



Termal kamera ve NDVI sensörü kullanılarak domatesin fizyolojik özelliklerinin tahminlenmesi

Estimation of physiological traits of tomato using thermography technique and NDVI sensor

Gökhan ÇAMOĞLU^{1*}, Kürşad DEMİREL², Levent GENÇ³

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Çanakkale

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Çanakkale

³Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Çanakkale

To cite this article:

Çamoğlu, G., Demirel, K. & Genç, L. (2019). Termal kamera ve NDVI sensörü kullanılarak domatesin fizyolojik özelliklerinin tahminlenmesi. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 23(1): 78-89. DOI: 10.29050/harranziraat.449224

Address for Correspondence:
Gökhan ÇAMOĞLU
e-mail:
camoglu@comu.edu.tr

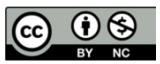
Received Date:

30.07.2018

Accepted Date:

18.01.2019

© Copyright 2018 by Harran University Faculty of Agriculture. Available on-line at www.dergipark.gov.tr/harranziraat



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

ÖZ

Bu çalışmada; domates (*Lycopersicon esculentum* L. cv Full F1) bitkisinde, bitki su stresi indeksi (CWSI) ve Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksi (NDVI) sensöründen elde edilen veriler kullanılarak su stresi düzeyinin, ayrıca CWSI ve NDVI değerleri ile bitkinin bazı fizyolojik özellikleri (stoma iletkenliği, yaprak su potansiyeli, yaprak oransal su içeriği ve klorofil) arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çanakkale ilinde 2017 yılında yürütülen çalışmada dört farklı sulama konusu (%100, %75, %50 ve %25) ele alınmıştır. Çalışma sonucunda, uzaktan algılama indekslerinin her ikisi de su stresi karşısında belirgin tepkiler vermiştir. Bu durumda her iki indeks de kullanılarak domatesin su stresinin başarılı bir şekilde belirlenebileceği söylenebilir. Buna ilaveten ölçümü zor, zaman alıcı ve bitkiye zarar verebilen fizyolojik ölçümlerin CWSI ve NDVI değerlerinin her ikisini de kullanarak yüksek doğrulukla tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Domates, Su stresi, Sulama, CWSI, Spektral indeks

ABSTRACT

The aim of this study are to determine the water stress level using the values obtained from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sensor and the Crop Water Stress Index (CWSI) and also relationships among some physiological traits (stomatal conductance, relative leaf water content, leaf water potential, chlorophyll) of plant and CWSI/NDVI. The study was conducted in Çanakkale province in 2017 investigated four different irrigation treatments (100%, 75%, 50% and 25%). As a result of the study, both remote sensing indices gave important responses to water stress. In this case, it can be said that the water stress of the tomato can be determined successfully by using both indices. The results indicated that physiological measurements that are difficult to measure, time consuming and damaging to the plant can be estimated with high accuracy by combined use of CWSI and NDVI indices.

Key Words: Tomato, Water stress, Irrigation, CWSI, Spectral index

Giriş

Bitkilerin içinde buldukları stres mekanizmasını anlamaya yönelik olarak fotosentez, klorofil, stoma iletkenliği yaprak su durumu gibi birçok fizyolojik ölçüm yapılabilmektedir. Ancak söz konusu ölçümler için

çok sayıda pahalı cihaza gereksinim duyulmaktadır. Bunların maliyetli olmalarının yanı sıra fazla iş gücü gerektirmesi, uzman personele ihtiyaç duyulması, bitkilere zarar verebilmesi, araziyi temsil gücünün düşük olması gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu nedenle günümüzde böyle olumsuz etkileri ortadan

kaldırabilecek bitki stresini tanımlamaya yönelik çalışmalara ağırlık verilmektedir. Bu anlamda stresi belirlemeye yönelik olarak teknolojinin de gelişmesiyle artık bitki sıcaklıklarını ve yansıma indekslerini veren cihazlar kolaylıkla kullanılabilir duruma gelmiştir.

Başta su stresi olmak üzere hastalık, yabancı ot gibi çevresel stres faktörleri bitkide fizyolojik değişikliklere sebep olmaktadır. Stres altındaki bitkilerin yapraktaki su içerikleri ve pigment yapıları değişime uğradığı için strese maruz kalan bitkiler sağlıklı bitkilerden farklı spektral yansımaları sahip olmaktadır. Fizyolojik değişikliğe örnek olarak klorosis (yaprak sararması) sebebiyle bitki yapraklarındaki renklerin değişmesi verilebilir. Yapraklardaki sarı renk, klorofilin parçalanmasıyla meydana gelir. Bu durumda yansıyan yeşil ışık azalır ve yansıyan kırmızı ışık artar (Covey, 1999). Görünür bölgedeki bu değişimin yanı sıra yakın kızılötesi bölgede de sağlıklı bitkiler stresli bitkilerden daha yüksek yansıma göstermektedir (Jacquemoud ve Ustin, 2001). Bu iki bölgeden yararlanılarak hesaplanan Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksi (NDVI) de bitki sağlığını izlemeye önemli rol oynamaktadır. Nitekim NDVI değerinin yapraktaki pigment değişimine ve yaprak su potansiyeline duyarlı olduğu yapılan bilimsel çalışmalarda da bildirilmiştir (Datt, 1998; Köksal ve ark., 2010; Camoğlu ve ark., 2013).

Termal kameralar yardımıyla belirlenen bitki taç sıcaklıklarından yararlanarak bitki su stresi indeksinin (CWSI) belirlenmesinde, Jones (1999) yaptığı çalışmada farklı alt ve üst baz referansları kullanmışlardır. Hesaplama, üst baz için petrolyum jel (vazelin) ile tamamen kaplanmış bitkiler, alt baz için de yüzeyleri tamamen ıslatılmış bitkiler kullanılmıştır. Ülkemizde bu teknikleri kullanarak bitki su stresini belirlemeye yönelik çalışmaların henüz yeterli olmadığı görülmektedir. Konuyla ilgili olarak NDVI değerini doğrudan veren sensörlerin kullanımına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmazken, termografi tekniğini kullanarak su stresinin belirlenmesi üzerine birkaç çalışmaya rastlanmaktadır. Ancak söz konusu çalışmalar da farklı bitkilerde

