$ ($p<0.01-0.001$) değerleri saptanmıştır. Patlıcanda anlamlı ilişki bulunamamıştır. Sonuçlar, KISO ölçümlerinin sebze türlerinde tohum kalitesini belirlemede etkili olabileceğini göstermiştir.

Haziran 2025, 94 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çimlenme, tohum gücü, hızlı yaşlandırma testi, klorofil oranı, imaj analizleri

ABSTRACT

PhD Thesis

QUALITY DISCRIMINATION OF VEGETABLE SEEDS USING THE RED LIGHT ABSORPTION RATE MEASUREMENT METHOD

Gözde ŞAHİN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Horticulture

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim DEMİR

This study was conducted to determine the relationship between red light absorption rate (RLAR) and seed germination and vigour (germination after accelerated aging) in 14 pepper and tomato, 11 cucumber, and 13 eggplant seed lots. Using the developed RLAR device, seeds were exposed to light at a wavelength of 660 nm, and red light absorption values were measured in microseconds (μ s). Germination tests were performed according to ISTA (2022) rules. RLAR values ranged from 545–575 μ s in pepper, 600–850 μ s in tomato, 392–447 μ s in cucumber, and 605–645 μ s in eggplant. Pre-aging total and normal germination rates were 62–100% and 55–95% in pepper, 56–97% and 39–97% in tomato, 88–100% and 88–99% in cucumber, and 92–100% and 83–98% in eggplant, respectively. Mean germination time ranged between 2.6–5.1 days in pepper, 3–7.4 days in tomato, 2.5–3 days in cucumber, and 3.5–6 days in eggplant. Regression analyses in pepper showed R^2 values of 0.473-0.685 and 0.569-0.702 after aging ($p < 0.01$ – 0.001), for total germination, normal germination, and mean germination time, respectively. In tomato, R^2 values were 0.46-0.90 before aging and 0.56-0.77 after aging; in cucumber, 0.70-0.72 before and 0.72-0.73 after aging ($p < 0.01$ – 0.001). No significant relationship was found in eggplant. The results indicate that RLAR measurements can be an effective tool in determining seed quality for certain vegetable species.

June 2025, 94 pages

Key Words: Germination, seed vigour, accelerated ageing test, chlorophyll content image analysis

TEŞEKKÜR

Bir tez, yalnızca bireysel bir çabanın değil; birlikte düşünülen, destek olunan, cesaret verilen bir yolculuğun ürünüdür. Bu yolculukta yanımda olan, katkı sunan ve emeğiyle iz bırakan herkese en içten şükranlarımla...

Doktora tezinin hazırlanmasında bilgi, tecrübe ve desteğiyle her zaman yanımda olan, bilimsel rehberliğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. İbrahim DEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının merkezinde yer alan KISO ekipmanının tasarımı ve üretimi sürecinde, yalnızca bilgi ve deneyimiyle değil, aynı zamanda varlığıyla bana güç veren, her adımda yanımda olduğunu hissettiren, zorlukları birlikte göğüslediğim can yoldaşım, sevgili eşim İlker ŞAHİN'e gönülden teşekkür ederim.

Doktora sürecim boyunca yapıcı eleştirileri, yönlendirici katkıları ve kıymetli zamanlarıyla tezime değer katan Prof. Dr. Gölge SARIKAMIŞ (Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü), Prof. Dr. Hayrettin KENDİR (Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü), Prof. Dr. Naif GEBOLOĞLU (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü) ve Doç. Dr. Canan ÖZTOKAT KUZUCU'ya (Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü) en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın laboratuvar aşamasında bilgi, deneyim ve desteklerini esirgemeyen Ziraat Fakültesi Tohum Bilmi Laboratuvarı ekibine; özellikle değerli katkılarıyla her zaman yanımda olan Hakan EKER'e, ayrıca Tuba GÜLÖKSÜZ, Serpil MİS, Neslihan KADIOĞLU, Eda Burcu KÜÇÜKHÜSEYİN'e ve laboratuvardaki diğer ekip arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Üniversiteye başladığım ilk günden bu yana yanımda olan, akademik yolculuğum boyunca her daim desteklerini hissettiren iki kıymetli dostum Işıl KOÇAK BAKLACI ve Nagehan KILINÇ SELEK'e, bu zorlu süreci birlikte aşmamda bana verdikleri moral ve dostluk için sonsuz teşekkür ederim.

Görev yapmakta olduğum Tarım ve Orman Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı Arz Güvenliği Daire Başkanlığı'na, akademik çalışmalarım süresince sundukları anlayış, destek ve teşvik için teşekkür ederim. Bu süreçte özellikle bilgi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan Daire Başkanım Sayın Salih SINIKÇI'ya, tez sürecimin ilerlemesine verdikleri değerli katkılar için Songül ELHANAY, Tuğba ŞAKAR ve Esra ÇALIŞKAN'a; ayrıca yanımda olan tüm ekip arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Bu aşamaya gelmemde ve hayatta her anlamda ayakları yere basan güçlü bir kadın olmamda en büyük paya sahip olan canım annem Ümran KOCAMAN'a, desteğini her zaman arkamda hissettiren kıymetli babam Ömer Lütfi KOCAMAN'a ve tüm zorlu zamanlarımda yanımda olarak gücümü tazeleyen sevgili kardeşim Mert KOCAMAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu tezi, koşulsuz sevgisi, sonsuz emeği ve varlığıyla her zaman en büyük gücüm olan, bana hem hayatı hem de insan olmayı öğreten canım annem Ümran KOCAMAN'a ithaf ediyorum.

Gözde ŞAHİN

Ankara, Haziran 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
2.1 İmaj Analizleri İle İlgili Çalışmaların Temeli	7
2.2 Bilgisayarlı İmaj Analizi ve Tarayıcı Sistemleri	9
2.3 X-Işını (Radyografi) Tabanlı Görüntüleme Yöntemleriyle Tohum Analizi.....	20
2.4 Klorofil Floresans Tabanlı Çalışmalar	28
2.5 RGB ve Renk Tabanlı Analizler	33
2.6 Multispektral ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Yaklaşımlar	37
2.7 Diğer Önemli Yaklaşımlar	40
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	41
3.1 Materyal	41
3.2 Yöntem	43
3.2.1 Kırmızı ışık soğurma (KISO) ekipmanının imalatı	43
3.2.2 KISO ile okuma yöntemi	48
3.2.3 Çimlendirme testlerinin yapılışı.....	49
3.2.4 Tohum gücü testi (Hızlı yaşlandırma testi, HYT)'nin yapılması.....	50
3.2.5 Ortalama çimlenme zamanının (OÇZ) hesaplanması	51
3.3 İstatistiksel Değerlendirme.....	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	53
4.1 Farklı Olgunluktaki Biber, Domates, Hıyar ve Patlıcan Tohum Partilerinin KISO Değerleri İle Çimlenme ve Ortalama Çimlenme Zamanı İle İlişkisi	53
4.2 Biber Tohumlarında KISO Değerlerinin Toplam (TÇO) ve Normal Çimlenme Oranı (NÇO) ve Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ) İle İlişkisi ...	54

4.3 Biber Tohumlarında KISO (μs) Değerlerinin Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi.....	57
4.4 Domates Tohumlarında KISO Değerlerinin Toplam (TÇO) ve Normal Çimlenme Oranı (NÇO) ve Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ) İle İlişkisi ...	59
4.5 Domates Tohumlarında KISO Değerlerinin Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi.....	62
4.6 Hıyar Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Toplam (TÇO) ve Normal Çimlenme Oranı (NÇO) ve Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ) İle İlişkisi.....	65
4.7 Hıyar Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi	68
4.8 Patlıcan Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Toplam (TÇO) ve Normal Çimlenme Oranı (NÇO) ve Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ) İle İlişkisi.....	71
4.9 Patlıcan Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi	73
5. TARTIŞMA	77
6. SONUÇ.....	87
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ.....	94

SİMGELER DİZİNİ

°C	Santigrat Derece
%	Yüzde
g	Gram
mL	Mililitre
mm	Milimetre
cm	Santimetre
R ²	Regresyon Katsayısı
r	Korelasyon
NaCl	Sodyum klorür
µs	Mikro saniye – 10 ⁻⁶ saniye

Kısaltmalar

KISO	Kırmızı Işık Soğurma Oranı
JPEG	Joint Photographic Experts Group (Birleşik Fotoğraf Uzmanları Grubu)
RGB	Kırmızı-Yeşil-Mavi (Red-Green-Blue)
KF	Klorofil Floresan
NÇO	Normal çimlenme oranı
TÇO	Toplam çimlenme oranı
OÇZ	Ortalama çimlenme zamanı
HYT	Hızlı yaşlandırma testi
SVIS	Seed Vigour Imaging System
UAV	İnsansız Hava Aracı (Unmanned Aerial Vehicle)
MSI	Çok Bantlı Görüntüleme (Multispectral Imaging)
MRI	Manyetik Rezonans Görüntüleme (Magnetic Resonance Imaging)
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans (Nuclear Magnetic Resonance)
LDA	Lineer Diskriminant Analizi
NIR	Yakın Kızılötesi Spektroskopi (Near-Infrared)
CT	Bilgisayarlı Tomografi (CT)
nCDA	Normlaştırılmış Kanonik Ayrım
ISTA	Uluslararası Tohum Test Birliği
AOSA	Amerikan Tohum Test Birliği
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TOB	Tarım ve Orman Bakanlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Klorofil soğurma spektrumu	3
Şekil 1.2 Tohum gelişimi ve olgunluk safhasındaki klorofil miktarı değişim.....	5
Şekil 2.1 İmaj analizi ve lahana tohumlarında çimlenme arasındaki ilişki grafiği	11
Şekil 2.2 Marul ve hıyar fidelerinin normal ve anormal fide tarayıcı görüntüleri.....	13
Şekil 2.3 Tohum görüntüleme yönteminin şeması ve ay çekirdeği tohumlarında elde edilen görüntü.....	15
Şekil 2.4 Su alımı sırasında tohumlardaki yuvarlaklık ve alan açısından değişimleri....	17
Şekil 2.5 Brokoli (A) ve turp (B) Tohum görüntüleri ve imbibasyon aşamaları	18
Şekil 2.6 Kahve çekirdeği canlılığını değerlendirmek için fidelerin dijital görüntüleri .	19
Şekil 2.7 Domates tohumunun iç morfolojisine ait imaj analiz amaçlı röntgen fotoğrafları	21
Şekil 2.8 Domates tohumlarının X ışını fotoğrafları.....	22
Şekil 2.9 Ceviz tohumlarının radyografileri.....	23
Şekil 2.10 X-ışını testi ve fide ile elde edilen soya fasulyesi tohumu görüntüleri.....	24
Şekil 2.11 Su içeriği %6, %12, %15 ve %20 olan tohumların radyografik görüntüleri .	25
Şekil 2.12 Dolmalık biber X-ışını görüntüleri-1	25
Şekil 2.13 Dolmalık biber tohumu X-ışını görüntüleri-2.....	26
Şekil 2.14 Dolmalık biber tohumu X-ışını görüntüleri -3.....	26
Şekil 2.15 Domates tohumlarının X-ışını görüntüleri.....	28
Şekil 2.16 Mercimek tohumlarının histogramı	34
Şekil 3.1 Araştırmanın birinci ve ikinci aşamasında kullanılan tohum örnekleri.....	42
Şekil 3.2 Araştırmada üretilecek kırmızı ışık soğurma oranı (KISO) ölçüm aletinin şematik görünümü	43
Şekil 3.3 Lazer diyot ışık kaynağı ve dalga boyu aralığı	44
Şekil 3.4 LED ışık kaynağı ve dalga boyu aralığı.....	44
Şekil 3.5 Cihaz tasarımında kullanılan Arduino mikrodenetleyici kartı ve RGB sensör görüntüleri	45
Şekil 3.6 Arduino IDE programı	45
Şekil 3.7 Geliştirilen KISO ekipmanının düzenek ve kısımları.....	46
Şekil 3.8 Değişik boyutta kaplar ile yapılan KISO okuma örnekleri.....	47
Şekil 3.9 Ölçümlerde kullanılan tohum kabı ve ışık kaynağının son hali.....	47
Şekil 3.10 KISO okuma örneğinin bilgisayar yoluyla sağlanan ekran görüntüsü	48

Şekil 3.11 KISO ölçüm aletinin prototip hali.....	48
Şekil 3.12 Tohum çimlendirme aşamalarından görüntüler	49
Şekil 3.13 Normal – anormal fide ayırım görüntüleri.....	50
Şekil 3.14 Hızlı yaşlandırma güç testi aşamaları	51
Şekil 4.1 Biber tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık (*:p<0.05,**: p<0.01,***: p<0.001) düzeyleri.....	56
Şekil 4.2 Biber tohum partilerinde hızlı yaşlandırma güç testi (HYT) sonrası KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık	58
Şekil 4.3 Domates tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık.....	61
Şekil 4.4 Domates tohum partilerinde hızlı yaşlandırma güç testi (HYT) sonrası KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık	64
Şekil 4.5 Hıyar tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık	67
Şekil 4.6 Hıyar tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık	70
Şekil 4.7 Patlıcan tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi.....	72
Şekil 4.8 Patlıcan tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Sebze tohumu üretim ve ithalat verileri	6
Çizelge 2.1 Görüntü analizi ile klasik yöntemle ait karşılaştırma tablosu	10
Çizelge 2.2 Altı küçük tohumlu türde ilk kök oluşumundan 2 gün sonra ölçülen fide uzunlukları.....	14
Çizelge 3.1 Denemede kullanılan türlerin; çeşit isimleri ve onlara ait tohum numaraları.....	42
Çizelge 4.1 Dört farklı türde az olgun ve olgun tohumların KISO değerleri (μ s), çimlenme oranları (%) ve ortalama çimlenme zamanı değerleri (OÇZ, gün)	53
Çizelge 4.2 Biber tohum partilerinde KISO (μ s), toplam (TÇO,%), normal (NÇO,%) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim.....	55
Çizelge 4.3 Biber tohumlarında KISO (μ s) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri.....	57
Çizelge 4.4 Domates tohum partilerinde KISO(μ s), toplam (TÇO, %), normal (NÇO, %) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim.....	60
Çizelge 4.5 Domates tohumlarında KISO (μ s) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri.....	63
Çizelge 4.6 Hıyar tohum partilerinde KISO (μ s), toplam (TÇO, %), normal (NÇO, %) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim.....	65
Çizelge 4.7 Hıyar tohumlarında KISO (μ s) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri.....	68
Çizelge 4.8 Patlıcan tohum partilerinde KISO (μ s), toplam (TÇO,%), normal (NÇO,%) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim.....	71
Çizelge 4.9 Patlıcan tohumlarında KISO (μ s) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri.....	74
Çizelge 5.1 Türlerle göre KISO değeri ile tohum kalite parametreleri arasında istatistiksel düzeydeki anlamlılık sayıları ve düzeyleri tablosu	80

1. GİRİŞ

Son yıllarda küresel ölçekte ve ülkemizde tarımsal girdi maliyetlerinin hızla artması, üretim faaliyetlerinde karşılaşılabilecek olumsuzluklara karşı toleransı önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, tarımsal üretimin temel girdisi olan sağlıklı ve yüksek kaliteli tohumların stratejik önemini her geçen gün daha da artırmaktadır. Küresel gıda güvenliğinin sağlanması, tarımsal girdilerin etkin kullanımı ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi açısından, kaliteli tohum kullanımı stratejik bir öneme sahiptir. Çimlenmeyen her bir tohum; iş gücü, enerji ve ekonomik kaynaklar açısından önemli kayıplara neden olmakta, bu durumun etkisi özellikle yüksek maliyetli hibrit sebze tohumu üretiminde kayıpları daha da belirginleşmektedir.

Öte yandan, son yıllarda yalnızca tohum üretimi açısından değil, tarımsal ve endüstriyel birçok ürün özelinde de çevresel ayak izlerinin araştırılması, bu ürünlerin ekosistem üzerindeki etkilerinin nicel olarak belirlenmesi ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi yönünde önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Tohum kayıplarının neden olduğu ekonomik ve enerji kaynaklı yük göz önünde bulundurulduğunda, tohum partilerinin çimlenme potansiyelinin ve fide oluşturma kapasitesinin hızlı ve tahribatsız (non-destructive) yöntemlerle belirlenebilmesi, günümüzde tarımsal üretimde kritik bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu alanda, özellikle nesnel ve tekrarlanabilir tanılama süreçlerini mümkün kılacak yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge çalışmalarının ülkemizde hâlen sınırlı düzeyde kaldığı gözlenmektedir. Bunun önemli sebebi bu konulardaki Ar-Ge çalışmalarının ileri teknik be bilgi birikimini gerekli kılmamasıdır.

Uluslararası kurumlarca onanmış tohum çimlenme ve güç testleri ile tohum partilerinin laboratuvarda ya da arazi/sera performansına göre sınıflandırma yapılabilir. Bu testler sayesinde, tohumun çevresel koşullara (sıcaklık, nem, ışık vb.) verdiği yanıt doğrudan izlenebilir; ayrıca farklı partiler arasındaki performans karşılaştırmaları güvenilir şekilde öngörülebilir. Bununla birlikte, bu testlerin önemli sınırlılıkları da bulunmaktadır. Öncelikle test sürecinin tamamlanması genellikle 7 ila 14 gün gibi uzun bir zaman alabilmekte; bu da hızlı karar almanın gerektiği durumlarda uygulanabilirliğini

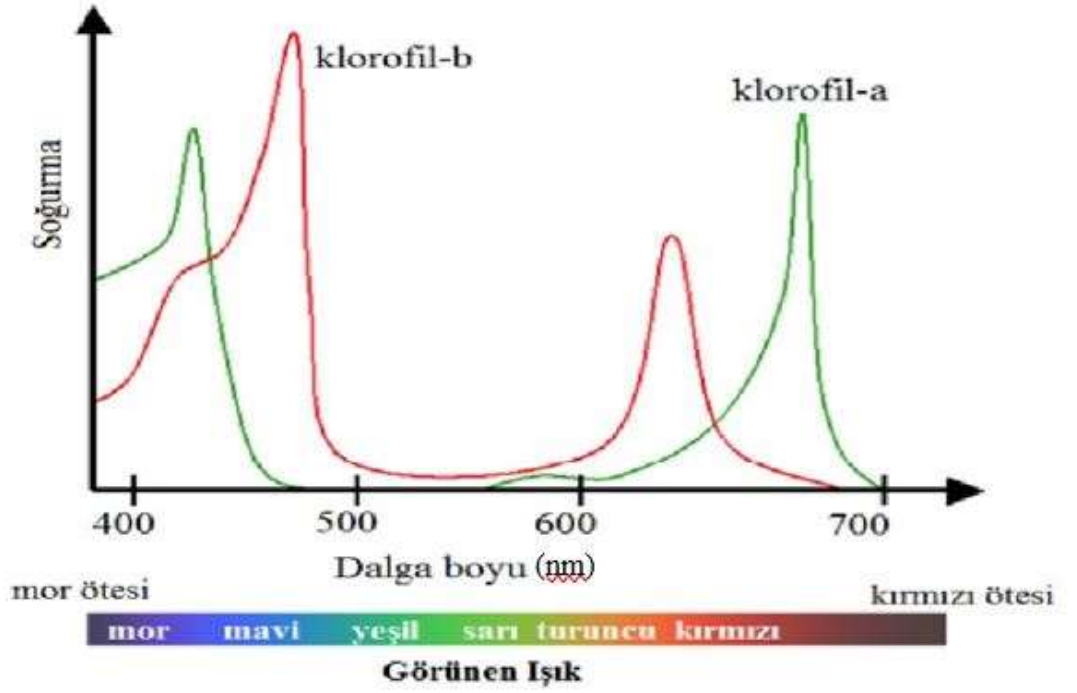
kısıtlamaktadır. Ayrıca, testin sağlıklı yapılabilmesi için kontrollü laboratuvar koşullarına, deneyimli personele ve belirli ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı testler (örneğin tetrazolium veya iletkenlik testi) tohuma tahrip edici müdahaleler içerdiğinden, numunelerin üretimde yeniden kullanımı mümkün olmamaktadır. Bu konuda farklı türlerde Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri bünyesinde bulunan Tohum Bilimi Laboratuvarı'nda farklı türlerde önemli sayıda araştırma yapılmış ve yayın üretilmiştir (Demir vd., 2008; Demir vd., 2011, Kenanoglu vd. 2013, Demir vd. 2019; Demir vd. 2022).

Ancak günümüzde hızlı, tahribatsız ve daha objektif analiz yöntemlerine olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu kapsamda tohuma zarar vermeden tohumun kalitesini bahsedilen geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı tespit edebilen imaj analizleri (i.e. klorofil florescence, RGB analizi, renk ve şekil tespiti) gibi teknikler geliştirilmiştir. Gelişmiş tarım teknolojilerine sahip tohum şirketleri, tohum kalite değerlendirmelerinde görüntü işleme (imaj analizi) tekniklerinden yaygın şekilde yararlanmaktadır. Bu sistemler, tohumun şekli, büyüklüğü, renk dağılımı, yüzey özellikleri, simetrisi ve doku farklılıkları gibi morfolojik parametrelerini otomatik olarak analiz ederek hızlı ve yüksek hassasiyetli sınıflandırmalar yapılmasına olanak tanımaktadır. İmaj analizine dayalı bu sistemler, hem üretim hattında fiziksel kalite ayıklaması yapmakta hem de çimlenme yeteneği veya fide canlılığı gibi fizyolojik özellikleri tahmin etmek amacıyla, non-destructive (tahribatsız) test alternatifleri sunmaktadır. Özellikle hibrit sebze tohumu üretimi gibi yüksek ekonomik değere sahip üretim süreçlerinde, bu teknolojiler tohumun istenilen kalite standartlarına uygunluğunu önceden belirlemek için kritik bir araç olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu sistemler, insan kaynaklı hataları en aza indirirken, yüksek hacimli tohum partilerinde standart kalite kontrolünü mümkün kılarak süreç verimliliğini de artırmaktadır.

Tohumda imaj analizi testleri gelişmiş tohum şirketlerince yaygın olarak kullanılıyor olsa da bu teknolojilerin ülkemizdeki kullanımı oldukça sınırlı ve yetersiz kalmaktadır. Söz konusu teknikler; fizik, elektronik ve yazılım geliştirme alanlarında uzmanlık gerektirmesi nedeniyle disiplinler arası iş birliğine dayalı Ar-Ge altyapılarını zorunlu kılmakta ve çoğu zaman yüksek maliyetli ekipman yatırımları gerektirmektedir. Bu Ar-

Ge çalışmalarını gerçekleştirebilmek için ortak çalışma ve teknik geliştirme alt yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca üretilen ekipmanlar oldukça pahalı ve kolay elde edilemeyecek maliyettir.

Tohumda kullanılan imaj tekniklerinden biri ve sebze tohumlarında detaylı kullanılan tohum yüzeyindeki klorofil düzeyine göre tohum çimlenmesini/kalitesini belirlemektir (Jalink vd., 1998a, 1998b; Kenanoğlu, 2012; Cicero vd. 2009; Yadav vd. 2015; Altızani-Junior vd. 2023). Olgunlaşma sürecinde tohum kabuğundaki klorofil parçalanır ve renk yeşilden sarıya döner. Bu bulgudan hareketle daha düşük klorofil kapsamının daha iyi çimlenme ve olgunlaşma ile örtüştüğü ortaya konmuştur (Jalink vd., 1999; Raven ve Beardall, 2006; Kenanoğlu vd., 2013, Usha ve Dadlani, 2015; Hay vd. 2015).



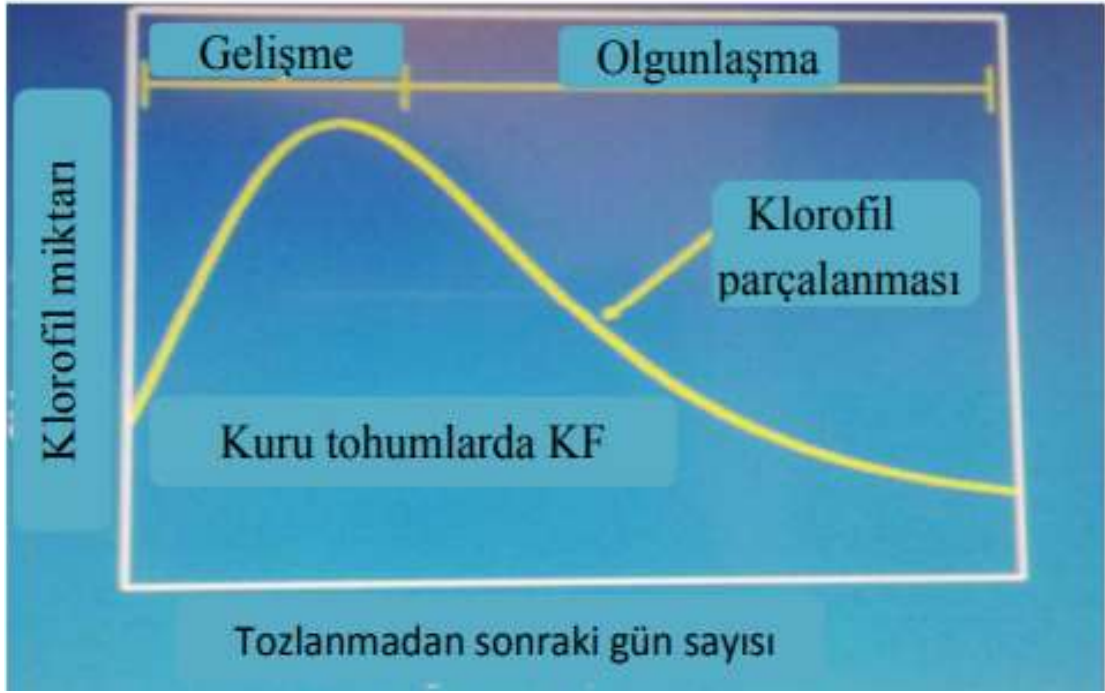
Şekil 1.1 Klorofil soğurma spektrumu (Büyük, 2022)

Klorofil pigmenti, ışık spektrumunda özellikle kırmızı ışığı absorbe etme özelliğine sahiptir ve bu durum bitkilerde, özellikle yeşil yapraklarda asimilat oluşumunun etkinliğinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Benzer bir mekanizma, tohum yüzeyindeki klorofil varlığı üzerinden olgunluk düzeyinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

Tohumlara kırmızı ışık (670–700 nm dalga boyu) verildiğinde, yansıyan ışık miktarı olgunluk göstergesi olarak değerlendirilebilmektedir. Eğer tohum, klorofil içeriğini olgunlaşma süreci boyunca büyük ölçüde kaybetmişse, kırmızı ışığı absorbe edemeyecek ve daha fazla yansıtacaktır. Bu tür tohumların daha olgun olduğu, dolayısıyla daha yüksek çimlenme kapasitesine ve fide gelişim gücüne sahip olacağı öngörülmektedir (Şekil 1.1 ve 1.2). Buna karşın, daha az olgun tohumlardan oluşan partilerde, kabuk yüzeyinde klorofil miktarının yüksek olması nedeniyle kırmızı ışığın daha fazla absorbe edildiği, dolayısıyla yansımanın düşük olduğu gözlemlenir. Bu durum, söz konusu tohumların canlılık ve kalite açısından daha düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir.

Söz konusu teknik; lahanalar (Jalink vd. 1998a, 1998b; Dell'Aquila vd. 2002; Yadav vd. 2015), havuç (Groot vd. 2006), ıspanak (Deleuran vd. 2013), biber (Kenanoğlu vd. 2013) ve fesleğen (Altizani-Junior vd. 2023) gibi çeşitli sebze tohumlarında başarıyla uygulanmıştır. Nitekim Kenanoğlu vd. (2013), depolanmış biber tohumlarında söz konusu yöntemle kalite ayırımının etkin biçimde yapılabildiğini ortaya koymuştur.

Sebze tohumlarında tarla bitkilerine göre kademeli çiçeklenme ve dolayısıyla da tozlanma zamanı ve tohum olgunluğunda farklılaşmalar daha fazla görülür. Örneğin domateste meyveler salkımlarda, biberde farklı katmanlarda, hıyarda farklı boğumlarda oluşur. Dolayısıyla bu yapısal farklılıklar nedeniyle aynı anda beraberce hasat yapıldığında tohum partileri içinde kısmen daha az olgunlaşmış (geç gelen salkımlardaki meyveler) ve daha iyi olgunlaşmış (ilk salkımlar, ilk boğumlar vs.) tohumların bir arada bulunması kaçınılmaz hale gelmektedir. Kademeli meyve hasadı uygulansa dahi, üretim sürecinde bu heterojenliği tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmamaktadır. Bu bağlamda, sebze tohumlarında fizyolojik olgunluğun düzeyini ve kaliteyi hasat sonrası ayrıştırabilme imkânı sunan non-destructive (tahribatsız) görüntüleme tabanlı analiz yöntemleri, oldukça değerli araçlar olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 1.2 Tohum gelişimi ve olgunluk safhasındaki klorofil miktarı değişim (Kenanoğlu, 2012)

Ülkemizde domates, biber, hıyar ve patlıcan gibi sebze türlerinde F_1 hibrit tohum üretimi hem üretim hacmi hem de ticari değeri açısından büyük önem taşımaktadır. Tarım ve Orman Bakanlığı'nın 2024 yılına ait tohumluk üretim istatistiklerine göre, Türkiye'de yaklaşık 13.907 kg domates, 58.821 kg biber, 51.129 kg hıyar ve 7.285 kg patlıcan F_1 hibrit tohumu üretilmiştir. Bu türler hem açık alanlarda hem de örtü altı üretimde yaygın olarak yetiştirildiğinden, yüksek kaliteli tohum kullanımına olan ihtiyaç kritik bir düzeydedir. Dolayısıyla bu ürün gruplarında, tohum kalitesinin erken ve tahribatsız biçimde belirlenmesine olanak sağlayacak teknolojilere duyulan gereksinim her geçen gün artmaktadır (Balkaya vd., 2025). Belirtilen türlerde ve diğer bazı sebzelerde bin adetlik tohum paketlerinin fiyatının 10.000 TL'ye kadar çıkabildiği belirtilmektedir. Tohumluk ithalat istatistiklerine göre, Türkiye'de sebze tohumu ithalatı ise özellikle domates ve hıyar türlerinde dikkat çekici düzeydedir. Bu durum sebze tohumculuğunda dışa bağımlılığın olduğunu ve yerli hibrit tohum üretiminin artırılmasını hem ekonomik sürdürülebilirlik hem de gıda arz güvenliği açısından zorunlu hâle geldiğini göstermektedir. Dolayısıyla bu ürün gruplarında, tohum kalitesinin erken ve tahribatsız biçimde belirlenmesine olanak sağlayacak teknolojilere duyulan gereksinim her geçen

gün artmaktadır. Ayrıca Şu an itibariyle Őlkemizde en fazla çeşidinin tescil edildiği ve kullanımda olduğu 4 tŐr tezdde söz konusu olan tŐrlerdir.

Çizelge 1.1 Sebze tohumu Őretim ve ithalat verileri (TOB, 2024)

Sebze TŐrŐ	Yerli Tohum Őretim (kg)	İthalat Tohum (kg)
Biber	58.821	6.987
Hıyar	51.129	19.280
Domates	13.907	11.372
Patlıcan	7.285	540
Toplam	131.142	38.179

Belirtilen bilimsel veriler ıŐıĐında bu çalışmanın amacı;

A) Klorofil ve kırmızı ışık (670 nanometre) iliŐkisine bağlı olarak tohum yapısına zarar vermeden ve herhangi bir Ön işlem uygulamadan tohum partisinden yansıyan kırmızı ışık oranını (kırmızı ışık soğurma oranı, KISO) tespit eden prototip bir ekipman geliştirmek. Ayrıca bu ekipmanın iŐlerliĐini sağlayacak bir elektronik yazılım Őretmek,

B) Tohuma verilen kırmızı ışık kaynağı ile tohumdan yansıyan kısmı sensör yardımıyla okuyarak –KISO, kırmızı ışık soğurma oranını- saptayarak bu değerin tohum partisinin çimlenme/tohum gŐcŐ ile ilişkili olup olmadığını domates, biber, hıyar ve patlıcan tohumlarında belirlemektir. Ekipmanın baŐarisını a) az olgun ve olgun tohumlarda b) ticari olarak piyasada pazarlanan tohum partilerinde test etmektir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 İmaj Analizleri İle İlgili Çalışmaların Temeli

İmaj analizi olarak adlandırılan sistemlerin temel prensibi bir görüntü yakalayıcı aracılığı ile hazırlanan numunelerden alınan görüntünün bilgisayara aktarılması ve bilgisayarda bir program ile kullanıcı tanımlı, yarı otomatik ya da otomatik olarak veri analizlerinin yapılması esasına dayanmaktadır. Dijital fotoğraflardan çeşitli görüntü işleme programları, tarayıcılar (scanner) ile, X-Ray metotları, Red-Green-Blue (RGB), Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI), Nükleer Manyetik Rezonans (NMR), Klorofil Floresan Ayrım (KF) gibi farklı metotlar kullanılarak imaj analizleri gerçekleştirilir. İmaj analizi yöntemlerinin tohum teknolojisinde tercih edilmesinin birden fazla nedeni bulunmaktadır (Galletti vd. 2020). Bu nedenler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- İşlem tohum yapısına ve tohuma zarar vermeden gerçekleştirilir.
- Seçilen yönteme göre maliyetler değişse de elde edilen cihazla uzun yıllar sürekli işlemler tekrarlanabilir.
- Renk tespiti gibi öznel değerlendirmeler, sayısal verilere dayalı yöntemlerle kişi etkisinden bağımsız şekilde yapılmaktadır.
- Tohum analisti açısından kolay uygulanabilir bir yöntem olup, sürekli izleme gereksinimini ortadan kaldırarak süreci pratik hale getirir.
- Dijitalleştirilmiş görüntüler kısa sürede ve yüksek hızda elde edilebilmekte, bu da değerlendirme süreçlerinin etkinliğini artırmaktadır.
- Tohum ve fide görüntüleri büyütülebilir, dijital olarak işlenebilir ve elektronik ortamda paylaşılabilir.
- Dijital görüntüler, içerdikleri nesnelere renk, boyut ve şekil özelliklerine ilişkin hızlı, hassas ve tekrarlanabilir ölçümlerin gerçekleştirilmesine olanak tanır.

