



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi (YYU Journal of Agricultural Science)



<http://dergipark.gov.tr/yyutbd>

Araştırma Makalesi (Research Article)

### Termografi Tekniği ile Biber Bitkisinde Su Stresinin ve Bazı Fizyolojik Özelliklerin Belirlenmesi\*\*

İlker EROĞLU<sup>1</sup>, Gökhan ÇAMOĞLU<sup>\*2</sup>, Kürşad DEMİREL<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, 17020, Çanakkale, Türkiye

<sup>3</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 17020, Çanakkale, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3518-5522> <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-6585-4221> <sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-2029-5884>  
\*Sorumlu yazar e-posta: camoglu@comu.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 02.04.2020  
Kabul: 07.08.2020  
Online Yayınlanma 30.09.2020  
DOI: 10.29133/yyutbd.713717

#### Anahtar kelimeler

Biber,  
Termal indeks,  
Termal kamera,  
Sulama.

**Öz:** Çalışmada, termografi tekniği ile hesaplanan indeksler kullanılarak biberde su stresinin ve bu indeksler ile bazı fizyolojik özelliklerin belirlenmesi hedeflenmiştir. 2017 yılında Çanakkale’de dört farklı sulama konusundan (S100, S75, S50 ve S25) oluşan bir deneme yürütülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, uygulanan sulama konularından termal indeksler ve tüm fizyolojik özellikler etkilenmiştir. Termal kamera yardımıyla bitki düzeyindeki ölçümlerden ampirik olarak belirlenen bitki su stresi indeksi (CWSI<sub>e</sub>) verilen sulama suyundaki azalışa bağlı olarak artmış, stoma iletkenliği indeksi (I<sub>Ge</sub>) ise azalmıştır. Sınıflama ve regresyon ağacı analizine göre, CWSI<sub>e</sub>’nin sulamaya başlama zamanını belirlemek amacıyla kullanımının yeterli olduğu söylenebilir. Bu durumda söz konusu indeksin eşik değeri 0.42 alınabilir. Termal indeksler ile fizyolojik özellikler arasında her bir büyüme dönemi için yapılan regresyon analizi sonuçlarına göre oldukça önemli ilişkiler elde edilmiştir. Söz konusu ilişkiler çiçeklenme döneminden sonra artış göstermiştir. Çalışmanın sonucu olarak su stresini ayırt etmedeki başarısı ve uygulamadaki kolaylığı nedeni ile biber bitkisinde uzaktan algılama tekniklerinden biri olan termografi tekniği ile elde edilen indekslerin kullanımı önerilebilir. Çalışma, termal görüntülerden yararlanarak biber bitkisinde su stresinin hızlı ve doğru bir şekilde belirlenebilme potansiyeli olduğunu göstermiştir.

### Determination of Water Stress and Some Physiological Traits in Pepper Plant with Thermography Technique

#### Article Info

Received: 02.04.2020  
Accepted: 07.08.2020  
Online Published 30.09.2020  
DOI: 10.29133/yyutbd.713717

#### Keywords

Pepper,  
Thermal index,  
Thermal imager,  
Irrigation.

**Abstract:** In this study, it was aimed to determine the water stress level of pepper plant by help of thermal indices and to determine the relationships among some physiological traits with these indices. An experiment consisting of four different irrigation applications (S100, S75, S50 and S25) was conducted in 2017 in Çanakkale. According to the results obtained from the study, thermal indices and all physiological traits were affected from the irrigation treatments. Crop Water Stress Index (CWSI<sub>e</sub>) determined empirically from the measurements of plant body with the help of thermal camera increased due to the decrease in irrigation water and Stomatal Conductance Index (I<sub>Ge</sub>) has decreased as well. According to classification and regression tree analysis, arguably the use of CWSI<sub>e</sub> is enough to determine the time to start irrigation. In this case, the threshold value of the index is suitable as 0.42. According to the results of regression analysis for each growth period, significant correlations (p

<0.001) were obtained among physiological traits with thermal indices. These relations increased after flowering period. As a result of the study, because of its success in discriminating water stress and ease of application, the use of indices obtained by thermal cameras which is one of the remote sensing techniques may be suggested for pepper plant. The study showed that the water stress in pepper plant has the potential to be determined quickly and accurately by using thermal images.

\*\* Bu çalışma, İlker EROĞLU'nun yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

## 1. Giriş

Su stresi, bitkilerde büyümeyi etkilediği için ürünün verim ve kalitesinde önemli rol oynar. Stres koşulunda meydana gelen turgor kaybı hücre büyümesini engelleyerek hücrelerin küçük kalmasına yol açar. Bu durum, yaprakların küçük kalmasına ve fotosentez sonucu oluşması gereken ürünlerinin olumsuz etkilenmesine sebep olur. Su stresinin başlamasıyla iletim borularında su potansiyeli azalır ve fotosentez ürünlerinin taşınması yavaşlar. Bunun sonucu olarak meyve oluşumu olumsuz etkilenir (Kaçar ve ark., 2009). Bu nedenle, su stresinin erken teşhisi oldukça önem taşımaktadır. Günümüzde su stresinin semptomlarının gözle görünür hale gelmeden belirlenmesi üzerine teknikler ile ilgili çalışmalara ağırlık verilmektedir. Bu tekniklerin farklı bitkilerde ve farklı ölçüm şekillerine göre belirlenebilirliği araştırılmaktadır. Araştırılan tekniklerden biri de bitkilerin termal sıcaklıklarıdır. Termal bölge ile elde edilen bitki sıcaklıkları transpirasyon ile dolayısıyla da bitki su tüketimi ile doğrudan ilişkilidir. Su stresi altındaki bitkilerde, insan gözüyle görülemeyen, erken aşamalarda ortaya çıkan semptomların tahmini, uzaktan algılama aracılığıyla gözlenebilmektedir (Jackson, 1986; Behmann ve ark., 2014). Uzaktan algılamadaki termal veriler, bitkilerde su stresini izlemek için kullanılabilir. Çünkü bitkiler, su stresi durumunda terlemeyi azaltmakta ve stomalarını kapatmaktadır. Bu durumda, bitki sıcaklıklarında artış gerçekleşmektedir. Bu artış nedeniyle, bitki su durumunun/su stresinin izlenmesinde bitki sıcaklıklarının kullanımı mümkün olmaktadır (Jackson, 1982; Jones ve ark., 2002). Bitki sıcaklıklarının ölçülmesinde, günümüze kadar ölçüm tekniğinin basit ve ekonomik olması nedeniyle kızılötesi termometreler daha yaygın olarak kullanılmıştır. Günümüzde ise su stresini belirlenmesi çalışmalarında kullanımı hızla yaygınlaşan yüksek çözünürlüklü termal kameralar da kullanım alanı bulmaktadır (Çamoğlu ve Genç, 2013).