yapılmıştır. Çamoğlu ve Genç (2013) tarafından yapılan çalışmada, su stresine bağlı olarak taze fasulyenin su kullanımının, veriminin ve bazı morfo-fizyolojik özelliklerinin değişimi ve bu değişimin kızılötesi termal görüntüleme tekniği ile hiperspektral yansıma verilerini kullanarak belirlenebilme olanakları araştırılmıştır. Demirel ve ark. (2014), farklı sulama ve azot seviyelerinde saksı ortamında yetiştirilen rokanın sıcaklık değişimlerini termal kameralar yardımıyla belirlemişlerdir. Akçan ve ark. (2016), çim bitkisinin su stresinin termografi tekniğini kullanarak belirlenebilme olanaklarını araştırmışlardır. Sonuç olarak, termal görüntüler kullanılarak bitkilerde su stresi konusu üzerine araştırmalara yer verilirken ülkemizde böyle çalışmaların henüz yaygınlaşmadığı görülmektedir. Bunun yanında domates bitkisinde de dünyada bu konuları ele alan çalışmaların yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmayla, ülkemizde bu konuda yapılacak araştırmalara literatür yönünden katkı sağlanması hedeflenmiştir. Diğer yandan, çalışma ülkemizde hassas teknolojilerin kullanımının çiftçi koşullarında yaygınlaşması yönünde önemlidir.

Çalışmada, bitkiye dayalı izleme tekniklerinden biri olan termal görüntüleme ile elde edilen CWSI ile NDVI sensöründen elde edilen değerler kullanılarak domatesin su stresi düzeyinin ve ayrıca söz konusu indeksler ile bazı fizyolojik özellikler (stoma iletkenliği, yaprak su potansiyeli, yaprak oransal su içeriği ve klorofil) arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, CWSI ve NDVI ile domatesin fizyolojik özellikleri arasında tek ve çok değişkenli regresyon modelleri oluşturulmuştur. Böylece, ölçümü zor ve zaman alıcı bu özelliklerin bitkiye zarar vermeden, hızlı ve doğru bir şekilde belirlenebilme potansiyeli ortaya konulmuştur.

Materyal ve Yöntem

Araştırma alanının tanımı

Çalışma; 2017 yılında, Çanakkale’de, sofralık domates (*Lycopersicon esculentum* L. cv Full F1) bitkisinde, tarla koşullarında yürütülmüştür.

Denemeye başlamadan önce alanı temsil eden üç farklı noktadan, toprak profilinin 0-30 cm, 30-60 cm ve 60-90 cm derinliklerinden bozulmuş ve bozulmamış toprak örnekleri alınmış olup bunlardan tarla kapasitesi, solma noktası, hacim

ağırlığı ve toprak bünyesi belirlenmiştir (Çizelge 1). Deneme alanında kullanılan suyun EC ve pH değerleri sırasıyla 1.3 dS m⁻¹ ve 7.9 olarak ölçülmüştür.

Çizelge 1. Deneme alanı topraklarının bazı fiziksel analiz sonuçları
Table 1. Some physical analysis results of the soil in the study area

Toprak derinliği Soil depth (cm)	Bünye Texture	Hacim ağırlığı Bulk density (g cm ⁻³)	Tarla kapasitesi Field capacity		Solma noktası Wilting point		Kullanılabilir su tutma kapasitesi Available water holding capacity	
			Pv (%)	d (mm)	Pv (%)	d (mm)	Pv (%)	d (mm)
0-30	SL	1.49	34.9	104.7	23.9	71.7	11.0	33.0
30-60	SL	1.53	33.9	101.7	21.6	64.8	12.3	36.9
60-90	SL	1.58	34.9	104.7	21.3	63.9	13.7	40.8
Toplam (0-90 cm)				311.1		200.4		110.7

Denemenin yürütüldüğü aylara (Mayıs-Ekim) ilişkin olarak uzun yıllık ortalama sıcaklık değeri 21.1 °C, bağıl nem % 68.4 ve rüzgar hızı 3.7 m sn⁻¹'dir. 2017 yılı için ise söz konusu değerler sırasıyla; 22.3 °C, % 60.1, ve 3.3 m sn⁻¹ olmuştur (Anonim, 2018).

Deneme deseni

Araştırma, tesadüf blokları deneme desenine göre 4 sulama konusu 3 tekerrürlü olarak yürütülmüştür (Çizelge 2). Deneme, 24 Mayıs 2017 tarihinde domates fidelerinin dikimi ile

başlamış olup 26.10.2017 tarihinde son hasat yapılarak bitmiştir. Domatesin dikim normu 100x66 cm olarak alınmıştır. Her parselde 4 bitki sırası oluşturulmuş ve her bitki sırasına 10 adet bitki dikilmiştir. Parsel aralarına toprağın adveksiyon etkisini ortadan kaldırmak amacıyla bir sıra daha domates dikilmiştir. Çalışmada ölçümlerin tümü ortadaki iki bitki sırasında yapılmıştır.

Araştırmada bitkilerin sulanması için damla sulama sistemi kullanılmış olup istatistiksel dizayna uygun olarak tesis edilmiştir.

Çizelge 2. Denemede ele alınan sulama konuları
Table 2. Irrigation treatments investigated in the experiment

Sulama konusu Treatment	Açıklama Explanation
I-100	0-90 cm toprak derinliğindeki kullanılabilir nemin %40±5'i tüketildiğinde eksilen nemin tarla kapasitesine tamamlanması (kontrol)
I-75	I-100 konusunda tüketilen suyun %75'i
I-50	I-100 konusunda tüketilen suyun %50'si
I-25	I-100 konusunda tüketilen suyun %25'i

Kültürel işlemler

Dikimden önce pullukla sürüm yapılmış ve ardından rotatiller ile sürülerek dikime hazır duruma getirilmiştir. Toprak analiz sonuçlarına göre, dikimle birlikte damla sulama sisteminde yer alan venturi gübreleme sistemiyle ilk gübreleme (Dekara 5 kg AquaDrip 20-20-20-TE) yapılmıştır. Diğer gübreleme işlemleri çiçeklenme ve hasat dönemleri arasında (5 kg da⁻¹ olmak üzere üç kez daha) yapılmıştır. Tüm yetiştirme periyodu boyunca

ortaya çıkan yabancı otlarla mücadele elle, frezeyle ve herbisit uygulanarak yapılmıştır. Ortaya çıkan/çıkabilecek diğer hastalık ve zararlılarla mücadelede ise kükürt ve insektisit kullanılmıştır.