Tohum morfolojisinin analizi ve rengin nicel bir şekilde tanımlanması karmaşık bir yapı gösterir ve her zaman mümkün değildir (Perrino vd. 1984). *Trifolium* türlerinde tohum

rengine bağlı olarak çimlenme hızı, tohum sertliği ve kalite parametrelerinin değiştiğini ve bu ilişkinin genetik ve çevresel faktörlerle belirlendiğini bildirmiştir (Jansen, 1995).

Ayrıca, tohumların maksimum kaliteye ulaştığı gelişim evresinde, tohum rengi ve şeklinin farklılaşması da mümkündür (Demir ve Ellis 1992). Geçmiş yıllarda uzunluk ve genişlik gibi boyutsal ölçümlerin belirlenmesi genellikle kumpaslarla manuel olarak yapılmıştır. Tohum büyüklüğünün belirlenmesi için alternatif bir yöntem olarak elekler kullanılmıştır. Bu tür ölçümlerin öznelliğinin yanı sıra, bazı familyalarda (örn. *Cynomoriaceae*, *primulaceae*, *rubiaceae*, *scrophulariaceae*, vb.) tohumların oldukça küçük olmasından kaynaklanan zorluklar, imaj analizi tekniklerinin uygulanması sayesinde mekanik olmaktan çıkararak elektronik metotlarla aşılabilir hale gelmiştir. Sonuç olarak, imaj analizi teknikleri, dijital görüntülerde yer alan nesnelerin renk, boyut ve morfolojik özelliklerini yüksek doğrulukla ve tekrarlanabilir şekilde ölçme olanağı sunar. Bu yaklaşım, tohumlara zarar vermeden (non-destructive) kalite değerlendirmesi yapılmasına ve analiz sürecinin önemli ölçüde hızlandırılmasına olanak sağlar.

Renk, şekil ve boyut gibi morfolojik özelliklerin yanı sıra, klorofil gibi fizyolojik göstergelerin belirlenmesinde de imaj analiz teknikleri etkin şekilde kullanılabilir. Tohum olgunluğu ve canlılığı ile yakından ilişkili olan klorofil, bitkisel dokularda fotosentetik aktivitenin temel bileşenlerinden biri olup, tohum gelişim sürecindeki fizyolojik olgunluk düzeyini yansıtan önemli bir biyobelirteçtir. Klorofil molekülünün uygun dalga boyunda uyarıldığında hızlı şekilde floresans (yansıma) gösterdiği bilinmektedir (Müller 1874, Nobel 1970). Bu özellik, özellikle olgunlaşmamış tohumların kabuğundaki yeşil rengin, klorofil pigmentinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Werker 1997).

Steckel vd. (1989), farklı olgunlaşma aşamalarında hasat edilen havuç (*Daucus carota* L.) tohumlarında, gelişim sürecine bağlı olarak tohum kabuğundaki toplam klorofil içeriğinin azaldığını ve bu azalmayla birlikte çimlenme performansının arttığını bildirmiştir. Bu korelasyon doğrultusunda, araştırmacılar tohum ekstraktlarının klorofil içeriğini değerlendirmek ve optimum hasat zamanını tahmin etmek amacıyla renk kartlarına dayalı basit saha testleri önermiştir.

Tohum türlerinin çoğunluğunda, olgunlaşma süreci boyunca klorofil içeriği azalırken tohum kabuğu yeşil rengini kaybederek sarıya ya da türe özgü başka bir renge dönüşmektedir. Bu dönüşüm süreci “klorofil parçalanması” ya da “gradasyon” olarak tanımlanır. Ayrıca bazı flavenol bileşikleri de olgunluk belirteci olarak değerlendirilebilir. Örneğin, Taylor vd. (1990), sinapın bileşiğinin floresan özelliğinden yararlanarak ölü Brassica tohumlarını canlı olanlardan ayırt etmeye yönelik yeni bir teknik geliştirmiştir. Dolayısıyla, klorofil içeriğinin doğru ve tahribatsız biçimde tespit edilebilmesi, modern imaj analiz tekniklerinin tarımsal uygulamalarda artan önemini ortaya koymaktadır.

2.2 Bilgisayarlı İmaj Analizi ve Tarayıcı Sistemleri

Kamera ve tarayıcı gibi görüntüleme cihazlarıyla elde edilen görsellerin, bilgisayar destekli analiz yöntemleriyle değerlendirilmesi, tarımsal görüntüleme teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntemler, özellikle fide morfolojisi ve canlılık düzeyinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak tanımakta; otomatik sınıflandırma ve standardize edilmiş kalite ölçümleri için güvenilir bir temel sunmaktadır.

Tarayıcı tabanlı imaj analiz yöntemlerinin öne çıkan avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Düşük ekipman maliyeti,
- Tohum analisti açısından kolay uygulanabilirlik,
- Alan derinliği yüksek ve aydınlatma koşullarından bağımsız olarak dijitalleştirilmiş görüntülerin hızlı bir şekilde elde edilebilmesi,
- Gelişen teknolojiyle birlikte tarayıcı kalitesinde sürekli artış sağlanması,
- Tohum ve fide görüntülerinin pratik ve güvenilir biçimde analiz edilebilmesi.

Fidelerin bilgisayarlı görüntü analizine dayalı incelenmesine yönelik erken dönem çalışmalardan biri, buğday çeşitlerinin tanımlanmasında morfolojik karakterlerin makine görüşü ile güvenilir biçimde ölçülebileceğini ortaya koymuştur (Keefe ve Draper 1986).

Ayrıca McCormac vd. (1990) görüntü analizi yöntemini kullanarak otomatik canlılık testi üzerinde bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada 3 adet marul ve 1 adet havuç tohum lotunda eğimli tahta testini örnek alarak, canlılık testlerinden elde edilen verilerin ölçülmesi ve kaydedilmesi için görüntü analizinin potansiyeli araştırılmıştır. Burada bildirilen çalışma iki aşamada düşünülmüştür: Görüntü analizi ile eğimli tahta sonuçlarının ölçülmesi için bir yöntem geliştirilmesi (1) ve görüntü analizi ile elde edilen sonuçların klasik yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması (2). Araştırma sonuçları, imaj analizi tekniğinin, ekim aşamasında ekstra maliyetler veya zaman gereksinimleri olmaksızın, canlılık için eğimli tahta testinin (güç testi) sonuçlarını ölçmek için doğru bir araç sağlayabileceğini göstermiştir.

Çizelge 2.1 Görüntü analizi ile klasik yöntemle ait karşılaştırma tablosu (McCormac vd., 1990)

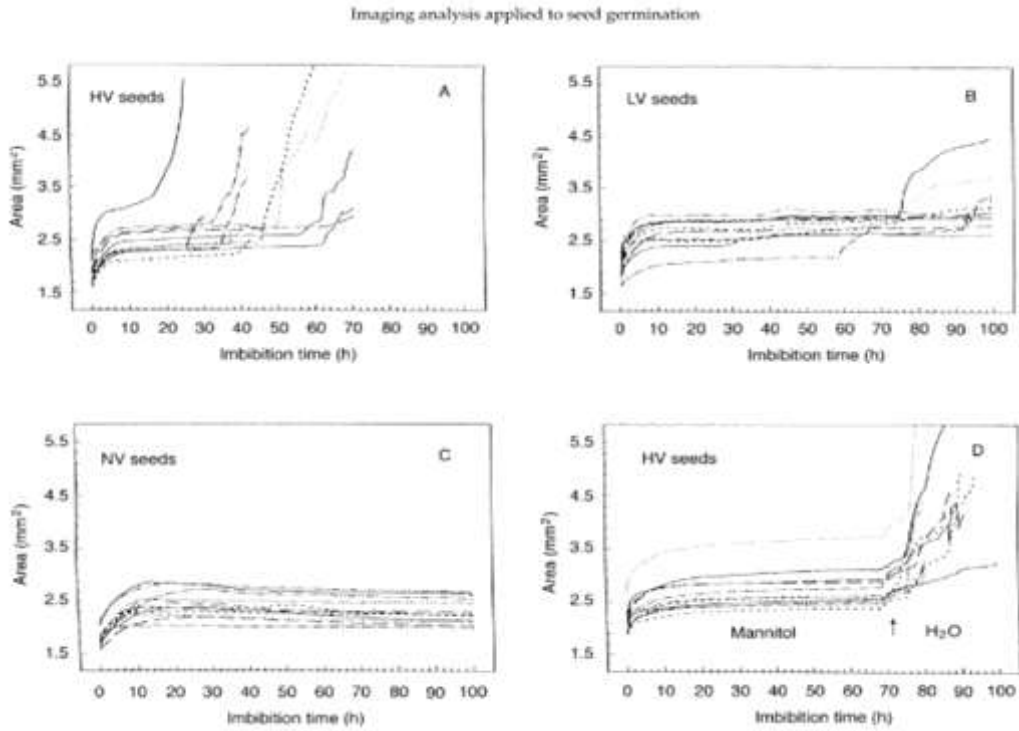
Ölçüm Yöntemi	Deneme Numarası	Tohum Partisi A (Ortalama \pm SS)	Tohum Partisi B (Ortalama \pm SS)	Tohum Partisi C (Ortalama \pm SS)	Tohum Partisi D (Ortalama \pm SS)
Elle	1	36,7 (17,5)	40,8 (23,8)	25,7 (50,4)	17,7 (76,7)
Görüntü Analizi (IA)	1	35,8 (17,5)	40,6 (22,7)	26,4 (50,3)	17,9 (72,9)
Elle	2	33,8 (20,9)	36,1 (32,2)	29,0 (47,2)	18,0 (75,9)
Görüntü Analizi (IA)	2	34,8 (21,4)	37,1 (31,9)	28,1 (47,7)	17,3 (73,4)

Her bir değer, çift katmanlı substratta tek bir denemede yetiştirilen 80 fidenin kök uzunluklarından hesaplanmıştır (dört tekrarlı plaka). T-testleri ($p = 0,05$), elle ölçüm yöntemi ile görüntü analizi yöntemi arasında ortalamalar açısından anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir.

Tohum partileri: A, B ve C — marul; D — havuç.

Howarth ve Stanwood (1993) tarafından marul ve sorgum için tüm çimlenme süresi boyunca kök büyüme hızını ölçmek üzere bir makine görüş sistemi geliştirilmiştir. Makine görüş ölçüm tekniği manuel büyüme hızı tekniğiyle karşılaştırılmıştır. Görüş sistemi manuel büyüme hızı tekniğiyle karşılaştırıldığında benzer büyüme hızı ölçümleri sağlamıştır. Sistem ve manuel ölçüm arasındaki ortalama hata marul testi için -0.13 cm ve sorgum testi için -0.07 cm olmuştur. Ayrıca bu tekniğin büyüme hızının ve yüzde çimlenmenin doğru bir temsilini de sağladığı bildirilmiştir.

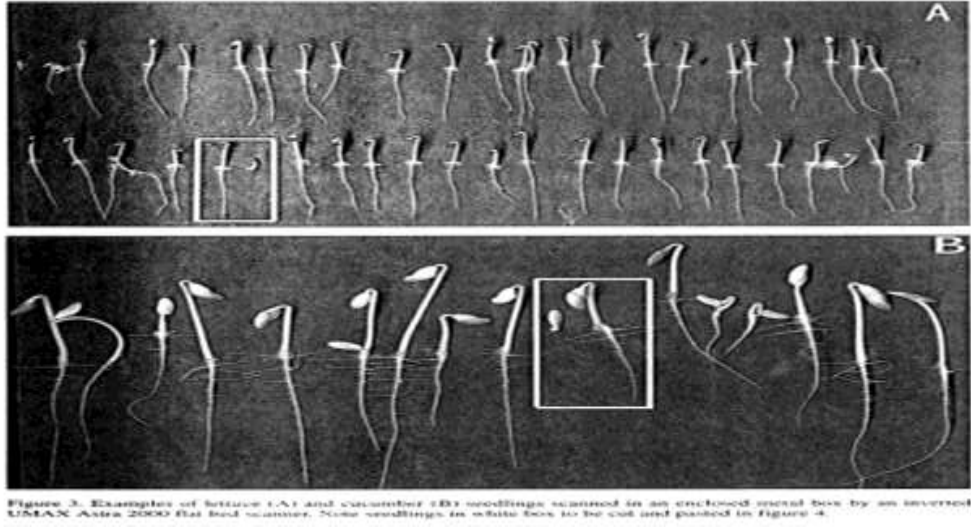
Dell'Aquila vd. (2000) beyaz baş lahana (*Brassica oleracea* L.) tohumlarının su alım sürecinin izlenmesinde görüntü analizi çalışmasını yürütmüşlerdir. Çalışmada, beyaz lahana tohumlarının su alım süresi için dört tanımlayıcı (alan, çevre, genişlik ve uzunluk) kullanılarak görüntü analizi sonuçları üretilmiştir. Farklı canlılığa sahip (yüksek, düşük canlılık ve ölü tohumlar) örneklerden elde edilen 12 tohum, 25° C' de ozmotik potansiyele sahip çözeltiyle işleme tabi tutulmuştur. Tohumlar floresan ışık tüpleriyle donatılmış bir aydınlatma masasına yerleştirilerek bir kamera sistemi ile izlenmiştir. Görüntüler bilgisayar sistemine aktarılarak, tohumların birbirini izleyen görüntülerini tek tek otomatik olarak kaydetmek ve analiz etmek için SCI-Image' da bir program yardımıyla analizler değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, her bir tohumun yaklaşık olarak küresel olduğu varsayılmıştır ve tohum boyutu değişikliğinin güvenilir bir parametresi olarak seçilen alan artışı, taze ağırlık artışı yerine su alma sürecinin iyi bir tanımlayıcısı olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.1 İmaj analizi ve lahana tohumlarında çimlenme arasındaki ilişki grafiği (Dell'Aquila vd. 2000)

Yüksek canlılığa sahip (HV) tohumlar için faz I, oldukça muntazam bir alan artışı ile karakterize edilirken, faz II, çimlenme tamamlanıncaya kadar zaman içinde büyük ölçüde değişmiştir. Düşük canlılığa sahip (LV) tohum örneğinde (Şekil B), alan artışının faz III'ü çimlenmemiş tohumlarda tespit edilmemiştir. Ölü tohumlarda (NV) tohumları (Şekil C), faz I sırasında hızlı bir alan artışı göstermiş, faz III, ölü tohumlar için beklediği gibi tespit edilmemiştir. HV tohumları 72 saat 1.5 MPa mannitol ile muamele edildiğinde ve daha sonra ozmotik içermeyen agaroz ortamına aktarıldığında, faz III başlangıcının (kök oluşumu) senkronizasyonunu göstermiştir. Bu deney, ozmotik stres altında tohumların boyut değişikliklerini tespit etmede görüntüleme tekniklerinin uygulanabilirliğinin bir örneğini ortaya koymaktadır.

McDonald vd. (2001) tarafından, marul ve hıyar tohumlarında bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile tohum ve fide görüntülerinin tarayıcılar kullanılarak kolayca ve ucuz bir şekilde dijitalleştirilmesi sağlanmıştır. Tohumların ve fidelerin dijitalleştirilmiş görüntülerini renkli olarak e-posta ekleri veya örneklerin görsel kitaplıklarının bulunduğu web sitelerine aktarılan verilerle hızlı bir şekilde değerlendirme olanağı ortaya konmuştur. Bu çalışmanın amacı, saflık ve çimlenme testinin standardizasyonunu geliştirmek için tohum test laboratuvarına uyarlanabilecek rutin bir görüntüleme platformu geliştirmektir. Tohumlar, doğrudan düz yataklı bir tarayıcıya yerleştirilmiş ve tek tip bir kontrast sağlamak için tek bir yeşil kağıt tabakasıyla kaplanarak görüntüler, düz yataklı tarayıcıda maksimum çözünürlükte (1200 dpi) taranmıştır. Tarayıcıda avantaj, kök kıllarının ve diğer hassas yapıların zarar görmemesidir. Fideler tarandıktan ve yüksek çözünürlüklü (1200 dpi) dosyalar halinde sayısallaştırıldıktan sonra, normal / anormal fidelerin doğrudan karşılaştırmaları için kesilip yapıştırılabilmekte, yapı tanımlaması için etiketlenebilmekte, JPEG dosyası biçiminde kaydedilerek e-posta eki olarak gönderilebilmektedir. Şekil 2.5'te bir çimlenme kurutma kağıdında normal ve anormal marul ve hıyar fidelerinin örnekleri gözlenmektedir.



Şekil 2.2 Marul ve hıyar fidelerinin normal ve anormal fide tarayıcı görüntüleri (McDonald vd. 2001)

Bu çalışma, tarayıcıların tohum ve fide görüntülerini ekonomik ve yüksek kaliteli bir biçimde dijitalleştirmeye olanak sağladığını ortaya koymuştur. Elde edilen görüntüler, tohum analistlerinin gelecekteki eğitimlerinde kullanılmak üzere kapsamlı bir tohum kütüphanesi oluşturmak ve/veya normal fide örnekleri geliştirmek amacıyla arşivlenebilmektedir. Ayrıca, bu görüntüler karşılaştırma yapılmasını kolaylaştırmak adına başkalarıyla da paylaşılabilir. Bu çalışmada açıklandığı gibi bu görüntülerin hızlı bir şekilde elde edilme olanağı, tohum testinin standardizasyonuna önemli bir katkı sağlayabilir.

Geneve ve Kester (2001), tarayıcıdan elde edilen dijital görüntülerin bilgisayar destekli analizini kullanarak çimlenmeden sonra fide boyutunun değerlendirilmesi çalışmasını yürütmüşlerdir. Bu araştırmanın amacı, kuvvet testi olarak kullanılmaya uygun, dijital kök çıkıntısı görüntülerini kullanan bilgisayar destekli bir değerlendirme sistemi geliştirmektir. Bu araştırma için geliştirilen temel hususlar arasında, dijital görüntüler elde etmek için düz yataklı bir tarayıcının kullanılması ve taramayı kolaylaştırmak için şeffaf bir çimlenme ortamının değerlendirilmesi yer almaktadır. Petrilerde yetiştirilen farklı küçük tohumlu (*impatiens walleriana*, petunya, *lisianthus*, karnabahar, domates, biber, *vinca*, marigold) türlerde de dijital görüntüleme alımı denenmiştir.

Çizelge 2.2 Altı küçük tohumlu türde ilk kök oluşumundan 2 gün sonra ölçülen fide uzunlukları (Geneve ve Kester 2001)

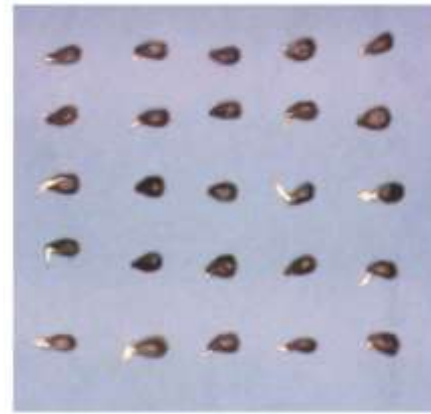
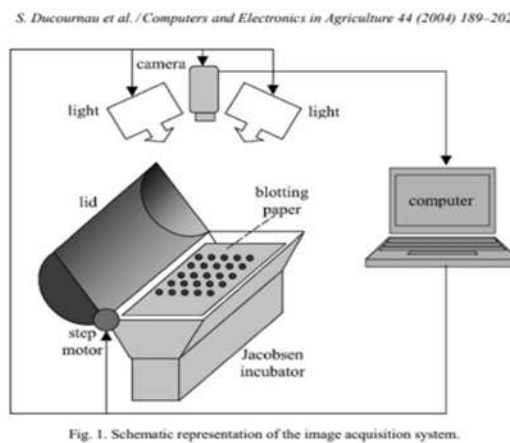
Ortam/Yöntem	Karnabahar (mm)	Biber (mm)	Domates (mm)	İmpatiens (mm)	Vinca (mm)	Kadife Çiçeği (mm)
Film	10,2	6,9	10,9	7,5	5,6	20
Kağıt	9,5	10,4	7,5	6	5,8	21,8
Emici Kağıt	8,1	12,8	13,3	8,4	6,5	21,2
Analist #1	8,5	6,5	11,6	6,1	4,9	16,9
Analist #2	11,6	6,7	10,9	8,6	5,8	20,9
Analist #3	10,2	6,9	10,9	7,5	5,6	20
Bilgisayar	10,7	5	11,7	8,6	4,8	19,4

Her bir dijital görüntü ve bilgisayar destekli analiz, petri kabı başına 2 dakikadan az bir süre gerektirmiş ve verileri elektronik çizelge biçiminde kaydederek ek zamandan tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca, her bir tohum partisiyle ilgili bir sorun ortaya çıkması durumunda, dijital görüntüler arşivlenebilir ve tohum partisinin başlangıç kalitesinin kanıtını sağlamak için yeniden değerlendirilebilir. Selüloz filmin bir çimlenme ortamı olarak avantajı, saydam olması ve dijital görüntülerin düz yataklı bir tarayıcı kullanılarak kolayca alınmasına izin vermesidir. Ek olarak, tohum test laboratuvarları tarafından gerçekleştirilen bir petri kabı testinin kullanıldığı standart çimlenme koşullarıyla uyumludur. Tek tip aydınlatma ve düz yataklı tarayıcı, laboratuvarlar arasında tekrarlanabilir sonuçlar sağlayacaktır.

Dell'Aquila (2003) yaptığı çalışmada tuz stresi koşulları altında strese giren lahana tohumlarında su alımını incelemek için bir araç olarak görüntü analizini kullanmıştır. Bu çalışmada 35°C ve %15,8 nem içeriğinde 20 gün boyunca yaşlandırılan lahana tohumları, standart çimlenme testi ve tuz stresi altında çimlenme testi ile bilgisayar destekli görüntü analiz sistemiyle birleştirilerek su alımı sırasında çimlenme ve su alımı açısından izlenmiştir. Tohumlar 8. veya 16. saatte NaCl çözeltisine aktarıldığında, tohum alanındaki artış 24. saate kadar yavaş seyretmiştir. Ancak 24. saatte stresin kaldırılmasının ardından, ilk saat içerisinde su alımına bağlı olarak tohum alanında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, bozulmuş tohumlarda daha sınırlı düzeyde gerçekleşmiş; ayrıca 24–25 saatlik emilim sürecinde tohumdan sızan çözeltinin elektriksel

iletkenliğinde de artış kaydedilmiştir. Çimlenme parametreleri, sızıntı suyunun iletkenliği ve 24–25 saatlik süre zarfında tohum alanındaki değişim arasında anlamlı korelasyonlar saptanmıştır.. Bu bulgular, tohum çimlenmesi ve boyutunun hızlı görüntü işleme ve kaydının, tohum hidrasyon durumunun herhangi bir varyasyonunun doğru bir şekilde belirlenmesi için yenilikçi bir tekniği temsil edebileceğini göstermektedir. Ek olarak, tohum alanının ölçüsü, tohum kuvvetinin ve hem ilerleyen bozulma hem de tuz stresine toleransın iyi bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

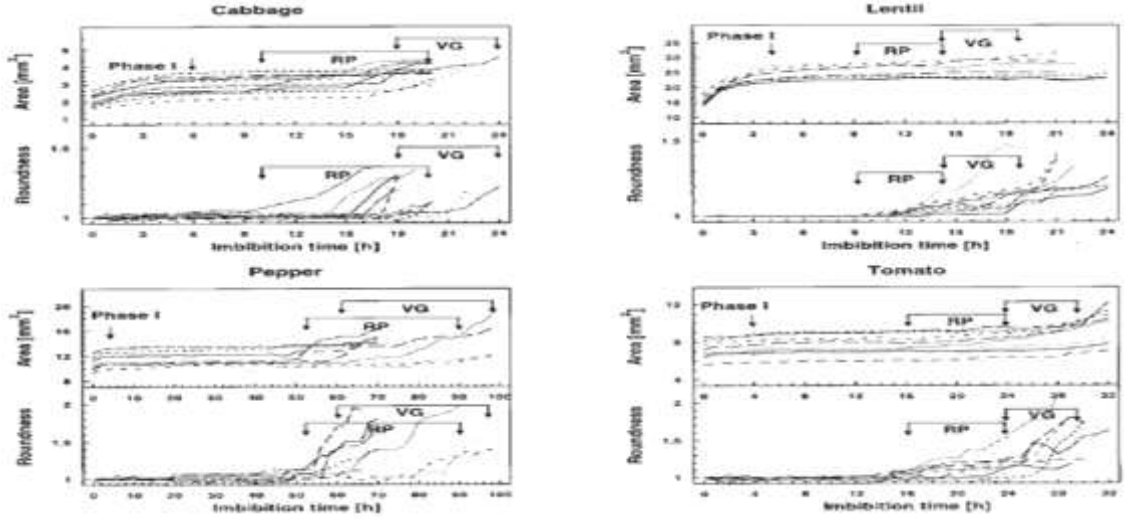
Ayçiçeği tohumlarının çimlenme oranının otomatik olarak izlenmesi için bir görüntü yakalama sistemi Ducournau vd. (2004) tarafından gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, kontrollü aydınlatma, sıcaklık ve higrometrik (nem ile ilgili) koşullar altında fidelerde ortaya çıkan kök uçlarının sayısını saymak için tasarlanmış bir makine görme sistemi sunmaktadır. Otomatik edinim sistemi, tamamen denetimsiz bir şekilde iki adımda çalışan bir algoritma kullanır. İlk adım, renkli görüntüleri ikili görüntülere dönüştürmeyi mümkün kılan bir sınıflandırma prosedüründen oluşur (tohumlar beyaz, arka plan siyah). İkinci aşamada, ortalama çimlenme zamanı (OÇZ) sağlanarak çimlenen tohumların sayımı gerçekleştirilmiştir. Yöntem, ay çekirdeği setlerinde sistem tarafından sağlanan sonuçların uzman teknisyenler tarafından değerlendirilen sonuçlarla karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır.



Şekil 2.3 Tohum görüntüleme yönteminin şeması ve ay çekirdeği tohumlarında elde edilen görüntü (Ducournau 2004)

Çimlenme (kökçük çıkışı) ekimden 20 ila 96 saat sonra her saat görüntü kaydedilerek izlenmiştir. Görüntü edinimine bir örnek (kök ucu çıkmış tohumların yakalanmış görüntüleri) Şekil 2.3'te verilmiştir. Burada sunulan otomatik görüntü elde etme ve bölümlenme sistemi, daha güvenilir ortalama çimlenme sürelerine yol açan, daha kısa zaman aralıklarında çimlenmiş tohum sayımlarının yapılması avantajıyla, klasik uzman gözlemi tarafından sağlananlardan daha uygun sonuçlar vermiştir. Tohumların düzenli olarak inkübasyon masasına yerleştirilmesini gerektirmesine rağmen, sistem ekimden sonra insan müdahalesi olmadan ilerlediğinden genel prosedür uygulayıcılar için daha az zaman almıştır.

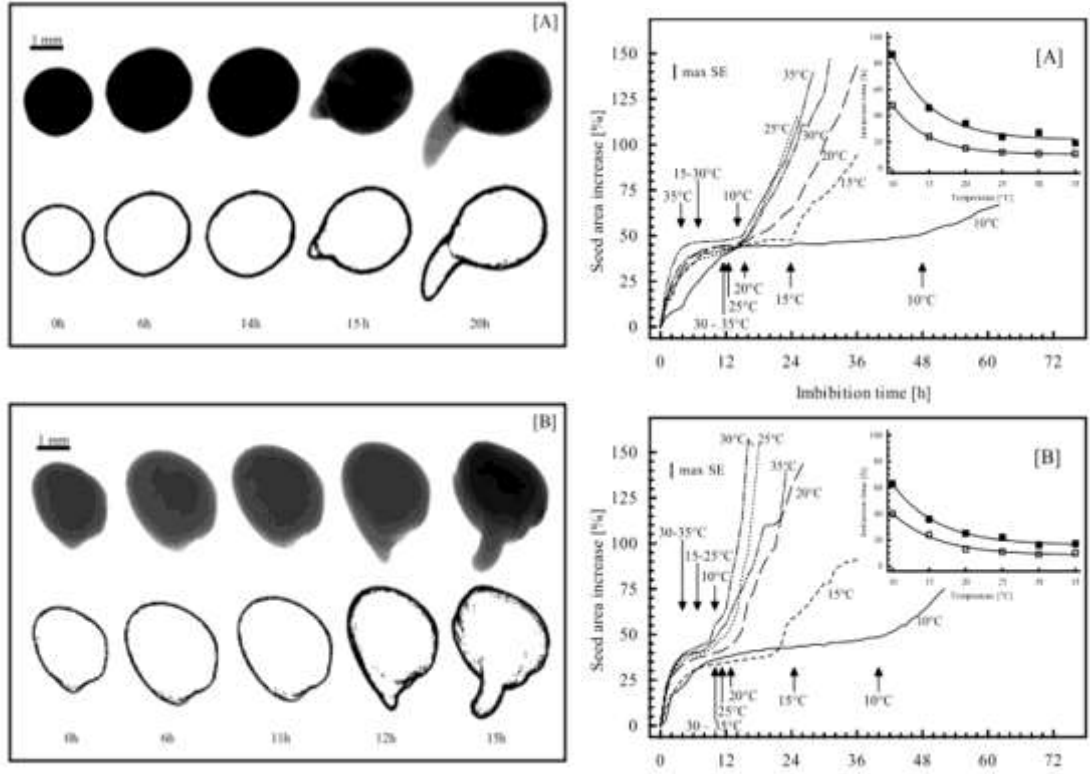
Dell'Aquila (2004) görüntü analiz sistemi ile izlenen lahana, mercimek, biber ve domates tohumlarının çimlenmesi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada lahana, mercimek, biber ve domates tohumlarında su alım süresi seyrini incelemek için bir görüntü analiz sistemi uygulanmıştır. Ölçüm için kullanılan yazılım ile her tohum için sırasıyla tohum boyutu ve şeklinin tanımlayıcıları olarak alan ve yuvarlaklık faktörü belirlenmiştir. Alan parametresini kullanarak, dört tohum türünün tümü için şişme süreci, üç fazlı su alım modelinin faz I ve faz II' sinin ayırt edilebildiği bir dizi eğri ile tanımlanmıştır. Kök çıkıntısı ve uzaması meydana geldiğinde faz II ve faz III arasındaki sınırlar, kök büyümesini takiben tohum şekli değiştiğinde hızla artan yuvarlaklık faktörü ile tohum görüntüleri analiz edilerek belirlenebilmiştir. Yuvarlaklık faktörünün normalleştirilmiş değerleri ile kök uzunluğu arasında kurulan yakın korelasyonlar, tohum şekli tanımlayıcısının "görünür çimlenme" başlangıcında dolaylı olarak kök uzamasını tahmin etmek için kullanılabileceğini belirtmiştir.



Şekil 2.4 Su alımı sırasında tohumlardaki yuvarlaklık ve alan açısından değişimleri (Dell'Aquila, 2004)

Şekil 2.4'te tür olarak 12 lahana, 9 mercimek, biber ve domates tohumlarının yuvarlaklık faktörü ve tohum alanı ölçümlerinde değişiklikler gösterilmiştir. Kök uzunluğu 1.5-2.0 mm arasında değiştiğinde, şişme sürecinin 1. aşamasının sonu ve kök çıkıntısı (RP) ve "görünür çimlenme" (VG) başlangıç zamanları belirlenmiştir.

Dell'Aquila (2005) brokoli (*Brassica oleracea var. italica*) ve turp (*Raphanus sativus*) tohumlarının çimlenmesini izlemek için görüntü analizinin kullanılması üzerine çalışma yürütmüştür. Brokoli ve turp tohumu çimlenmesini farklı sıcaklık rejimleri altında incelemek için çimlenme testi, son çimlenme yüzdesini, başlangıcını ve oranını değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu yöntem, tek tohumlarda saptanan tohum alan artışının ve tespit edilen kök oluşumunun zamanlamasının değerlendirilmesi yoluyla imbibisyon (su alım) aşamalarının izlenmesinde daha doğru olan bilgisayar destekli bir görüntü analizi testi ile entegre edilmiştir. Ek olarak, tohum alanı artışı, klasik bir çimlenme testi ile görünür çimlenmenin puanlandığı zaman aralığında kök uzama oranı ile yakın bir ilişki kurmak için de kullanılmıştır.