Biber bitkisini anavatanı Amerika kıtası olup buradan diğer kıtalara yayılmıştır. Gen kaynaklarına göre biber özellikle gelişim ve meyve şekli açısından önemli değişiklikler göstermektedir (Vural ve ark., 2000). Ülkemiz açısından oldukça önemli bir yere sahip olan biber hemen her bölgede yetiştirilmekte ve ticari açıdan da önemli bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir (Aybak, 2007). Ülkemizde önemli bir üretim potansiyeline sahip Çanakkale ili özellikle salçalık biber üretimiyle 2. sırada yer almaktadır (Anonim, 2015).

Ülkemizde ve dünyada termal görüntüler kullanılarak bitkilerin su stresinin erken teşhisi üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu çalışmada, tatlı biber çeşidinde (*Capsicum annuum*, L. cv. Aristocrat F1) bitki düzeyindeki ölçümlerden elde edilen termal görüntülerden hesaplanan indekslerin su stresine bağlı olarak değişimi ve bazı fizyolojik özellikler (klorofil okumaları, stoma iletkenliği ve yaprak oransal su içeriği) ile aralarındaki ilişkileri araştırılmıştır. Bitki düzeyindeki termal ölçümlerden ampirik olarak Bitki Su Stresi (CWSI<sub>e</sub>) ve Stoma İletkenliği (I<sub>Ge</sub>) indeksleri hesaplanmış ve fizyolojik özellikler ile aralarında regresyon modelleri elde edilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Araştırma alanının özellikleri

Araştırma, 2017 yılı yetiştirme sezonunda Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Bitkisel Üretim Araştırma ve Uygulama Birimi'nde yürütülmüştür.

Deneme alanı toprakları genel olarak kumlu-tın bünyeye sahip olup etkili bitki kök derinliğindeki (0-60 cm) tarla kapasitesi, solma noktası ve kullanılabilir su tutma kapasitesi değerleri 206.4 mm, 125.0 mm ve 81.4 mm'dir. Söz konusu kök derinliğindeki hacim ağırlığı değerleri katmanlara göre sırasıyla 1.49 g/cm<sup>3</sup> ve 1.53 g/cm<sup>3</sup>'tür. Gübre ihtiyacının belirlenmesi için alanı temsil

edecek şekilde farklı noktalardan 0-30 cm derinlikten bozulmuş toprak örnekleri alınmış olup kimyasal analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre gübreleme programı uygulanmıştır.

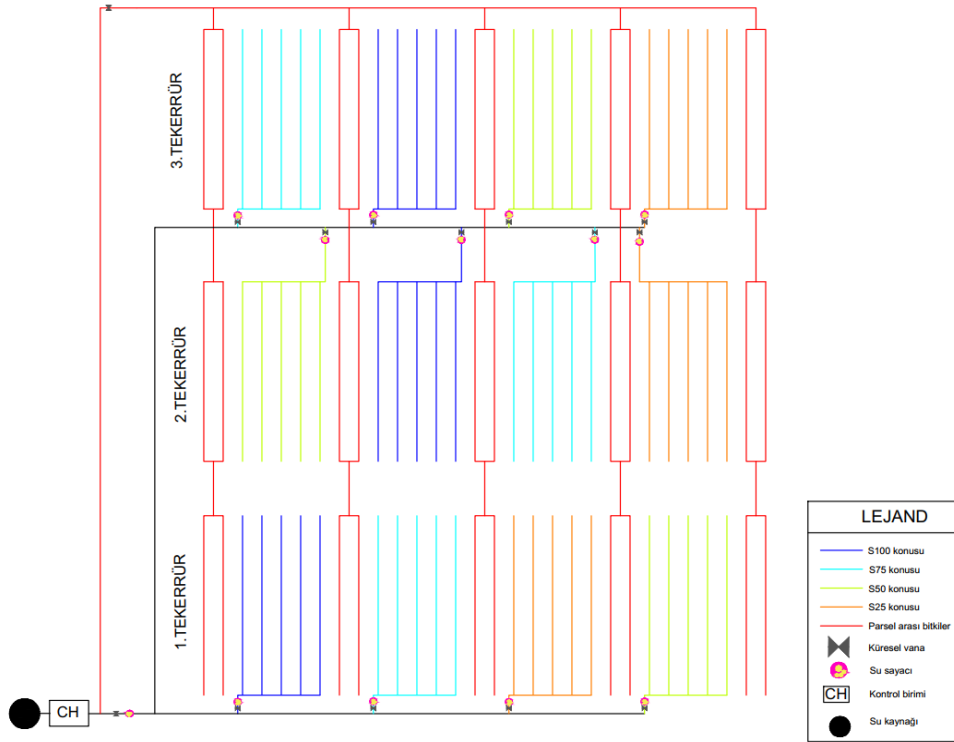
İlin en sıcak ayları Temmuz ve Ağustos aylarıdır. Söz konusu aylardan özellikle de ağustos ayında neredeyse hiç yağış düşmemektedir. Yağışların önemli bir kısmı yaz mevsimi dışında gerçekleşmektedir. Termal ölçümlerde kullanılmak üzere deneme alanına deneme süresince sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve yağış değerlerini kaydeden bir iklim istasyonu yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra her ölçümde yerden yaklaşık 1.5 metre yüksekliğe ve gölge bir alana yerleştirilen psikrometre ile de ıslak ve kuru hava sıcaklıkları kaydedilmiştir.