Uygulanan sulama suyu miktarı

Denemede konulara uygulanan sulama suyu miktarının belirlenmesinde toprak nem sensörleri (DECAGON 10HS) kullanılmıştır. Sensörlerden

gelen verilerin kaydedilmesinde veri kaydediciler (DECAGON EM50) kullanılmıştır. Çalışmada toplam 9 adet sensör kullanılmış ve bunlar 1-100 konusunun her bir tekerrüründe toprağın 0-30 cm 30-60 cm ve 60-90 cm katmanlarına yerleştirilmiştir. Deneme başlamadan önce söz konusu sensörler mevcut toprak koşullarına göre kalibre edilmiş ve elde edilen eşitliklere göre gerçek nem değerleri tahmin edilmiştir. Her sulamadan önce bu değerlerden yararlanılarak konulara uygulanacak sulama suyu miktarları Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$I=(TK-MN) \times P \times A \quad (1)$$

Çizelge 3. Çalışmada yapılan ölçümler ve analizler
Table 3. Measurements and analyzes in study

Ölçüm grubu <i>Measurement group</i>	Ölçümler ve hesaplamalar <i>Measurements and calculations</i>	Kullanılan cihaz veya yöntem <i>Device or method used</i>
Fizyolojik ölçümler <i>Physiological measurements</i>	Stoma iletkenliği Klorofil okuması Yaprak su potansiyeli Yaprak oransal su içeriği	Porometre (Decagon SC-1) Klorofilmetre (Fieldsout CM1000) Basınç odası (PMS Model 1000) Gravimetrik yöntem
Uzaktan algılama ölçümleri <i>Remote sensing measurements</i>	Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksi (NDVI) Termal indeks (CWSI)	NDVI sensörü (Decagon SRS-Nr) Termal kamera (Fluke Ti27)

Fizyolojik ölçümler

Fizyolojik ölçümlerin tümü 11.00-14.00 saatleri arasında yapılmıştır. Stoma iletkenliği, her tekerrürde rastgele seçilen 3 bitkinin güneş gören ve olgunluğunu tamamlamış birer yaprağında yapılmıştır (Şekil 1a). Yapraktaki klorofil içeriğinin göstergesi olarak kullanılan klorofil okumaları, her bir bitkinin üç farklı yaprağından aynı yaprakta üçer kez ölçüm almak suretiyle yapılmıştır (Şekil 1b). Ölçümlerde ışıklılık indeksi 4-5 arasında tutulmuştur. Yaprak su potansiyeli, her bir tekerrürde 3 farklı bitkiden alınan sürgünlerde ölçülmüştür (Şekil 1c). Ölçümde bitkinin söz

Eşitlikte; I: Sulama suyu miktarı (litre), TK: 90 cm toprak derinliğindeki tarla kapasitesi değeri (mm), MN: Sulamadan hemen önceki mevcut nem değeri (mm) P: Örtü yüzdesi (en az %30 alınmıştır), A: Parsel alanı (m²)

Yapılan ölçümler ve hesaplamalar

Çalışma kapsamında yapılan ölçümler ve bu ölçümlerde kullanılan cihazlar Çizelge 3'de sunulmuştur. Tüm ölçümler, dikimden sonraki 43. günde (DSG₄₃) başlamış ve DSG₁₁₃'de bitmiştir. Ölçümlerin tümü her iki sulamada bir ve sulama öncesinde yapılmıştır (Şekil 1).

konusu dönemdeki tam gelişmiş güneş gören kısımları kullanılmıştır. Yaprak oransal su içeriği, her tekerrürden üç farklı bitkiden gelişimini tamamlamış üç yaprak örneği alınarak Eşitlik 2 yardımıyla belirlenmiştir (Ackley, 1954; Smart ve Bingham, 1974).

$$YOSİ = \frac{YA - KA}{TA - KA} \times 100 \quad (2)$$

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

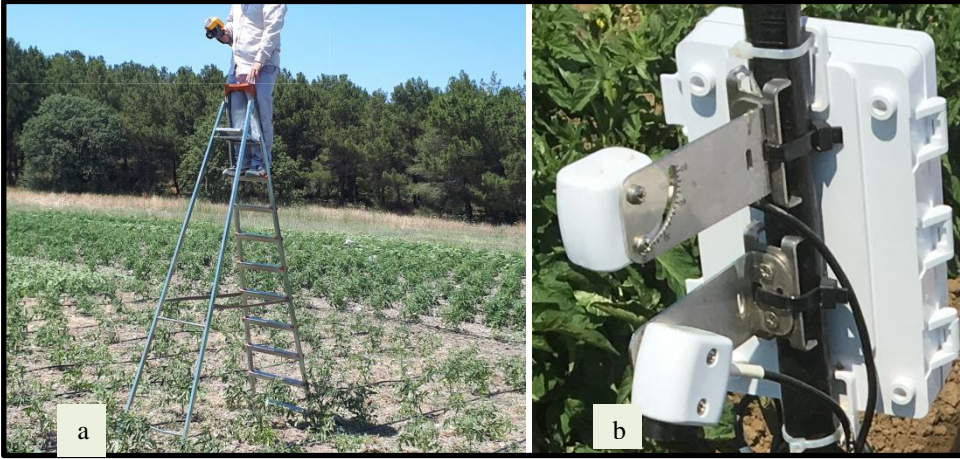


Şekil 1. Stoma iletkenliği (a), klorofil okuması (b) ve yaprak su potansiyeli (c) ölçümleri
Figure 1. Measurements of stomatal conductance (a), chlorophyll reading (b) and leaf water potential (c)

Uzaktan algılama ölçümleri

Termal ve NDVI ölçümleri, havanın bulutsuz ve rüzgar hızının 2 m s⁻¹'den daha az olduğu

günlerde, sulama öncesinde ve gün içinde stresin en fazla görüldüğü saat 11:00 ile 14:00 arasında yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Termal (a) ve NDVI (b) ölçümleri
Figure 2. Thermal (a) and NDVI (b) measurements

Termal görüntülerde geniş açılı lens (46°x34°) kullanılmış ve emissivite değeri 0.98'e ayarlanmıştır. Ölçümler, geniş açılı lensle yaklaşık 3.5 m yükseklikten 5.9 m²'lik bir alanı görecektir şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2a). Arka plan sıcaklığının belirlenmesinde alüminyum folyodan yararlanılmıştır (Jones ve ark., 2002). Bitki su stresi indeksi (CWSI) Eşitlik 3 yardımıyla belirlenmiştir. CWSI değerlerinin belirlenmesi için gerekli alt ve üst baz değerleri ampirik eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_{islak})}{(T_{kuru} - T_{islak})} \quad (3)$$