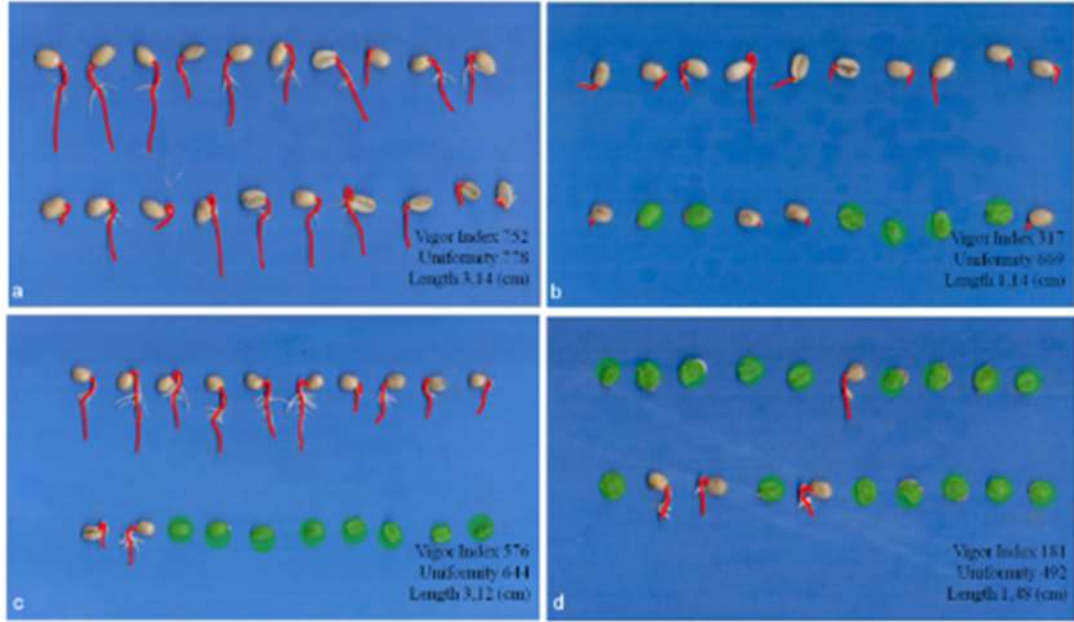


Şekil 2.5 Brokoli (A) ve turp (B) Tohum görüntüleri ve imbibasyon aşamaları (Dell'Aquila, 2005)

İmbibisyon aşamaları ve kökçük çıkıntısı oluşumu, brokoli ve turp tohumlarında 72 saat boyunca görüntü analiz teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Bu yöntem, su alımının trifazik eğrisinin (Bewley 1997) I. fazına karşılık gelen, tohum alanındaki hızlı artış evresinin kapsamını belirlemeye olanak sağlamıştır (Dell'Aquila vd., 2000). Ayrıca, kök ucunun tohum kabuğunu geçmesiyle birlikte gözlenen tohum alanındaki yavaş artışın (su alımının II. fazı), gecikme fazının sona erdiğine işaret eden bir gösterge olduğu tahmin edilmektedir. Brokoli tohumlarında I. fazın süresi, 15–30 °C sıcaklık aralığında 6–7 saat ile sabit kalırken; 10 °C'de bu süre 13–15 saate çıkmakta, 35 °C'de ise 3–4 saate düşmektedir. Benzer bir eğilim turp tohumlarında da gözlemlenmiş; faz I süresi 15–25 °C aralığında 6–7 saat, 10 °C'de 9–10 saat ve 30–35 °C'de 3–4 saat olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, II. faz süresi, aynı sıcaklık koşullarında bile tohumlar arasında faz I'e kıyasla daha yüksek düzeyde varyasyon göstermiştir.

Trujillo vd. (2019), Seed Vigor Imaging System (SVIS) kullanarak kahve tohumlarının (*Coffea arabica L.*) canlılığını fide görüntüleri üzerinden değerlendirmiştir. Bourbon ve

Catucaí 20/15 çeşitlerinden alınan tohum partileri üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, SVIS analiz sonuçları geleneksel vigor testleriyle karşılaştırılmış ve benzer doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. SVIS yöntemiyle, 20 günlük fidelerin dijital görüntülerinden yüksek ve düşük vigor seviyeleri başarılı şekilde ayrıştırmış, bu da sistemin tohum canlılığını değerlendirmede etkili bir araç olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.6 Kahve çekirdeği canlılığını değerlendirmek için fidelerin dijital görüntüleri (Trujillo, vd. 2019)

Limão vd. (2023), mercimek tohumlarında vigor değerlendirmesi için SAPL ve ILASTIK yazılımlarını kullanarak görüntü analizlerinin, fide uzunluğu ve canlılık sınıflandırmasında güvenilir ve hızlı bir alternatif sunduğunu göstermiştir.

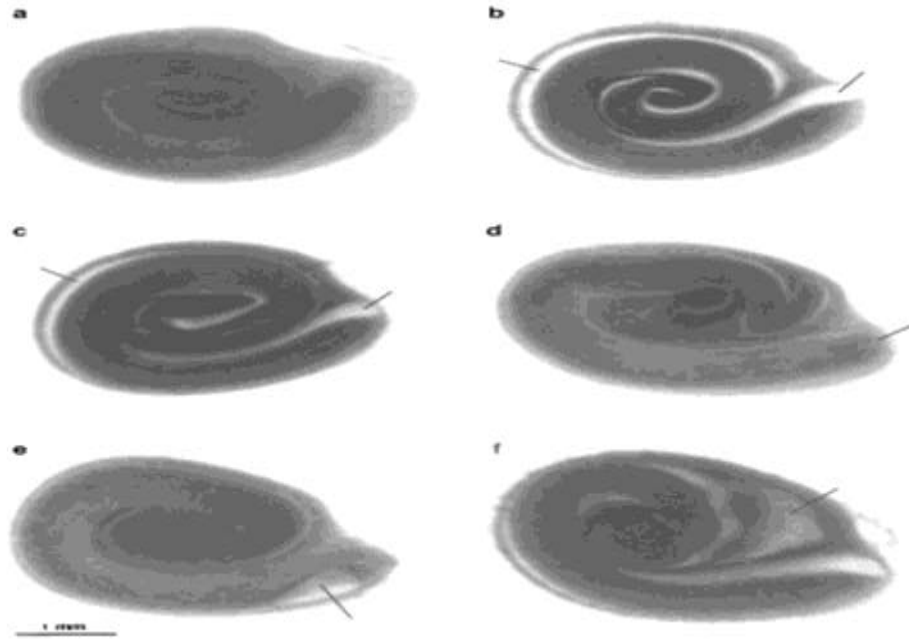
Yang vd. (2023) çim tohumlarında tohum çimlenmesinin tahmininde imaj analizleriyle tohum çimlenmesinin %94-99 düzeyinde olanlarının ayrılabilmesini ve bunun tohum kabuğunun renk değişimi ve şekliyle sağlanabildiğini ortaya koymuşlardır. Çim tohumlarının arazide kullanılırken daha yüksek canlılıkta olanlarını ayırarak arazide daha kuvvetli bitki gelişimi için yarar sağlamamıştır.

2.3 X-Işını (Radyografi) Tabanlı Görüntüleme Yöntemleriyle Tohum Analizi

X-ışını görüntüleme, tohumların iç yapısını tahribatsız biçimde analiz ederek embriyo, endosperm ve boşluk oranları gibi morfolojik unsurların belirlenmesini sağlayan bir tekniktir. Bu veriler, çimlenme yeteneği ve fide kalitesi gibi fizyolojik özelliklerle ilişkilendirilerek kullanılmaktadır.

X-ışını radyografi teknikleri, tohumların iç morfolojik özelliklerini görselleştirerek çimlenme başarısı ve fide canlılığı üzerine erken tahminler yapılmasını sağlamaktadır. Özellikle embriyonun gelişim düzeyi, endosperm dağılımı, iç boşluklar ve yapısal bütünlük gibi unsurlar bu yöntemle incelenebilmektedir. Çalışmalar, bu yapısal verilerin çimlenme oranı ve fide morfolojisiyle yüksek korelasyon gösterdiğini ortaya koymuştur. X-ışını görüntüleme, klasik çimlenme testlerine alternatif olarak zaman kazandıran, tahribatsız ve standartlaştırılabilir bir araç olarak öne çıkmaktadır.

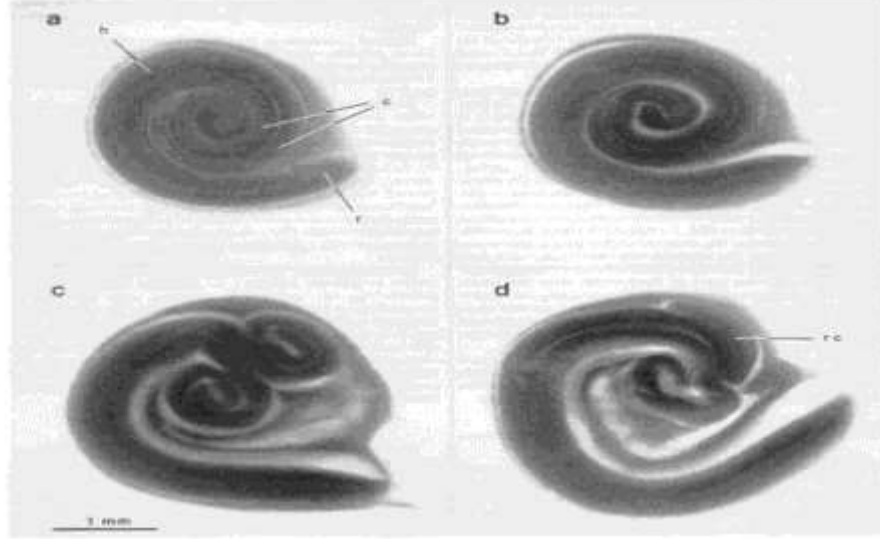
Liu vd. (1993) 'Domates tohumlarının su alımı sırasında embriyo ve endosperm morfolojisindeki değişiklikler üzerine X-Ray (röntgen) çalışmaları' başlıklı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada osmopriming ve hidropriming sırasında domates tohumundaki morfolojik değişiklikler, X-ışını fotoğrafları kullanılarak takip edilmiş ve embriyo, endosperm ve tohum içi boş alanlar ölçülmüştür. Hem osmopriming hem de hidropriming, neredeyse tamamı tohumun iç kısmında, boş alan gelişimiyle sonuçlanmıştır. Su alımı sırasında canlı tohumlarda, kök çıkışı safhasına kadar endospermde herhangi bir bozulma tespit edilmemiştir. Doğrudan hasattan sonra, yani taze durumda ozmotik uygulama yapılmış tohumlar, herhangi bir boş alan göstermezken, serbest alan normal olarak dehidrasyon ve ikinci bir priming işleminden sonra alan gelişimi olmuştur. Bu sonuçlar, osmopriming ya da hidropriming işlemleriyle iç boşluk oluşumunu tetiklemek için, öncesinde bir dehidrasyon aşamasının gerekli olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, iç boşluk alanındaki artışın, tekrar kurutma işlemi sırasında embriyo kök ucunda meydana gelen potansiyel hasarların bir göstergesi olabileceği de belirtilmiştir.



Şekil 2.7 Domates tohumunun iç morfolojisine ait imaj analiz amaçlı röntgen fotoğrafları (Liu vd. 1993)

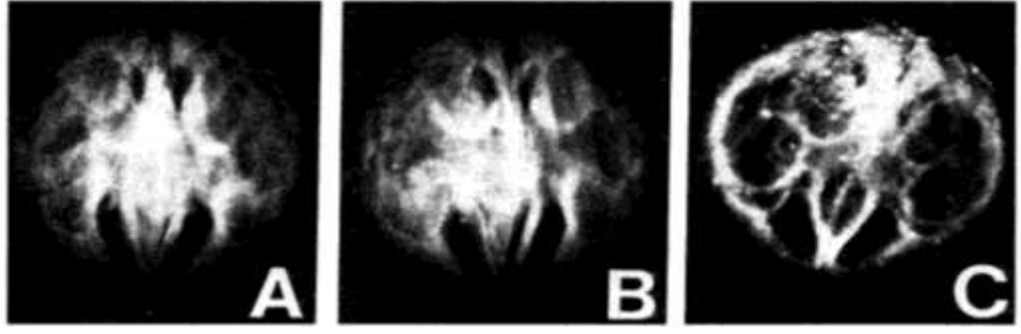
Bir önceki çalışma ile bağlantılı olan; domates fidesi morfolojisinin tohumların X-ışını analizi ile tahmin edilmesi çalışması Van der Burg, vd. (1994) tarafından yapılmıştır. Ekim aşamasında domates fidelerinin morfolojisini tahmin etmek için X-ışını fotoğraflarına dayalı çalışmalar yapılmıştır. X-ışını görüntüleri, embriyo boyutu ve morfolojisi ile birlikte endosperm yoğunluğu ile tohum iç boşluk alanları hakkında tahribatsız bir şekilde bilgi sağlamıştır. Kotiledon morfolojisi, kullanılabilir fidelerin yüzdesi ile en yüksek korelasyona sahip olmuştur. Kotiledon morfolojisini ve tohum boş alanını sınıflandıran X-ışını görüntülerinin değerlendirilmesine dayanan bir test, kullanılabilir fide yüzdesini şu anda kullanılan çimlenme testinden daha doğru bir şekilde tahmin etmiştir. Tüm X-ışını kategorilerinin olasılıklarını kullanan bir denkleme dayalı ikinci bir yöntem, priming yapılmış tohumların kullanılabilir fide yüzdesini orantılı olarak ilk yöntemden daha doğru bir şekilde tahmin etmiştir. X-ışını görüntülerine dayalı olarak tohum partilerinin kullanılabilir fide yüzdesini belirlenmesi tohum kalitesini artırma potansiyeline sahiptir. X ışını değerlendirmesine dayalı olarak elle seçimden sonra kontrol tohumlarının kullanılabilir fide yüzdesi ortalama olarak %22 daha yüksek olmuştur. Priming uygulanmış tohumlar ise %12 daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, çalışmanın bulguları, X-ışını analizinin fide performansını tahmin etmede etkili

bir araç olduğunu ve yüksek kaliteli tohumların seçimini sağlamada kullanılabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 2.8 Domates tohumlarının X ışını fotoğrafları (Van der Burg, vd., 1994)

1996 yılında Vozzo vd. tarafından siyah ceviz (*Juglans nigra* L.) tohumlarının kalitesini ayırt etmek için nükleer manyetik rezonans (NMR) spektroskopisi ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) kullanımı üzerinde çalışılmıştır. Siyah ceviz tohumları büyüktür ve çimlenme için tabakalaşma (katmanlaşma-tabakalar ayrılma) gerektirir. Bununla birlikte, birçok tohum tabakalaşmayı takiben oluşmaz. Boş tohumları seçmek için radyografi kullanılabilir, ancak bu yöntem hangi dolu tohumların fide oluşturabileceği konusunda kesin bilgi vermez. Bu çalışmada, farklı kalite düzeylerine sahip tohumların NMR spektroskopisi veya MRI yardımıyla tahribatsız biçimde sınıflandırılabilir olup olmadığı değerlendirilmiştir. Hem NMR spektroskopisi hem de MRI, boş tohumları tespit etmede radyografi kadar etkili bulunmuştur.

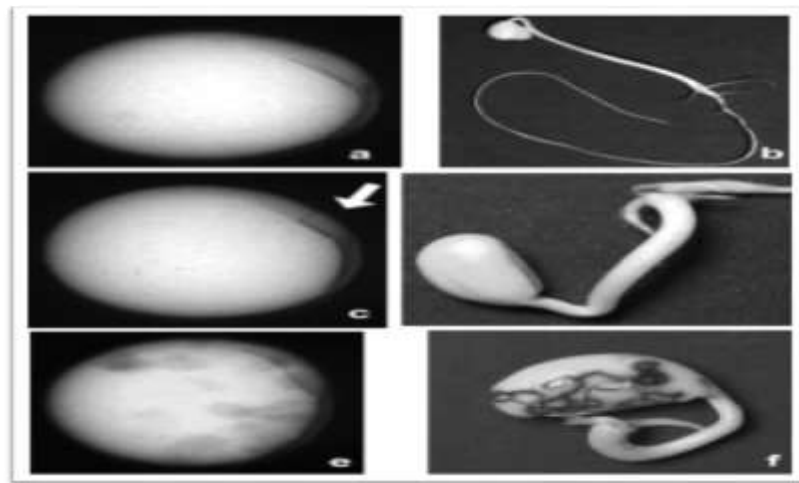


Şekil 2.9 Ceviz tohumlarının radyografileri (A) filizlenen tam bir tohum (B) filizlenmemiş bir tam tohum ve (C) boş bir tohum gösterilmektedir (Vozzo vd., 1996)

NMR ve MRI analizlerinde 'tabakalaşma', tohum içerisindeki bileşenlerin (özellikle su ve lipit fazlarının) farklı yoğunluk ve kimyasal özelliklere bağlı olarak ayrışması sonucu oluşan yapısal bölünmeyi ifade etmektedir. Bu süreç, özellikle yüksek lipit içeriğine sahip tohumlarda, su ve lipit fazlarının farklı davranışları nedeniyle görsel olarak daha belirgin hale gelmektedir. NMR spektrumları, tabakalaşma öncesinde çoğu zaman hem su hem de lipitler için benzer proton sinyalleri vermekteyken, tabakalaşma sonrası spektral zirveler daha yoğun ve ayrılmış bir yapı göstermektedir. MRI deneyleri ve spektroskopik analizlerin sonuçları da bu bulgularla uyumludur. Lipit içeriği düşük olan tohumlar, yüksek lipit içerenlere kıyasla çok daha düşük yoğunlukta görüntüler üretmiştir. Embriyoların MRI görüntüleri, tabakalaşmayı takiben daha yoğun şekilde elde edilebilmiştir. Özellikle yüksek lipit içeriğine sahip tohumlarda, çimlenebilir bireyler ile çimlenemeyen bireylerin bu yöntemlerle ayırt edilemediği gözlemlenmiştir. Yine de, NMR ve MRI teknikleri, ceviz gibi lipit açısından zengin tohum türlerinde embriyo gelişimini ve canlılık durumunu değerlendirmede faydalı araçlar sunmaktadır. Özellikle NMR spektroskopisi, daha ulaşılabilir enstrümantasyonla uygulanabilmesi yönüyle avantaj sağlar. Belirgin bir lipit sinyali taşımayan tohumların genellikle içi boş, anormal ya da embriyo gelişimini tamamlamamış bireyler olduğu belirlenmiştir. NMR'ın temel sınırlılığı, aynı tohum örneği üzerinde analiz yapılmasını gerektirmesidir. Buna karşın MRI, çok sayıda tohumun eş zamanlı değerlendirilmesine olanak tanıyarak pratik kullanım açısından avantaj sağlar.

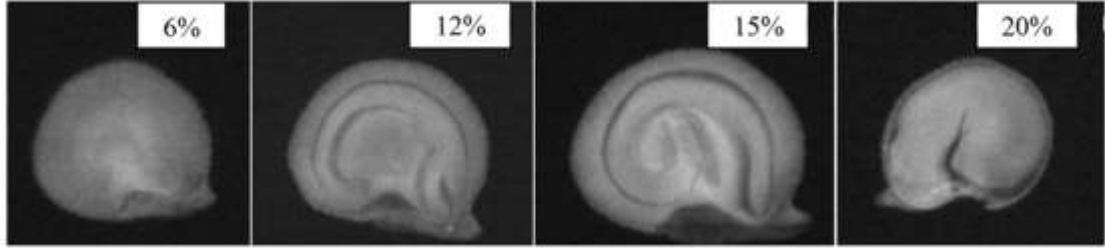
X-ışını analiz testi kullanılarak soya fasulyesindeki mekanik hasar ve süne hasarının bir değerlendirmesi çalışmasını Pinto, vd. (2009) yürütmüşlerdir. Bu çalışmanın amacı, soya fasulyesi tohumlarında oluşan mekanik ve süne zararlarını X-ışını görüntüleme yöntemiyle belirlemektir. Farklı partilerinden tohumlar, X-ışını testi ile sınıflandırılmış ve daha sonra, hasarı olası tohum canlılığı kaybı ile ilişkilendirmek amacıyla çimlenme, hızlandırılmış yaşlandırma ve alternatif olarak da tetrazolyum testleri gerçekleştirilmiştir. X-ışını görüntülerinin yorumlayıcı analizi için hasar şiddeti ve konumu dikkate alınmıştır. Şekil 2.11 normal bir fide (b) ile sonuçlanan mekanik veya süne hasarları olmayan tohum (a), embriyonik ekseninde ciddi bir mekanik hasara neden olan ve anormal bir fide (d) ile sonuçlanan tohum (c); (e) embriyonik ekseninde ve kotiledonlarda ciddi süne hasarı olan tohum, anormal bir fide ile sonuçlarını (f) göstermektedir. Sonuçlar, X-ışını görüntü analizi tekniğinin soya fasulyesi tohumundaki mekanik ve süne hasarını tespit etmede etkili olduğunu göstermiştir.

X-ışını testi, yoğunluğu tohum fizyolojik performansı ile ilişkilendirilebilen mekanik böcek hasarlarını büyütme potansiyeline sahiptir. Tahribatsız bir yöntem olduğu için, tek tek tohumlar yüzey bütünlüğü özelliklerine göre sınıflandırılabilir ve ayrıca fizyolojik testlere tabi tutulabilir. X ışını analizi ile tohum testi, hasat öncesi ve sonrası diğer olumsuz uygulamalardan kaynaklanan çatlaklar veya kırıklar gibi mekanik ve böcek hasarının yüzeysel görselleştirilmesine izin verir (ISTA 2020, Paulsen vd. 1998).

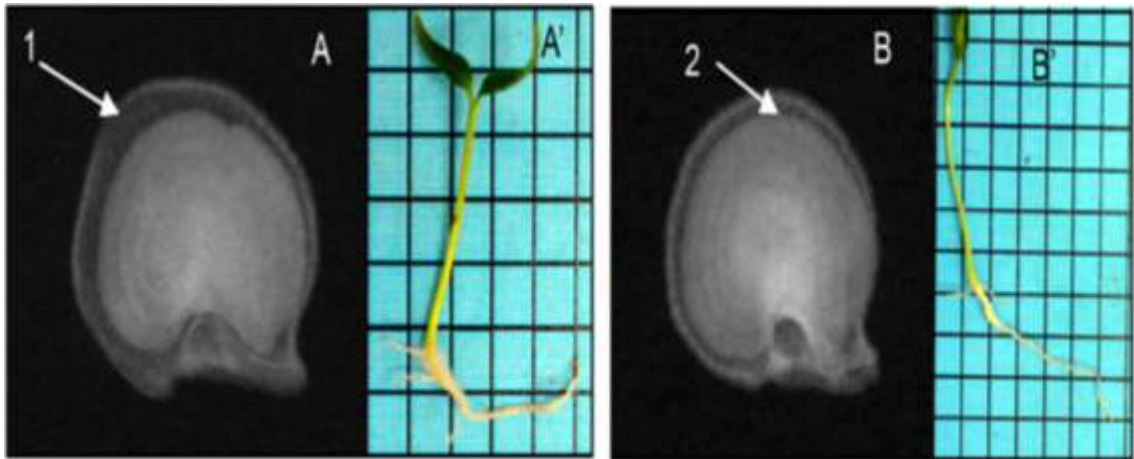


Şekil 2.10 X-ışını testi ve fide ile elde edilen soya fasulyesi tohumu görüntüleri (Pinto vd.)

X-ışını testi ile değerlendirilen dolmalık biber tohum yapısı ve çimlenme arasındaki ilişki Gagliardi ve Marcos-Filho (2011) tarafında araştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, X-ışını testinin, dolmalık biber tohumlarındaki hasar ve anormallikleri belirleme potansiyelini, embriyo ve endosperm tarafından kaplanan alan ile toplam boş alanı arasındaki oranın ölçülmesi tohumun iç yapısı ve çimlenme ile olası ilişkileri değerlendirmektir.

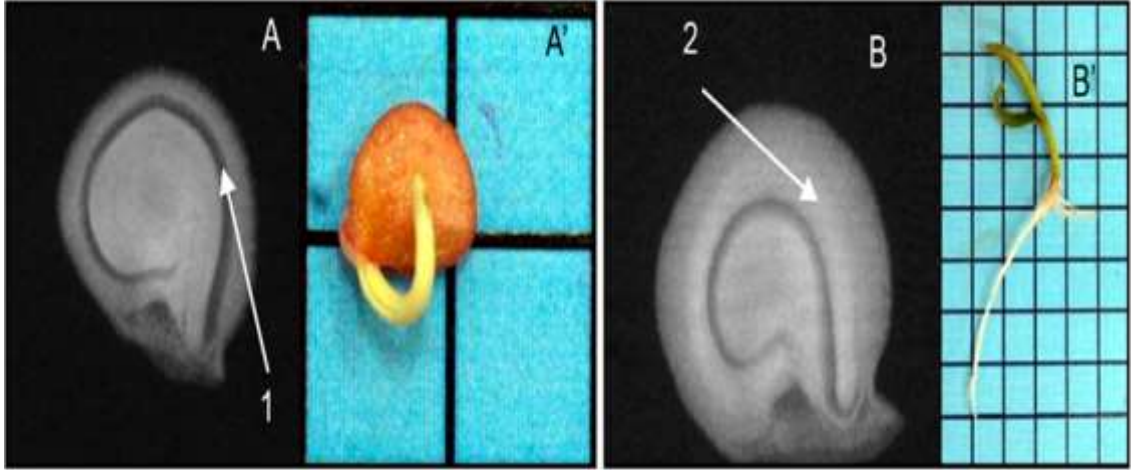


Şekil 2.11 Su içeriği %6, %12, %15 ve %20 olan tohumların radyografik görüntüleri



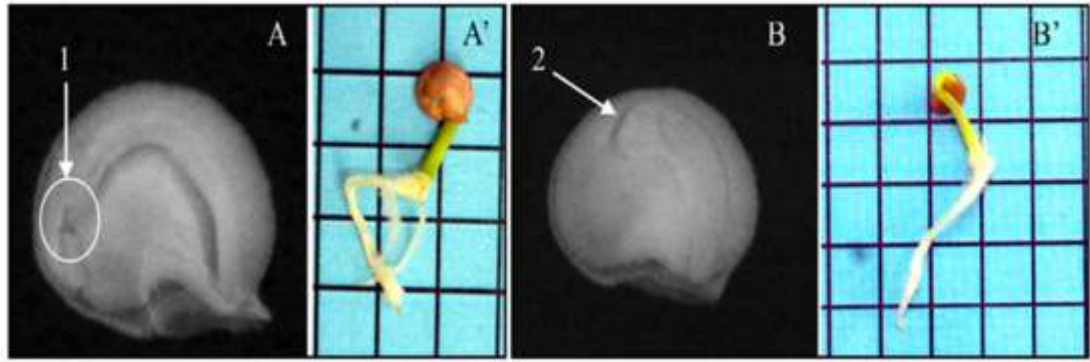
Şekil 2.12 Dolmalık biber X-ışını görüntüleri-1 (Gagliardi ve Marcos-Filho 2011)

İç hacminin %50–75’lik kısmı embriyo ve endosperm dokularıyla doldurulmuş tohumlara ait radyografik görüntüler (A ve B) ile bu tohumlardan elde edilen normal fidelerin fotoğrafları Şekil 2.12’de sunulmuştur. Buna göre endospermin (A) daha fazla geri çekilmesi (integument ve endosperm arasındaki karanlık alan), daha küçük fide oluşmasına neden olmuştur (A). Endospermin (B) daha küçük geri çekilmesi (integument ile endosperm arasındaki karanlık alan), daha büyük fide oluşması (B) gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Dolmalık biber tohumu X-ışını görüntüleri-2 (Gagliardi ve Marcos-Filho 2011)

İç tohum boşluğunun %50-75 düzeyinde (embriyo + endosperm) daha büyük alan (endosperm ve embriyo arasındaki karanlık alan) (A), daha fazla anormal fide oluşturması (A). Daha küçük boşluk (endosperm ve embriyo arasındaki karanlık alan) (B); daha fazla normal fide gösterilmektedir.



Şekil 2.14 Dolmalık biber tohumu X-ışını görüntüleri -3 (Gagliardi ve Marcos-Filho 2011)

Anormal tamamen dolu tohumların radyografik görüntüleri ve çimlenme testinden kaynaklanan anormal fideleri kotiledon dokularında bir çatlak ve kotiledon yapraklarında farklılaşma bulunmamaktadır. Bu çalışmada dolmalık biber tohumlarında tohum çimlenmesi ile ilişkili hasar ve anormallikleri belirleme etkinliğinin yanı sıra, dolmalık

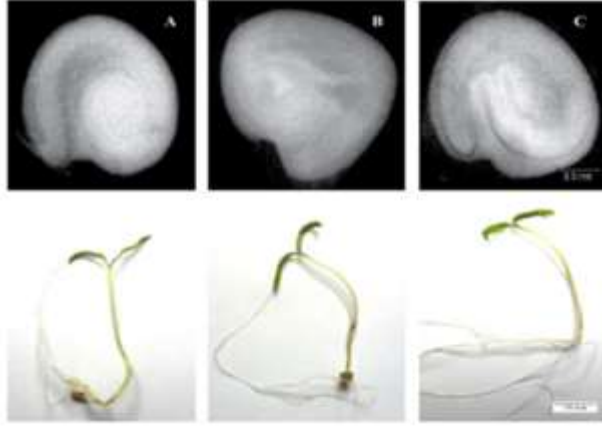
biber tohumunun embriyo ve endosperm tarafından işgal edilen iç alanının azalması, anormal fide ve çimlenmemiş tohumların görülme sıklığı ile ilgilidir

Benzer şekilde Silva vd. (2012), patlıcan tohumlarında X-ray ile görüntü almanın tohum kalitesiyle ilişkisini araştırmış; iç morfolojik özelliklerin yaygınlıkları ve lokalizasyonlarına bağlı olarak çimlenmeyi etkilediğini ve tohum içi boşlukların kaliteyle doğrudan bağlantılı olabileceğini ortaya koymuştur.

Jaillais vd. (2015), X-ışını görüntüleme tekniklerini kullanarak, *Fusarium culmorum* ile enfekte olmuş buğday tohumlarının tespiti üzerine bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, sağlıklı ve enfekte taneler arasındaki iç morfolojik farklar analiz edilmiş ve sınıflandırma için görüntü işleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bulgular, X-ışını radyografisinin tohum içi patojen varlığını tahribatsız, hızlı ve güvenilir şekilde ortaya koyabildiğini göstermiştir. Bu yönüyle yöntem, tohum sağlığı denetiminde önemli bir tanı aracı olarak değerlendirilmektedir.

Borges, vd. (2019) olgunlaşma sırasında domates tohumu görüntü analizi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmanın amacı, X-ışını görüntü analizi yoluyla farklı gelişim ve olgunlaşma aşamalarında "BRS Nagai" hibrit domates tohumlarının iç morfolojisini değerlendirmek ve sonuçları tohum çimlenmesi ve canlılığı ile ilişkilendirmektir. Tozlaşmadan 30, 40, 50, 60 ve 70 gün sonra hasat edilen meyvelerden tohumlar çıkarılmıştır. Daha sonra tohumlar, embriyo morfolojisi sınıflandırması için görsel olarak analiz edilen görüntüleri röntgen (X-Ray) ile çekilmiştir. Ayrıca embriyo ile endosperm arasındaki açıklığın ölçümü ImageJ yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar çimlenme yoluyla tohumun fizyolojik kalitesi ile karşılaştırılmıştır. X ışını analizini içeren korelasyonlar, tohumların normal olarak sınıflandırılan embriyolara sahip olduğunda, daha yüksek canlılığa sahip olma ve normal fideler üretme eğiliminde olduğunu göstermiştir. Öte yandan, daha yüksek iç serbest alana sahip tohumlar, düşük canlılığa ve daha yüksek anormal fide yüzdesine sahip olma eğilimindedir. X-ışınları kullanılarak yapılan görüntü analizi, domates tohumlarının fizyolojik olgunluğunun incelenmesinde etkili bulunmuştur. X-ışınlarının analizi, yüksek kaliteli tohumların seçimine izin veren embriyo morfolojisi aracılığıyla tohum

performansını tahmin edebilir. Tozlaşmadan sonra 40 güne kadar olan meyvelerin domates tohumları, tozlaşmadan 60 gün sonra tamamen olgun meyvelerden ekstrakte edilen tohumlara kıyasla düşük morfolojik kaliteye sahiptir.



Şekil 2.15 Domates tohumlarının X-ışını görüntüleri (Borges, vd. 2019)

Altizani-Junior vd. (2023), fesleğen tohumlarında farklı olgunluk düzeylerine göre kalite ayrımını, SVIS (Seed Vigor Imaging System) yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Çalışmada kullanılan radyografik görüntüleme tekniği sayesinde boş tohumlar, şekil bozukluğu olanlar, mekanik olarak zarar görmüş tohumlar ve diğer fiziksel kusurlar taşıyan örnekler etkili biçimde ayrıştırılmıştır. Araştırmacılar, tohumları tahrip etmeden gerçekleştirilen bu ayırma yöntemlerinin, tohum kalitesinin değerlendirilmesinde önemli avantajlar sunduğunu vurgulamıştır. Bu teknik, yüksek kaliteli tohumların seçilmesinde başarılı sonuçlar vermiştir.