## 2.2. Araştırmada kullanılan bitki

Araştırmada, Aristocrat F1 çeşidi tatlı dolmalık biber (*Capsicum annuum* L.) kullanılmıştır. Bu biber; tütün mozaik virüsü de dahil olmak üzere çoğu hastalığa göre dirençli olan, adaptasyon kabiliyeti yüksek ve boğum araları kısa olan bir çeşittir. Yaklaşık olarak 8-15 cm boyunda 4 loblu olan bu tatlı dolmalık biber, kalın etli, sulu ve kokuludur. Meyveleri ortalama 380-430 gr ağırlığındadır. Erken dönemde yeşil, olgunlukta ise kırmızı renklidir. Dikimden yaklaşık olarak 70 gün sonra yeşil olarak, 90 gün sonra ise kırmızı olarak hasat edilir. Biber fidelerinin dikimi, 26 Mayıs 2017 tarihinde, sıra arası 70 cm ve sıra üzeri 33 cm olacak şekilde yapılmıştır.

## 2.3. Deneme deseni

Dört farklı sulama konusundan oluşan çalışma, istatistiksel olarak tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak kurulmuştur. Bitkilerin sulanmasında damla sulama sistemi kullanılmıştır (Şekil 1). Söz konusu sistemde su kaynağından alınan su, kontrol biriminden geçirilerek parsellerin başına yerleştirilen vana ve su sayaçları ile denetimli olarak uygulanmıştır. Damla sulama sisteminde 33 cm aralıklı, 4 L/h debiye sahip hat içi damlatıcılı lateraller kullanılmıştır. Çalışmada ele alınan sulama konularına ve damla sulama sistemine ilişkin detaylar Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneme deseni ve sulama sistemi.

Çizelge 1. Denemede uygulanan sulama konuları

Sulama konusu	Açıklama
S100	Etkili bitki kök derinliğindeki (60 cm) kullanılabilir su tutma kapasitesinin %40±5'i tüketildiğinde sulamaya başlanmış ve tarla kapasitesi düzeyine tamamlanmıştır.
S75	S100 konusuna uygulanan suyun %75'i verilmiştir.
S50	S100 konusuna uygulanan suyun %50'si verilmiştir.
S25	S100 konusuna uygulanan suyun %25'i verilmiştir.

Her bir tekerrürde 5 bitki sırası ve her sıraya 20 bitki dikilmiştir. Bir parselin boyutları 3.5 m x 6.6 m'dir. Parseller arasında suyun geçişini önlemek amacıyla 2.1 m'lik bir alan parsel dışı bırakılmıştır. Bu alanda oluşabilecek adveksiyonun bitkileri ve ölçümleri olumsuz etkilememesi için söz konusu alana da bitki dikilmiştir. Bu durumda her bir parsel arasına 2 bitki sırası daha ilave edilmiştir. Söz konusu bitkilerin sulaması ayrı bir hat ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).

Denemede sulama zamanının belirlenmesi için toprak nemi uzaktan izleme sistemiyle (Devint) sürekli izlenmiştir. Belirlenen eşik değere (%40±5) geldiğinde sulamalar yapılmıştır. Nemin izlenmesinde tüm konuların her tekerrüründe 3 farklı derinliğe (0-30 cm, 30-60 cm ve 60-90 cm) sensörler (GS1, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) yerleştirilmiştir ve deneme başlamadan önce gravimetrik esasına göre kalibrasyonları yapılmıştır. Su sayacı yardımı ile kontrollü bir şekilde deneme parsellerine uygulanan su miktarları, mm cinsinden belirlenmiş olup sulanacak alan ve örtü yüzdesiyle çarpılarak hacme çevrilmiştir. Örtü yüzdesini belirlemek için sulama öncesinde tesadüfi olarak seçilen 5 bitkinin taç genişliği sıra arasına bölünmüş ve bu değer en az %30 alınmıştır.

## 2.4. Bitkide yapılan ölçümler

Çalışmada; klorofil okumaları, stoma iletkenliği, yaprak oransal su içeriği ve termal indeksler belirlenmiştir. Yapılan ölçümler bitkinin fenolojik dönemlerine dikkate alınarak o dönem içindeki ölçümlerin ortalaması hesaplanarak verilmiştir. Fenolojik dönemler; çiçeklenme dönemi (Ç), ürün oluşumu ve ilk hasat dönemi (Ü), olgunlaşma ve son hasat dönemi (O) şeklinde ele alınmıştır. Çiçeklenme dönemi 14.07.2017-26.07.2017 tarihleri arasında yapılan üç ölçümle değerlendirilmiştir. Bu ölçümler sırasıyla dikimden sonraki günler (DSG) olan 49-56-61. günde yapılan ölçümlerdir. Ürün oluşumu ve ilk hasat döneminde (Ü) ölçümler 31.07.2017-24.08.2017 tarihleri arasında ve sırasıyla DSG66-70-74-82-86-90'da yapılmıştır. Son olarak O döneminde DSG 94-102-112-117 olmak üzere toplamda dört ölçüm yapılmış olup 28.08.2017-20.09.2017 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir.

### 2.4.1. Fizyolojik ölçümler

#### 2.4.1.1. Klorofil okumaları

Yaprakta klorofil miktarının göstergesi olarak klorofilmetre (Fieldscout CM 1000, FieldScout Technologies, Plainfield, IL) kullanılmıştır (Şekil 2). Klorofil okumaları her sulama öncesinde, havanın açık olduğu günlerde, gün ortasında (11.00-14.00) yapılmıştır. Ölçümler, her bir tekerrürden tesadüfi olarak seçilen üç bitkinin gelişimini tamamlamış en genç üç yaprağında yapılmıştır. Yetiştirme periyodu boyunca ölçümler aynı ışıklılık indeksinde (BRT=4) yapılmıştır (Camoglu ve Genc, 2013).



Şekil 2. Klorofilmetre okumaları.

#### 2.4.1.2. Stoma iletkenliği

Stoma iletkenliği porometre (Sc-1 Porometer, Decagon Devices Inc., WA, USA) kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3). Cihaz, 5 °C ile 40 °C hava sıcaklığında ve %0 ile %100 bağıl nem arasında ölçüm yapabilmektedir. Stoma iletkenliği ölçümleri, sulama konularına geçtikten sonra, her sulamada, sulama öncesinde, gün ortasında, her parselden tesadüfi seçilen üç bitkinin güneşe bakan tarafındaki birer yaprağında belirlenmiştir.