Eşitliklerde; T_c: Taç sıcaklığı (°C), T_{islak}: Islak referans yüzeyin sıcaklığı (°C), T_{kuru}: Kuru referans yüzeyin sıcaklığı (°C)

Ampirik yöntemde T_{islak} Eşitlik 4 yardımıyla (Monteith ve Unsworth, 1990; O'Shaughnessy ve ark. 2011), T_{kuru} ise ölçülen hava sıcaklığına 5 °C ilave edilerek tahmin edilmiştir (Cohen ve ark., 2005, Möller ve ark., 2007). Bu yöntemle hesaplanan termal indeks, CWSI_e olarak gösterilmiştir.

$$T_{wet} \approx T_a - \frac{e_s(T_a) - e_a}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

Eşitlikte; T_a: hava sıcaklığı (°C), e_s: havanın doymuş buhar basıncı (kPa), e_a: havanın gerçek

buhar basıncı (kPa), Δ: buhar basıncı eğrisinin eğimi (kPa °C⁻¹), γ: psikrometrik sabite (kPa °C⁻¹) Görüntü işleme ve analizler Çamoğlu ve Genç (2013) tarafından belirtilen şekilde yapılmıştır. Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksi (NDVI) ölçümleri SRS-NDVI sensörleri kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2b). Cihaz NIR ve RED dalga boyundaki yansımaları ölçüp Eşitlik 5 (Rouse ve ark., 1973) yardımıyla hesaplayarak doğrudan NDVI değerini vermektedir. NDVI değerleri, her bir tekerrürde parseli temsil eden üç bitki üzerinde bitki taç genişliğini aşmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. NDVI sensöründen alınan değerler datalogger (Decagon M50) kullanılarak kaydedilmiştir.

$$NDVI = \frac{R_{800} - R_{630}}{R_{800} + R_{630}} \quad (5)$$

İstatistiksel analiz

Denemede gerçekleştirilen uygulamaların sonucunda elde edilen veriler arasındaki farkın önemli olup olmadığı (p=0.05) tek yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA) ile belirlenmiştir. Farkın önemli olması durumunda, konular arasındaki farklılığı belirlemek için Duncan testi kullanılmıştır. Ele alınan özellikler arasındaki modelleri belirlemek amacıyla tek değişkenli regresyon (TDR) ve enter yöntemi kullanılarak çok

değişkenli doğrusal regresyon (ÇDDR) analizi yapılmıştır. Tüm istatistiki değerlendirmelerde SPSS 20.0 paket programı kullanılmıştır.

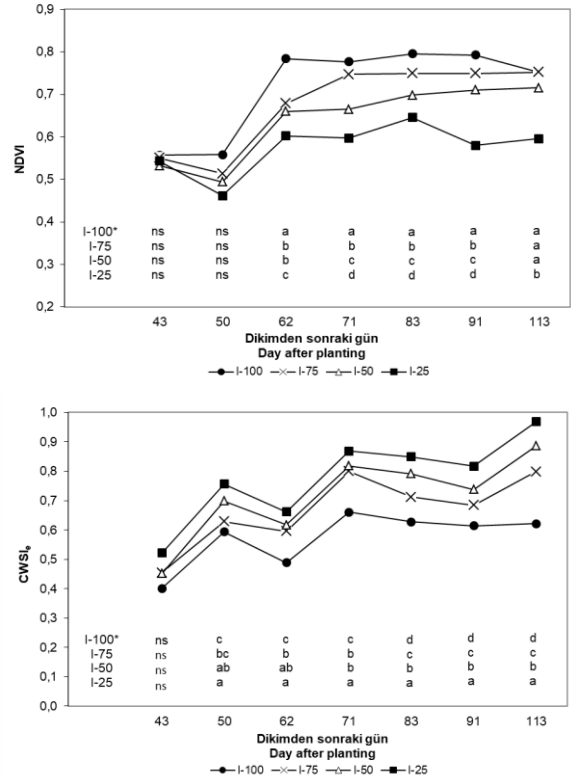
Araştırma Bulguları ve Tartışma

Uzaktan algılama indeksleri

Yetiştirme periyodu boyunca domatese ilişkin ölçülen Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksi (NDVI) ve ampirik olarak hesaplanan Bitki Su Stresi İndeksi (CWSI_e) değerlerinin konulara göre değişimleri Şekil 3'de verilmiştir. Dönem boyunca ölçülen NDVI ve CWSI_e değerleri konulara göre sırasıyla 0.46 ile 0.80 ve 0.40 ile 0.97 arasında değişmiştir. Genel itibarıyla ilk ölçümden sonraki tüm ölçümlerde I-100 konusuna ilişkin NDVI değeri en yüksek değerleri alırken, CWSI_e en düşük değerleri almıştır. Stresin artışına bağlı olarak NDVI değerleri azalmış, CWSI_e değerleri ise artmıştır. İlk iki ölçümden (DSG₄₃ ve DSG₅₀) konuların NDVI değerleri arasında istatistiksel bir fark oluşmazken sonraki ölçümlerde aralarındaki farklar belirgin hale gelmiştir. Bu durum, bitkinin erken dönemde henüz yapraktaki pigmentlerin tam olarak zarara uğramadığını göstermektedir. Sönmez ve ark. (2015) domateste tuz stresi koşullarında spektral yansıma tepkilerini araştırdıkları çalışmalarında, stresin bir süre devam ettikten sonra NDVI değerinin konuları ayırt edici etkisinin olduğunu bildirmişlerdir.

Mastorilli ve ark. (2010) domateste su stresinin değerlendirilmesinde NDVI değerinin 0.6 ile 0.9 arasında değiştiğini ve anlık sulama programlamasında kullanışlı olamayacağını belirtmişlerdir. Çamoğlu ve ark. (2018) benzer şekilde NDVI değerinin biber bitkisinde tam sulanan bitkiler ile hafif stres uygulanan bitkileri ayırt edemediğini bildirmişlerdir. Ancak bu çalışmada, çoğu ölçümden NDVI değeri konuları ayırt etmede başarılı sonuçlar vermiştir. Nicacias (2009) domateste stresli ve stressiz bitkilerde yaptığı NDVI ölçümlerinde, söz konusu değerin domates çeşitlerine ve ölçüm zamanına göre 0.21 ile 0.84 arasında değiştiğini ve stresin artışına bağlı olarak NDVI değerinin azaldığını bildirmiştir. CWSI_e değerlerinde ilk ölçümden sonra konular

arasında istatistiksel bir farklılık oluşmuştur. Özellikle DSG₇₃'den sonra tüm konuların farklı grupta yer alması, söz konusu indeksin sulama konularını ne derece başarılı ayırabildiğinin bir göstergesidir. Morales ve Urrestarazu (2013), domateste transpirasyonu etkileyen su stresi gibi diğer bir stres faktörü olan tuzun etkisinin de termografi tekniğini kullanarak başarılı bir şekilde tespit edilebileceğini belirtmişlerdir. Nardella ve ark. (2008) domateste üç farklı sulama düzeyi (%100, %75 ve %50) uyguladıkları çalışmalarında, ampirik olarak hesaplanan CWSI değerlerinin zamana ve konulara bağlı olarak 0.18 (%100) ile 0.74 (%50) arasında değişiklik gösterdiğini ve istatistiksel olarak konuların birbirinden ayrıldığını belirtmişlerdir.