2.4 Klorofil Floresans Tabanlı Çalışmalar

Bu yöntemde, tohum kabuğunda bulunan klorofilin floresans özelliklerinden yararlanılarak tohum kalitesine ilişkin değerlendirmeler gerçekleştirilmektedir. Klorofil floresansı, özellikle olgunlaşmamış ya da düşük canlılığa (vigor) sahip tohumların ayırt edilmesinde etkili bir belirteç olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, floresan temelli ayırım teknikleriyle yapılan sınıflandırmaların yalnızca çimlenme performansını artırmakla kalmadığı, aynı zamanda tohumlardaki enzimatik aktivite düzeyleri üzerinde

de olumlu etkiler yarattığı ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, bu yöntemin hem ticari hem de fizyolojik değerlendirme süreçlerinde güvenilir bir araç olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Jalink vd. (1999) yürüttükleri çalışmada tohum kabuğundaki klorofil a içeriğinin lazer uyarımlı klorofil floresans (KF) ölçümleri yoluyla tahribatsız bir şekilde belirlenmesi ve bu ölçümlerin tohum olgunluğu ve kalitesiyle ilişkisini araştırmışlardır. Domates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ve beyaz lahana (*Brassica oleracea* L.) tohumlarında yürütülen deneylerde, KF sinyalinin tohum olgunlaşma süreci boyunca üssel olarak azaldığı ve bu azalışın çimlenme performansı ile yüksek derecede korelasyon gösterdiği bulunmuştur. KF ölçümlerine dayalı sınıflandırmalar hem domates hem de lahana tohumlarında, düşük KF sinyaline sahip grupların daha yüksek fizyolojik kalite sergilediğini ortaya koymuştur. Çalışmanın sonuçları, KF analizinin, tohumların fizyolojik olgunluklarının ve kalite düzeylerinin hızlı ve tahribatsız bir şekilde belirlenmesi için etkili bir yöntem sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu teknik, tohum olgunluğu ile fizyolojik, fitopatolojik ve fiziksel kalite parametreleri arasındaki ilişkilerin araştırılmasında da yeni imkanlar sağlamaktadır.

Ooms ve Destain (2001), hindiba (*Cichorium intybus* L.) tohumlarında olgunluk ve kaliteyi değerlendirmek amacıyla klorofil floresansına dayalı bir makine görüş sistemi geliştirmiştir. Çalışmada, tohumun papus ve perikarp bölgelerinden yansıyan kırmızı floresans ölçülerek, olgunluk düzeyine bağlı floresans farklılıkları analiz edilmiştir. Beş farklı klonda yürütülen deneylerde, çimlenme yüzdesi ve çimlenme hızı tohum olgunluğu ile ilişkilendirilmiş; Çimlenmenin 21. günde maksimuma ulaştığı, çimlenme hızının ise 30. günden sonra arttığı belirlenmiştir. Klorofil floresansının özellikle 21–36 DAF aralığında tohum canlılığını yansıttığı ve bu parametrenin hindiba tohum vigorunu tahmin etmede etkili bir gösterge olduğu sonucuna varılmıştır.

Konstantinova vd. (2002), arpa (*Hordeum vulgare* L.) tohumlarında klorofil floresansı (KF) ölçümünü kullanarak tohum olgunluğu ve sağlık durumunu değerlendirmişlerdir. Çalışmada, KF sinyallerine göre altı alt örnekleme ayrılan tohum partilerinde, düşük ve orta CF sinyallerine sahip alt örneklerin en yüksek çimlenme performansına sahip olduğu

belirlenmiştir. Yüksek KF sinyali gösteren tohumların, *Fusarium* spp. ve *Cochliobolus sativus* gibi çimlenmeyi olumsuz etkileyen patojenlerle daha fazla enfekte olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, KF sıralamasının yalnızca olgunlaşmamış tohumları değil, aynı zamanda ağır fungal enfeksiyonlara sahip tohumları da ayıklayarak tohum sağlığını ve çimlenme kalitesini artırabileceğini göstermektedir.

Suhartanto (2002), domates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) tohumlarındaki klorofil floresansının, tohum olgunluğu ve kalite performansının bir göstergesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Lazer uyarımlı klorofil floresansı tekniği kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, tohum gelişimi süresince klorofil içeriğinin üssel olarak azaldığı ve bu azalmanın çimlenme kapasitesi ile negatif korelasyon gösterdiği belirlenmiştir. 51–54 gün çiçeklenme sonrası tohumlar fizyolojik olgunluğa ulaşmış ve bu dönemde klorofil floresansı minimuma inmiştir. Ana bitkinin genotipi ve ışık koşullarının tohum klorofil seviyeleri üzerinde önemli etkileri olduğu, hormonal mutantlar kullanılarak yapılan çalışmalarda klorofil yıkımının hormon sinyalleme ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. Kontrollü yaşlandırma testlerinde, yüksek klorofil içerikli olgun tohumların oksidatif strese daha duyarlı olduğu ve kalite kaybı yaşadığı ortaya konmuştur. Sonuç olarak, klorofil floresansı, domates tohumlarında fizyolojik olgunluk ve kalite belirlemede etkili, hızlı ve tahribatsız bir biyobelirteç olarak önerilmektedir.

Raven ve Beardall (2006), klorofil floresansının bitki ekofizyolojisinde bir stres göstergesi olarak kullanım potansiyelini tartışmıştır. Özellikle kırmızı floresans sinyalinin, fotosentetik etkinlik ve çevresel stresle ilişkili olarak değişkenlik gösterdiği vurgulanmış; bu yöntemin bitkilerin ışık stresi, kuraklık, besin yetersizliği gibi çevresel etkilere verdiği fizyolojik yanıtların değerlendirilmesinde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Yöntemin tahribatsız ve hızlı olması hem araştırma hem de tarımsal izleme süreçlerinde önemini artırmaktadır. Çalışma, klorofil floresansının ekofizyolojik analizlerde tamamlayıcı bir araç olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

CiCero vd. (2009) soya tohumlarında (*Glycine max*) klorofil floresansı kullanılarak yeşil tohumların ayrılması ve bu işlemin tohum kalitesine etkisi araştırmıştır. Kuraklık gibi olumsuz iklim koşulları sonucu olgunlaşma sürecinde klorofilin tam degradasyona

uğramamasıyla oluşan yeşil tohumlar, yüksek klorofil floresansı göstermiş ve düşük kaliteyle ilişkilendirilmiştir. Beş farklı yeşil tohum oranına sahip örnekler JS 2001 Seed Sorter cihazı ile düşük ve yüksek klorofil floresansı gösteren fraksiyonlara ayrılmış; düşük floresanslı tohumların çimlenme ve canlılık değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, klorofil floresansı temelli ayıklamanın soya tohumu kalitesini artırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Kenanoğlu vd. (2013) klorofil floresan ayırım ve görüntüleme tekniğinin biber tohumlarının kalitesini iyileştirme amacıyla kullanımı konusunu araştırmıştır. Bu araştırma 2009 ve 2011 yılları arasında ticari ve farklı olgunluktaki tohum partilerinde kalitenin Klorofil Floresan (KF) ayırım metodu ile (klorofil floresan değeri yüksek tohumların ayrılması) geliştirilmesi amacıyla 6 farklı biber (*Capsicum annuum* L.) çeşidinde yürütülmüştür. Ayırım yapılan tohumlarda KF tekniğiyle ayrıca kabuktaki klorofil varlığı da tespit edilmiştir. Bu çeşitler; Kandil Dolma, Çarliston, Yağlık, Çorbacı, Demre Sivrisi, 11B-14'tür. Çalışmanın ilk safhasında tohum partileri %8 nemde 6 ve 12 ay -18,5°C ve 25 °C depolanmıştır. İkinci safhadaki tohumlar; turuncu, kırmızı, koyu kırmızı ve aşırı olgun dönemlerde hasat edilmiştir. Her iki safhadaki tohumların KF tekniği ile ayırımı yapılmış (KF değeri düşük) ve kontrol (ayırım yapılmamış) gruplarına; çimlendirme, fide çıkış ve kontrollü bozulma güç testleri uygulanmıştır. Ayrıca, ticari partilerinin ayırım yapılan ve yapılmayan kontrol gruplarında Katalaz, Süperoksit Dismutaz ve Askorbat Peroksidaz aktiviteleri belirlenmiştir. KF metodu ile tüm enzimler artış göstermiştir. KF ayırımı, depolanmış tohum partilerinde çimlenme performansını yaklaşık %10 oranında artmıştır. Çeşitler karşılaştırıldığında en hassas olarak çimlenme oranını diğer çeşitlere göre daha hızlı kaybeden Yağlık ve Kandil Dolma olmuştur. Genel olarak KF ayırımı ile belirlenen tohumların enzim aktiviteleri daha yüksek olmuştur. Bu durum ticari olarak yapılan tek hasat yönteminde (aynı zamanda hasat edilen farklı olgunluktaki tohumlarda) avantaj sağlamaktadır. Gelişme dönemindeki tohum partilerinde kalite artışı KF metodu ile sağlanırken bu durumun en fazla I. ve II. hasat dönemlerinde daha avantajlı (%5-30) olduğu belirlenmiştir. Tüm sonuçlardan yola çıkarak KF ayırım ve görüntüleme tekniğinin gerek ticari depolanmış gerekse farklı olgunluktaki biber tohum partilerinde tohuma zarar vermeden kalite artışını sağlayan bir metot olduğu belirlenmiştir.

Nijenstein (2014), klorofil floresansının (KF) tohum olgunluğu ve kalitesini değerlendirmek için hızlı, hassas ve tahribatsız bir yöntem olarak kullanılabilirliğini vurgulamıştır. Tohum gelişimi sırasında klorofil içeriği olgunlukla birlikte azaldığından, KF seviyesi tohum kalitesine ilişkin bir gösterge sunmaktadır. Çalışma, KF ölçüm cihazlarının domates, biber, havuç, pirinç ve soya gibi pek çok türde olgunlaşmamış veya düşük kaliteli tohumları ayırmada etkin şekilde kullanıldığını göstermektedir. KF, hasat zamanlaması, tohum sıralama ve depolama kararlarında yardımcı olurken, aynı zamanda tohum canlılığı ve çimlenme potansiyeli ile korelasyon gösterdiği için vigor tahmininde de kullanılabilir bir parametre olarak önerilmektedir.

Hay vd. (2015), pirinç (*Oryza sativa* L.) tohumlarında uzun süreli saklamaya en uygun hasat zamanının belirlenmesinde klorofil floresansı analizinin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Farklı günlerde hasat edilen tohumlarda, KF histogramlarının istatistiksel özellikleri ile tohum dayanıklılığını yansıtan p50 değeri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bazı genotiplerde KF ile p50 arasında anlamlı korelasyonlar bulunmasına rağmen, bu ilişkinin tüm genotiplere genellenemeyeceği görülmüştür. Sonuç olarak, CF analizi bazı genetik materyallerde faydalı olsa da gen bankası gibi geniş çeşitlilik içeren koleksiyonlarda tek başına yeterli bir gösterge olmayabileceği belirtilmiştir.

Galletti vd. (2020), domates (*Solanum lycopersicum* L.) ve havuç (*Daucus carota* L.) tohumlarının kalite değerlendirmesi için optik görüntüleme tekniklerinin kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, klorofil floresansı ve kemometrik tabanlı multispektral görüntüleme yöntemleri kullanılarak, tohum fizyolojik potansiyelinin hızlı ve tahribatsız bir şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Kemometrik analizler kapsamında ana bileşen analizi ve kuadratik diskriminant analizi uygulanmış ve multispektral görüntüleme verileri makine öğrenmesi programları ile değerlendirilmiştir. Bulgular, klorofil floresansı yönteminin tohum partileri arasındaki fizyolojik farklılıkları belirlemede etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle düşük kaliteli tohumların yüksek klorofil floresansına sahip olduğu tespit edilmiş ve bu yöntemle düşük fizyolojik potansiyele sahip tohumların başarılı bir şekilde ayrıştırılabileceği belirlenmiştir.

Grulichova vd. (2022) çalışmalarında havuç, kereviz, dereotu, maydanoz ve yabancı havucu tohumlarında, klorofil ve karotenoid içerikleri ile tohum kalite parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada, tohumlarda klorofil a, klorofil b, β -karoten ve lutein içerikleri spektrofotometrik yöntemle belirlenmiş, bu pigmentlerin çimlenme yüzdesi, çimlenme hızı indeksi ve radikül çıkışı ile korelasyonu analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, özellikle klorofil b ve lutein içeriklerinin fide canlılığı ve tohum kalitesine ilişkin güvenilir belirteçler olabileceği saptanmıştır. Bazı tür ve çeşitlerde klorofil ve karotenoid birikimi, çimlenme hızı ve radikül çıkışını olumsuz etkilerken, dereotu ve kereviz gibi türlerde bu etki pozitif yönde gözlenmiştir. Çalışma, pigment içeriklerinin tahribatsız (non-destrüktif) bir yöntemle ölçülerek, tohum kalite değerlendirmelerinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Irudukunda vd. (2024) klorofil floresans metoduyla marul çeşitlerinin yaprak formlarını ve renk kapsamalarını dikkate alarak çeşitlerin özelliklerini belirlemiştir. Bu çalışma, fide canlılığının hızlı değerlendirilmesi için uygun maliyetli görüntüleme tekniklerini araştırarak tarımsal araştırmalarda yaygın bir soruna pratik bir çözüm sunmaktadır. Metot hem kanopi (yaprak örtüsü) yapısının sağlıklı ölçülmesine hem de sağlıklı sınıflandırmaya olanak vermiştir. Bu yolla çeşitlerin kolaylıkla tanımlanması ve değerlendirmesi olanaklı olmaktadır.

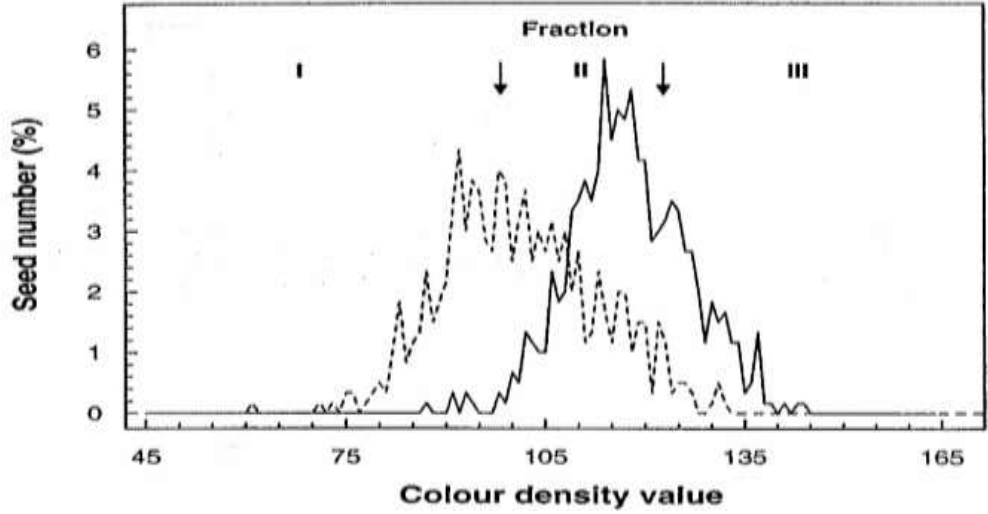
2.5 RGB ve Renk Tabanlı Analizler

RGB renk modeli (kırmızı-yeşil-mavi) kullanılarak yapılan bu çalışmalar, tohum yüzey rengine dayalı olarak fizyolojik kalite tahmini yapılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle bozulmuş ya da yaşlandırılmış tohumların, RGB yoğunluk farklılıkları aracılığıyla sınıflandırılması, çimlenme yüzdesi ve anormal fide oranlarıyla güçlü ilişkiler göstermektedir. Görüntü analizine dayalı bu yaklaşımlar, laboratuvar ortamında tahribatsız, hızlı ve standartlaştırılabilir bir değerlendirme yöntemi olarak önerilmektedir.

Ahmad vd. (1999), fungal hastalıklar, viral enfeksiyonlar ve olgunlaşmamış soya tohumlarının (Glycine max) renk analizi ile sınıflandırılmasını amaçlamıştır. Bu çalışmada yalnızca RGB renk uzayı (kırmızı, yeşil, mavi) kullanılmış, asemptomatik ve

semtomatik tohumlar arasındaki ayırım, her bir renk bileşeninin ortalama, minimum ve varyans değerleri üzerinden yapılmıştır. Model, %88 genel doğruluk oranı ile özellikle asemptomatik ve yeşil, olgunlaşmamış tohumlarda yüksek başarı sağlamıştır. Çalışmada, RGB dışındaki renk uzayları (örneğin HSI veya Lab) dikkate alınmamış, bu yönüyle analiz doğrudan RGB verisi ile sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda, araştırma RGB temelli görüntü işleme yaklaşımları arasında yer almaktadır.

Dell'Aquila (2005) bozulmuş mercimek tohumlarının sınıflandırılmasında tahribatsız bir yöntem olarak RGB renk yoğunluğu üzerine bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada iki boyutlu mercimek tohumu görüntülerinde RGB renk bileşenlerini analiz etmek için bilgisayar destekli görüntü analiz sistemi geliştirilmiştir. Yöntem, daha sonra her biri farklı bir RGB aralığına sahip üç fraksiyona ayrılan bozulmamış tohumların RGB değerlerinin ve karşılık gelen hesaplanmış ortam RGB indeksinin (yani, üç farklı bileşen değerinin ortalaması) ölçülmesine dayanır.



Şekil 2.16 Mercimek tohumlarının histogramı (Dell'Aquila, 2005)

Orta RGB değerleri 98'in altında olan sınıflandırılmış tohumlar, erken yaşlanma aşamalarında artan anormal fide yüzdesi ile en düşük çimlenme yüzdesine sahipken, 125'in üzerinde RGB değerlerine sahip sınıflandırılmış tohumlar, en yüksek çimlenmeye ve yalnızca yaşlandırma süresinin son aşamalarında anormal fide artışına sahip olmuştur.

Orta RGB indeksinin 98 ile 125 değerleri arasında sınıflandırılan tohumlar, orta derecede azalan çimlenme göstermiştir. Bu eğilim aynı zamanda ortalama çimlenme süresi ve elektriksel iletkenlik ile de doğrulanmıştır. Bilgisayar teknolojisinin işletim kolaylığı, düşük maliyeti, tahribatsız tohum analizi ve ayıklaması, bu tekniğin bir tohum laboratuvarında uygulanma potansiyelini arttırmaktadır. Bu çalışmada tohumun bozulmasıyla ilgili fizyolojik ve biyokimyasal deneyler için, orijinal sınıflandırılmamış numune ve karşılık gelen RGB işaretleyici ile ayrılmış alt numuneler üzerindeki yaşlanma etkilerini incelemek faydalı olabilir, bu nedenle tam çimlenme kaybından önce tohumlarda meydana gelen hasarlara ilişkin deneysel veriler daha kesin olabilir. Tekniğin çok çeşitli türler için otomatikleştirilmesi ve standartlaştırılması gerekse bile, özellikleri, yani operasyonel kolaylık, tahribatsız ve pahalı olmayan yöntem, bir tohum laboratuvarında gerçekleşen tohum rutin yönetimi için uygulanması araştırcılar tarafından önerilmiştir.

Gomes-Junior vd. (2017) RGB parametrelerine dayanarak Swingle citrumelo (Trifoliolate Orange x Citrus paradisi) tohum canlılığı ve depolanabilirliğinin meyve olgunluk sınıfları ile ilişkilendirilmesi çalışmasını yürütmüşlerdir. Swingle citrumelo [Duncan greyfurt.  *Poncirus trifoliata* (L.) melezlenmiş ve citrus üretim alanlarında “tristeza” virüsüne ve kök rklğ organizmalarına (Hutchison 1974) toleranslı olarak kullanılmaktadır. Ancak fidanlıklar, fide anaçlarının üretiminde zayıf çimlenme ve düşük tohum depolama potansiyeli (Roberts 1973; Carvalho vd. 2002; Rodrigues vd. 2010) ve ayrıca yüksek kaliteli tohumlar elde etmek için optimum meyve olgunlaşma aşaması belirsizliği (Medina vd. 2005, Silva vd. 2011) gibi sorunlarla karşı karşıya kalmaktadırlar. Ayrıca, meyve olgunlaşma aşamalarının görsel renge göre karakterizasyonu, meyve seçimlerinin standardizasyonunu sorunlu hale getirmektedir (Hamilton vd. 2007, Silva vd. 2011). Renk lm için çeşitli tekniklerin kullanılması, olgunlaşan aşamaları sınıflandırmak için daha güvenilir ve tutarlı bir yöntem olma potansiyeline sahiptir (Leon vd. 2006).

Kırmızı (R) renk bileşeni, her bir yeşil, yeşilimsi sarı ve sarı meyveler için en iyi tanımlamayı sağlamıştır. Yeşilimsi sarı meyvelerinden ekstrakte edilen tohumlar, yeşil ve sarı meyvelerinden elde edilen tohumlara kıyasla daha yüksek depolama potansiyeline sahip özellikler göstermiştir. Bu nedenle, daha yüksek fizyolojik özellik ve depolama

potansiyeline sahip tohumlar elde etmek ve hasat için en iyi zamanı belirlemek üzere RGB renk sistemi kullanılarak hassas meyve olgunlaşma sınıflandırması oluşturulabilir. Perikarp rengindeki varyasyonlar, yüksek fizyolojik kalitede tohum üretimi için Swingle citrumelo meyvelerinin tutarlı bir şekilde seçilmesini zorlaştırmaktadır (Medina vd. 2005). Ayrıca, meyve olgunlaşma aşamalarının görsel renge göre karakterizasyonu, meyve seçimlerinin standardizasyonunu sorunlu hale getirmektedir (Hamilton vd. 2007, Silva vd., 2011). Renk ölçümü için çeşitli tekniklerin kullanılması, olgunlaşan aşamaları sınıflandırmak için daha güvenilir ve tutarlı bir yöntem olma potansiyeline sahiptir (Leon vd. 2006). Sonuçta, SVIS ile 20 günlük fidelerin dijital analizinin kahve tohum canlılığını değerlendirmek için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Bamya tohumlarının olgunlaşması sırasında morfolojik ve fizyolojik değişikliklerin görüntü analizi ile değerlendirilmesi çalışmasını Santos vd. (2019) gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma, olgunlaşma sırasında bamyanın (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) tohum performansı ile X-ışını görüntüleriyle tanımlanan belirli morfolojik parametreleri ilişkilendirmek amacıyla yapılmıştır. Santa Cruz 47 çeşidinin farklı gelişim aşamalarındaki meyveleri beş günlük aralıklarla (çiçeklenmeden 5 ila 65 gün sonra) toplanmış ve su içeriği, kuru madde, çimlenme ve güç, her hasattan hemen sonra veya yedi gün geçici depolamadan sonra ekstrakte edilen tohumlarda belirlenmiştir.

Her hasattan sonra uygulanan X-ışını analizleri ile elde edilen görüntüler, ImageJ yazılımı kullanılarak sayısal olarak değerlendirilmiş ve bu süreçte görüntü oranı (tohum çevresini çevreleyen elipsin ana ve küçük eksenleri arasındaki ilişki) ile iç tohum boşluk yüzdesi verileri nicel olarak hesaplanmıştır. Fizyolojik olgunluğa (maksimum kuru madde birikimi), tohum su içeriği %56.6 olduğunda, çiçeklenmeden 30 gün sonra ulaşılmıştır. Tohum çimlenmesi ve canlılığı olgunlaşma sırasında artarak 50 günde maksimuma ulaşmıştır. Tohumlar, olgunlaşma sırasında morfolojik değişiklikler göstermiş, daha küresel hale gelerek (en boy oranı 1.0'a yakın); aynı zamanda tohumun iç boşluğundaki boş alan azalmıştır. Bu parametre, %5'e eşit veya daha düşük değerlere ulaştığında fizyolojik olgunluğun bir göstergesi olarak başarıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

2.6 Multispektral ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Yaklaşımlar

Bu yaklaşım farklı dalga boylarında görüntü toplayan multispektral sistemlerin ve bu verileri işleyebilen makine öğrenmesi algoritmalarının kullanıldığı ileri düzey çalışmalar yer almaktadır. Gerek yapay zekâ destekli sınıflandırma gerekse generatif veri etiketleme yöntemleriyle tohum kalitesi, olgunluk düzeyi ve canlılık tahmini yüksek doğrulukla yapılabilmektedir. Bu teknolojiler, büyük veri setleriyle çalışabilme, tekrarlanabilirlik ve ölçeklenebilirlik açısından klasik yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır.

Ayrıca sınırlı sayıda etiketli verinin bulunduğu durumlarda, etiketli veri havuzunu genişletmek amacıyla generatif veri etiketleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, var olan ölçümlere dayalı olarak etiketlerin olasılıksal ya da öğrenilmiş modellere göre tahmin edilmesini sağlar. Örneğin; Gaussian Karışım Modeli (GMM), Kernel Yoğunluk Tahmini (KDE) ve K-En Yakın Komşu (KNN) gibi yaklaşımlar, mevcut veri dağılımını modelleyerek yeni gözlemlere otomatik olarak zayıf etiket atamaktadır. Bu sayede, özellikle İnsansız Hava Aracı (UAV) gibi geniş ölçekli görüntü verilerinde manuel etiketleme ihtiyacı azalırken, derin öğrenme modellerinin eğitiminde kullanılacak verinin hacmi artırılabilir. Dericquebourg vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada bu yöntemler başarıyla uygulanmış ve tohum olgunluk tahmininde doğruluğun anlamlı ölçüde yükseldiği rapor edilmiştir.

Huang vd. (2015), optik algılama teknolojileriyle (makine görüşü, NIR ve hiperspektral görüntüleme) tohum kalitesi ve güvenliğinin hızlı ve tahribatsız biçimde değerlendirilebileceğini göstermiştir. ElMasry vd. (2019), bilgisayarla görü ve multispektral görüntüleme tekniklerini kullanarak börülce (*Vigna unguiculata*) tohumlarının çimlenme yeteneklerini ve kalite durumlarını sınıflandırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada, ultraviyole, görünür ve kısa dalga yakın kızılötesi bantlarda elde edilen multispektral veriler ile bireysel tohumların spektral imzaları ((farklı dalga boylarında kaydedilen yansıma desenleri) analiz edilmiş, doğrusal ayırt edici analiz (LDA) temelli çok değişkenli modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, yaşlanmış/yaşlanmamış, çimlenmiş/çimlenmemiş ve normal/anormal fide gibi farklı kategorilerde yüksek sınıflandırma doğrulukları sunmuştur (%62–%97). Sonuçlar,

multispektral görüntüleme ve görüntü işleme sistemlerinin tahribatsız, hızlı ve güvenilir sınıflandırma potansiyelini ortaya koymakta; bu teknolojilerin tohum kalite kontrol süreçlerinde etkin bir araç olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

Rego vd. (2020) çok bantlı görüntüleme (MSI) tekniğini ve istatistiksel modelleri kullanarak börülce (*Vigna unguiculata*) tohumlarının sağlık durumunu değerlendirmiş ve farklı fungal türlerin ayrımını yapmayı amaçlamıştır. Çalışmada, *Fusarium pallidroseum*, *Rhizoctonia solani* ve *Aspergillus* sp. ile inokule edilen tohumlardan elde edilen çok bantlı görüntüler üzerinden doğrusal ayrım analizi (LDA) ile modeller oluşturulmuştur. Modelin, inkübasyon öncesinde %92'nin, sonrasında ise %99'un üzerinde doğrulukla tanı sağladığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, MSI temelli analizlerin baklagillerde tohum sağlığı kontrolünde etkili ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

De Medeiros vd. (2020) otomatik X-ışını analizi ve makine öğrenimi modellerini birleştirerek kurkas (*Jatropha curcas* L.) tohumlarının çimlenme kapasitesini tahmin etmek ve çimlenme hızı ile fide canlılığına göre sınıflandırmıştır. Çalışmada, tohumların radyografik görüntülerinin otomatik analizi gerçekleştirilmiş ve bir dizi morfolojik ve doku bütünlüğü tanımlayıcısı elde edilmiştir. X-ışını testinin ardından, tohumlar fizyolojik değerlendirmelere tabi tutulmuştur. Her bir tohuma ait tanımlayıcılar temelinde kalite sınıfları oluşturulmuş ve Lineer Diskriminant Analizi (LDA) modelleri uygulanmıştır. Tohum canlılığının tahmininde %94, çimlenme hızında %83 ve fide canlılığında %89 oranında doğru sınıflandırma elde edilmiştir. Yüksek verimli X-ışını görüntü analizi, kurkas tohumlarını farklı kalite sınıflarına ayırmak için gerekli bilgileri sağlayabilir.

Mayrinck vd. (2020), pamuk tohumlarının fizyolojik kalitesini değerlendirmek için yakın kızılötesi spektroskopisi (NIR) yöntemini incelemiştir. Sekiz farklı tohum partisi üzerinde yapılan analizlerde, öğütülmüş tohum örneklerinin yüksek ve düşük vigor seviyelerini ayırt etmede %91-100 doğruluk oranına ulaştığı bulunmuştur. Bu sonuçlar, NIR yönteminin hızlı ve maliyet etkin bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

Porsch (2020), şeker pancarı tohumlarında tohum iç yapısının ve kalite özelliklerinin tespiti amacıyla geliştirilen tam otomatik bir 3D X-ışını bilgisayarlı tomografi (CT) sistemini tanıtmıştır. Çalışmada, tohumların iç hacim, kalınlık, çap, hacim ve doldurma derecesi gibi parametreleri CT görüntüleri üzerinden otomatik olarak ölçülmüş ve tohum kalite analizinde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Geleneksel radyografiye kıyasla CT tekniği, tohum iç yapısının üç boyutlu, yüksek çözünürlüklü ve kantitatif olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Sistem, yüksek örnekleme kapasitesi (15 saatte 300 tohum) ve insan müdahalesi gerektirmeyen tam otomatik işleyişi ile endüstriyel tohum kalite kontrolünde kullanılabilecek pratik bir çözüm sunmaktadır.

Sun vd. (2021), multispektral görüntüleme ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak 15 farklı patlıcan (*Solanum melongena*) çeşidine ait tohumlar sınıflandırılmıştır. Toplam 78 özellik çıkarılarak analiz yapılmıştır. Çalışma, multispektral verilerin tohum çeşit ayrımında morfolojik ve spektral bilgiyi birlikte işleyerek yüksek doğruluk sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, genetik ve çevresel faktörlerin aynı ebeveynden gelen tohumlarda bile fenotipik farklılıklara yol açabileceği vurgulanmıştır.

Dericquebourg vd. (2022), İHA (İnsansız Hava Aracı) multispektral görüntülerinden bitki tohumlarının olgunluk tahminini iyileştirmek için generatif-model tabanlı veri etiketleme yöntemlerini kullanmaktadır. Parametrik (Gaussian Karışım Modeli-GMM) ve parametrik olmayan (K-En Yakın Komşu-KNN ve Kernel Yoğunluk Tahmincisi- KDE) tekniklerle oluşturulan zayıf etiketler, derin öğrenme modelleri olan evrişimsel sinir ağları (CNN) ve uzun kısa süreli bellek (LSTM) entegre edilerek tahmin doğruluğunu artırmıştır. Sonuçlar, KDE tabanlı etiketlemenin en iyi performansı sağladığını ve generatif etiketleme yöntemlerinin sınırlı etiketli veriyle çalışan derin öğrenme modellerini iyileştirdiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, tarımda otomatik ve ölçeklenebilir olgunluk tahmini yaparak hasat zamanlamasını optimizasyonuna katkı sağlamaktadır.

Zhang vd. (2022), yonca (*Medicago sativa*) tohumlarının canlılık seviyelerinin tespitinde multispektral görüntüleme teknolojisinin etkinliğini incelemektedir. Araştırmada, farklı olgunluk aşamalarına ve farklı hasat yıllarına ait tohumların 19 farklı dalga boyundaki

morfolojik ve spektral verileri toplanmış ve analiz edilmiştir. Çalışmada, tohum canlılığını belirlemek için çok değişkenli analiz yöntemleri uygulanmıştır. Sonuçlar, LDA modelinin farklı olgunluk seviyelerindeki tohumları %92,9 farklı hasat yıllarındaki tohumları ise %97,8 doğrulukla sınıflandırabildiğini göstermiştir. Ayrıca, Normlaştırılmış Kanonik Ayırım Analizi (nCDA) modelinin çimlenme yüzdesi tahmininde başarılı olduğu belirlenmiştir. Zhang ve ekibi, multispektral görüntüleme ile geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve hassas bir şekilde tohum kalitesinin değerlendirilebileceğini ortaya koyarak, tarımsal tohum analizlerinde bu teknolojinin önemli bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Ermiş vd. (2025), ornamental kabak (*Cucurbita pepo* L. var. *ovifera*) tohumlarının morfolojik (kütle, uzunluk, genişlik, kalınlık) ve kolorimetrik (CIELAB L*, a*, b*) özelliklerine dayalı olarak sınıflandırılmasında makine öğrenmesi modellerinin (Random Forest, LightGBM ve k-Nearest Neighbors) etkinliğini değerlendirmiştir. 6 farklı genotip ve toplam 900 tohum örneği ile yapılan çalışmada, veriler normalize edilerek dengeleme yapılmış ve model başarımı çeşitli metriklerle değerlendirilmiştir. RF modeli %95,9 doğruluk oranı, 0,951 MCC ve 0,962 F1 skoru ile en yüksek başarıyı göstermiştir. Çalışma, görsel olarak benzer tohum tiplerinin tahribatsız sınıflandırılmasında makine öğrenmesi temelli yöntemlerin yüksek doğrulukla çalışabileceğini ortaya koyarak, tohum sınıflandırma süreçlerinin otomasyonu ve genetik çeşitliliğin korunması açısından önemli katkılar sunmaktadır.