Şekil 3. Stoma iletkenliği ölçümleri

#### 2.4.1.3. Yaprak oransal su içeriği

Deneme konularına ilişkin yaprak oransal su içeriği (YOSİ) Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır (Ackley, 1954). Konulara göre sulamaların başlamasından sonra, diğer ölçümler ile aynı günlerde, gün ortasında her parselden tesadüfi belirlenen üç bitkinin gelişimini tamamlamış en genç yapraklarında yapılmıştır.

$$YOSİ = \frac{YA - KA}{TA - KA} \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte; YOSİ: Yaprak oransal su içeriği (%), YA: Yaş ağırlık (mg), KA: 70 °C sıcaklıkta 48 saat bekletme sonrasındaki kuru ağırlık (mg), TA: 24 saat saf su içerisinde bekletilerek elde edilen turgor ağırlık (mg)

#### 2.4.1.4. Termal görüntülerin elde edilmesi ve termal indekslerin belirlenmesi

Termal görüntülerin elde edilmesinde termal kamera (Fluke-Ti27, Fluke, USA) kullanılmıştır. Kameranın spektrum aralığı 8-14 µm, çözünürlüğü 240x180 ve hassasiyeti 0.05 °C'dir. Aletin

emissivite değeri 0.98 alınmıştır. Ölçümler, bir bitkinin tamamını görecekte şekilde yapılmıştır (Şekil 4). Bitki taç sıcaklıkları, her sulamada, sulama öncesinde olmak üzere sulama konularının her bir tekerrüründe üç bitkiden elde edilmiştir (Jones ve ark., 2002).



Şekil 4. Termal görüntülerin elde edilmesi.

Termal görüntüler kullanılarak Eşitlik 2 yardımıyla bitki su stresi indeksi (CWSI) ve Eşitlik 3 ile de stoma iletkenliği indeksi ( $I_G$ ) hesaplanmıştır (Jones, 1999).

$$CWSI = \frac{(T_{\text{taç}} - T_{\text{ıslak}})}{(T_{\text{kuru}} - T_{\text{ıslak}})} \quad (2)$$

$$I_G = \frac{(T_{\text{kuru}} - T_{\text{taç}})}{(T_{\text{taç}} - T_{\text{ıslak}})} \quad (3)$$

Eşitliklerde;

$T_{\text{taç}}$ : Mevcut bitkinin sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{ıslak}}$ : Stressiz bitkinin sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{kuru}}$ : Tam stres altındaki bitkinin sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )

Stressiz ve tam stres altındaki bitkinin tahmini sıcaklık değerlerinin hesaplanmasında ampirik yöntem kullanılmıştır (Monteith ve Unsworth, 1990; Cohen ve ark., 2005). Bu nedenle söz konusu termal indeksler  $CWSI_e$  ve  $I_{G_e}$  olarak gösterilmiştir.

## 2.5. İstatistiksel analiz

Çalışmada, SPSS 20.0 paket programı kullanılarak varyans analizi ve Duncan testi yapılmıştır. Analizlerde önemlilik seviyesi (P değeri) %5 alınmıştır. Sulama konularının termal indekslerden yararlanılarak ayrılma potansiyelini belirlemek için Sınıflama ve Regresyon Ağacı (CRT) yönteminden yararlanılmıştır (Breiman ve ark., 1984). Termal indeksler ile incelenen özellikler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için regresyon analizinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda termal indekslerden yararlanarak fizyolojik özelliklerin tahmini amacıyla basit doğrusal regresyon yöntemi kullanılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Termal indeksler

Yetiştirme periyodu boyunca ampirik olarak hesaplanan bitki su stresi indeksi (CWSI<sub>e</sub>), Ç döneminde 0.47 ile 0.67, Ü döneminde 0.41 ile 0.73, O döneminde ise 0.38 ile 0.68 arasında değişmiştir (Çizelge 2). Bitki su stresi indeksinin sıfıra yakın olması bitkinin stressiz olduğunun, değerlerin bire yaklaşması ise stresin varlığını göstermektedir (Idso ve ark., 1981; Jones, 1999). Bu durum, bu çalışmada da belirgin şekilde görülmüştür. Ampirik olarak belirlenen bitki su stresi indeksinde en düşük değer S100 konusunda, en yüksek değer ise S25 konusunda belirlenmiştir.

Çizelge 2. Sulama konularına göre CWSI<sub>e</sub> değerlerinin değişimi

Sulama konuları	Büyüme dönemi*			Ortalama*
	Ç	Ü	O	
S100	0.47 C öd	0.41 D öd	0.38 C öd	0.42 D
S75	0.49 BC öd	0.52 C öd	0.49 B öd	0.50 C
S50	0.58 AB öd	0.66 B öd	0.66 A öd	0.64 B
S25	0.67 A öd	0.73 A öd	0.68 A öd	0.70 A

\*p<0.05, öd: önemli değil, Not: Her bir büyüme döneminde yer alan farklı büyük harfler, sulama konuları arasındaki; her bir konudaki farklı küçük harfler ise büyüme dönemleri arasındaki farkı göstermektedir. Ç: çiçeklenme dönemi, Ü: ürün oluşumu ve ilk hasat dönemi, O: olgunlaşma ve son hasat dönemi.

Konular arasındaki farklılıklar incelendiğinde, sadece Ü döneminde konuların tamamen farklı gruplarda yer aldığı görülmektedir. Çiçeklenme döneminde konular birbiri içinde farklılık göstermiş olmasına rağmen belirgin bir farklılık oluşmamıştır. Olgunlaşma ve son hasat döneminde ise, S25 ve S50 konuları aynı grupta yer alırken, S100 ve S75 konuları diğerlerinden ayrılmıştır. Bu da stresin fazla olduğu konuların yetiştirme periyodunun sonuna doğru ayırt edilemediği anlamına gelmektedir. Ortalama değerlere bakıldığında, yine tüm konuların ayrı sınıfta yer aldığı görülmektedir. Konuların CWSI<sub>e</sub> değerlerinin büyüme dönemlerine göre değişimi incelendiğinde, hiçbir konuda söz konusu değişimin istatistiksel olarak önemli olmadığı görülmektedir. Bu durum, sulama zamanına karar vermede ortalama değerlerin kullanılabilmesini göstermektedir.