Şekil 3. Konulara göre NDVI ve CWSI değerlerinin değişimi
Figure 3. The change of NDVI and CWSI values according to treatments

Fizyolojik özellikler ile uzaktan algılama indeksleri arasındaki ilişkiler

Stoma iletkenliği ile indeksler arasındaki ilişkiler

Yetiştirme periyodu boyunca her ölçüm için stoma iletkenliği ile NDVI ve CWSI_e değerleri arasındaki tek değişkenli regresyon (TDR) analizleri Şekil 4'de, çok değişkenli doğrusal

regresyon (ÇDDR) analizleri ise Çizelge 4’de gösterilmiştir. İlk ölçümde (DSG₄₃) konulara henüz geçilmediği için, bu tarihe ilişkin regresyon analizi yapılmamıştır. Şekil 4 incelendiğinde, stoma iletkenliği ile NDVI arasında aynı yönde, CWSI_e ile arasında ise ters yönde bir ilişkinin olduğu görülmektedir. R² değerleri, ölçüm günlerine bağlı olarak NDVI için 0.46 (DSG₅₀) ile 0.94 (DSG₇₁) ve CWSI_e için 0.55 (DSG₅₀) ile 0.96 (DSG₁₁₃) arasında değişmiştir. Her iki indekste de ilk ölçümde R²

p<0.05 düzeyinde önemli olurken, diğer günlerde p<0.001 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Çizelge 4 incelendiğinde, her iki indeksin de eşitlikte yer alması ile tüm ölçüm günlerinde R² değerlerinin arttığı görülmektedir. Söz konusu değerler 0.70 ile 0.98 arasında değişmiştir. En düşük ve en yüksek değerler sırasıyla ilk (DSG₅₀) ve son (DSG₁₁₃) ölçümde gerçekleşmiştir. İlk ölçümdeki (DSG₅₀) R² değerinin önemlilik seviyesi TDR analizinde %5 iken, ÇDDR analizinde %1 düzeyine yükselmiştir.

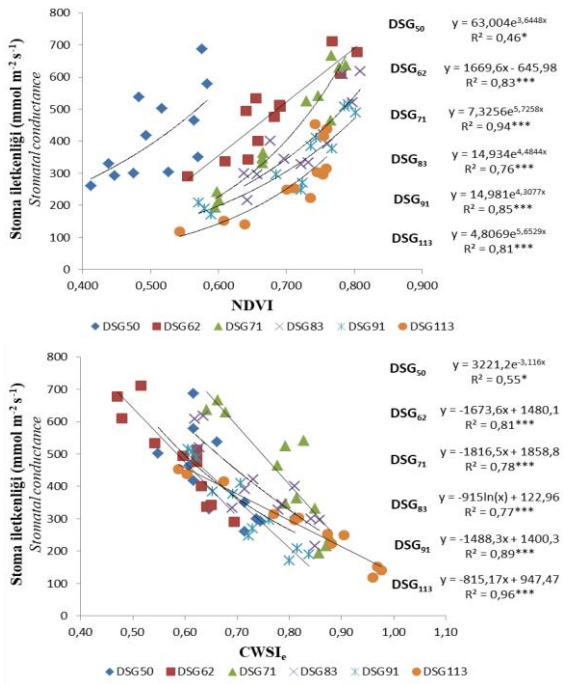
Çizelge 4. Stoma iletkenliği ile indeksler arasındaki ÇDDR analizi sonuçları
Table 4. The results of ÇDDR analysis between stomatal conductance and indices

DSG	Model Model	Regresyon katsayıları Regression coefficients	Standart hata Standard error	R ²	Düzeltilmiş R ² Adjusted R ²
50	Sabite	522.742	374.880	0.70**	0.64
	NDVI	1135.238	443.627		
	CWSI _e	-1014.000	354.309		
62	Sabite	306.618	582.657	0.87***	0.85
	NDVI	976.308	465.080		
	CWSI _e	-813.526	480.254		
71	Sabite	-360.406	421.595	0.95***	0.94
	NDVI	1728.224	315.899		
	CWSI _e	-526.722	279.977		
83	Sabite	321.541	1406.858	0.76**	0.71
	NDVI	825.241	1154.765		
	CWSI _e	-696.462	788.493		
91	Sabite	1192.534	702.728	0.88***	0.86
	NDVI	140.166	489.049		
	CWSI _e	-1337.506	515.618		
113	Sabite	608.979	107.471	0.98***	0.98
	NDVI	332.767	102.145		
	CWSI _e	-688.252	52.653		

^{ns}:Önemsiz, *:p<0.05, **:p<0.01, ***: p<0.001, n=12

Farklı bitkilerde yapılan çalışmalarda da stoma iletkenliği ile CWSI arasında önemli ilişkiler elde etmişlerdir. Ben-Gal ve ark. (2009) zeytinde yaptıkları çalışmada, termal görüntüler yardımıyla

hesaplanan CWSI değerlerinin stoma iletkenliğini belirlemede kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Zia ve ark. (2013) mısırdaki stoma iletkenliği ile CWSI arasındaki R² değerini 0.62 olarak elde etmişlerdir.