2.7 Diğer Önemli Yaklaşımlar

Paine vd. (2001) 'Empedans (Alternatif Akım Direnci) Spektrum Analizi Tohum Kalite Testi' başlıklı araştırmayı yürütmüşlerdir. Elektriksel empedans spektroskopisi teknikleri, çimlenme potansiyellerini değerlendirmek ve tahmin etmek için fasulye tohumlarında (*Phaseolus vulgaris* L.) kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bu tohumlar, yaşlandırılmış ve nem içeriği düzenlenmiştir. Nem içeriği, empedans özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Su içeriği arttıkça iyonların hareketliliği arttığından empedans değerleri de düşmüştür. Sonuç olarak düşük direnç değerlerinin, yüksek değerlere sahip tohumlara kıyasla düşük kaliteli tohumlara karşılık geldiği anlaşılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Doktora tezine konu olan araştırma 2 aşamalı olarak 2022-2025 yılları arasında Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümüne ait Tohum Bilimi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.1 Materyal

Araştırmanın ilk safhasında kullanılan farklı olgunluktaki (Az olgun- Olgun) domates (*Solanum lycopersicum* L.) ve patlıcan (*Solanum melongena* L.) tohumları Uşak Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Öğretim üyesi Doç. Dr. Burcu Begüm Kenanoğlu, hıyar (*Cucumis sativus* L.) tohumları Iğdır Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Eren Özden, biber (*Capsicum annuum* L.) tohumları ise Yalova Atatürk Merkez Araştırma Enstitüsü'nden Dr. C. Kutay Yıldırım'dan temin edilmiştir. Tohumlar alındıktan sonra 5 °C'de ağzı kapalı ortamlarda tutulmuştur.

Araştırmanın ikinci safhasında geliştirilmiş olan KISO ekipmanının geniş sayıda tohum partisinde test edilmesi amacıyla her türden sırasıyla biber ve domates 14 adet, patlıcanda 13 adet, hıyarda ise 11 adet tohum partisi ticari firmalardan temin edilmiştir. Bu firmaların isimleri ve çeşitler listesi Çizelge 3.1'de, kullanılan tohum ve görselleri ise Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Araştırmanın birinci ve ikinci aşamasında kullanılan tohum örnekleri

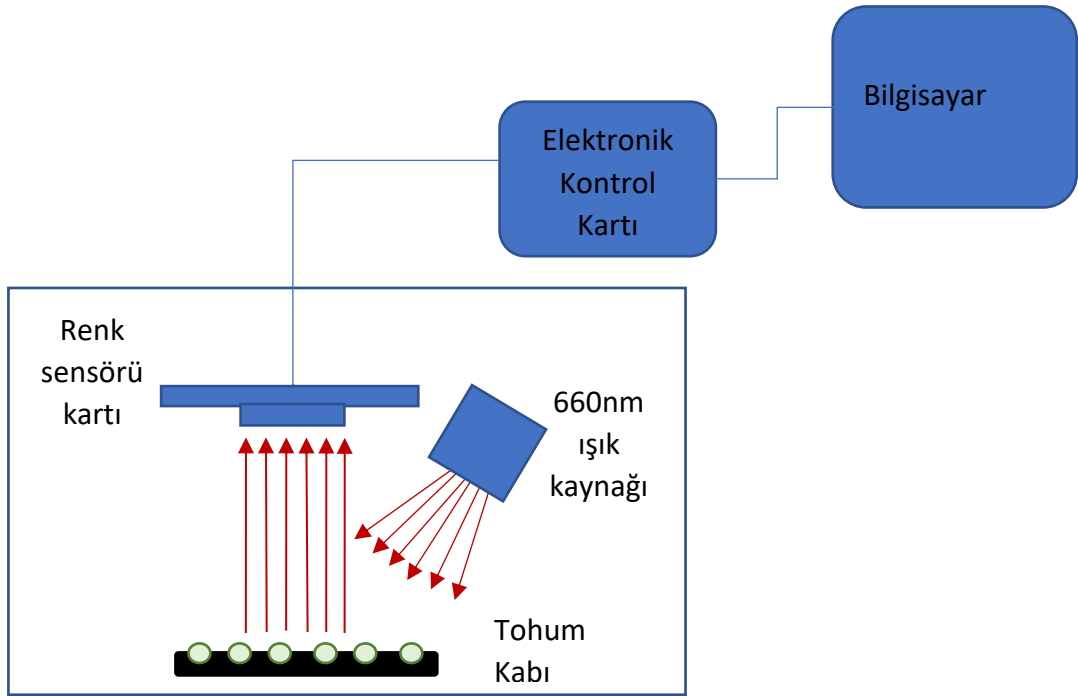
Çizelge 3.1 Denemede kullanılan türlerin; çeşit isimleri ve onlara ait tohum numaraları

Sıra	Biber Çeşitleri	Domates Çeşitleri	Hıyar Çeşitleri	Patlıcan Çeşitleri
1	Burdem 3,5,6,7,8,10	H2274 1,2,3,4,8	Gözen 1	Kemer 4,7,8,9,10,12,13
2	K. Dolma 1,14	Rio Grande 6,7,9	Hızır F-1 2	Pala 5,6
3	Y. Yağlık 2	SC2121 10	Beith Alpha 3,5,6,9,10,11	Kemer 2
4	Çorbacı 4,9,13	Şencan 11	Çengelköy 4,8	Balıkesir 11
5	Çarliston 11,12	Falcon 12	Beith Alpha- Açık 7	Aydın Siyahı 1
6		Pembe 13		Patlıcan 3
7		Rita 14		
Toplam	14	14	11	13

3.2 Yöntem

3.2.1 Kırmızı ışık soğurma (KISO) ekipmanının imalatı

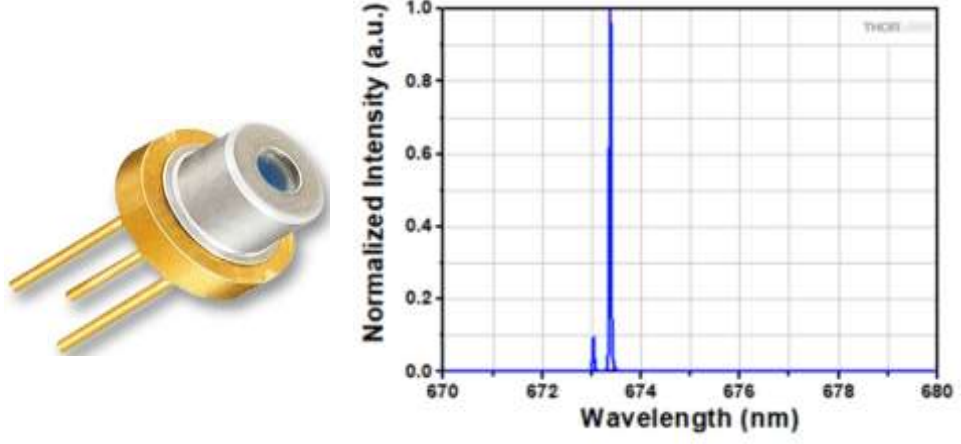
Blok şeması Şekil.3.2’de verilen düzenek için malzeme temini yapılmıştır. Bu kapsamda Arduino Uno mikrodenetleyici kartı, TCS 3200 RGB sensör kartı, 673nm lazer diyot ve 660 nm LED (Light Emitting Diode) ışık kaynakları temin edilmiştir. Ayrıca bilgisayar üzerinde çalışan ve sensör değerlerini okuyan yazılım program geliştirilerek bilgisayarda çalışır ve okuma yapar aşamaya getirilmiştir.



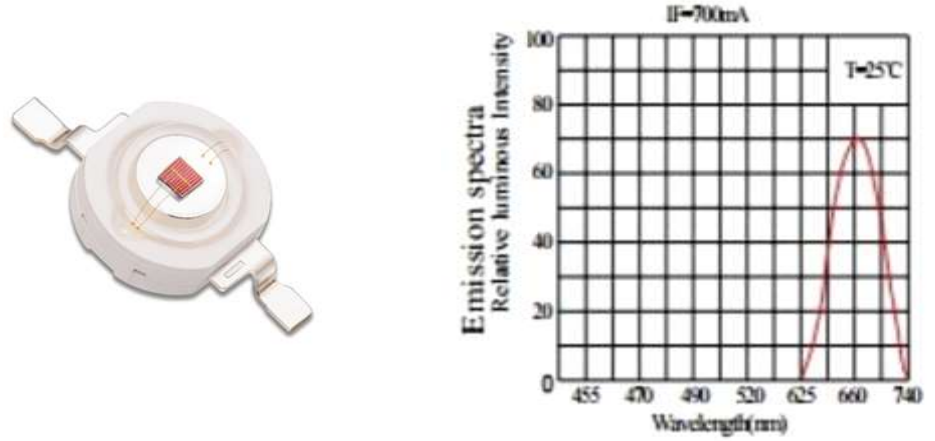
Şekil 3.2 Araştırmada üretilecek kırmızı ışık soğurma oranı (KISO) ölçüm aletinin şematik görünümü

Işık kaynağı olarak değişik dalga boyu aralığında kaynaklar denenmiştir. Bu denemeler lazer diyot ve LED ışık kaynakları kullanılarak yapılmıştır. Lazer diyot, LED’e kıyasla çok daha dar bir dalga boyu bant genişliğine sahip olup yaydığı ışık 673-674 nm arasındadır. LED ışık kaynağı ise 625-740nm arasında ışık yaymaktadır. Lazer diyot, dar bir aydınlatma açısına sahipken, LED daha geniş bir alanı aydınlatabilmektedir. Bu

durum Şekil 3.3 ve 3.4'te gösterilmiştir. Daha geniş bir bant aralığı ve aydınlatma açısı nedeni ile LED kullanımı daha tutarlı sonuçlar verdiği için LED ışık kaynağı seçilmiştir.



Şekil 3.3 Lazer diyot ışık kaynağı ve dalga boyu aralığı



Şekil 3.4 LED ışık kaynağı ve dalga boyu aralığı

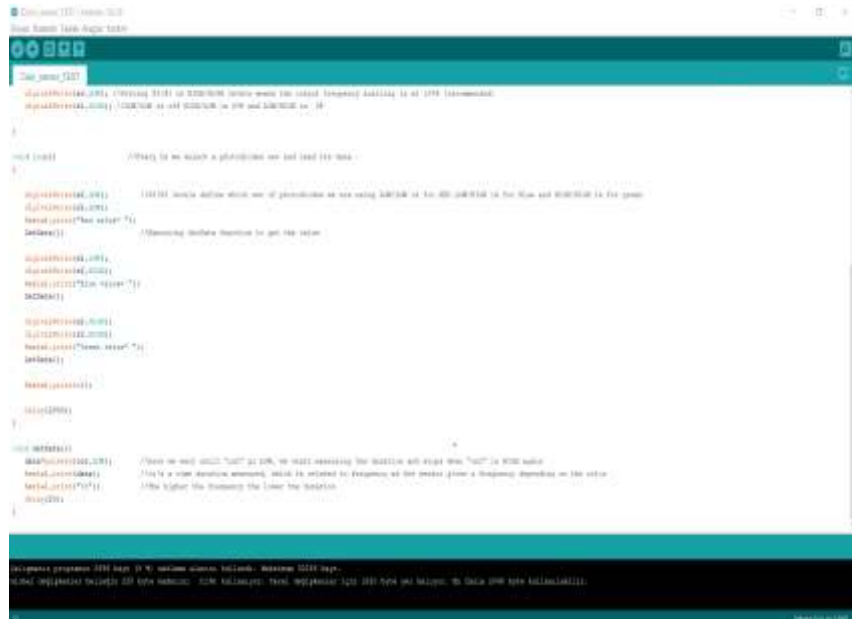
LED ışık kaynağı, sabit güçte aydınlatma yapabilmesi amacıyla sabit akım güç kaynağı ile beslenmiştir ve termal soğutucu plaka üzerine monte edilmiştir. Yapılan okumalar öncesinde 3 dakika beklenerek aydınlatma gücü sabitleştirilmiştir.

Ayrıca Arduino üzerinde çalışacak yazılım, Arduino IDE programı ile geliştirilerek Arduino üzerine yüklenmiştir. Düzenekte yer alan RGB Sensör kartı üzerine düşen ışıktaki kırmızı, yeşil ve mavi bileşenleri ayrı ayrı ölçebilmektedir. Bu düzenek için

kırmızı bileşen ölçümü baz alınmıştır. Bu yazılım, sensör ile haberleşerek, renk değerlerini bilgisayara iletmektedir. Şekil 3.5'te bu bileşenlerin görselleri verilmiştir.



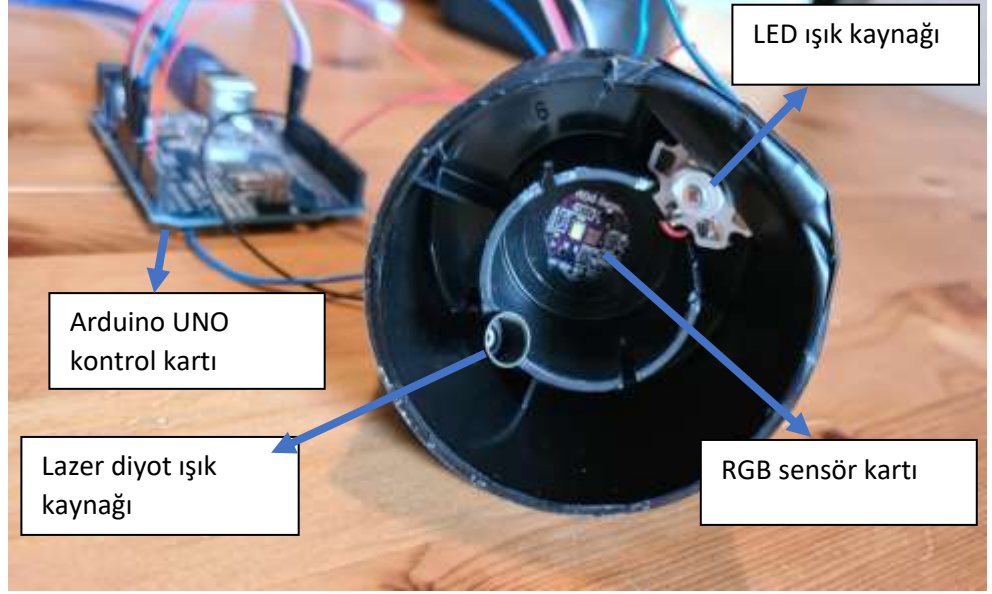
Şekil 3.5 Cihaz tasarımında kullanılan Arduino mikrodenetleyici kartı ve RGB sensör görüntüleri



Şekil 3.6 Arduino IDE programı

Düzenek kurulumu için öncelikle sensör kartı, Arduino kartına bağlanmıştır. Arduino kartı ise USB kablo ile bilgisayara bağlanmıştır. Sensör, üzerine düşen kırmızı ışık ile ters orantılı olarak çıkış vermektedir, kırmızı ışık yüksek değerde olduğunda sensör çıkışı düşmektedir. Sensöre gelen ışık, tohumdan yansıyan kırmızı ışıktır. Tohum ne kadar olgunsa, klorofil içeriği o kadar azdır. Az klorofil, kırmızı ışığın az soğurulmasına neden

olmaktadır ve daha çok kırmızı ışık geri yansımaktadır. Sonuç olarak, olgun tohumlar, sensörden daha düşük değer okunmasını sağlamaktadır. Kurulan düzenek Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Geliştirilen KISO ekipmanının düzenek ve kısımları

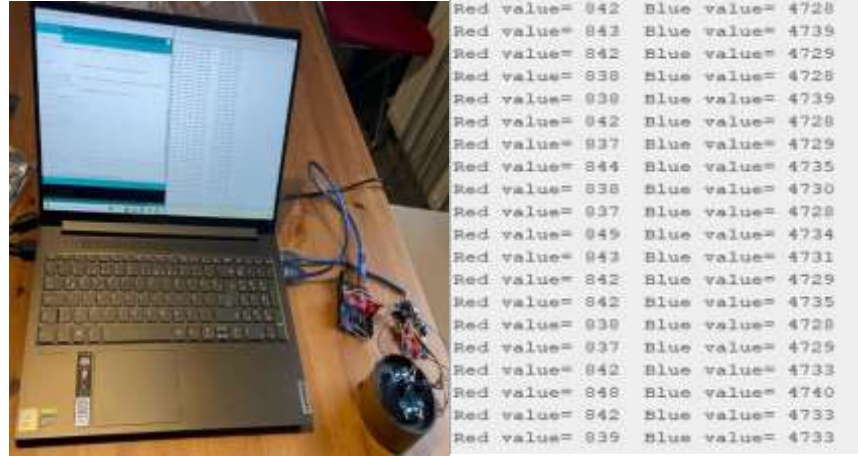
Denemenin ilk aşaması için temin edilen tohumlar ile lazer diyot ve LED kullanılarak testler yapılmıştır. Tohum kabı olarak, beyaz ve siyah kağıt ve kırmızı plastik kap kullanılmıştır. Test için öncelikle ışık kaynağı 3 dakika çalıştırılarak termal dengeye gelmesi beklenmiştir. Her test arasında boş tohum kabından ölçüm alınarak kaynağın kararlı çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Tohum kabı tam doldurularak kabın tabanından renk yansıması engellenmiştir. Ayrıca tohum kabındaki tohumlar karıştırılarak homojen ölçüm alınması sağlanmıştır. KISO okumaları μs (mikro saniye) olarak yapılmıştır.



Şekil 3.8 Değişik boyutta kaplar ile yapılan KISO okuma örnekleri



Şekil 3.9 Ölçümlerde kullanılan tohum kabı ve ışık kaynağının son hali



Şekil 3.10 KISO okuma örneğinin bilgisayar yoluyla sağlanan ekran görüntüsü



Şekil 3.11 KISO ölçüm aletinin prototip hali

3.2.2 KISO ile okuma yöntemi

Okuma için temin edilen tohum partilerinden dörder adet alt örnek okuma için ayrılmıştır. Her alt örnek tohum partisi okuma kabını dolduracak miktarda (yaklaşık 50 adet) tohum

içermektedir. Tohum kabına yerleştirilen alt örnek tohumlar, her okumada döndürülerek 4 farklı pozisyonda okuma yapılmıştır. Bu durumda, her tohum partisi için 16 okuma (4 tohum partisi*4 okuma) yapılmıştır. Her türdeki bir lot için bu örnek okumalarının mikrosaniye (μ s) cinsinden ortalaması alınmıştır. Okuma değeri bilgisayar ekranında sabit seviyeye geldiğindeki değer kabul edilmiştir.

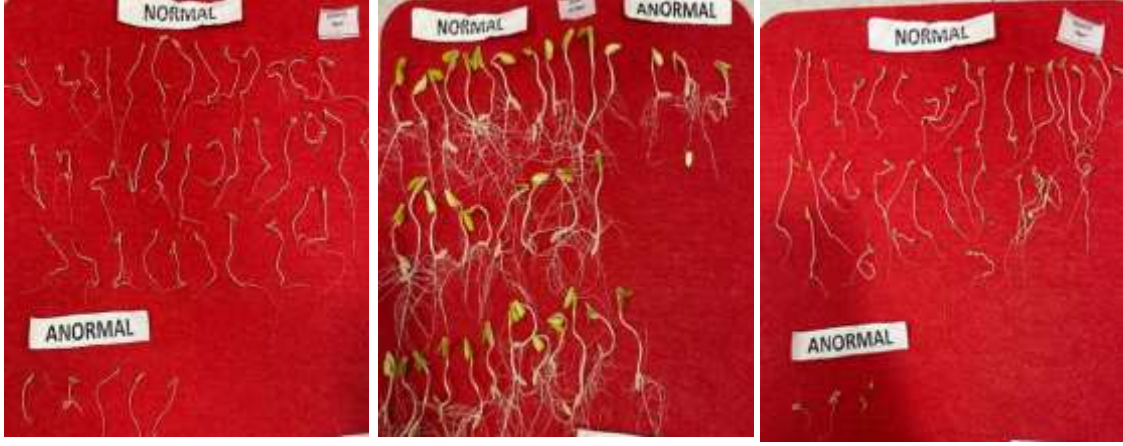
3.2.3 Çimlendirme testlerinin yapılışı

Çimlenme testleri distile su ile ıslatılmış 20x40 cm ebadındaki kurutma kâğıdı (Filtrak, Germany) arasında 3 tekerrür x 50 tohum ile, alt kısma iki adet kurutma kâğıdı üstüne tohumlar dizilmiş ve tekrar bir kat kâğıtla kapatılarak kâğıt arasında çimlendirme metodu uygulanmıştır. Tohumlar dizildikten ve üstleri kapatıldıktan sonra rulo haline sarılarak nem kaybını önlemek için kilitli poşetlere 3 tekerrür olacak şekilde yerleştirilmiştir. 25°C sıcaklığa ayarlanmış etüvlerde domates, biber ve patlıcanda 14 gün, hıyarda ise 7 gün karanlıkta ortamda tutularak ve 2 mm kökçük (radikula) çıkış sayımı her gün aynı saatlerde yapılmıştır (ISTA 2022). Çimlendirme testi sonunda toplam ve normal olarak gelişmiş fide oranları saptanmıştır (Şekil 3.13)



Şekil 3.12 Tohum çimlendirme aşamalarından görüntüler

Normal çimlenme oranı fidenin köklerinin ve sürgünlerinin sağlıklı olarak geliştiği fideleri tanımlamaktadır. Toplam çimlenme ise 2 mm kökçük çıkışı gösteren tohumları sayarak elde edilmiştir. Her iki sayım da % olarak hesaplanmıştır.



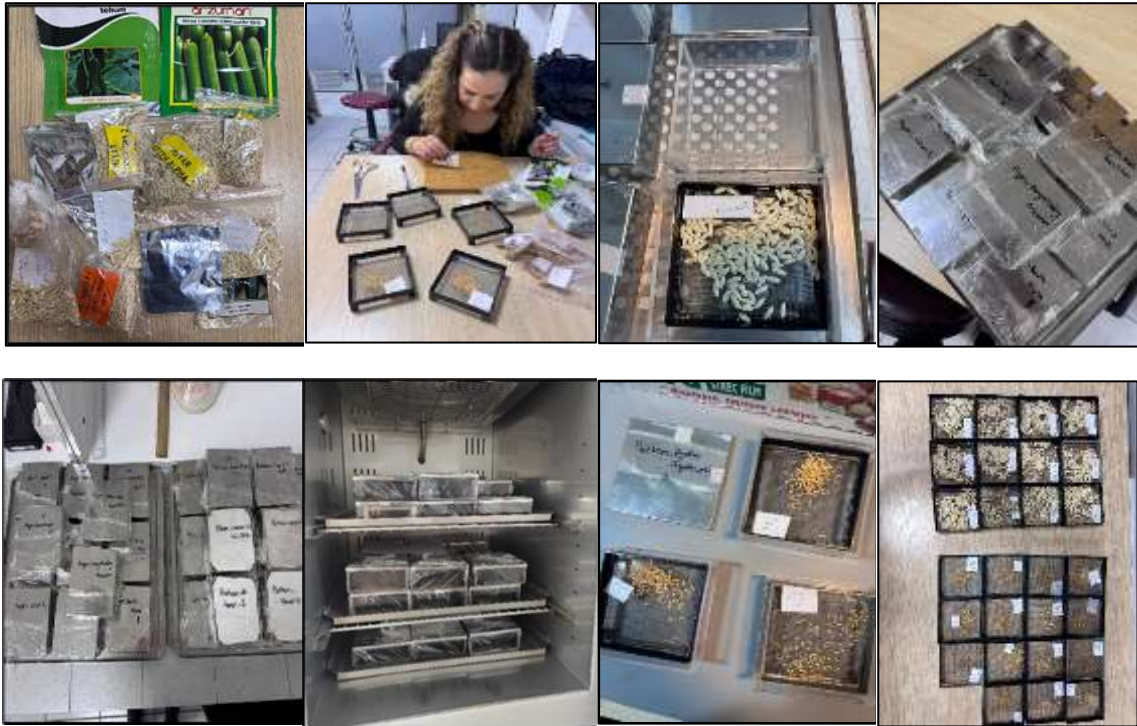
Şekil 3.13 Normal – anormal fide ayırım görüntüleri

3.2.4 Tohum gücü testi (Hızlı yaşlandırma testi, HYT)'nin yapılması

Hızlı yaşlandırma testi denemesi türlere ait her partiden 150 (3 x 50, tekerrür/adet) tohum kullanılarak kurulmuştur. Deneme ISTA (2022) kurallarına göre yürütülmüştür. İlk aşamada tohum partilerinin başlangıç ağırlıkları hassas terazide (0.0001 gram) tartılmış, ardından tohumlar 10x10x4 cm (uzunluk x genişlik x derinlik) ölçülerinde paslanmaz örgülü tel elekler üzerine yerleştirilmiştir. Tel eleklerde %100 oransal nemin sağlanması için 40 ml saf su eklenmiş 11x11x5 cm ölçülerindeki kapaklı yaşlandırma kutularına konmuştur. Plastik kutuların kapaklarına buharlaşmayla tohumların ıslanmasını önlemek için filtre kağıtları kesilip yapıştırılmıştır. Yaşlandırma kutuları etüve yerleştirilmeden önce nem kaybının önlenmesi amacıyla streç filmle kaplanmış ve hazırlanan yaşlandırma kapları 41 °C'ye ayarlanmış etüvde 96 saat süre ile bekletilmiştir. Şekil 3.12'de hızlı yaşlandırma testinin aşamalarının olduğu görseller sunulmuştur. Bu aşamadan sonra tohumlar plastik kaplardan tel eleklerle çıkartılarak yarım saat kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

Tartımdan sonra tohumlar plastik kavanozlara alınarak çimlendirme denemesi için hazır hale getirilmiştir. Test sonrasında başlangıç canlılığında belirtildiği şekilde ISTA (2022) kurallarına uygun olarak çimlendirme denemeleri kurulmuştur.

Hızlı yaşlandırma testi sonrasında toplam çimlenme ve normal çimlenme oranı (%) ortalama çimlenme zamanı (gün) testleri 3.2.3 ve 3.5'te tanımlandığı şekilde yürütülmüştür.



Şekil 3.14 Hızlı yaşlandırma güç testi aşamaları

3.2.5 Ortalama çimlenme zamanının (OÇZ) hesaplanması

Ortalama çimlenme zamanı (OÇZ); Çimlendirme denemesi sırasında yapılan günlük sayımlardan elde edilen değerlerle aşağıdaki formülden yararlanılarak gün olarak hesaplanmıştır (Demir vd. 2008).

$$OÇZ = \frac{\sum n \cdot D}{\sum n}$$

Formülde; OÇZ: Ortalama çimlenme zamanı

n: D. günde çimlenen tohum sayısı

D: Çimlenme başlangıcından itibaren geçen gün sayısını ifade etmektedir.

3.3 İstatistiksel Değerlendirme

Çalışmada denemeler tesadüf parselleri deneme desenine uygun olarak yürütülmüştür. Testlerden elde edilen yüzde değerler, istatistiksel analiz öncesinde açı (arc-sin) transformasyonuna tabi tutulmuş; ardından SPSS (v.25) paket programı kullanılarak Duncan çoklu karşılaştırma testi ile ortalamalar arasındaki farklar değerlendirilmiştir. Tohum gücü testleri ile fide çıkış testleri ve depolama sonrası çimlenme değerleri arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacı ile regresyon analizi yapılmıştır. KISO değerleri ile toplam, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı arasındaki regresyon değerlerin başarısı %5, 1 ve 0,1 düzeyinde ortaya konulmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Farklı Olgunluktaki Biber, Domates, Hıyar ve Patlıcan Tohum Partilerinin KISO Değerleri İle Çimlenme ve Ortalama Çimlenme Zamanı İle İlişkisi

Enstitülerden temin edilen ve olgunluk durumları bilinen (az olgun- olgun) biber, domates, hıyar ve patlıcan çeşitlerinin geliştirdiğimiz KISO (μ s) aleti okumaları, toplam çimlenme oranı (%) ve ortalama çimlenme zamanına ait değerler (OÇZ, gün) Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Dört farklı türde az olgun ve olgun tohumların KISO değerleri (μ s), çimlenme oranları (%) ve ortalama çimlenme zamanı değerleri (OÇZ, gün)

Tür	Az Olgun			Olgun		
	KISO (μ s)	Çimlenme (%)	OÇZ(gün)	KISO (μ s)	Çimlenme (%)	OÇZ(gün)
Biber	588	92	5.0	573	90	4.4
Domates	1029	96	3.2	919	100	3.2
Hıyar	514	96	2.0	489	100	1.2
Patlıcan	817	1	5.0	753	55	6.3

Biber için az olgun tohumlar için KISO ölçüm değeri ortalama 588 μ s iken çimlenme yüzdesi %92 ve ortalama çimlenme süresi 5.0 gün olarak tespit edilmiştir. Olgun olan tohumlar için KISO okuma değeri ortalama 573 (μ s) iken çimlenme yüzdesi %90 ve ortalama çimlenme süresi 4,4 gün olarak bulunmuştur.

Domates için az olgun tohumlar için KISO ölçüm değeri ortalama 1029 μ s iken çimlenme yüzdesi %96 ve ortalama çimlenme süresi 3,2 gün olarak bulunmuştur. Olgun olan tohumlar için KISO ölçüm değeri ortalama 919 μ s iken çimlenme yüzdesi %100 ve ortalama çimlenme süresi 3,2 gün olarak bulunmuştur.

Hıyar için az olgun tohumlar için alet okuma değeri ortalama 514 μ s iken çimlenme yüzdesi %96 ve ortalama çimlenme süresi 2 gün olarak bulunmuştur. Olgun olan tohumlar için alet okuma değeri ortalama 489 μ s iken çimlenme yüzdesi %100 ve ortalama çimlenme süresi 1.2 gün olarak bulunmuştur.

Patlıcan için az olgun tohumlar için alet okuma değeri ortalama 817 μ s iken çimlenme yüzdesi %1 ve ortalama çimlenme süresi 5 gün olarak bulunmuştur. Olgun olan tohumlar için alet okuma değeri ortalama 753 μ s iken çimlenme yüzdesi %55 ve ortalama çimlenme süresi 6.3 gün olarak bulunmuştur (Çizelge 4.1).

Araştırmanın bu ilk aşaması türler arasında yapılan karşılaştırmalar sonucunda, olgun tohumların okuma değerlerinin, az olgun tohumlara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kırmızı ışığın olgun tohumlar tarafından daha az soğurulduğunu ve dolayısıyla olgun tohum yapılarında klorofil miktarının azaldığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, geliştirilen alet yaklaşımının klorofil azalışını tespit etmede etkili olduğunu desteklemektedir.

4.2 Biber Tohumlarında KISO Değerlerinin Toplam (TÇO) ve Normal Çimlenme Oranı (NÇO) ve Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ) İle İlişkisi

On dört biber tohum partisinin KISO, toplam ve normal çimlenme yüzdeleri ve ortalama çimlenme zamanı değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Tohum partileri, KISO değerlerine göre mikrosaniye (μ s) olarak en düşükten en yüksek değere doğru sıralanmış ve bu kapsamda en düşük değer 545 ile 1. tohum partisinde, en yüksek değer ise 571 ile 14. tohum partisinde ölçülmüştür. Toplam çimlenme yüzdeleri %62 ile %100 arasında değişmiş olup, en yüksek değer 6. tohum partisinde, en düşük değer ise 14. tohum partisinde gözlenmiştir. Tohum partileri arasında, istatistiksel olarak anlamlı ve değişen düzeylerde farklılıklar tespit edilmiştir. Üçüncü ve altıncı tohum partileri diğer 12 tohum partisinden istatistiksel olarak daha anlamlı ($p<0.05$) yüksek değer ile ayrılmış, 14. tohum partisi ise diğer partilerden düşük değeriyle ayrılmıştır. Normal çimlenme oranı itibariyle 3, 6 ve 7. lotlar %94-95 ile en yüksek ve istatistiksel

olarak diğler lotlardan anlamlı ($p<0.05$) olarak ayrılırken, 14. lot %55 ile en düşük ve diğler 13 lottan daha düşük değer vermiştir. Ortalama çimlenme zamanı 2.6 ile 5.1 gün arasında değerler göstermiş olup en hızlı çimlenen lotlar 1, 5 ve 8 en yavaş çimlenenler ise 10, 13, 14 ile 4 ve 9 lotlar olmuştur.