Yapılan çalışmalarda farklı bitki türleri için de termal görüntülerden hesaplanan CWSI indeksinin su stresini ayırt edebildiği vurgulanmıştır. Cohen ve ark. (2005) pamuk bitkisinde termal kamera yardımıyla CWSI indeksini belirlemişlerdir. Söz konusu değer 0.10 ile 0.58 arasında olduğunu ve su stresindeki artışa bağlı olarak bu değer de arttığını bildirmişlerdir. Camoğlu ve Genc (2013), taze fasulye bitkisinde CWSI<sub>e</sub> indeksi 0.40 (tam sulama konusu) ile 0.88 (%75 su kısıtı uygulanan konu) arasında bulmuşlardır. Söz konusu çalışmada hafif stresin (%25 su kısıtı uygulanan konu) bu indeksle ayırt edilemediği bildirilmiştir. Ancak, bu çalışmada elde edilen bulgularda, S100 konusunun hafif stresin uygulandığı S75 konusundan da ayrıldığı görülmektedir. Bu durum bitki türlerine veya çeşitlerine göre stresin ayırımının değişebileceğini göstermektedir.

Termal ölçümlerden hesaplanan diğer bir indeks olan I<sub>Ge</sub>, Ç döneminde 0.50 ile 1.15, Ü döneminde 0.41 ile 1.52, O döneminde ise 0.51 ile 1.97 arasında değişmiştir (Çizelge 3). Ampirik hesaplanan stoma iletkenliği indeksinde en düşük değer sıfır olup bu değere yakın olması bitkinin stresli olduğunu ve bu değerden uzaklaştıkça da stresin azaldığını ifade etmektedir (Jones, 1999). Söz konusu durum bu çalışmada da gerçekleşmiştir. En yüksek değer S100 konusunda, en düşük değer ise S25 konusunda görülmüştür. I<sub>Ge</sub> indeksinin stresin fazla olduğu konular arasında ayırt edici olmadığı gözlenmiştir. Çiçeklenme dönemi dışında diğer iki büyüme döneminde S100 ve S75 konuları arasında istatistiksel açıdan farklı gruplarda yer almıştır (Çizelge 3). Büyüme dönemlerindeki bu durumlar ortalama değerlere de yansımıştır. Sulama konularının büyüme dönemlerine göre değişimine bakıldığında, istatistiksel açıdan bir değişimin olmadığı görülmektedir. Bu durum, CWSI<sub>e</sub> indeksinde olduğu gibi I<sub>Ge</sub> indeksinde de sulama zamanına karar vermede ortalama değerlerin kullanılabilmesini göstermektedir.

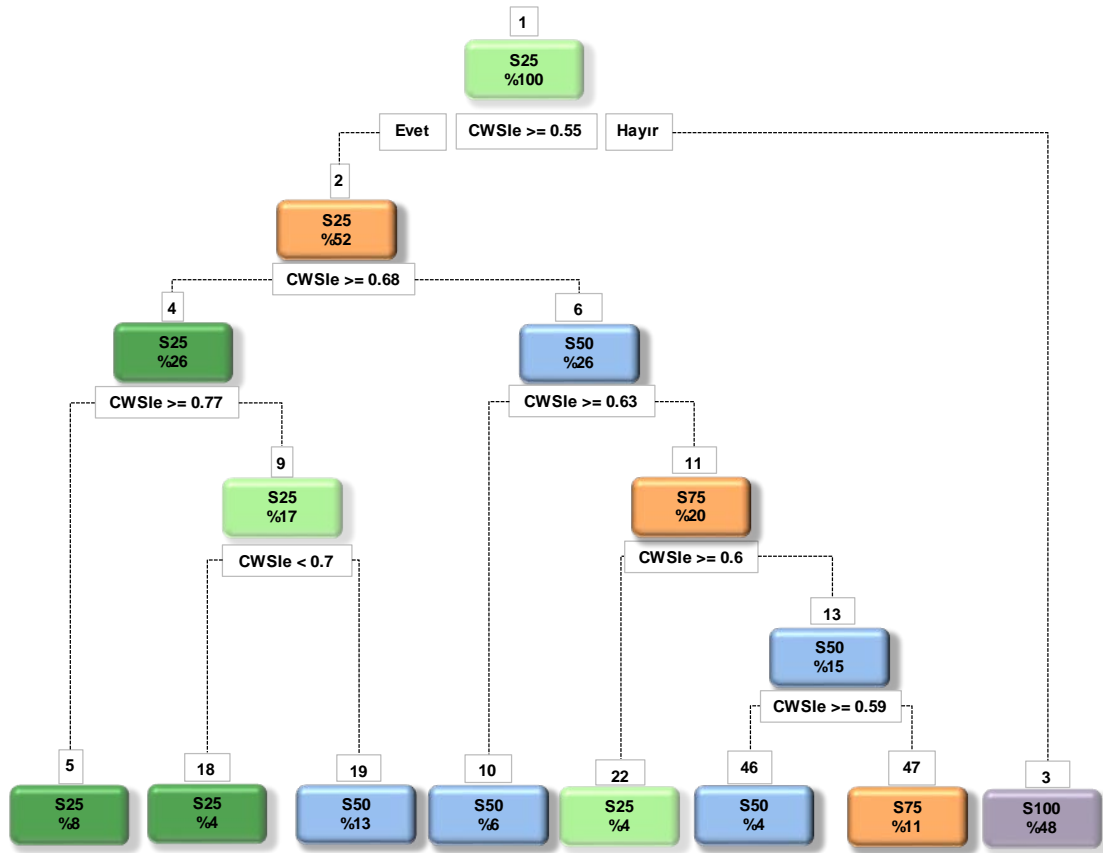
Çizelge 3. Sulama konularına göre  $I_{Ge}$  değerlerinin değişimi

Sulama konuları	Büyüme dönemi*			Ortalama*
	Ç	Ü	O	
S100	1.15 A öd	1.52 A öd	1.97 A öd	1.58 A
S75	1.08 A öd	0.99 B öd	1.18 B öd	1.07 B
S50	0.73 B öd	0.56 C öd	0.57 C öd	0.60 C
S25	0.50 B öd	0.41 C öd	0.51 C öd	0.46 C

\* $p < 0.05$ , öd: önemli değil, Not: Her bir büyüme döneminde yer alan farklı büyük harfler, sulama konuları arasındaki; her bir konudaki farklı küçük harfler ise büyüme dönemleri arasındaki farkı göstermektedir. Ç: çiçeklenme dönemi, Ü: ürün oluşumu ve ilk hasat dönemi, O: olgunlaşma ve son hasat dönemi.