Şekil 4. Stoma iletkenliği ile indeksler arasındaki TDR analizi sonuçları

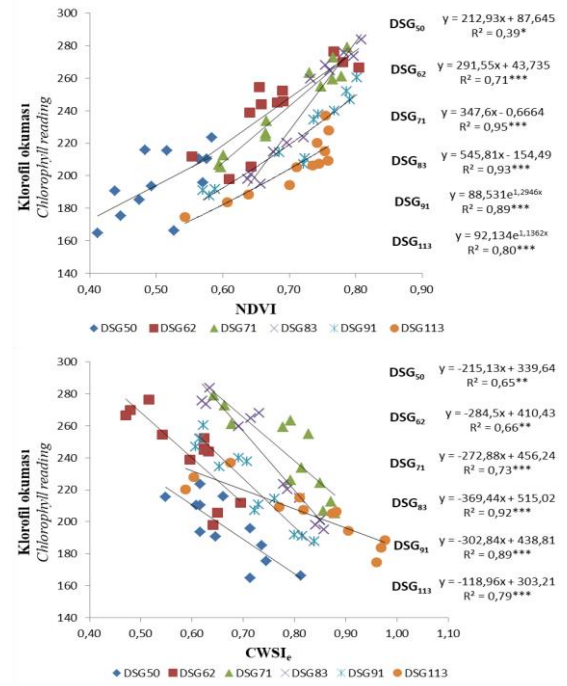
Figure 4. The results of TDR analysis between stomatal conductance and indices

Klorofil okuması ile indeksler arasındaki ilişkiler

Yetiştirme periyodu boyunca her ölçüm için klorofil okuması ile NDVI ve CWSI_e değerleri arasındaki TDR analizleri Şekil 5’de, ÇDDR analizi sonuçları da Çizelge 5’de gösterilmiştir. Klorofil okuması ile NDVI arasındaki ilişki pozitif yönde olurken, CWSI_e ile arasındaki ilişki ise negatif yönlü olmuştur. Elde edilen R² değerleri NDVI için 0.39 (p<0.05) ile 0.95 (p<0.001) ve CWSI_e için 0.65

(p<0.05) ile 0.92 (p<0.001) arasında değişmiştir. En düşük değerler her iki indekste de DSG₅₀’de gerçekleşmiştir. En yüksek R² değerleri ise NDVI için DSG₇₁ ve CWSI_e için DSG₈₃’de elde edilmiştir.

Her iki indeksin de eşitlikte yer almasıyla R² değerlerinin özellikle DSG₅₀’de oldukça yükseldiği görülmektedir (Çizelge 5). R² değerleri 0.73 ile 0.95 arasında değişmiş olup tümü istatistiksel açıdan %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur.



Şekil 5. Klorofil okuması ile indeksler arasındaki TDR analizi sonuçları

Figure 5. The results of TDR analysis between chlorophyll reading and indices

Çizelge 5. Klorofil okuması ile indeksler arasındaki ÇDDR analizi sonuçları

Table 5. The results of ÇDDR analysis between chlorophyll reading and indices

DSG	Model Model	Regresyon katsayıları Regression coefficients	Standart hata Standard error	R ²	Düzeltilmiş R ² Adjusted R ²
50	Sabite	248.014	45.204	0.80***	0.76
	NDVI	142.311	53.494		
62	Sabite	174.857	159.704	0.73**	0.67
	NDVI	196.461	127.477		
71	Sabite	65.786	62.142	0.95***	0.94
	NDVI	304.974	46.563		
83	Sabite	152.598	169.667	0.95***	0.94
	NDVI	302.864	139.264		
91	Sabite	265.215	126.364	0.91***	0.89
	NDVI	121.857	87.940		
113	Sabite	180.584	41.531	0.90***	0.88
	NDVI	120.838	39.472		
	CWSI _e	-185.801	42.724		
	CWSI _e	-112.310	131.636		
	CWSI _e	-46.815	41.268		
	CWSI _e	-176.313	95.092		
	CWSI _e	-180.496	92.718		
	CWSI _e	-73.292	20.347		

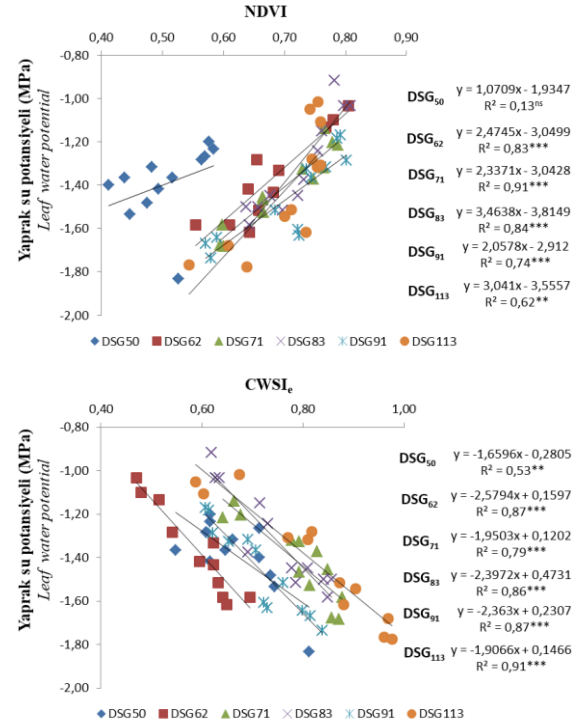
^{ns}:Önemsiz, *:p<0.05, **:p<0.01, ***: p<0.001, n=12

Farklı bitkilerde yapılan çalışmalarda da söz konusu indeksler ile klorofil arasında önemli ilişkiler olduğu belirtilmiştir (Penuelas ve Inoue, 1999; Köksal ve ark., 2010; Camoglu ve ark., 2013; Camoglu ve ark., 2018).

Yaprak su potansiyeli ile indeksler arasındaki ilişkiler

Yaprak su potansiyeli ile NDVI ve CWSI_e değerleri arasındaki TDR analizleri gösteren Şekil 6 incelendiğinde; YSP ile NDVI arasındaki R² değerleri, ölçüm günlerine bağlı olarak 0.13 (p>0.05, önemsiz) ile 0.91 (p<0.001), CWSI_e ile 0.53 (p<0.05) ile 0.91 (p<0.001) arasında değişmiştir. Elde edilen R² değerleri ilk ölçüm gününden sonra artmıştır. NDVI ve CWSI_e için en yüksek değerler sırasıyla DSG₇₁ ve DSG₁₁₃'de elde edilmiştir. Mastrorilli ve ark. (2010) domateste farklı su stresine bağlı olarak ölçtükleri YSP ve NDVI arasındaki R² değerini 0.95 olarak belirlemişlerdir. Söz konusu çalışmada da aralarındaki ilişkinin oldukça önemli olduğu ve YSP'nin NDVI ile tahmin edilebileceği ortaya çıkmıştır. Farklı bitkilerde yapılan çalışmalarda da NDVI ve CWSI değerleri ile YSP arasında benzer bulgular elde edilmiştir (Penuelas and Inoue, 2000; Cohen ve ark., 2005; Möller ve ark., 2007; Ben-Gal ve ark., 2009; O'Shaughnessy ve ark., 2011; Camoglu ve Genc, 2013).