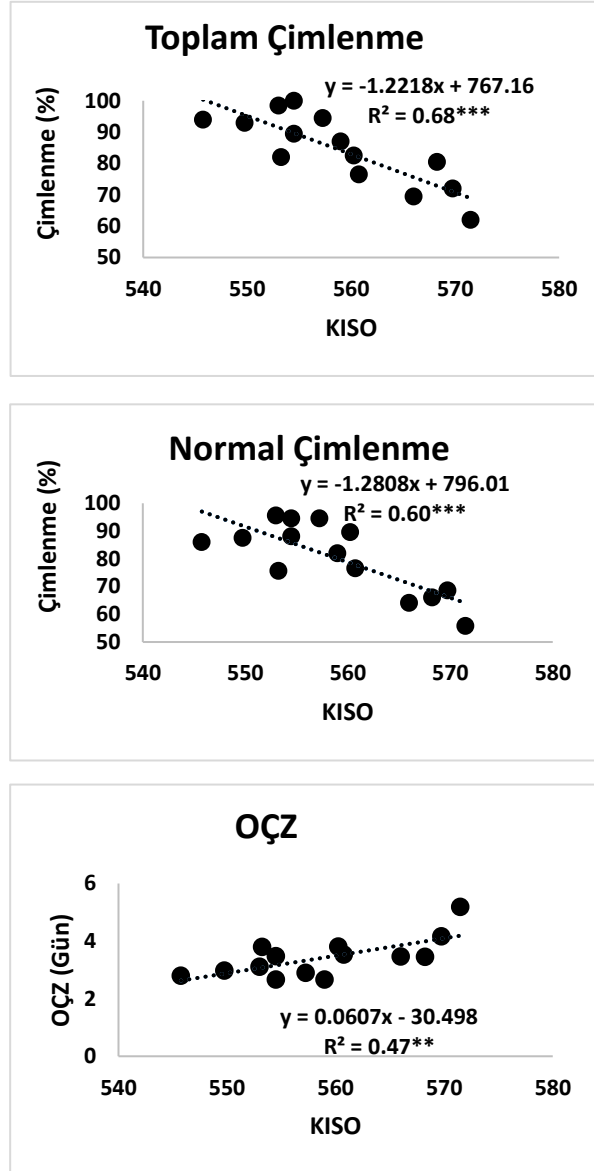
Çizelge 4.2 Biber tohum partilerinde KISO (μs), toplam (TÇO,%), normal (NÇO,%) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim

Tohum Partisi	KISO (μs)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO, %)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO,%)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ, Gün)
1	545 ^a	94 ^b	86 ^b	2.7 ^a
2	549 ^{ab}	93 ^b	87 ^b	2.9 ^{ab}
3	553 ^{bc}	98 ^a	95 ^a	3.1 ^{ab}
4	553 ^{bc}	82 ^d	75 ^d	3.7 ^{cd}
5	554 ^{bd}	89 ^c	88 ^b	2.6 ^a
6	554 ^{bd}	100 ^a	94 ^a	3.4 ^{bc}
7	557 ^{ce}	94 ^b	94 ^a	2.8 ^{ab}
8	559 ^{de}	87 ^c	81 ^c	2.6 ^a
9	560 ^e	82 ^d	89 ^b	3.7 ^{cd}
10	560 ^e	76 ^e	76 ^d	4.1 ^d
11	566 ^f	69 ^f	64 ^f	3.7 ^{cd}
12	568 ^f	80 ^d	66 ^{ef}	3.4 ^{bc}
13	569 ^{fg}	72 ^f	67 ^e	4.1 ^d
14	571 ^g	62 ^g	55 ^g	5.1 ^e

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p<0.05$).

KISO değerleri ile toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanları arasında yapılan regresyon analizi sonuçları biber tohumları için Şekil 4.1'de sunulmuştur. Şekilde gözlendiği gibi kırmızı ışık soğurma oranı her üç kalite kriteri ile yüksek düzeyde anlamlı ve istatistiksel olarak ilişkili ($p<0.01-0.001$) bulunmuştur.

Toplam çimlenme için regresyon değeri $R^2=0.6857$ ($p<0.001$), normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı için bu değerler sırasıyla $R^2=0.6095$ ($p<0.001$) ve $R^2= 0.4734$ ($p<0.01$) olarak saptanmıştır. Bağımsız değişken olan KISO değerlerindeki farklılaşmalar bağımlı değişkenler olan toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanında yüksek düzeyde ve anlamlı şekilde değişime neden olmuştur.



Şekil 4.1 Biber tohum partilerinde KISO (μs) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık (*: $p<0.05$,**: $p<0.01$,***: $p<0.001$) düzeyleri

4.3 Biber Tohumlarında KISO (μ s) Değerlerinin Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi

KISO değerleri ve hızlı yaşlandırma güç testi sonrası toplam ve normal çimlenme değerleri ile ortalama çimlenme zamanı değerleri biber tohum partileri için Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

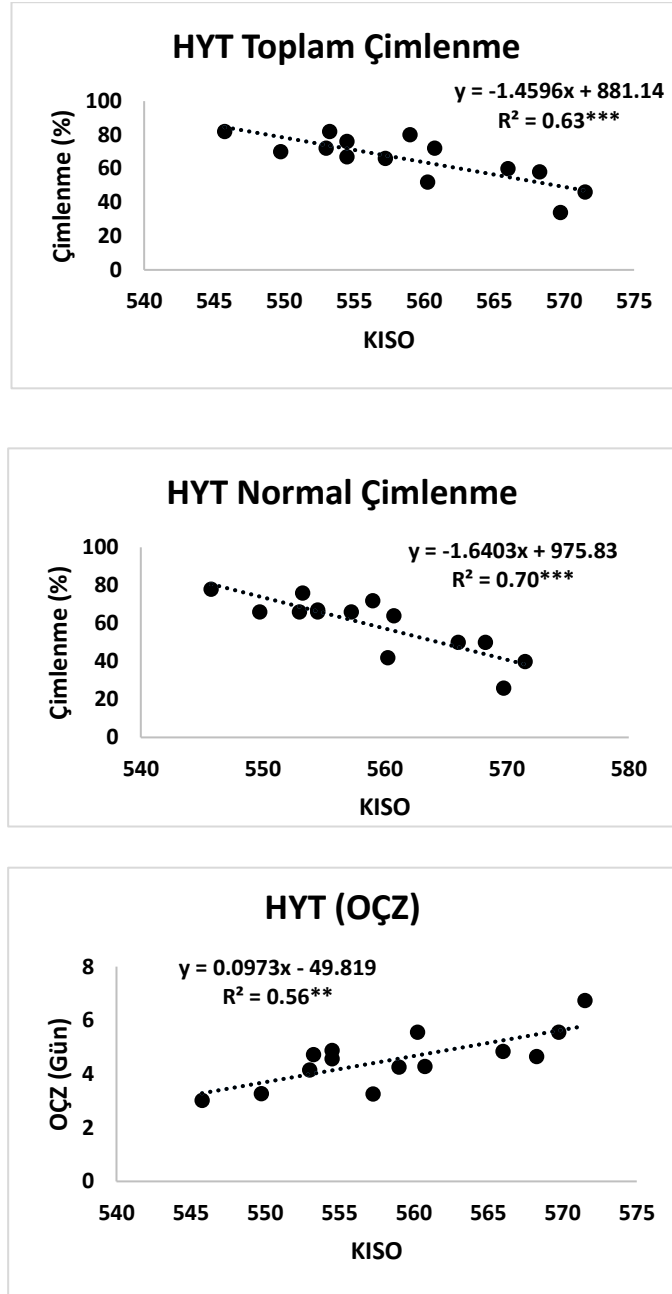
Çizelge 4.3 Biber tohumlarında KISO (μ s) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri

Tohum Partisi	KISO (μ s)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ)
1	545 ^a	82 ^a	78 ^a	3.0 ^a
2	549 ^{ab}	70 ^{cd}	66 ^c	3.2 ^b
3	553 ^{bc}	72 ^c	66 ^c	4.1 ^c
4	553 ^{bc}	82 ^a	76 ^a	4.7 ^g
5	554 ^{bd}	67 ^{de}	67 ^c	4.5 ^e
6	554 ^{bd}	76 ^b	66 ^c	4.8 ⁱ
7	557 ^{ce}	66 ^e	66 ^c	3.2 ^b
8	559 ^{de}	80 ^a	72 ^b	4.2 ^d
9	560 ^e	52 ^g	42 ^e	5.5 ^j
10	560 ^e	72 ^c	64 ^c	4.2 ^d
11	566 ^f	60 ^f	50 ^d	4.8 ⁱ
12	568 ^f	58 ^f	50 ^d	4.6 ^f
13	569 ^{fg}	34 ⁱ	26 ^f	5.5 ^j
14	571 ^g	46 ^h	40 ^e	6.7 ^k

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p < 0.05$).

KISO değerleri daha önce Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Toplam çimlenme değerleri %34 ile %82 arasında değişmiştir. En yüksek değerler %80-82 ile 1, 4 ve 8. lotlardan elde edilmiş ve bu lotlar diğerlerinden istatistiksel anlamda ($p < 0.05$) farklılaşmıştır (Çizelge 4.3). En düşük toplam çimlenme değerleri ise %34 ile 13. tohum partisinde ve %46 ile de 14. tohum partisinde gözlenmiştir. Normal çimlenme yüzdeleri toplam çimlenmeden iki parti hariç düşük olmuştur. Bu fark 11. tohum partisinde olduğu gibi %10 farka kadar

çıkmiştir. Normal çimlenme yüzdesi bakımından 1 ve 4. partiler diğer 12 partiden istatistiksel olarak daha yüksek ($p<0.05$) değerler göstermiştir (Çizelge 4.3). Ortalama çimlenme zamanı 3.0 ile 6.7 gün arasında değişmiştir. En hızlı çimlenme 3.0 ile 1. tohum partisinden, en yavaş çimlenme 6, 7 ile de 14 no'lu partiden sağlanmıştır. Her iki tohum partisi de diğer partilerden istatistiksel anlamda farklılık ($p<0.05$) göstermiştir.



Şekil 4.2 Biber tohum partilerinde hızlı yaşlandırma güç testi (HYT) sonrası KISO (μs) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık (*: $p<0.05$, **: $p<0.01$, ***: $p<0.001$) düzeyleri

KISO değerleri ile tohum g testi olan hızlı yaşlandırma sonrası toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı ile regresyon analizi sonuçları Şekil 4.2’de sunulmuştur. KISO değerleri toplam çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı ile $p<0.01$ düzeyinde normal çimlenme ile ise $p<0.001$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. R^2 değerleri toplam ve normal çimlenme ve de ortalama çimlenme zamanı için sırasıyla 0.63, 0.70 ve 0.56 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.2).

Regresyon analiz sonuçları KISO lmlerinin tohum g parametresi olarak kullanılan hızlı yaşlandırma (HYT) testi sonuçları ile bağlantılı bulunmuş ve tohum gndeki değişimlerin KISO ölçümleriyle tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur.

4.4 Domates Tohumlarında KISO Değerlerinin Toplam (TO) ve Normal imlenme Oranı (NO) ve Ortalama imlenme Zamanı (OZ) İle İlişkisi

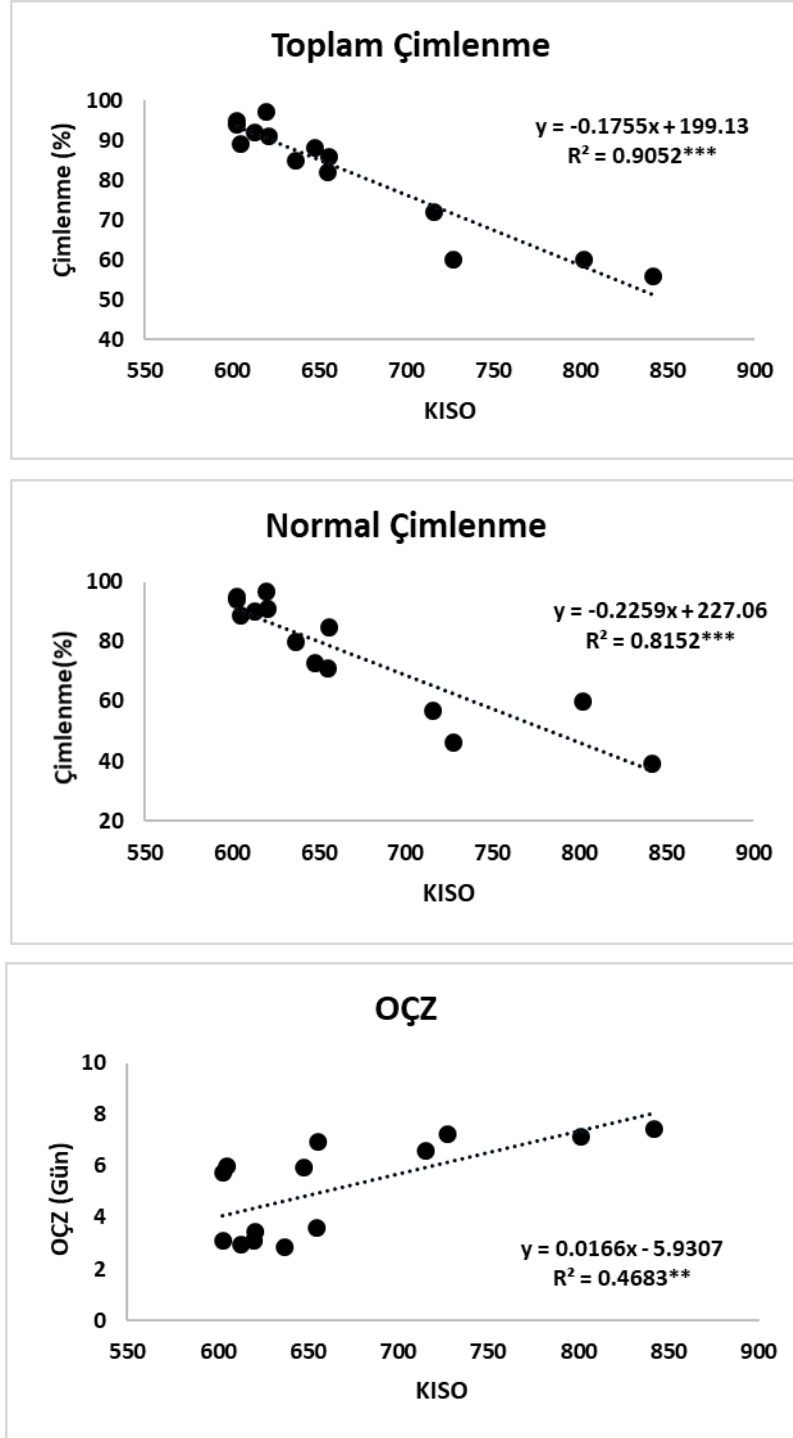
On dört domates tohum partisinin KISO, toplam ve normal çimlenme yüzdeleri ve ortalama çimlenme zamanı değerleri izelge 4.4’te verilmiştir.

Tohum partileri, KISO lm değerlerine göre (μs) olarak en düşük değerden en yüksek değere doğru sıralanmış ve bu kapsamda en düşük değer 603 ile 1. tohum partisinde, en yüksek değer ise 842 ile 14. tohum partisinde ölçülmüştür. Toplam imlenme yüzdeleri %56 ile %97 arasında değişmiş olup, en yüksek değer 5. tohum partisinde, en düşük değer ise 14. tohum partisinde gözlenmiştir. Tohum partileri arasında, istatistiksel olarak anlamlı ve değişen düzeylerde farklılıklar tespit edilmiştir. Özellikle, 5. tohum partisi diğer 13 tohum partisinden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde ($p<0.05$) daha yüksek değer ile ayrılmış, 14. tohum partisi ise diğer tüm tohum partilerine göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük bir değerle ayrılmıştır. Normal imlenme oranı itibariyle 5 ve 2. lotlar %97-95 ile en yüksek ve diğer tohum partilerinden istatistiksel olarak yüksek anlamlı ($p<0.05$) olarak ayrılırken, 14. lot %39 ile en düşük ve diğer 13 lottan daha düşük değer vermiştir. Ortalama imlenme zamanı 3 ile 7.4 gün arasında değişiklikler göstermiş olup en hızlı imlenen tohum partileri 7, 4, 1, 5 ve 6. tohum partileri olurken en yavaş çimlenenler ise 12, 13 ve 14. tohum partileri olmuştur.

Çizelge 4.4 Domates tohum partilerinde KISO(μ s), toplam (TÇO, %), normal (NÇO, %) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim

Tohum Partisi	KISO (μ s)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO,%)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO,%)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ,Gün)
1	603 ^a	94 ^{ab}	94 ^{ab}	3.0 ^a
2	603 ^a	95 ^{ab}	95 ^a	5.7 ^b
3	605 ^{ab}	89 ^{cd}	89 ^c	6.0 ^{bc}
4	613 ^{bc}	92 ^{bc}	90 ^c	2.9 ^a
5	620 ^c	97 ^a	97 ^a	3.1 ^a
6	621 ^c	91 ^{bc}	91 ^{bc}	3.4 ^a
7	637 ^d	85 ^{de}	80 ^e	2.8 ^a
8	648 ^e	88 ^{cd}	73 ^f	5.9 ^b
9	655 ^e	82 ^e	71 ^f	3.6 ^a
10	655 ^e	86 ^{de}	85 ^d	6.9 ^{cd}
11	715 ^f	73 ^f	57 ^g	6.6 ^{bd}
12	720 ^g	63 ^g	46 ^h	7.2 ^d
13	801 ^h	60 ^{gh}	60 ^g	7.1 ^d
14	842 ⁱ	56 ^h	39 ⁱ	7.4 ^d

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p < 0.05$).



Şekil 4.3 Domates tohum partilerinde KISO (μs) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$) düzeyleri

KISO değerleri ile toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanları arasında yapılan regresyon analizi sonuçları domates tohumları için Şekil 4.3'de

sunulmuştur. Şekilde gözlendiği gibi kırmızı ışık soğurma oranı her üç kalite kriteri ile yüksek düzeyde anlamlı ve istatistiksel olarak ilişkili ($p<0.01-0.001$) bulunmuştur. Toplam çimlenme için regresyon değeri 0.9052 ($p<0.001$), normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı için bu değerler sırasıyla 0.8152 ($p<0.001$) ve 0.4683 ($p<0.01$) olarak saptanmıştır. Bağımsız değişken olan KISO değerlerindeki farklılaşmalar bağımlı değişkenler olan toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanında yüksek düzeyde ve anlamlı şekilde değişime neden olmuştur.

4.5 Domates Tohumlarında KISO Değerlerinin Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi

KISO değerleri ve hızlı yaşlandırma güç testi sonrası toplam ve normal çimlenme değerleri ile ortalama çimlenme zamanı değerleri domates tohum partileri için Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

KISO değerleri daha önceki Çizelge 4.4'teki değerler ile aynıdır. Toplam çimlenme değerleri %46 ile %88 arasında değişmiştir. En yüksek değerler %88-84 ile 6, 5 ve 4. lotlardan elde edilmiş ve bu lotlar diğerlerinden istatistiksel anlamda ($p<0.05$) farklılaşmıştır (Çizelge 4.5).

En düşük toplam çimlenme değeri ise %46 ile de 14. tohum partisinde gözlenmiştir. Normal çimlenme yüzdeleri toplam çimlenmeden düşük, iki tohum partisinde ise eşit gerçekleşmiştir. Normal çimlenme yüzdesi bakımından 4, 6 ve 3. partiler diğer 11 partiden istatistiksel olarak daha yüksek ($p<0.05$) değerler göstermiştir (Çizelge 4.5). Ortalama çimlenme zamanı 3.5 ile 9.6 gün arasında değişmiştir. En hızlı çimlenme 3.5 gün ile 4. tohum partisinde, 9.6 gün ile de 12. tohum partisinde sağlanmıştır.

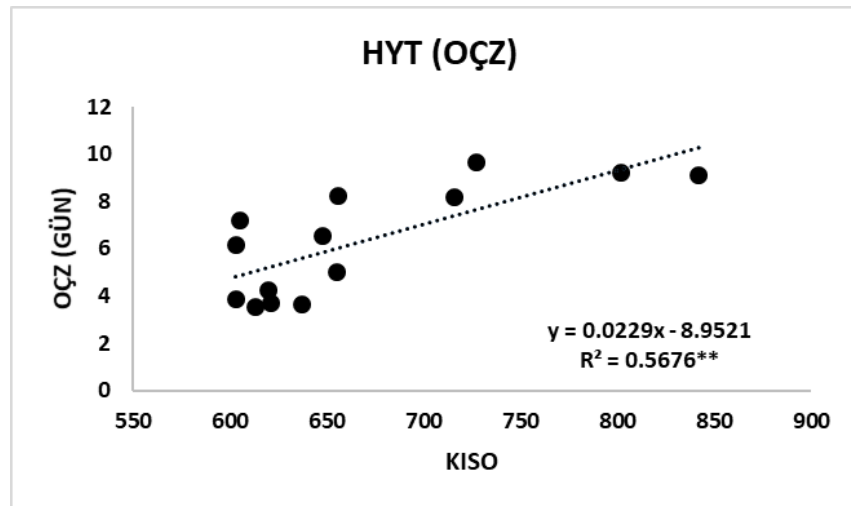
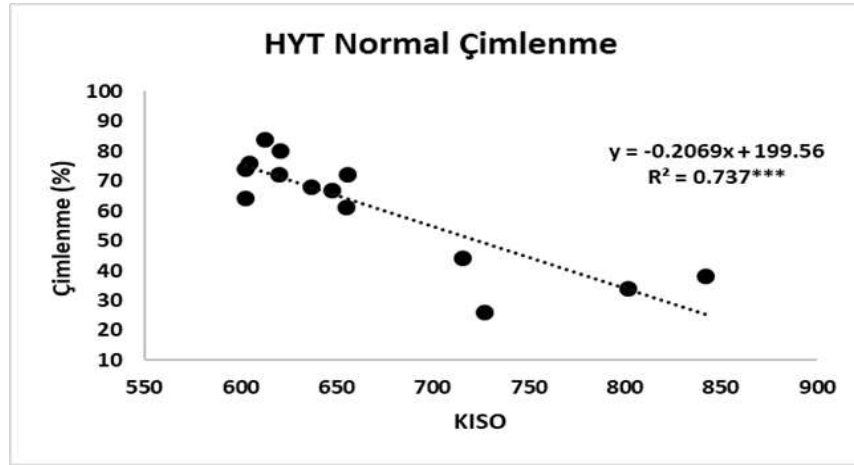
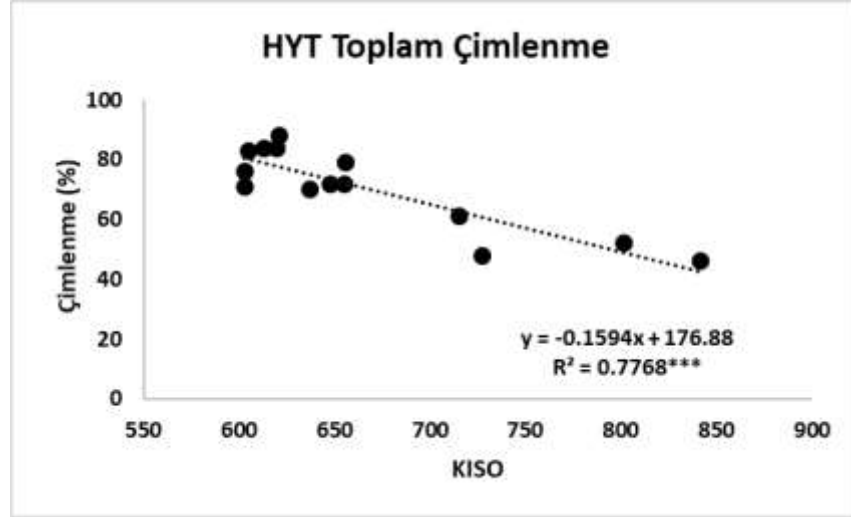
Çizelge 4.5 Domates tohumlarında KISO (μs) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri

Tohum Partisi	KISO (μs)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ)
1	603 ^a	76 ^c	74 ^c	3.8 ^c
2	603 ^a	71 ^d	64 ^{ef}	6.1 ^f
3	605 ^{ab}	83 ^b	76 ^{bc}	7.2 ^h
4	613 ^{bc}	84 ^b	84 ^a	3.5 ^a
5	620 ^c	84 ^b	72 ^{cd}	4.2 ^d
6	621 ^c	88 ^a	80 ^{ab}	3.6 ^b
7	637 ^d	70 ^d	68 ^{de}	3.6 ^b
8	648 ^e	72 ^d	67 ^{de}	6.5 ^g
9	655 ^e	72 ^d	61 ^f	5.0 ^e
10	655 ^e	72 ^d	72 ^{cd}	8.2 ^j
11	715 ^f	61 ^e	44 ^g	8.2 ⁱ
12	720 ^g	48 ^g	26 ⁱ	9.6 ^m
13	801 ^h	52 ^f	34 ^h	9.2 ^l
14	842 ⁱ	46 ^g	41 ^g	9.1 ^k

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p < 0.05$).

Her iki tohum partisi de diğer partilerden istatistiksel anlamda farklılık ($p < 0.05$) göstermiştir.

KISO değerleri ile tohum güç testi olan hızlı yaşlandırma sonrası toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı ile regresyon analizi sonuçları Şekil 4.4'te sunulmuştur. KISO değerleri toplam çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı ile $p < 0.01$ düzeyinde normal çimlenme ile ise $p < 0.001$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. R^2 değerleri toplam ve normal çimlenme ve de ortalama çimlenme zamanı için sırasıyla 0.7768, 0.737 ve 0.5676 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Domates tohum partilerinde hızlı yaşlandırma güç testi (HYT) sonrası KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık (*:p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001) düzeyleri

Regresyon analiz sonuçları KISO ölçümlerinin tohum gücü parametresi olarak kullanılan hızlı yaşlandırma (HYT) testi sonuçları ile bağlantılı bulunmuş ve tohum gücündeki değişimlerin KISO ölçümleriyle tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur.

4.6 Hıyar Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Toplam (TÇO) ve Normal Çimlenme Oranı (NÇO) ve Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ) İle İlişkisi

On bir hıyar tohum partisinin KISO, toplam ve normal çimlenme yüzdeleri ve ortalama çimlenme zamanı değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Hıyar tohum partilerinde KISO (μ s), toplam (TÇO, %), normal (NÇO, %) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim

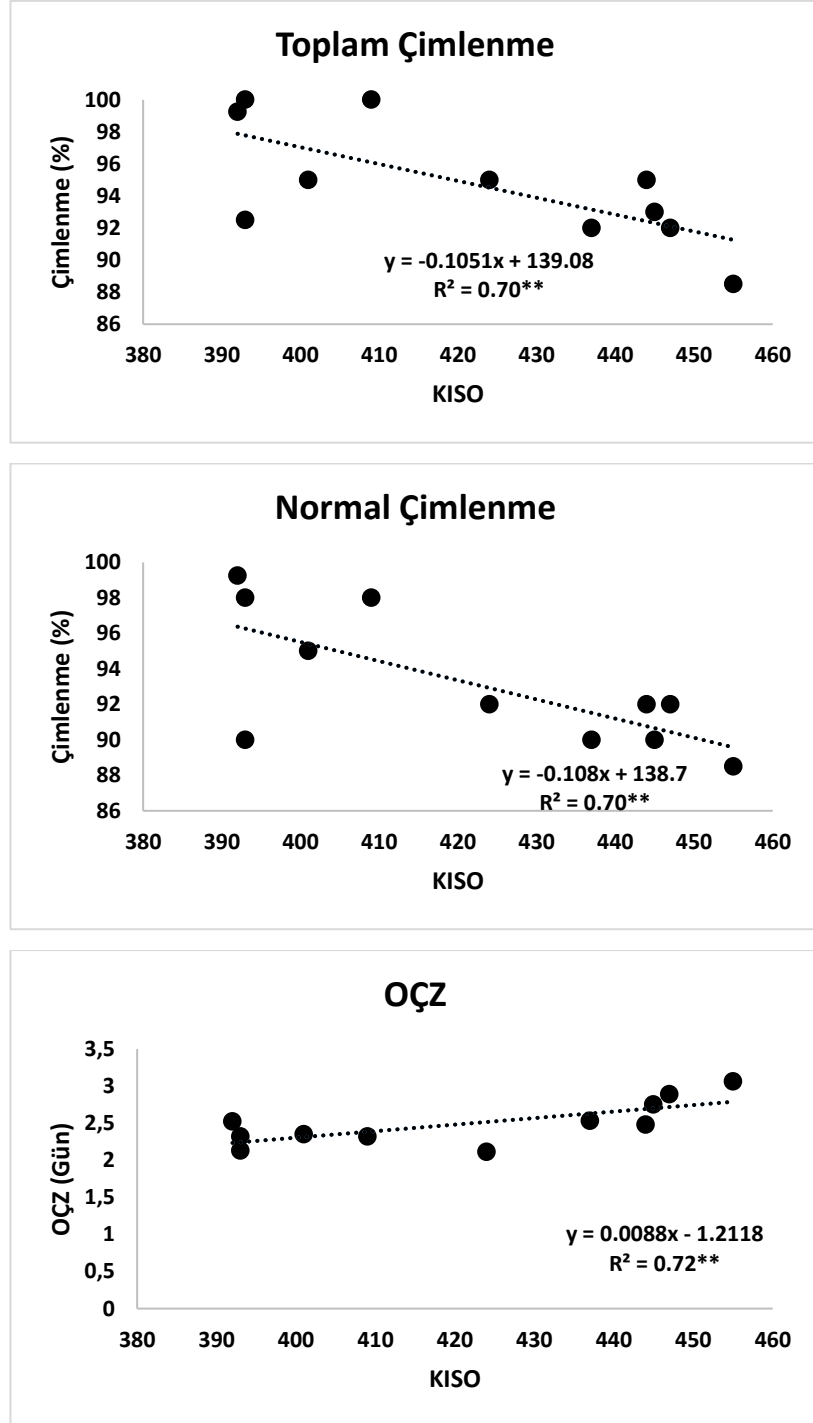
Tohum Partisi	KISO (μ s)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO,%)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ)
1	392 ^a	99 ^a	99 ^a	2.5 ^d
2	393 ^a	92 ^b	90 ^d	2.1 ^a
3	393 ^a	100 ^a	98 ^{ab}	2.3 ^b
4	401 ^b	95 ^b	95 ^{bc}	2.3 ^b
5	408 ^c	100 ^a	98 ^{ab}	2.3 ^b
6	409 ^c	95 ^b	92 ^{cd}	2.1 ^a
7	424 ^d	92 ^{bc}	90 ^d	2.5 ^d
8	437 ^e	95 ^b	92 ^{cd}	2.4 ^c
9	444 ^f	93 ^b	90 ^d	2.7 ^e
10	445 ^f	92 ^{bc}	92 ^{cd}	2.8 ^f
11	447 ^f	88 ^c	88 ^d	3.0 ^g

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p < 0.05$).

Tohum partileri, KISO ölçüm değerlerine göre (μ s) olarak en düşük değerden en yüksek değere doğru sıralanmış ve bu kapsamda en düşük değer 392 ile 1. tohum partisinde, en yüksek değer ise 447 ile 11. tohum partisinde ölçülmüştür. Toplam çimlenme yüzdeleri %88 ile %100 arasında değişmiş olup, en yüksek değer 5. tohum partisinde, en düşük değer ise 11. tohum partisinde gözlenmiştir. Tohum partileri arasında, istatistiksel olarak anlamlı ve değişen düzeylerde farklılıklar tespit edilmiştir. Özellikle, 3 ve 5. tohum partileri diğer 9 tohum partisinden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde ($p<0.05$) daha yüksek değer ile ayrılmış, 11. tohum partisi ise diğer tüm tohum partilerine göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük bir değerle ayrılmıştır.

Normal çimlenme oranı itibariyle 1,3 ve 5. tohum partilerinde %98-99 ile en yüksek ve diğer tohum partilerinden istatistiksel olarak yüksek anlamlı ($p<0.05$) olarak ayrılırken, 11. lot ise %88 ile en düşük ve diğer 10 lottan daha düşük değerle ayrılmıştır. Ortalama çimlenme zamanı 2.11 ile 3.06 gün arasında değişiklikler göstermiş olup en hızlı çimlenenler 2 ve 6. tohum partileri olurken en yavaş çimlenenler ise 10 ve 11. tohum partileri olmuştur.

KISO değerleri ile toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanları arasında yapılan regresyon analizi sonuçları hıyar tohumları için Şekil 4.5'te sunulmuştur. Şekilde gözlendiği gibi kırmızı ışık soğurma oranı her üç kalite kriteri ile yüksek düzeyde anlamlı ve istatistiksel olarak ilişkili ($p<0.01-0.001$) bulunmuştur. Toplam çimlenme için regresyon değeri 0.70 ($p<0.01$), normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı için bu değerler sırasıyla 0.70 ($p<0.01$) ve 0.72 ($p<0.01$) olarak saptanmıştır. Bağımsız değişken olan KISO değerlerindeki farklılaşmalar bağımlı değişkenler olan toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanında yüksek düzeyde ve anlamlı şekilde değişime neden olmuştur.



Şekil 4.5 Hıyar tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$) düzeyleri

4.7 Hıyar Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi

KISO değerleri ve hızlı yaşlandırma güç testi sonrası toplam ve normal çimlenme değerleri ile ortalama çimlenme zamanı değerleri hıyar tohum partileri için Çizelge 4.7 'de sunulmuştur.