### 3.2. Sınıflama ve regresyon ağacı analizi

Termal indeksler kullanılarak sulama konularının ayırt edilemeyeceğine ilişkin yapılan sınıflama ve regresyon ağacı analizi sonuçları Şekil 5'te ve sınıflama matrisine ait sonuçlar Çizelge 4'de sunulmuştur.



Şekil 5. Sınıflama ve regresyon ağacı sonuçları.

Termal indeksler ile oluşturulan sınıflama modelinde 47 farklı nod oluşmuş ve sulama konularının her biri farklı alt nodlarda sınıflandırılmıştır (Şekil 5). Bu modelde sınıflamaya etki eden tek indeks  $CWSI_e$  olmuştur. Diğer indeks olan  $I_{Ge}$ 'nin sınıflandırmada etkisi olmamıştır. Oluşturulan modelde  $CWSI_e$  değeri 0.55'den küçük olduğunda (nod 1) belirgin biçimde S100 konusu olduğu görülmektedir. Çamoğlu ve Genç (2013) yaptıkları çalışmada, CRT analizi ile taze fasulyede söz konusu değeri 0.65 olarak bulmuşlardır. 0.77'ye eşit veya büyük olduğunda S25 (nod 4), 0.63 (nod 6) ile 0.68 (nod 2) arasında olduğunda S50 konusunun olabileceğine işaret etmektedir. 0.63'e eşit veya küçük (nod 6) olduğunda S75 konusu olabileceği, buradan da 0.59'a eşit veya küçük (nod 47) olduğunda bunun S75 olabileceği anlaşılmaktadır.

Sınıflama sonuçlarına göre ortalama hata %41.7 olmuştur (Çizelge 4). Söz konusu modelde en fazla hata S75 konusunda elde edilirken, S100 konusundaki sınıflamada hiç hata olmamıştır. Diğer bir



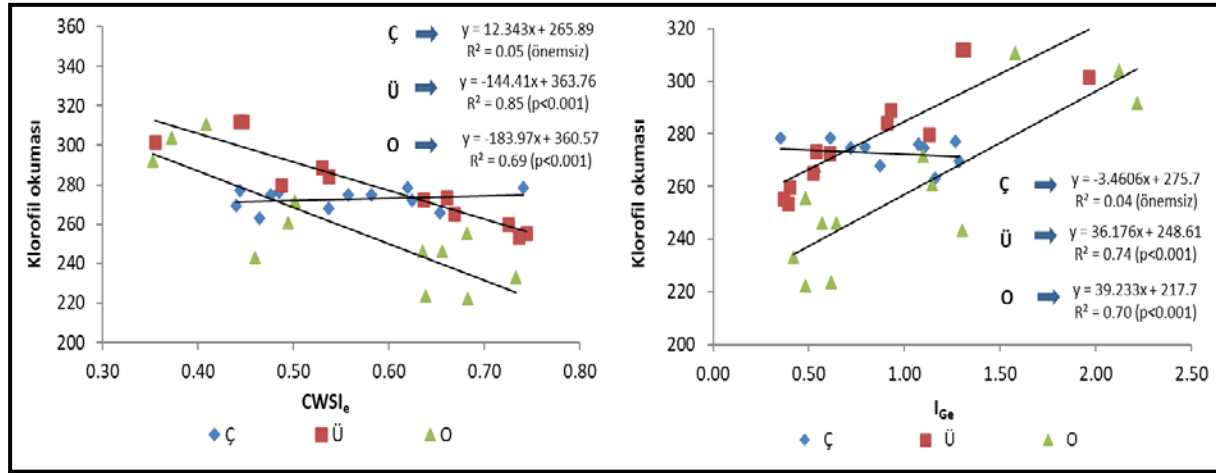
ifadeyle, oluşturulan bu modeldeki karar yolu kullanılarak S100 konusu diğer konulardan %100 başarı ile ayırt edilebilmiştir. Bu durum S100 konusuna ilişkin  $CWSI_e$  değerinin sulama zaman planlamasında kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4. Sınıflama ve regresyon ağacı modeline dayalı olarak termal indekslere göre örneklerin sınıflama sonuçları

Gerçek sınıf	Tahmin sınıfı				Oransal Hata
	S25	S50	S75	S100	
S25	21	12	3	3	%46.2
S50	3	23	6	7	%41.0
S75	3	2	8	26	%79.5
S100	0	0	0	39	%0.0
				Ortalama	%41.7