ÇDDR analizi sonuçlarını gösteren Çizelge 6 incelendiğinde, yine her iki indeksin de eşitlikte yer almasıyla R² değerlerinde artış gözlenmiştir. Söz konusu değerler ölçüm günlerine göre 0.56 ile 0.93 arasında değişmiştir. Sadece ilk ölçümde elde edilen R² değeri %5 düzeyinde önemli bulunurken diğerleri %0.1 düzeyinde önemli çıkmıştır.



Şekil 6. Yaprak su potansiyeli ile indeksler arasındaki TDR analizi sonuçları
Figure 6. The results of TDR analysis between leaf water potential and indices

Çizelge 6. Yaprak su potansiyeli ile indeksler arasındaki ÇDDR analizi sonuçları
Table 6. The results of ÇDDR analysis between stomatal conductance and indices

DSG	Model Model	Regresyon katsayıları Regression coefficients	Standart hata Standard error	R ²	Düzeltilmiş R ² Adjusted R ²
50	Sabite	-0.572	0.573	0.56*	0.46
	NDVI	0.471	0.679		
	CWSI _e	-1.580	0.542		
62	Sabite	-1.002	0.753	0.91***	0.88
	NDVI	0.987	0.601		
	CWSI _e	-1.751	0.621		
71	Sabite	-2.145	0.510	0.93***	0.92
	NDVI	1.755	0.382		
	CWSI _e	-0.626	0.339		
83	Sabite	-0.993	1.870	0.87***	0.84
	NDVI	1.221	1.535		
	CWSI _e	-1.611	1.048		
91	Sabite	0.644	1.195	0.87***	0.84
	NDVI	-0.301	0.832		
	CWSI _e	-2.647	0.877		
113	Sabite	-0.657	0.530	0.93***	0.91
	NDVI	0.784	0.503		
	CWSI _e	-1.601	0.259		

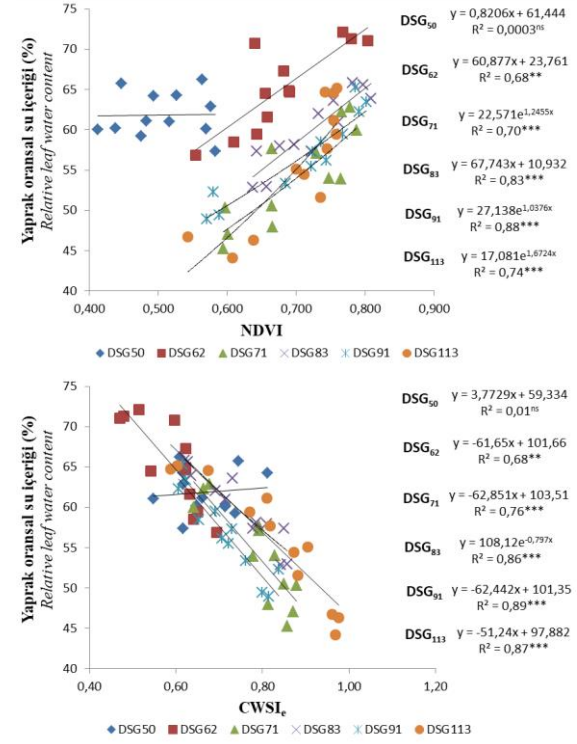
^{ns}:Önemsiz, *:p<0.05, **:p<0.01, ***: p<0.001, n=12

Yaprak oransal su içeriği ile indeksler arasındaki ilişkiler

Yaprak oransal su içeriği ile indeksler arasında yapılan TDR analizi sonucu elde edilen R^2 değerleri her iki indeks için de ilk ölçüm gününde önemsiz bulunmuştur (Şekil 7). Diğer ölçüm günlerinde söz konusu değerler artmış DSG_{62} 'de 0.68'e yükselerek %1 düzeyinde önemli bulunmuştur. Sonraki ölçümlerde ise önemlilik düzeyi %0.1 seviyesine yükselmiştir. En yüksek R^2 değerleri her iki indekste de DSG_{91} 'de elde edilmiştir.

ÇDDR analiz sonuçlarına göre iki indeksin de eşitlikte yer alması durumunda R^2 değerlerinin nispeten yükseldiği görülmektedir (Çizelge 7). Söz konusu değerler TDR analizinde olduğu gibi burada da DSG_{50} 'de önemsiz bulunmuştur. En yüksek değer son ölçümde (DSG_{113}) elde edilmiştir. R^2 değerlerindeki en fazla artış da yine söz konusu ölçüm gününde olmuştur. Camoğlu ve ark. (2018) biberde TDR analizi sonucu NDVI ve $CWSI_e$ için sırasıyla 0.65 ve 0.26 olan R^2 değerinin, her iki indeksin beraber kullanılmasıyla 0.78'e yükseldiğini bildirmişlerdir. Bitkilerin su içeriği ile indeksler arasındaki ilişkilerin önemli olduğu

Jones ve ark. (2004) ile Camoğlu ve ark. (2013) tarafından da bildirilmiştir.



Şekil 7. Yaprak oransal su içeriği ile indeksler arasındaki TDR analizi sonuçları

Figure 7. The results of TDR analysis between relative leaf water content and indices

Çizelge 7. Yaprak oransal su içeriği ile indeksler arasındaki ÇDDR analizi sonuçları

Table 7. The results of ÇDDR analysis between relative leaf water content and indices

DSG	Model Model	Regresyon katsayıları Regression coefficients	Standart hata Standard error	R^2	Düzeltilmiş R^2 Adjusted R^2
50	Sabite	58.157	14.319	0.01 ^{ns}	-0.21
	NDVI	1.602	16.945		
	$CWSI_e$	4.150	13.534		
62	Sabite	62.069	36.011	0.70 ^{**}	0.64
	NDVI	32.670	28.744		
	$CWSI_e$	-32.327	29.682		
71	Sabite	66.019	29.703	0.79 ^{***}	0.75
	NDVI	29.148	22.256		
	$CWSI_e$	-40.994	19.725		
83	Sabite	79.896	35.958	0.88 ^{***}	0.86
	NDVI	13.740	29.515		
	$CWSI_e$	-40.097	20.153		
91	Sabite	69.857	27.442	0.90 ^{***}	0.88
	NDVI	21.621	19.098		
	$CWSI_e$	-40.240	20.135		
113	Sabite	62.256	14.066	0.93 ^{***}	0.92
	NDVI	35.608	13.369		
	$CWSI_e$	-38.376	6.891		