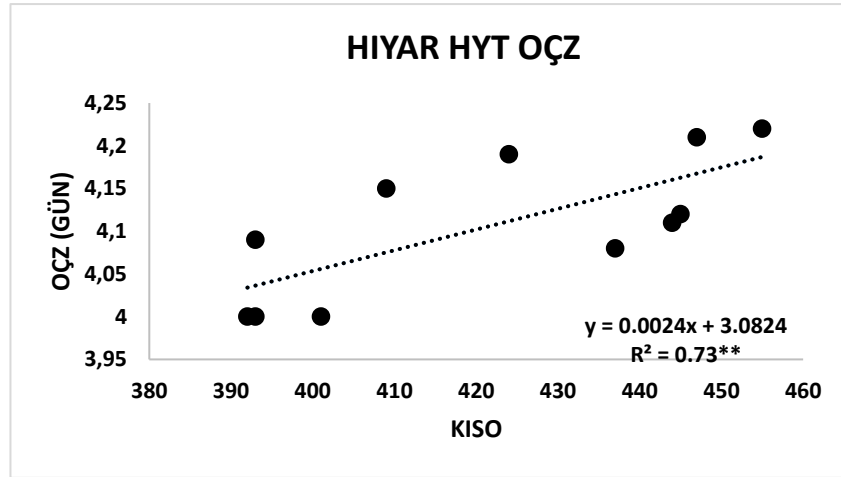
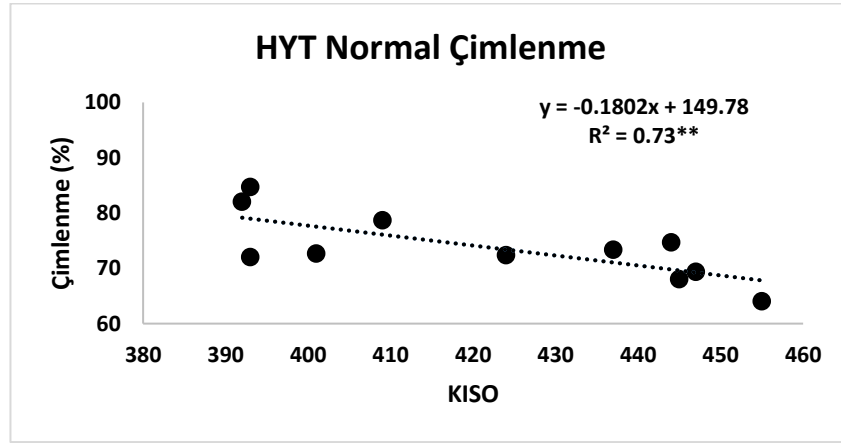
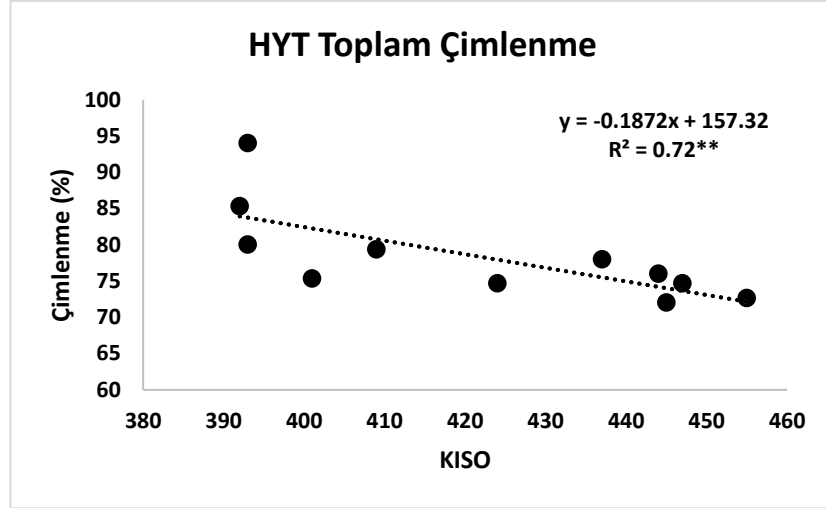
Çizelge 4.7 Hıyar tohumlarında KISO (μs) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri

Tohum Partisi	KISO (μs)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ)
1	392 ^a	85 ^b	82 ^{ab}	4.0 ^a
2	393 ^a	80 ^c	72 ^{cd}	4.0 ^a
3	393 ^a	94 ^a	85 ^a	4.09 ^{bc}
4	401 ^b	75 ^{eg}	84 ^a	4.0 ^a
5	408 ^c	79 ^{cd}	78 ^b	4.15 ^d
6	409 ^c	74 ^{ef}	72 ^{cd}	4.19 ^e
7	424 ^d	78 ^{ce}	73 ^c	4.08 ^b
8	437 ^e	76 ^{de}	74 ^c	4.11 ^{bc}
9	444 ^f	72 ^f	68 ^e	4.12 ^{cd}
10	445 ^f	74 ^{fg}	69 ^{de}	4.21 ^e
11	447 ^f	72 ^g	64 ^f	4.22 ^e

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p < 0.05$).

KISO değerleri daha önceki izelge 4.6'daki değerler ile aynıdır. Toplam imlenme değerleri %94 ile %72 arasında değişmiştir. En yüksek değerler %94 ile 3. partiden elde edilmiş ve bu parti diğerlerinden istatistiksel anlamda ($p<0.05$) farklılaşmıştır (izelge 4.). En düşük toplam çimlenme değerleri ise %72 ile 9 ve 11 lotlarda %74 ile de 6. ve 10. lotlarda gözlenmiştir. Normal imlenme yüzdeleri toplam çimlenmeden bir parti hariç düşük olmuştur. Bu fark 3. tohum partisinde olduğu gibi %10 farka kadar çıkmıştır. Normal imlenme yüzdesi bakımından 3 ve 4. partiler diğer 9 partiden istatistiksel olarak daha yüksek ($p<0.05$) değerler göstermiştir (izelge 4.6). Ortalama imlenme zamanı ise 4 ile 4.22 gün arasında değişmiştir. En hızlı çimlenme 4.0 gün ile 1, 2 ve 4. tohum partisinde, en yavaş çimlenme ise 4.22 gün ile de 11,10 ve 6. tohum partilerinde sağlanmıştır. Bahsedilen tohum partileri diğer partilerden istatistiksel anlamda farklılık ($p<0.05$) göstermiştir

KISO değerleri ile tohum g testi olan hızlı yaşlandırma sonrası toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı ile regresyon analizi sonuçları Şekil 4.6'da sunulmuştur. KISO değerleri toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı ile $p<0.01$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. R^2 değerleri toplam ve normal çimlenme ve de ortalama çimlenme zamanı için sırasıyla 0.72, 0.73 ve 0.73 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Hıyar tohum partilerinde KISO (μs) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi ve anlamlılık (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$) düzeyleri

4.8 Patlıcan Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Toplam (TÇO) ve Normal Çimlenme Oranı (NÇO) ve Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ) İle İlişkisi

On üç patlıcan tohum partisinin KISO, toplam ve normal çimlenme yüzdeleri ve ortalama çimlenme zamanı değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.

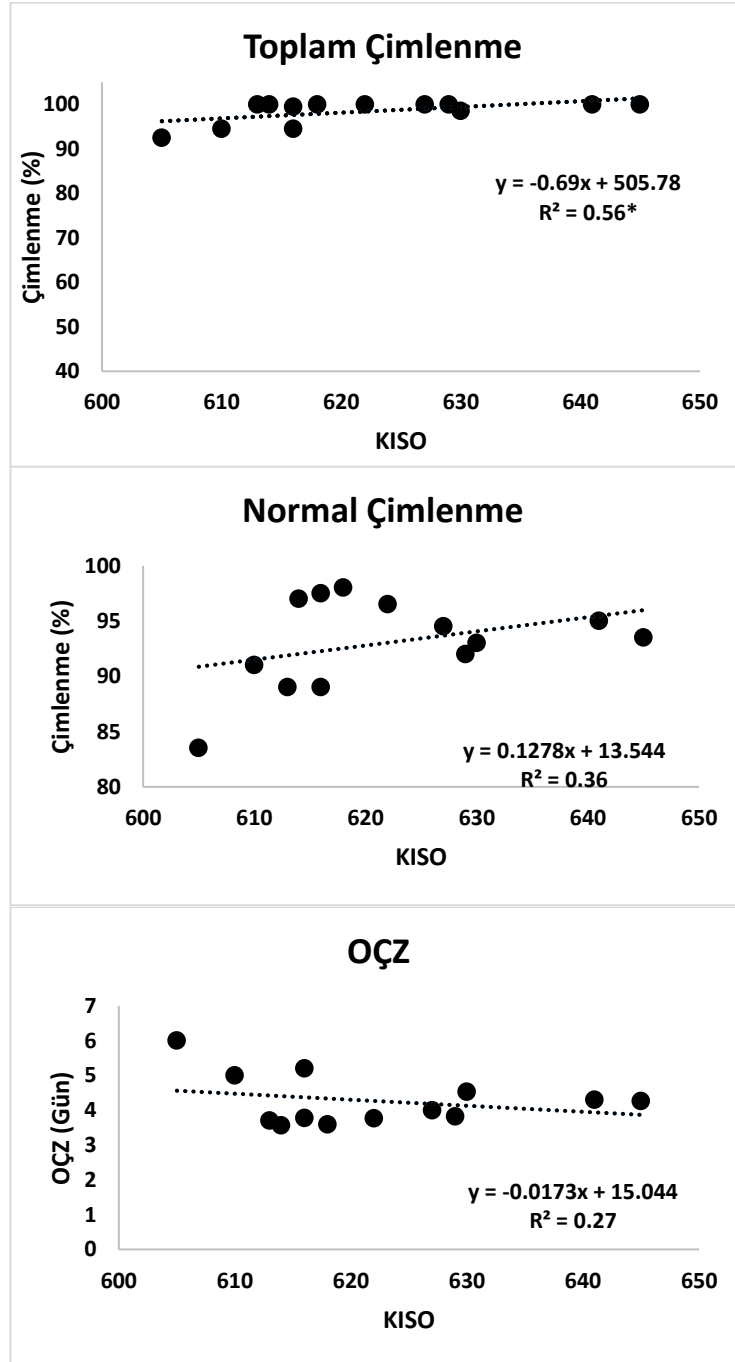
Çizelge 4.8 Patlıcan tohum partilerinde KISO (μ s), toplam (TÇO,%), normal (NÇO,%) çimlenme oranı ve ortalama çimlenme zamanındaki (OÇZ, gün) değişim

Tohum Partisi	KISO (μ s)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO, %)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO,%)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ, Gün)
1	605 ^a	92 ^b	83 ^g	6.0 ^e
2	610 ^b	94 ^b	91 ^{ef}	5.01 ^{cd}
3	613 ^{bc}	100 ^a	89 ^f	3.67 ^a
4	614 ^c	100 ^a	97 ^{ab}	3.55 ^a
5	616 ^{cd}	94 ^b	89 ^f	5.23 ^d
6	616 ^{cd}	99 ^a	97 ^f	3.77 ^{ab}
7	618 ^d	100 ^a	98 ^a	3.58 ^a
8	622 ^e	100 ^a	96 ^{ac}	3.76 ^{ab}
9	627 ^f	100 ^a	94 ^{ae}	4.0 ^{ab}
10	629 ^f	98 ^a	92 ^{df}	3.83 ^{ab}
11	630 ^f	100 ^a	93 ^{ce}	4.53 ^{bd}
12	641 ^g	100 ^a	95 ^{ad}	4.29 ^{ac}
13	645 ^h	100 ^a	93 ^{be}	4.26 ^{ac}

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p<0.05$).

Patlıcan tohum partileri, KISO değerlerine (μ s) göre en düşükten en yükseğe doğru sıralandığında, en düşük değer 605 ile 1. tohum partisinde, en yüksek değer ise 645 ile 13. tohum partisinde ölçülmüştür. Toplam çimlenme oranları %92 ile %100 arasında değişmiş; bu bağlamda 3, 4, 7, 8, 11, 12. ve 13. partiler %100 ile en yüksek çimlenme oranına ulaşırken, en düşük toplam çimlenme oranı %92 ile 1. partide gözlenmiştir. Tohum partileri arasında toplam çimlenme oranı, normal çimlenme oranı ve ortalama çimlenme süresi açısından istatistiksel olarak anlamlı ve farklı düzeylerde varyasyonlar belirlenmiştir. Ancak bu farklılıkların KISO değerleriyle birebir örtüşmediği görülmektedir. Örneğin, en yüksek KISO değerine sahip olan 13. tohum partisi, aynı

zamanda en yüksek toplam çimlenme oranına sahip gruplardan biri olmuştur. Benzer şekilde, normal çimlenme oranı ve ortalama çimlenme süresi açısından da KISO ölçümleri ile arasında tutarsızlıklar dikkat çekmektedir.



Şekil 4.7 Patlıcan tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi

Özellikle patlıcan tohumlarında, doğal olarak düşük klorofil içeriği veya koyu renkli kabuk yapısı, klorofil sinyallerinin KISO cihazı tarafından yeterince algılanamamasına neden olabilir. Bunun sonucunda, bazı partilerde klorofil varlığı düşük görünmesine rağmen çimlenme oranlarının yüksek olması; ya da tam tersi şekilde, düşük KISO değerlerine sahip partilerde beklenenden düşük performansların gözlenmediği saptanmıştır. Bu bulgular, KISO tekniğinin özellikle patlıcan gibi türlerde çimlenme kapasitesini öngörmeye sınırlı bir gösterge olabileceğini düşündürmektedir.

KISO değerleri ile toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanları arasında yapılan regresyon analizi sonuçları patlıcan tohumları için Şekil 4.7’de sunulmuştur. Şekilde gözlendiği gibi kırmızı ışık soğurma oranı her üç kalite kriteri ile yüksek düzeyde anlamlı ve istatistiksel olarak ilişkili ($p>0.05$) bulunamamıştır. Toplam çimlenme için regresyon değeri 0.56, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı için bu değerler sırasıyla 0.36 ve 0.27 olarak saptanmıştır. Toplam çimlenmede %5 düzeyinde bir anlamlılık saptanmıştır. Bağımsız değişken olan KISO değerlerindeki farklılaşmalar bağımlı değişkenler olan toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanında istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymaktadır.

4.9 Patlıcan Tohumlarında KISO Değerlerinin Ticari Tohum Partilerinde Tohum Gücü (Hızlı Yaşlandırma Testi, HYT) İle İlişkisi

KISO değerleri ve hızlı yaşlandırma güç testi sonrası toplam ve normal çimlenme değerleri ile ortalama çimlenme zamanı değerleri patlıcan tohum partileri için Çizelge 4.3’te sunulmuştur.

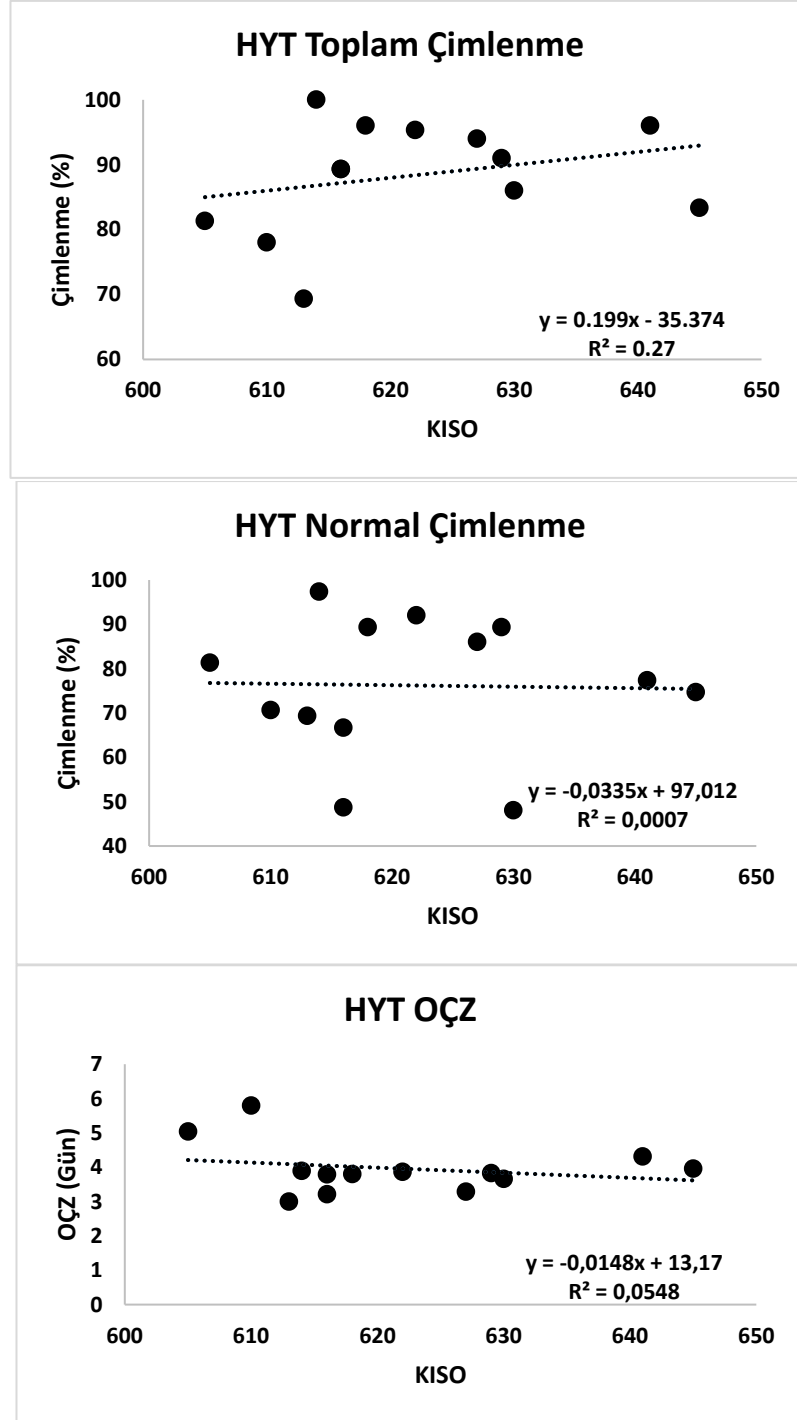
KISO değerleri daha önceki Çizelge 4.8’deki değerler ile aynıdır. Toplam çimlenme değerleri %69 ile %100 arasında değişmiştir. En yüksek değerler %100 ile 4. tohum partisinde elde edilmiştir. En düşük toplam çimlenme değerleri ise %69 ile 3. tohum partisinde gözlenmiştir. Normal çimlenme yüzdeleri toplam çimlenmeden düşük olmuştur. Ancak patlıcan tohumlarında önceki çimlenme testlerinde olduğu gibi hızlı yaşlandırma sonrası çimlendirme testlerinde de tohum partileri arasında istatistiksel

olarak anlamlı ve farklı düzeylerde varyasyonlar belirlenmiştir olmasına karşın bu farklılıkların KISO değerleriyle birebir örtüşmediği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.9 Patlıcan tohumlarında KISO (μ s) değerleri ve Hızlı yaşlandırma testi (HYT) sonrası toplam (TÇO, %), normal çimlenme (NÇO, %) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) değerleri

Tohum Partisi	KISO (μ s)	Toplam Çimlenme Oranı (TÇO, %)	Normal Çimlenme Oranı (NÇO, %)	Ortalama Çimlenme Zamanı (OÇZ, Gün)
1	605 ^a	81 ^{gh}	81 ^d	5.03 ^e
2	610 ^b	78 ^h	70 ^f	5.80 ^f
3	613 ^{bc}	69 ⁱ	69 ^{fg}	3.0 ^a
4	614 ^c	100 ^a	97 ^a	3.88 ^{cd}
5	616 ^{cd}	89 ^{de}	66 ^g	3.21 ^{ab}
6	616 ^{cd}	89 ^{de}	48 ^h	3.79 ^c
7	618 ^d	96 ^b	89 ^{bc}	3.80 ^e
8	622 ^e	95 ^b	92 ^b	3.86 ^{cd}
9	627 ^f	94 ^{bc}	86 ^c	3.28 ^{ab}
10	629 ^f	91 ^{cd}	89 ^{bc}	3.83 ^{cd}
11	630 ^f	86 ^{ef}	48 ^h	3.66 ^{bc}
12	641 ^g	96 ^b	77 ^e	4.30 ^d
13	645 ^h	83 ^{fg}	76 ^e	3.97 ^{cd}

Aynı sütunda bulunan ve farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($p < 0.05$).



Şekil 4.8 Patlıcan tohum partilerinde KISO (μ s) ile toplam, normal çimlenme yüzdeleri (%) ve ortalama çimlenme zamanı (OÇZ, gün) arasındaki regresyon ilişkisi

KISO değerleri ile toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanları arasında yapılan regresyon analizi sonuçları patlıcan tohumları için Şekil 4.9’da sunulmuştur. Şekilde gözlendiği gibi kırmızı ışık soğurma oranı her üç kalite kriteri ile

istatistiksel olarak ilişki ($p>0.05$) bulunamamıştır. Toplam çimlenme için regresyon değeri 0.27, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı için bu değerler sırasıyla 0.0007 ve 0.0548 olarak saptanmıştır (Şekil 4.9). Hızlı yaşlandırma sonrası bağımsız değişken olan KISO değerlerindeki farklılaşmalar bağımlı değişkenler olan toplam ve normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanında istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir etkisinin bulunmadığını ($p>0.05$) ortaya koymaktadır

5. TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, kırmızı ışık soğurma (KISO) prensibine dayalı bir ekipman geliştirilmiş ve bu ekipman aracılığıyla biber, domates, hıyar ve patlıcan tohumlarında olgunluk düzeyi ile tohum kalitesi arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bulgular, KISO değerlerinin biber, domates ve hıyar türlerinde hem olgunluk seviyeleri hem de ticari partilerin kalitesiyle istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler gösterdiğini ($p < 0.05-0.001$) ortaya koymuştur. Öte yandan, patlıcan tohumlarında KISO değerleri ile kalite parametreleri arasında anlamlı bir korelasyon saptanamamıştır ($p > 0.05$). Bu durum, KISO yönteminin diğer üç türden farklı olarak patlıcan türü için uygun bir kalite göstergesi olmadığını göstermektedir.

Tohumların olgunlaşma süreci tohum nemi, kuru madde birikimi, hormonal değişimler vb. boyunca fizyolojik değişimlere paralel olarak tohum kabuğundaki klorofil miktarında belirgin bir azalma ile tanımlanabilir. Bu azalma, tohumun fizyolojik olgunluğuna işaret eden bir belirteç niteliğindedir. Geliştirilen KISO yöntemi, bu azalmayı yansıtan optik ölçümler aracılığıyla tohumların olgunluk düzeylerini ayırt etmede etkili bir araç sunmuştur.

Bu çalışmada geliştirilen KISO ekipmanı, geleneksel imaj analiz tekniklerinden farklı olarak tohum kabuğundaki klorofil miktarını doğrudan oransal olarak ölçerek tohum kalitesini nicel olarak belirlemeye olanak sağlamıştır. Görüntüleme tabanlı sistemlerin tohumlara zarar vermeden ve hızlı sonuç verebilme avantajları, KISO yönteminin de temel dayanaklarından birini oluşturmuştur. Bu yönüyle KISO, klasik görüntü işleme yaklaşımlarının ötesine geçerek kalite değerlendirmesinde özgün bir araç sunmaktadır.- Tohum yapısı bozulmaz ve tohuma zarar verilmez. İmaj analiz metotlarının en önemli avantajlarından biri hızlı karar verme bir diğeri de tohum lotuna herhangi bir laboratuvar testi yapmadan kaliteyi belirleyebilmektir (Dellaquila 2004)

Geliştirilen KISO sistemi, klasik imaj analiz yöntemlerinin birçok avantajını bünyesinde barındırmaktadır. Ölçümler dijital ortamda sayısal veriler üzerinden değerlendirildiği için, renk tespiti gibi öznel yargılara dayalı hatalar minimize edilmiştir. Cihazın uzun

ömürlü kullanım imkânı ve hızlı sonuç üretmesi, özellikle ticari üretim ve tohum partisinin sahada hızla değerlendirilmesi gereken durumlarda pratiklik sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen görüntüler arşivlenebilir, karşılaştırılabilir ve elektronik ortamda kolaylıkla paylaşılabilir niteliktedir. Bu özellikler, KISO'nun sadece yenilikçi değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve kullanıcı dostu bir yöntem olduğunu da göstermektedir. Verilerin üretim yılına göre arşivlenmesi yıllar içinde tohum kalitesinin bölgesel bağlamda değişiminin değerlendirilmesini ekolojinin olgunluğa etkisini gözlemlemek bakımından yararlı sonuçlar doğurabilir (Cicero vd. 2009).

Klorofil flüoresan tekniği, tohum kabuğundaki klorofil varlığını tahribatsız biçimde ölçmesi nedeniyle modern tohum kalite değerlendirme yaklaşımlarında önemli bir yer edinmiştir (Jalink vd. 1999). Bu çalışmada geliştirilen KISO yöntemi, söz konusu tekniği temel alarak, farklı türlerde tohum olgunluğunu ve kalite düzeyini belirlemek üzere yapılandırılmıştır. Özellikle tohum rengi ve morfolojisinde gözle ayırt edilemeyen farkların dijital olarak saptanabilmesi, bu yöntemin hem hız hem de nesnellik açısından avantajlı olduğunu göstermektedir. Benzer yaklaşım daha önce lahanada (Jalink vd. 1998a, 1998b, Dell'Aquila vd. 2002, Yadav vd. 2015), havuç (Groot vd. 2006), ıspanak (Deleuran vd. 2013), biber (Kenanoğlu vd. 2013) ve fesleğen (Altizani-Junior vd. 2023) gibi çeşitli sebze tohumlarında başarıyla uygulanmıştır. Sonuçlar farklı familyalara ait türlerde benzer metodların kullanım şansı bulunabileceğini ortaya koymaktadır. Bizim çalışmamızda üç tür *Solanacea* bir tür de *Cucurbitacea* familyasına aittir. Patlıcan, domates ve biber ile aynı familyaya ait olmakla beraber farklı sonuçlar vermiştir.

İmaj analizleri içinde değerlendirilen klorofil flüoresan tekniği, bitki dokularında bulunan klorofil pigmentlerinin, belirli dalga boylarındaki ışığı (genellikle kırmızı ışık: 670–700 nm) emdikten sonra daha düşük enerjili bir ışık (yaklaşık 720–740 nm) olarak geri yayma (flüoresans) özelliğine dayanır (Jalink vd. 1998, Nijenstein 2014, Yadav vd. 2015). Bu fenomen, özellikle klorofil içeriği yüksek olan genç ya da az olgunlaşmış tohumlarda belirgin şekilde gözlemlenir. Klorofil, ışığı emerken aynı zamanda bir kısmını ısıya, bir kısmını kimyasal enerjiye ve bir kısmını da flüoresan ışığa dönüştürür. Klorofil içeriği azaldıkça bu flüoresan sinyal de azalır. Bu durum, tohumun olgunluk düzeyiyle yakından ilişkilidir. Olgunlaşma sürecinde klorofil parçalanır ve flüoresans seviyesi düşer.

Klorofilin kabuktaki parçalanması bezelye ve bamya gibi sebzelerde olgunlaşma sürecinde çıplak gözle görmek bile olasıdır.

Buradan hareketle kabuğunda yüksek miktarda klorofil taşıyan tohumlarda (az olgun vs.) kırmızı ışık daha yüksek soğurulmakta (düşük kaliteli) kabuğunda klorofil azalmış tohumlarda (olgun vs.) ise daha düşük KISO değeri ile soğurulma az olmakta ve dolayısıyla da negatif lineer bir istatistiksel bağlantı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla KISO ölçümleri ile tohum kalitesi arasında bir negatif ilişki gözlenmektedir. Bu durum farklı türlerde saptanmıştır (Jalink vd. 1998, Dell'Aquila vd. 2002, Yadav vd. 2015, Groot vd. 2006, Deleuran vd. 2013, Altizani-Junior vd. 2023). Örneğin, Kenanoglu vd. (2013) biber tohum partilerinde yaptığı çalışmada hem olgunluk farklılıklarının hem de depolama sonrası ölçümlerden sonra tohum kalite ayırımını klorofil flüoresan metoduyla sağlıklı şekilde ortaya koymuştur. Aynı araştırmacılar biberde farklı çeşitlerde de KF metodunun etkin olduğunu kanıtlamıştır. Belirtilen çalışma okumalarının Hollanda'da yapıldığı ve Wageningen Üniversitesi Tohum Araştırmaları Enstitüsünün imkanlarının kullanıldığı bir araştırmadır. Ancak okumanın yapıldığı ekipmanın oldukça pahalı olması nedeniyle temin edilmesi olanaklı olmamıştır.

Bu tez kapsamında, klorofil flüoresan ekipmanın çalışma prensibine dayalı mevcut sistemlerin sınırlı erişilebilirliği ve yüksek maliyetleri göz önünde bulundurularak, yerli olanaklarla klorofil soğurma ölçümüne dayalı bir ekipman prototipi geliştirilmiştir. Bu süreçte ekipmanın geliştirilmesinde elektronik mühendisi İlker Şahin'in hem program yazmada hem de ekipmanın geliştirilmesinde çok büyük desteği olmuştur. Ölçüm sistemi, programlanan sensör aracılığıyla her bir tohumun ışık absorpsiyon düzeyini sayısal veriye dönüştürerek analiz edilmesini mümkün kılmıştır.

Tohum kabuğunun kırmızı ışığı soğurma düzeyi ile tohum kalitesi arasında ters yönlü bir ilişki olduğu öngörülmektedir. Bu doğrultuda, daha düşük ışık soğurma değerlerine sahip tohumların daha yüksek kaliteye, yüksek soğurma düzeyine sahip tohumların ise daha düşük kaliteye sahip olduğu beklenmektedir. Bu ölçüm parametresi, "kırmızı ışık soğurma oranı" olarak tanımlanmış ve çalışmada KISO kısaltmasıyla ifade edilmiştir.

Biber, domates ve hıyar tohumlarında, KISO değerleri ile toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı arasında yüksek düzeyde anlamlı istatistiksel ilişkiler ($p<0.1-0.001$) elde edilmiştir (Şekiller 4.1, 4,3, 4.5). Ayrıca hızlı yaşlandırma sonrası yapılan çimlenme testi sonuçları ve ortalama çimlenme zamanı değerleri ile de üç türde istatistiksel anlamda ($p<0.1-0.001$) önemli negatif lineer ilişkiler vermiştir (Şekiller 4.2, 4.4, 4.6). Sonuçlarımızda yer alan dört türden biber, domates ve hıyar tohumlarında, KISO değerleri ile kalite parametreleri arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Buna karşılık, patlıcan tohumlarında bu tür bir ilişki saptanamamıştır. Bu durum, KISO yöntemi açısından türler arasında farklılıklar bulunduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.1 Türler göre KISO değeri ile tohum kalite parametreleri arasında istatistiksel düzeydeki anlamlılık sayıları ve düzeyleri tablosu

Tür	Kalite Parametreleri			Anlamlılık Seviyeleri		
	Toplam Çimlenme (%)	Normal Çimlenme (%)	Ortalama Çimlenme Zamanı (Gün)	P<0,05	P<0,01	P<0,001
Biber	0.68***	0.60***	0.47**	0	1	2
Domates	0.90***	0.81***	0.46**	0	1	2
Hıyar	0.70**	0.70**	0.72**	0	3	0
Patlıcan	0.56*	0.36	0.27	1	0	0

Tür	Hızlı Yaşlandırma (Güç Testi) Sonrası Kalite Parametreleri			Anlamlılık Seviyeleri		
	Toplam Çimlenme (%)	Normal Çimlenme (%)	Ortalama Çimlenme Zamanı (Gün)	P<0,05	P<0,01	P<0,001
Biber	0.70***	0.63***	0.56**	0	1	2
Domates	0.77***	0.73***	0.56**	0	1	2
Hıyar	0.72**	0.73**	0.73**	0	3	0
Patlıcan	0.27	0.0007	0.05	0	0	0

Çizelge 5.1’de türlere göre KISO değerleri ile tohum kalitesinin toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme değerlerinin değişimi ile hızlı yaşlandırma öncesi ve sonrası istatistiksel anlamlılık düzeyleri ve sayıları ortaya konmuştur. Bu çizelgedeki sonuçlar, KISO metodunun biber, domates ve hıyarda $P < 0.01$ ve üzerinde değerlerde anlamlılık göstererek oldukça başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. KISO okumalarının tohum çimlenmesi yanında fide kalitesiyle yakından alakalı olan ortalama çimlenme zamanı ile de yüksek düzeyde anlamlı ilişki vermesi fide üretim sürecinde tohum gücünün seviyesini de belirleyici olması bakımından değerlidir. Nitekim Demir vd. (2008) biber tohumlarında çimlenme hızının fide kalitesi, fide boyutu ile yakından ilgili olduğunu ortaya koymuştur. Bu açıdan tohum partilerinin güç sınıflandırmasında da ilgili metodun kullanım alanı bulabileceğini öne sürebiliriz.

Patlıcan tohumlarında KISO ile kalite parametreleri arasında anlamlı bir ilişki saptanamamış olması, yöntemin türler arası etkinliğinde farklılıklar olabileceğini göstermektedir. Bu durumun muhtemel nedenlerinden biri, patlıcan tohum kabuğunun sarı-kahverengi pigment yapısı nedeniyle klorofil içeriğinin düşük olması ya da kullanılan ışık dalga boyunun bu yapıdan yeterli yansıma alamamasıdır. Benzer şekilde, pirinç tohumlarında da beyaz (açık) renk nedeniyle klorofil flüoresan yönteminin sınırlı başarı gösterdiği bildirilmiştir (Hay vd. 2015). Dolayısıyla, KISO yönteminin başarısı yalnızca klorofil miktarına değil; aynı zamanda tohum kabuğunun pigment içeriği, ışık geçirgenliği ve yüzey özellikleri gibi fiziksel faktörlere de bağlıdır. Bu bulgu, yöntemin her türde aynı doğrulukla uygulanamayabileceğini göstermektedir. Buna rağmen, çalışmada yer alan diğer üç sebze türünde (biber, domates, hıyar) elde edilen yüksek uyumlu sonuçlar, KISO sisteminin sebze tohum teknolojisinde yerli ve hızlı bir kalite değerlendirme aracı olarak önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda dikkate alınabilecek diğer bir konu tür içindeki çeşit farklılığıdır. Biz çalışmamızda tür içindeki farklı çeşitleri beraber değerlendirdik. Çeşitler arasında farklılık olabileceği varsayılabilir. Ancak Kenanoğlu vd. (2013) çeşitler arasında da farklılığın önemli olmadığını KF metodunun biberde çeşitler farklı olsa da etkin şekilde kullanılabilirdiğini kanıtlamıştır. Yine de gelecekte yapılacak çalışmalarda çeşit farklılıklarının KISO okumalarına etkili olup olmadığının test edilmesi gündeme getirilebilir.