### 3.3. Klorofil okumaları ve termal indeksler arasındaki regresyon modelleri

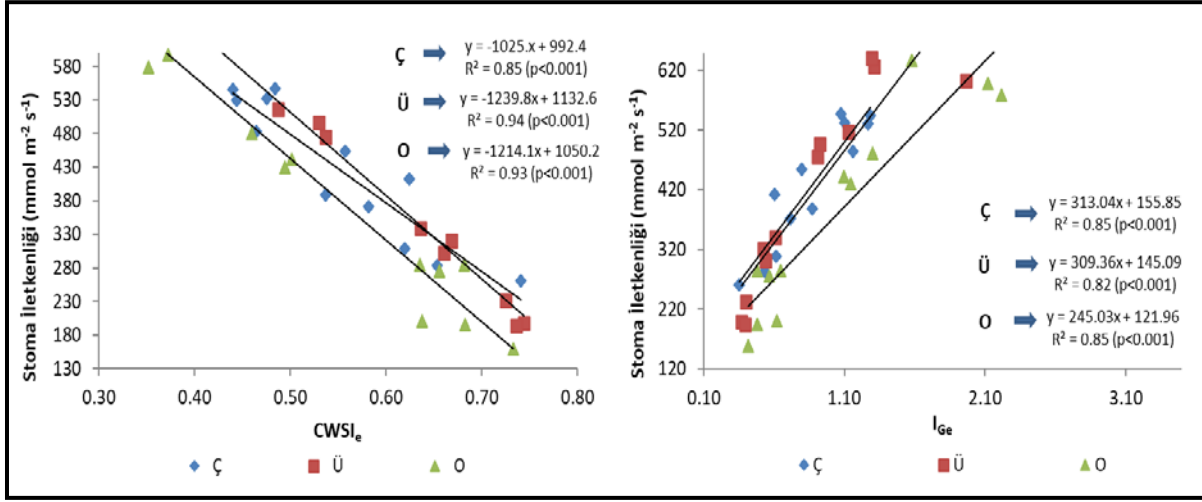
Yapraktaki klorofilin bir belirteci olan klorofil okumaları ile termal indeksler arasındaki regresyon analizleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre klorofil okuması ile indeksler arasındaki  $R^2$  değerleri, Ç döneminde her iki indeks için de önemsiz ( $p < 0.05$  düzeyinde) bulunmuştur. Çiçeklenme dönemindeki ilişki düzeyinin oldukça düşük olması, dikimden ürün oluşumuna kadar geçen süre içerisinde yapraklardaki klorofilin su stresinden kaynaklı olarak henüz parçalanma sürecine girmemiş olması ile açıklanabilir. Ancak söz konusu dönemden sonra önemli bir artış göstermiş ve en yüksek  $R^2$  değeri Ü döneminde gerçekleşmiştir. Söz konusu dönemde  $CWSI_e$  ile klorofil okuması arasındaki ilişki  $I_{Ge}$ 'ye göre daha iyi bulunmuştur. Strachan ve ark. (2002), mısırdaki klorofil ile yansıma değerleri arasındaki  $R^2$  değerlerini sırasıyla 0.76 ve 0.81 olarak belirlemişlerdir. Fujiwara ve ark. (2004), soya fasulyesinde su stresi koşullarında yakın kızılötesi bölgedeki yansıma değerleri ile klorofil değerleri arasında yüksek bir ilişki elde etmişlerdir.



Şekil 6. Klorofil okumaları ve termal indeksler arasındaki ilişkiler.

### 3.4. Stoma iletkenliği ve termal indeksler arasındaki regresyon modelleri

Stoma iletkenliği ile termal indeksler arasında elde edilen regresyon modelleri Şekil 7'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre,  $R^2$  değerleri termal indeks ve büyüme dönemleri dikkate alındığında 0.82 ile 0.94 arasında olup bu değerlerin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Bu durumda, genel anlamda her iki indeksin de tüm büyüme dönemlerinde, stoma iletkenliğini tahmin etme gücünün kuvvetli olduğu anlaşılmaktadır. Büyüme dönemlerine göre elde edilen  $R^2$  değerlerinin  $I_{Ge}$  için önemli düzeyde değişmediği,  $CWSI_e$  için ise çiçeklenmeden sonra artış gösterdiği görülmektedir.

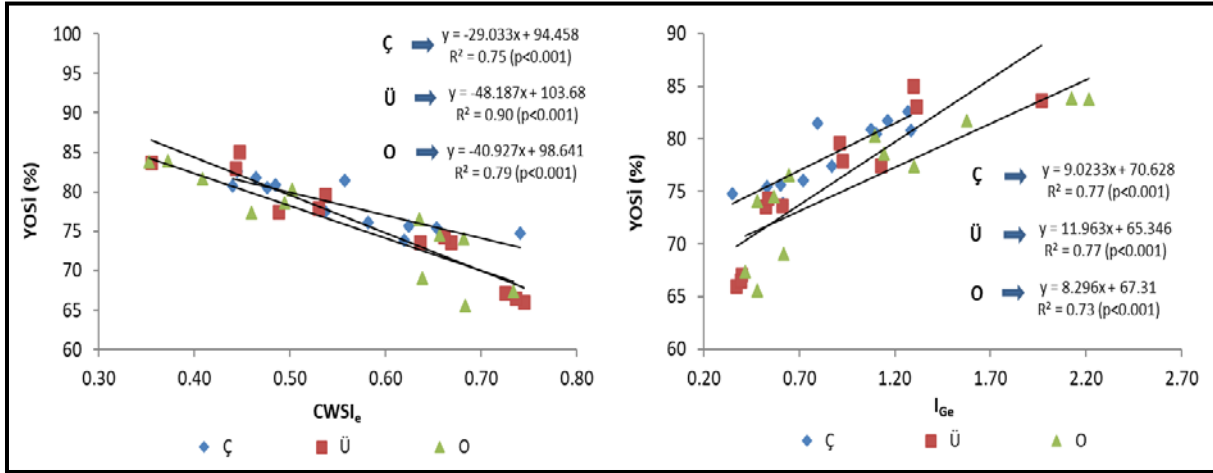


Şekil 7. Stoma iletkenliği ve termal indeksler arasındaki ilişkiler.

Zia ve ark. (2013), mısır bitkisinde stoma ve CWSI arasındaki R<sup>2</sup> değerini 0.62 bulmuşlardır. Çamoğlu ve ark. (2019), domateste termal görüntülerden ampirik olarak hesapladıkları CWSI ile stoma iletkenliği arasındaki R<sup>2</sup> değerlerini 0.55-0.96 arasında bulmuşlardır. Söz konusu ilişkinin gücünün ilk ölçümden sonra arttığını da belirtmişlerdir.

### 3.5. Yaprak oransal su içeriği ve termal indeksler arasındaki regresyon modelleri

Yaprak oransal su içeriği (YOSİ) ile termal indeksler arasındaki regresyon modelleri her bir büyüme dönemi için ayrı olmak üzere Şekil 8’de verilmiştir. CWSI<sub>e</sub> ile YOSİ arasındaki R<sup>2</sup> değerleri 0.75-0.90, I<sub>Ge</sub> ile 0.73-0.77 olarak elde edilmiştir. Çiçeklenme ve O dönemlerinde her iki indeks için bulunan R<sup>2</sup> değerleri birbirine yakın olmasına rağmen, Ü döneminde CWSI<sub>e</sub> indeksinin tahmin gücünün I<sub>Ge</sub>’ye göre oldukça iyi olduğu anlaşılmaktadır. Bu da söz konusu dönemde CWSI<sub>e</sub> indeksinin YOSİ tahmininde kullanılmasının daha uygun olduğu sonucunu çıkarmaktadır.



Şekil 8. Yaprak oransal su içeriği ve termal indeksler arasındaki ilişkiler.

Çamoğlu ve ark. (2018), Demre çeşidi biberde bitki su durumunun göstergesi olarak belirledikleri yaprak oransal su içeriği ile CWSI<sub>p</sub> (vazelin ve su kullanılarak hesaplanan) arasındaki R<sup>2</sup> değerini 0.23 olarak bulmuşlardır. İki çalışmada elde edilen R<sup>2</sup> değerleri arasındaki bu farklılıkların, CWSI indeksinin farklı şekilde hesaplanmasıyla ve/veya aynı bitki türü olsa dahi çeşitlerin de etkili olabileceğinin bir göstergesi olarak açıklanabilir.

#### 4. Sonuç

Biberde bitki düzeyinde yapılan termal ölçümler ile su stresi düzeyinin ve hesaplanan termal indeksler ile bazı fizyolojik özellikler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, ele alınan tüm özellikler uygulanan su stresine önemli tepkiler göstermiştir. Araştırmada, incelenen termal indekslerin her ikisinde de özellikle çiçeklenme döneminden sonra konular arasındaki fark oldukça belirgin olmuştur. Termal indeksler büyüme dönemine göre değişiklik göstermediği için S100 konusuna ilişkin ortalama değerler sulamaya başlamak için eşik değer alınabilir. Bu durumda CWSI<sub>e</sub> 0.42 ve I<sub>Ge</sub> indeksi de 1.57 olarak alınabilir. Su stresinin ayırt edilmesindeki başarılarını değerlendirmek amacıyla yapılan sınıflama ve regresyon ağacı analizine göre modele sadece CWSI<sub>e</sub> indeksi girmiştir. Bu durumda, söz konusu indeksin bu amaçla kullanımının yeterli olduğu söylenebilir. Model sonucunda özellikle S100 konusuna ilişkin sınıflandırmada hata olmaması CWSI<sub>e</sub> indeksinin sulama zaman planlamasında kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Biberin her bir büyüme dönemi için ayrı ayrı yapılan tek değişkenli doğrusal regresyon analizlerine göre termal indeksler ile fizyolojik özellikler arasında (en yüksek R<sup>2</sup>=0.94) elde edilen modellerde istatistiksel açıdan önemli ilişkiler bulunmuştur. Sadece klorofil okumaları ile her iki termal indeks arasındaki R<sup>2</sup> değeri çiçeklenme döneminde önemsiz çıkmıştır. Özellikle söz konusu büyüme döneminden sonra tüm ilişkilerin gücü artmıştır. Bu nedenle, incelenen fizyolojik özelliklerin tahmininde çiçeklenme döneminden sonra elde edilen modellerin kullanımı, tahmin başarısının artması açısından önerilebilir.

Sonuç olarak; biberde, bitki düzeyinde elde edilen termal indekslerin sulamaya başlama zamanının ve su stresinin belirlenmesinde kullanım potansiyeli olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, su stresine bağlı olarak gelişebilecek semptomlar da söz konusu tekniklerle yüksek doğrulukla belirlenebilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK (Proje No: 116O264) tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- Ackley, W. M. B. (1954). Water contents and water deficits of leaves of bartlett pear trees on the two rootstocks, *Pyrus communis* and *P. serotina*. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 64, 181-185.
- Anonim. (2015). Çanakkale İli Tarımsal Yatırım Rehberi. [https://www.tarim.gov.tr/SGB/TARYAT/Belgeler/il\\_yatirim\\_rehberleri/canakkale.pdf](https://www.tarim.gov.tr/SGB/TARYAT/Belgeler/il_yatirim_rehberleri/canakkale.pdf) Erişim tarihi: 15.01.2019.
- Aybak, H. Ç. (2007). *Biber*, Hasad Yayıncılık. 2.baskı, İstanbul.
- Behmann, J., Steinrücken, J., & Plümer, L. (2014). Detection of early plant stress responses in hyperspectral images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, 98-111.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and Regression Trees*. Monterey, Calif., U.S.A. Wadsworth, Inc.
- Camoğlu, G., & Genç, L. (2013). Determination of water stress using thermal and spectral indices from green bean canopy. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22(10a), 3078-3088.
- Camoğlu, G., Demirel, K., & Genç, L. (2018). Use of infrared thermography and hyperspectral data to detect effects of water stress on pepper. *Quantitative InfraRed Thermography J.*, 15, 81-94.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, S., & Tsipris, J. (2005) Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis., *J. of Experimental Botany*, 56, 1843-1852.
- Çamoğlu, G., & Genç, L. (2013). Taze fasulyede su stresinin belirlenmesinde termal görüntülerin ve spektral verilerin kullanımı. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1(1), 15-27.
- Çamoğlu, G., Demirel, K., & Genç, L. (2019). Termal kamera ve NDVI sensörü kullanılarak domatesin fizyolojik özelliklerinin tahminlenmesi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 23, 78-89.
- Fujiwara, H., Endo, T., & Yasuoka, Y. (2004, November). *Evaluation of water stress on a crop using the portable hyper spectral imager*. 25<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing & 1<sup>st</sup> Asian

- Space Conference, Thailand.
- Jackson, R. D. (1982). Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation Research*, 1, 43-85.
- Jackson, R. D. (1986). Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology*, 24, 265-287.
- Jones, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, 139–149.
- Jones, H. G., Stoll, M., Santos, T., Sousa, C., Chaves, M. M., & Grant, O. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53, 2249-2260.
- Kaçar, B., Katkat, A. V., & Öztürk, Ş. (2009). *Bitki Fizyolojisi*, Nobel Yayınları, 489, Ankara.
- Monteith, J. L., & Unsworth M. L. (1990). *Principles of Environmental Physics*, 2nd ed. Edward Arnold, London, United Kingdom, pp: 414.
- Strachan, I. B., Pattey, E., & Boisvert, J. B. (2002). Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 80(2), 213-224.
- Vural, H., Eşiyok, D., & Duman, İ. (2000). *Kültür Sebzeleri (Sebze Yetiştirme)*. Ege Üniversitesi Basım Evi, Bornova, İzmir.
- Zia, S., Romano, G., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J. L., & Müller, J. (2013). Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress tolerant maize genotypes of different phenology. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199, 75-84.