Son yıllarda yoğun kullanım alanı bulan imaj analizleri tohumu nemiyle tanımlamadan ve çimlendirme evresine geçmeden sınıflandırmaya, kalitesinin artırılmasına olanak verir. Bu amaçla farklı metotlar kullanılmaktadır (Dell'Aquila 2005; Pinto vd. 2009; Medeiros vd. 2018). Tohumun genişliği, kalınlığı şekli gibi farklı morfolojik özellikleri kullanarak kalite saptaması yapılır. İmaj analizleri kısa sürede sonuç vermesi ve etkin kullanım sağlaması bakımından tohum teknolojisinde önem taşımaktadır (Dell'Aquila vd. 2000, Geneve ve Kester 2001, Galletti vd. 2020, Iradukunda vd. 2024). Bu çalışmada geliştirilen KISO ekipmanı da, benzer şekilde tohum partilerinin çimlenme potansiyeli ve tohum gücü hakkında hızlı ve güvenilir bir öngörü sunmaktadır. Özellikle tohum partisinden alınan küçük örneklerle yapılan ölçümlerin, tüm partinin kalite değerlendirmesinde temsil edici olması hem ticari uygulamalarda hem de zaman kısıtlı ortamlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Kuru tohumlar üzerinde gerçekleştirilen bu analiz, laboratuvar süreçlerini hızlandırmakta ve sahada karar alma süreçlerini desteklemektedir.

Tohum çimlenmesi kalitenin önemli bir yönü olmakla beraber tohum gücü de kalitenin vazgeçilmez unsurlarındandır. Tohum çimlenmesi tohumun ideal koşullarda test edilmesiyle elde edilir. Bugün geçerli olan ve en geniş anlamda kabul gören iki tanımlamaya göre tohum gücü, "Tohum veya tohumluk partilerinin çimlenme ve fide çıkışı sırasındaki performans ve aktivitelerini belirleyen tüm özelliklerinin toplamı" (Powell 2022). Diğer tanımlamada ise "Tohumun geniş çevre koşulları altında hızlı, bir örnek çıkış ve normal fide oluşturma kabiliyeti" (ISTA 2022) olarak tanımlanmıştır. Tanımlardan da anlaşılacağı gibi tohum gücü birçok faktörden etkilenmektedir. Tohum gücü 'Tohum gücü yüksek çimlenme yeteneğinde olsalar da stres ya da optimum olmayan koşullarda tohumun performans gösterme yeteneğini ortaya koymaktadır (ISTA, 2022). Bu bakımdan tohum gücünün test edilmesine olanak veren farklı güç testleri bulunmaktadır. Hızlı yaşlandırma testi bunlardan biridir (ISTA 2022). Hızlı yaşlandırma testinde tohumlar %100 oransal nemde 41°C'de 72 ya da daha uzun saatler tutarak çimlenmedeki düşme oranına göre gücü test etme temeline dayanmaktadır. Hızlandırılmış yaşlandırma testi AOSA ve ISTA tarafından soya fasulyesi tohumları için onaylanmış bir güç testi (ISTA 2022) olmakla birlikte farklı türler (marul, domates, biber, soğan, fasulye, mısır, buğday, kolza, tütün, sorgum, yonca vb.) için de kullanılan bir test

yöntemidir (Powell 2022). Güç testlerinin sonuçları tohum partisinin araziye doğrudan ekilmesinde ya da sera koşullarında fide yetiştirme dönemindeki çıkış performansı ile yakından ve istatistiksel olarak bağlantılı bulunmuştur (Demir vd. 2019, Demir vd. 2022, Powell 2022). Bu çalışmada hızlı yaşlandırma testi koşulları olarak 41 °C, %100 oransal nem ve 96 saati kullanılmıştır. Bütün türlerde yaşlanma sonrası çimlenme değerleri düşme eğilimi göstermiştir. Hızlı yaşlanma sonrası KISO değerleri ile toplam çimlenme, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanının istatistiksel olarak önemli düzeyde ilişkili olması KISO metodunun tohum çimlenme değerlerinin doğal ya da yapay yaşlanma ile düştüğü tohum partilerini kalite olarak ayırımında da başarılı şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu açıdan tohum teknolojisinde depolama sonrası tohum çimlenme düzeyinin belirlenmesinde KISO metodunun kullanılması tohum partilerinin kullanımında, satışa sunulmasında yararlı olacaktır. Belirtilen savımızı destekler nitelikte Kenanoğlu vd (2016) biber tohumlarında depolama sonrasında yaptığı imaj analiz ayırımıyla kalitenin artırılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Bu sonuç depolama sürecinde tohum kabuğundaki klorofilin parçalandığı ve düşük kaliteli tohum partilerinin daha hızlı bir kayıp gösterdiği öngörülebilir. Nitekim Yadav vd. (2015) yaşlandırılmış lahana tohumlarında Klorofil tespit metodunun başarılı şekilde kullanıldığını belirlemiştir. Bu çalışmalar bizim ölçüm yöntemimizin ortaya koyduğu sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Tohum üreticileri ürettikleri yılda satamadıkları tohumları bir sonraki yıllarda depoladıktan sonra satışa sunmaktadır. Depolama sonrası çimlendirme yapma gereksinimi olmadan tohum çimlenme değerini tahmin etmek hem iş gücü hem de hız bakımından önemli olacaktır. Elde edilen bulgular, KISO ölçümlerinin biber, domates ve hıyar tohumlarında, depolama sonrasında da kalite parametreleriyle yüksek düzeyde anlamlı ilişkiler sunduğunu göstermektedir. Bu sonuç, sistemin yeni tohum partilerinde değil, aynı zamanda depolanmış materyallerde de etkin şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu tohum partilerinin üretildiği yıl satılmayan kısmının depolanması halinde oluşacak kalite kaybının KISO ekipmanı ve yöntemiyle saptanabileceğini göstermektedir.

KISO ekipmanının üretimi üst düzey elektronik bilgisi ve teknolojik yazılım desteğine gerek duymuştur. Günümüz ileri teknoloji uygulamalarında bu tür tekniklerin tarımsal teknolojilerde tohumun yanında diğer bitki özellikleri için de kullanılabileceğini

görmekteyiz. Nitekim Iradukunda vd. (2024) marul bitkilerinde yapraklardaki renk değişimi ve klorofil değişiminden bitkinin sağlıklı oluşunu ve güçlü yapısını tahmin etmiş ve buna göre bitkileri sınıflandırmıştır. Hatta tohumdaki hastalıkların ve fungal etmenlerin (Jansen, 1995, Bodevin vd. 2009) saptanmasında da bu metottan yardım alınabileceği belirlenmiştir.

Tohum gen bankalarında çimlenme oranının %85'in üzerinde olması, genetik bütünlüğün korunması açısından kritik bir eşik olarak kabul edilmektedir. Bu sınırın altına düşülmesi, genetik bozulmalar ve mutagenik değişim risklerini artırmakta, dolayısıyla tohum partisinin yeniden üretilmesini zorunlu kılmaktadır (Hay vd. 2015). Ancak binlerce örneğin muhafaza edildiği gen bankalarında bu sürecin manuel olarak takibi yüksek düzeyde iş gücü ve zaman gerektirir. KISO yöntemi, depolama sürecinde çimlenme kapasitesinin sayısal olarak (% değer) tahmin edilmesine olanak sağlayarak, bu tür büyük ölçekli koleksiyonların daha verimli izlenmesine katkı sunabilir. Sistem, erken uyarı işlevi görerek, yenileme gerektiren partilerin önceden belirlenmesini mümkün kılabilir. Bu tür bir kullanım, daha önce lahana tohumları üzerinde Dell'Aquila vd. (2002) tarafından önerilmiştir.

KISO değerleri türlere göre farklı düzeyde gerçekleşmiştir. Biberde 545 ile 575 μ s, domateste 600 ile 850 μ s arasında hıyarda 392 ile 447 μ s arasında patlıcanda ise 605 ile 645 μ s arasında olmuştur. Bu farklılıklar, her türün kendine özgü pigment yapısı ve optik özelliklerinin KISO sonuçlarını etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, yöntemin farklı türlerde uygulanabilirliğinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma dört yaygın sebze türü üzerinde gerçekleştirilmiş olup, elde edilen veriler yöntemin tür bazında kalibrasyon ihtiyacına işaret etmektedir. KISO sisteminin daha geniş bir tür yelpazesinde test edilmesi, yöntemin genellenebilirliğini artırmak ve sebze tohum teknolojisinde daha kapsamlı bir uygulama alanı oluşturmak açısından önem taşımaktadır.

Sebze türlerinin çoğu sürekli çiçeklenme gösteren türlerdir. Örneğin domateste ilk 4 salkım genelde tohum alımında kullanılır. Salkımların ilk çiçeklenme ve gelişimi

kademeli olur. İlk salkımın meyveleri tohumlarını daha erken olgunlaştırır. Daha sonraki salkımlardaki meyvelerin tohumları doğa olarak daha geç olgunlaşır ve daha küçük olabilir. Benzer oluşum biberde, hıyarda da vardır. Meyveler farklı boğumlarda ya da çatallarda oluşur. Meyvelerin oluşumu zamana yayılır. Dolayısıyla da tohum olgunluğu da benzer özellik gösterir. Serada üretim yapılan hibrit tohumlarda kademeli hasat yaparak olgunlaşmış meyveleri almak kimen de olsa yeknesak olgunluğu sağlayan bir yöntem olabilir. Biz çalışmamızda hibrit tohumlardan kullanamadık. Hem pahalı hem de kolay elde edilemedikleri için açık tozlanan tohum partileri ile testlerimizi yaptık. Açık tozlanan ve geniş alanlarda üretimi yapılan hibritlere göre daha az pahada olan açık tozlanan türlerde tohum hasadı kademeli olarak yapılmaz. Olgunlaşmış meyveler ‘once-over’ hasat denilen tek seferde tüm meyveler alınır; tohum partilerinde çok olgun ve az olgun meyveler beraber bulunur. Sezon yeterince uzun değilse üst kısımdaki salkımlarda ya da meyvelerde olgunlaşma gecikir. Bitki uzun bir sezonda dahi yapraklarını kaybeder sararmaya başlar ve de mevcut meyveleri besleyemez. Farklı olgunluktaki meyvelerin karışım halinde olduğu bir hasa tohum çimlenme ve çıkışının kademeli olmasının önemli bir nedenidir. Bu olgunluk farkları depolama sürecinde de tohumlar arası farkın oluşmasına neden olur. Daha az olgun tohum içeren lotlardaki kaliteyi KISO okumaları ile klorofil soğurmaya göre ayıklamak belirlemek tohum partilerinin sağlıklı karşılaştırmasına olanak verir. Nitekim Çizelge 4.1’de olgunluk farklarının KISO ölçümü ile saptanabilmesi bu metodun olgunlaşma ile ilgili farklılıklarda da kullanılabileceğini göstermektedir. Benzer sonuçları Jalink vd. (1998), Kenanoğlu vd. (2013), Deleuran vd. (2013), sırasıyla lahana, biberde ve ıspanakta farklı olgunluk seviyelerindeki tohumlarda klorofil ölçüm metodunun kullanılabileceğini saptamışlardır. Wageningen üniversitesi kapsamındaki araştırma enstitüsü tohum partisindeki her bir tohumun kalitesine göre ayrımının yapılabileceğini göstermektedir (Jalink vd. 1998). Ancak bu ileri düzey bir ekipmanı gerekli kılmaktadır. Bizim çalışmamızda tohumun alınan örnek üzerinden yaklaşık 50 adet tohumda değerlendirmesini yaptık. Okuma yapılan örnekler sağlıklı şekilde alınırsa verimli sonuçlar vereceğini düşünüyoruz. Deleuran vd. (2013) iyi örnekleme ile kalite testlerinin tüm lotlarda verimli sonuçlar doğurabileceğini ıspanak tohumlarında ortaya koymuşlardır.

Ziraat Mühendisleri Odası tarafından her 5 yılda bir yapılan ve ülkemiz tarımının değerlendirilmesinin yapıldığı kongredeki makalede Balkaya vd. (2025) ülkemizde tohum teknolojisi konusunda, tohumluğun hasadından başlayarak, kurutma, işleme, depolama ve kalite iyileştirici uygulamalarda önemli hataların yapıldığı ve eksik uygulamaların olduğunu bildirmişlerdir. Özellikle yabancı kaynaklara muhtaç olmanın hem pahalı hem de zor koşulları oluşturabildiğini ifade etmişlerdir. Bunun için tohumluğun hasadından satışına kadar olan tüm aşamalarda gelişmiş tekniklerin kullanımının ve buna yönelik yerli üretim teknolojilerinin geliştirilmesi tohumculuk sektöründe iyileşmenin önemli yollarından biri olacağı ifade edilmiştir. Üretimde gelişmenin en önemli yolu ileri kalite tekniklerin kullanıldığı ekipmanların üretilmesi ve sektöre kazandırılmasıdır. Çoğunlukla bu ekipmanlar yurt dışından getirilmekte ve yüksek maliyetler ödenmektedir. Firmalar için bu tip yatırımlar gider maliyetlerini arttırmaktadır.

Bu tezin en önemli katkılarından biri, sebze tohumlarında kalite değerlendirmesi amacıyla kullanılacak, efektif ve yerli üretim bir test ekipmanının geliştirilmiş olmasıdır. Elde edilen bulgular, söz konusu ekipmanın biber, domates ve hıyar tohumlarında güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuş; yöntemin bu üç türde etkinliğini doğrulamıştır.

Ekipmanın geliştirilme süreci, biyoloji, tarım ve elektronik mühendisliği disiplinlerinin ortak katkısıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda çalışma, yalnızca bilimsel içerik açısından değil, aynı zamanda disiplinler arası iş birliği modeli açısından da özgün bir örnek teşkil etmektedir. Gelecek aşamalarda, sistemin farklı sebze türlerinde de test edilmesi hedeflenmekte olup, bu genişletme çalışmaları yöntemin genellenebilirliğine yönelik önemli veriler sağlayacaktır. Ayrıca sistemin, tohum gen bankaları, fide üretim tesisleri ve tohum ticareti gibi geniş uygulama alanlarında hızlı, tahribatsız ve sayısal değerlendirme ihtiyacını karşılayabilecek bir potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir. Bu konudaki çalışmalarımıza gelecek yıllarda hız verilecektir.

6. SONUÇ

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışma, tohum kalitesinin tahribatsız ve hızlı biçimde değerlendirilmesine yönelik geliştirilen KISO ekipmanının, farklı sebze türlerinde uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Araştırma bulgularına dayalı olarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1- Kırmızı ışık soğurma metodu biber, domates ve hıyar tohumlarında çimlenme oranı, normal çimlenme ve ortalama çimlenme zamanı gibi kalite parametrelerini öngörmede istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler sunmuş ve etkili bir değerlendirme aracı olarak kullanıma uygun bulunmuştur.
- 2- Patlıcan tohumlarında, KISO değerleri ile kalite göstergeleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki saptanamamıştır. Bu durumun, türün pigment yapısına ve kabuk özelliklerine bağlı optik sınırlamalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- 3- KISO değerleri hızlı yaşlandırma testi sonrası da tohum çimlenmesi değerleri ile bağlantılı bulunmuştur. Bu bakımdan tohum partilerinin sera ya da arazi çıkış değerleri ile bağlantılı olabileceğini göstermektedir.
- 4- Farklı sebze türlerinde KISO sisteminin etkinliğinin test edilmesi, yöntemin genellenebilirliğini değerlendirmek ve sebze tohum teknolojisinde daha kapsamlı bir uygulama alanı oluşturmak açısından önemli bir sonraki adımı temsil etmektedir.
- 5- KISO ekipmanı tahrip etmeden tohum kalitesinin saptanmasında kullanılabilir.
- 6- KISO değerleri tohumların depolamadan sonra da kalitenin saptanmasında kullanılabileceğini öngörmektedir. Hızlı yaşlandırma testi sonrası yapılan testlerde çimlenmenin saptanabilmesi bu öngörüğü desteklemektedir.
- 7- Tezin en önemli bulgusu KISO ekipmanının imalatı ve pratik olarak kullanım potansiyelinin ortaya konmuş olmasıdır.
- 8- Ekipman özkaynaklar kullanılarak üretilmiş ve geliştirilmiştir. Bedeli konusunda herhangi bir öngörü bulunmamaktadır. Ancak üretim söz konusu olduğunda belirli bir maliyetle üretimin yapılabilmesi ön görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, I. S., Reid, J. F., Paulsen, M. R. and Sinclair, J. B. (1999). Color classifier for symptomatic soybean seeds using image processing. *Plant Disease*, 83(4), 320-327.
- Altizani-Júnior, J. C., Cicero, S. M., Alves, R. M. and Gomes-Junior, F. G. (2023). Non-destructive assessment of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) seeds quality. *Journal of Seed Science*, 45, 202345036.
- Balkaya, A., Arın, L., Duman, I., Kaymak, H.Ç , Mavi, K., Çelikel, F. G., Kavak, S. , Ermiş, S., Akyüz, B., Zengin, S. ve Atasoy, S. 2025. Türkiye Ziraat Mühendisliği X. Teknik Kongresi, 13-17 Ocak 2025, Ankara, 394-421.
- Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, 9(7), 1055.
- Bodevin S, Larsen TG, Lok F, Carstensen JM, Jørgensen K and Skadhauge B (2009) A rapid non-destructive method for quantification of fungal infection on barley and malt. Poster presented at 32nd EBC Congress, Hamburg, Germany, 10–14 May 2009.
- Büyük, İ., Ankara Üniversitesi Açık Ders Notları. Erişim Ocak 2022. Botanik Ders Notları Klorofil Soğurma Grafiği.
- Borges, S. R. D. S., Silva, P. P. D., Araújo, F. S., Souza, F. F. D. J., and Nascimento, W. M. (2019). Tomato seed image analysis during the maturation. *Journal of Seed Science*, 41(1), 022-031.
- Carvalho, J.A.; von Pinho, E.V.R.; Oliveira, J.A.; Guimarães, R.M. and Bonome, L.T. 2002. Rapid tests for evaluating the physiological quality of citromelo Swingle seeds. *Revista Brasileira de Sementes* 24, 263-270.
- Cicero, S. M., Schoor, R. V. D. and Jalink, H. (2009). Use of chlorophyll fluorescence sorting to improve soybean seed quality. *Revista Brasileira de Sementes*, 31, 145-151.
- De Medeiros, A. D., Pinheiro, D. T., Xavier, W. A., da Silva, L. J. and Dos Santos Dias, D. C. F. (2020). Quality classification of *Jatropha curcas* seeds using radiographic images and machine learning. *Industrial Crops and Products*, 146, 112162.
- Deleuran, L. C., Olesen, M. H. and Boelt, B. (2013). Spinach seed quality: potential for combining seed size grading and chlorophyll fluorescence sorting. *Seed Science Research*, 23(4), 271-278.
- Dell'Aquila, A., Van Eck, J. W. and Van Der Heijden, G. W. A. M. (2000). The application of image analysis in monitoring the imbibition process of white cabbage (*Brassica oleracea* L.) seeds. *Seed Science Research*, 10(2), 163-169.
- Dell'Aquila, A., R. Van der Schoor, and H. Jalink. (2002). Application of chlorophyll fluorescence in sorting controlled deteriorated white cabbage seeds. *Seed Science and Technology*, 30(3), 689–695.

- Dell'Aquila, A. (2003). Image analysis as a tool to study deteriorated cabbage (*Brassica oleracea* L.) seed imbibition under salt stress conditions. *Seed Science and Technology*, 31(3), 619-628.
- Dell'Aquila, A. (2004). Cabbage, lentil, pepper and tomato seed germination monitored by an image analysis system. *Seed Science and Technology*, 32(1), 225-229.
- Dell'Aquila, A. (2005). The use of image analysis to monitor the germination of seeds of broccoli (*Brassica oleracea*) and radish (*Raphanus sativus*). *Annals of applied biology*, 146(4), 545-550.
- Dell'Aquila, A. (2006). Red-Green-Blue (RGB) colour density as a non-destructive marker in sorting deteriorated lentil (*Lens culinaris* Medik.) seeds. *Seed Science and Technology*, 34(3), 609-619.
- Demir, I., and Ellis, R.H. (1992). Changes in seed quality during seed development and maturation in tomato. *Seed Science Research*, 2(2), 81-87.
- Demir, I., Ermis, S., Mavi, K. and Matthews, S. (2008). Mean germination time of pepper seed lots (*Capsicum annuum*) predicts size and uniformity of seedlings in germination tests and transplant modules. *Seed Science and Technology*, 36, 21-30
- Demir, I., Celikkol, T., Sarıkamış, G. and Eksi, C. (2011). Vigor tests to estimate seedling emergence potential and longevity in Viola seed lots. *HortScience*, 46, 402-405
- Demir, I., Kenanoglu, B. B. and Özden, E. (2019). Seed vigour tests to estimate seedling emergence in cress (*Lepidium sativum* L.) seed lots. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(3), 881-886.
- Demir, I., Kuzucu, C. O., Ermis, S., Memis, N., and Kadioglu, N. (2022). Estimation of seed longevity in onion seed lots by a vigor test of radicle emergence test in artificial ageing conditions. *Horticulturae*, 8(11), 1063.
- Dericquebourg, E., Hafiane, A., and Canals, R. (2022). Generative-model-based data labeling for deep network regression: Application to seed maturity estimation from UAV multispectral images. *Remote Sensing*, 14(20), 5238.
- Ducournau, S., Feutry, A., Plainchault, P., Revollon, P., Vigouroux, B., and Wagner, M. H. (2004). An image acquisition system for automated monitoring of the germination rate of sunflower seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(3), 189-202.
- ElMasry, G., Mandour, N., Wagner, M. H., Demilly, D., Verdier, J., Belin, E. and Rousseau, D. (2019). Utilization of computer vision and multispectral imaging techniques for classification of cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds. *Plant methods*, 15, 1-16.
- Ermiş, S., Ercan, U., Kabaş, A., Kabaş, Ö. and Moiceanu, G. (2025). Machine Learning-Based Morphological Classification and Diversity Analysis of *Ornamental Pumpkin* Seeds. *Foods*, 14(9), 1498.

- Gagliardi, Bruna, and Julio Marcos-Filho. 2011. Relationship between germination and bell pepper seed structure assessed by the X-ray test. *Scientia Agricola* 68(4), 411-416.
- Galletti PA, Carvalho MEA, Hirai WY, Brancaglioni VA, Arthur V and Barboza da Silva C. (2020) Integrating Optical Imaging Tools for Rapid and Non-invasive Characterization of Seed Quality: Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Carrot (*Daucus carota* L.) as Study Cases. *Frontiers Plant Science*, 11, 577851.
- Geneve, R. L. and Kester, S. T. (2001). Evaluation of seedling size following germination using computer-aided analysis of digital images from a flat-bed scanner. *HortScience*, 36(6), 1117-1120.
- Groot, S.P.C., Birnbaum, Y., Rop, N., Jalink, H., Forsbero, G., Kromphardt, C., Werner, S. and Koch, E. Effect of seed maturity on sensitivity of seeds towards physical sanitation treatments, *Seed Science and Technology*, 34, 403-413.
- Grulichova, M., Sedlakova, V., Trojan, V., Hanacek, P. and Vyhnanek, T. (2022). Correlation of photosynthetic pigments content with indicators of seed quality in the seeds of carrot, celery, dill, parsley, and parsnip. *Journal of Seed Science*, 44, e202244031.
- Hamilton, K.N.; Ashmore, S.E.; Drew, R.A. and Pritchard, H.W. (2007). Seed morphology and ultrastructure in *Citrus garrawayi* (*Rutaceae*) in relation to germinability. *Australian Journal of Botany* 55, 618-627.
- Hay, R. F., Timple, S. and van Dujlin, B. (2015) Can chlorophyll fluorescence be used to determine the optimal time to harvest rice seeds for long-term genebank storage? *Seed Science Research* 25, 321-334.
- Huang, M., Wang, Q. G., Zhu, Q. B., Qin, J. W. and Huang, G. (2015). Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. *Seed Science and Technology*, 43(3), 337-366.
- Hutchison, D.J. (1974). Swingle citrumelo-a promising rootstock hybrid. *Proceedings of Florida State Horticultural Society*, 87, 89-91.
- Howarth, M. S. and Stanwood, P. C. (1993). Measurement of seedling growth rate by machine vision. *Transactions of the ASAE*, 36 (3), 959-963.
- Jailais, B., Roumet, P., Pinson-Gadais, L. and Bertrand, D. (2015). Detection of Fusarium head blight contamination in wheat kernels by multivariate imaging. *Food Control*, 54, 250-258.
- Jalink, H., Frandas, A., van der Schoor, R. and Bino, R.J. (1998a) Chlorophyll fluorescence of the testa of *Brassica oleracea* seeds as an indicator of seed maturity and seed quality. *Scientia Agricola* 55, 88–93
- Jalink, H., van der Schoor, R., Frandas, A., van Pijlen, J. G., and Bino, R. J. (1998b). Chlorophyll fluorescence of *Brassica oleracea* seeds as a non-destructive marker for seed maturity and seed performance. *Seed Science Research*, 8(4), 437-443.

- Jalink, H., R. Van der Schoor, Y.E. Birnbaum, and R.J. Bino. (1999). Seed chlorophyll content as a indicator for seed maturity and seed quality. *Acta Hort.* 504(23), 219–228.
- Jansen, P. I. (1995). Seed production quality in *Trifolium balansae* and *T. resupinatum*: The role of seed colour. *Seed Science and Technology* (Switzerland).
- ISTA, 2022. *International Rules for Seed Testing*, Edition International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland
- Iradukunda, M., van Iersel, M. W., Seymour, L., Lu, G. and Ferrarezi, R. S. (2024). Low-cost imaging to quantify germination rate and seedling vigor across lettuce cultivars. *Sensors*, 24(13), 4225.
- Keefe, P.D. and Draper, S.R., (1986). The measurement of new characters for cultivar identification in wheat using machine vision. *Seed science and technology*, 14(3), 715-724.
- Kenanoğlu, B.B. (2012) Klorofil Floresan Ayırımı ve Görüntüleme Tekniğinin Biber Tohumlarının Kalitesini İyileştirme Amacıyla Kullanımı. Basılmamış Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 143 sayfa.
- Kenanoglu, B.B, Demir, I. and Jalink, H. (2013) Chlorophyll fluorescence sorting method to improve quality of Capsicum pepper seed lots produced from different maturity fruits. *HortScience* 48, 965–968
- Kenanoglu, B. B.Demir, I. and Jalink, H. (2016). Improvement of seed germination performance of stored commercial pepper seed lots with Chlorophyll Fluorescence sorting method. *American Journal of Experimental Agriculture* 10 (4), 1-6.
- Konstantinova, P., van der Schoor, R., van den Bulk, R. W. and Jalink, H. (2002). Chlorophyll fluorescence sorting as a method for improvement of barley (*Hordeum vulgare L.*) seed health and germination. *Seed Science and Technology*, 30, 411-421.
- Limão, M. A. R., Dias, D. C. F. D. S., Araújo, J. D. O., Soares, J. M., Nascimento, W. M. and Silva, L. J. D. (2023). Classification of lentil seed vigor based on seedling image analysis techniques and interactive machine learning. *Journal of Seed Science*, 45, e202345038.
- Liu, Y., Van Der Burg, W. J., Aartse, J. W., Van Zwol, R. A., Jalink, H. and Bino, R. J. (1993). X-ray studies on changes in embryo and endosperm morphology during priming and imbibition of tomato seeds. *Seed Science Research*, 3(3), 171-178.
- Leon, K., Mery, D., Pedreschi, F. and Leon, J. (2006). Color measurement in L* a* b* units from RGB digital images. *Food research international*, 39(10), 1084-1091.
- McCormac, A. C., Keefe, P. D. and Draper, S. R. (1990). Automated vigour testing of field vegetables using image analysis.
- McDonald, M., Evans, A. and Bennett, M. (2001). Using scanners to improve seed and seedling evaluations. *Seed science and technology*, 29(3), 683-689.

- Medeiros, A. D. D., Araújo, J. D. O., León, M. J. Z., Silva, L. J. D. and Dias, D. C. F. D. S. (2018). Parameters based on X-ray images to assess the physical and physiological quality of *Leucaena leucocephala* seeds. *Ciência e Agrotecnologia*, 42(6), 643-652.
- Medina, C.L., Rena, A.B., Siqueira, D.L., Machado, E.C. 2005. *Citrus physiology = Fisiologia dos citros*. p. 147-195.
- Müller, N.J.C. (1874). Beziehungen zwischen assimilation, absorption und fluoreszenz im chlorophyll des lebenden blattes. *Jahrb Wiss Bot*, 9, 42-49.
- Nijenstein, J.H. (2014) Chlorophyll fluorescence as an indicator of seed quality. *Seed Testing International* 147, 7–9.
- Nobel, P.S. (1970) *Plant cell physiology; a physicochemical approach*, (edited by D. Kennedy and R.B. Park) W.H. Freeman and Company, San Fransisco.
- Ooms, D. and Destain, M.F. (2011) Evaluation of chicory seeds maturity by chlorophyll fluorescence imaging. *Biosystems Engineering* 110, 168–177.
- Paine, D. H., Repo, T. and Taylor, A. G. (2001). Noninvasive seed quality test by impedance spectrum analysis. *Seed Technology*, 187-196.
- Paulsen, M.R., Nave, W.R. and Gray, L.E. (1981). Soybean seed quality as affected by impact damage. *Transactions of the ASAE*, 24, 1577-1589.
- Perrino, P., Yarwood, M., Hanelt, P. and Polignano, G. B. (1984). Variation of seed characters in selected *Vicia* species. *Kulturpflanze*, 32, 103-122.
- Pinto, T. L. F., Cícero, S. M., França-Neto, J. B. and Forti, V. A. (2009). An assessment of mechanical and stink bug damage in soybean seed using X-ray analysis test. *Seed Science and Technology*, 37(1), 110-120.
- Porsch, F. (2020). Automated seed testing by 3D X-ray computed tomography. *Seed Science and Technology*, 48(1), 73-81.
- Powell, A. A. 2022. Invited Review. *Seed Science and Technology*, 50, 1, Suppl., 45-73.
- Raven, J. and Beardall, J. (2006). Chlorophyll fluorescence and ecophysiology: seeing red ?. *New Phytologist*, 169, 449-451.
- Rego, C. H. Q., França-Silva, F., Gomes-Junior, F. G., Moraes, M. H. D. D., Medeiros, A. D. D. and Silva, C. B. D. (2020). Using multispectral imaging for detecting seed-borne fungi in cowpea. *Agriculture*, 10(8), 361.
- Roberts, E.H. (1973). Predicting the storage life of seeds. *Seed Science and Technology*, 1, 499-514.
- Rodrigues, F. A., Freitas, G. D. F., Moreira, R. A. and Pasqual, M. (2010). Characterization of fruits and seeds germination of rootstock trifoliata Flying Fragon and citrumelo Swingle. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32, 1180-1188.

- Santos, R. F. D., Gomes-Junior, F. G. and Marcos-Filho, J. (2019). Morphological and physiological changes during maturation of okra seeds evaluated through image analysis. *Scientia Agricola*, 77, e20180297.
- Silva, T. T. D. A., Guimarães, R. M., Pinho, É. V. D. R. V. and Abreu, L. A. D. S. (2011). Storage of 'Swingle' citrumelo seeds in different maturation stages subjected to fungicide treatment. *Revista Brasileira de Sementes*, 33, 768-776.
- Silva, V. N., Cicero, S. M. and Bennett, M. (2012). Relationship between eggplant seed morphology and germination. *Revista Brasileira de Sementes*, 34(4), 597e604.
- Steckel, J.R.A., Gray, D. and Rowse, H.R. (1989). Relationships between indices of seed maturity and carrot seed quality. *Annals of Applied Botany* 114, 177-183.
- Suhartanto, M.R. (2003). Seed chlorophyll fluorescence: A new parameter in quality seed estingBul. *Agron.* 31:26–30
- Sun, L., Fan, X., Huang, S., Luo, S., Zhao, L., Chen, X., He Y. and Suo, X. (2021). Research on classification method of eggplant seeds based on machine learning and multispectral imaging classification eggplant seeds. *Journal of Sensors*, 2021(1), 8857931.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024). Sebze tohumu üretim verileri.
- Taylor, A.G., Hill, H.J., Huang, X.L. and Min, T.G. (1990) Determining seed viability. US Patent No. 4,975,364.
- Trujillo, H. A., Guilhien, F. and Cicero, S. M. (2019). Digital images of seedling for evaluating coffee seed vigor. *Journal of Seed Science*, 41(1), 60-68.
- Usha T.S. and Dadlani M. (2015). Evaluation of seed vigor in soybean (*Glycine max*). *Legume Research*. 38(3),308-312.
- Van der Burg, W. J., Aartse, J. W., Van Zwol, R. A., Jalink, H. and Bino, R. J. (1994). Predicting tomato seedling morphology by X-ray analysis of seeds. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(2), 258-263.
- Vozzo, J. A., Halloin, J. M., Cooper, T. G., and Potechen, E. J. (1996). Use of NMR spectroscopy and magnetic resonance imaging for discriminating *Juglans nigra* L. seeds. *Seed Science and Technology*, 24, 457-463.
- Werker, E. (1997). *Seed anatomy* (pp. xii+-424).
- Xia, Y., Xu, Y., Li, J., Zhang, C. and Fan, S. (2019). Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 1, 35-47.
- Yang, S., Zhang, S., Yi, K., Wei, K., Zeng, H., Jia, Z., Mao P., Han X. and Li, M. (2023). Rapid non-destructive testing of smooth bromegrass (*Bromus inermis*) seed vigour using multispectral imaging. *Grass Research*, 3(1).
- Yadav, S. K., Jalink, H., Groot, S. P.C. Van der Schoor, R. Yadav, S., Dadlani, M. and Kodde, J. (2015). Quality improvement of aged cabbage seeds using chlorophyll fluorescence sensor. *Scientia Horticulturae* 189,81-85.