^{ns}:Önemsiz, *:p<0.05, **:p<0.01, ***: p<0.001, n=12

Sonuçlar

Bu çalışmada domates bitkisinin fizyolojik özelliklerinden stoma iletkenliği, yaprak su potansiyeli, yaprak oransal su içeriği ve klorofil değeri ile uzaktan algılama indekslerinden NDVI ve CWSI arasındaki ilişkiler tek değişkenli ve çok değişkenliği doğrusal regresyon analizlerini kullanarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda domatesin fizyolojik özellikleri ile uzaktan algılama indeksleri arasında istatistiksel olarak önemli R^2 değerleri elde edilmiştir. İlk ölçümden itibaren söz konusu değerler artış göstermiştir. Bu nedenle fizyolojik özelliklerin daha doğru tahmini için bu konu dikkate alınmalıdır. Hem CWSI hem de NDVI değerlerinin yer aldığı çok değişkenli regresyon modellerinde R^2 değerleri tek değişkenli regresyona göre daha da yükselmiştir. Söz konusu koşulda en yüksek R^2 değerleri; stoma iletkenliği için 0.98, klorofil için 0.95, yaprak su potansiyeli için 0.93 ve yaprak oransal su içeriği için 0.93 olarak bulunmuştur. Bu durumda, söz konusu fizyolojik özelliklerin doğru tahmini için her iki indeksin de kullanılması önerilebilir. Ayrıca, dikimden sonraki günün de dikkate alınarak, o gün için elde edilen modelin kullanılması, söz konusu fizyolojik özelliğin daha doğru tahmin edilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, domates bitkisinin su stresine karşı oldukça duyarlı olduğu, su stresinin fizyolojik özellikler ve uzaktan algılama indeksleri ile belirlenebileceği söylenebilir. Bununla birlikte, su stresinin belirlenmesinde kullanılan önemli fizyolojik özelliklerin bitkiye zarar vermeden, hızlı, anlık ve doğru tahmininde termografi tekniğinin ve doğrudan NDVI değerini veren sensörlerin kullanışlı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Ekler

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri FHD-2017-1190 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Ackley, W.B. (1954). Water contents and water deficits of leaves of bartlett pear trees on the two rootstocks *P. communis* and *P. serotina*. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 64, 181-185.
- Akçan, M., Çamoğlu, G., & Demirel, K. (2016). Termografi tekniğini kullanarak çimin su stresinin belirlenmesi. *13. Ulusal Kültürteknik Kongresi* (346-354), Antalya.
- Anonim (2018). *İklim Verileri*. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, U., Zipori, I., et al. (2009). Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27, 367-376.
- Camoglu, G., & Genc, L. (2013). Determination of water stress using thermal and spectral indices from green bean canopy. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22(10a), 3078-3088.
- Camoglu, G., Kaya U., Akkuzu, E., Genc, L., Gurbuz, M., Pamuk Mengu, G., et al. (2013). Prediction of leaf water status using spectral indices at young olive trees. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22(9a), 2713-2720.
- Camoglu, G., Demirel, K., & Genc, L. (2018). Use of infrared thermography and hyperspectral data to detect effects of water stress on pepper. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 15(1), 81-94.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga S., & Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56, 1843-1852.
- Covey, R. (1999). Remote sensing in precision agriculture: an educational primer, Iowa State University, Ames Remote, <http://www.amesremote.com/papers.htm> (Erişim tarihi: 14 Temmuz 2018).
- Datt, B. (1998). Remote sensing of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, chlorophyll *a+b*, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, 66, 111-121.
- Demirel, K., Camoglu, G., Genc, L., & Kizil, U. (2014). The variation of plant stress indicators and some traits under different irrigation and nitrogen levels in the rocket. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23(5), 1238-1248.
- Jacquemoud, S., & Ustin, S.I. (2001). Leaf optical properties: A state of the Art. Proc. 8th Int. Symp. *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensings* (223-323 pp), France.
- 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., de Sousa, C., Chaves, M.M. et al.(2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53, 2249-2260.
- Jones, C.L., Weckler, P.R., Maness, N.O., Stone, M.L., & Jayasekara, R. (2004). Estimating water stress in plants using hyperspectral sensing, ASAE/CSAE

- Annual International Meeting, 1-4 August, Paper Number: 043065.
- Köksal, E.S., Üstün, H., Özcan, H., & Güntürk, A. (2010). Estimating water stressed dwarf green bean pigment concentration through hyperspectral indices. *Pakistan Journal of Botany*, 42(3), 1895-1901.
- Mastrorilli, M., Campi, P., Palumbo, A.D., & Modugno, F. (2010). Ground-based remote sensing for assessing tomato water-status. *Italian Journal of Agronomy*, 5, 177-183.
- Monteith, J.L., & Unsworth, M.L. (1990). Principles of environmental physics. 2nd ed. Edward Arnold, London, United Kingdom, 414p.
- Morales, I., & Urrestarazu, M. (2013). Thermography study of moderate electrical conductivity and nutrient solution distribution system effects on grafted tomato soilless culture. *Hortscience*, 48(12), 1508-1512.
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., et al. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 58, 827-838.
- Nardella, E., Giuliani, M.M., Gatta, G., Tarantino, E., & De Caro, A. (2008). Irrigation scheduling in processing tomato crop cultivated in southern Italy: the role of physiological parameters. *Italian Journal of Agronomy*, 3(3), 685-686.
- Nicacias, M.M. (2009). *Evaluating the effect of moisture stress on tomato using non-destructive remote sensing techniques*. Master Thesis, School of Agricultural and Environmental Science, Faculty of Science and Agriculture, University of Limpopo.
- O'Shaughnessy, S.A., Evett, S.R., Colaizzi, P.D., & Howell, T.A. (2011). Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management*, 98, 1523-1535.
- Penuelas, J., & Inoue, Y. (1999). Reflectance indices indicative of changes in water and pigment content of peanut and wheat leaves. *Photosynthetica*, 36(3), 335-360.
- Penuelas, J., & Inoue, Y. (2000). Reflectance assessment of canopy CO₂ uptake. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 3353-3356.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Proceedings of the Third ERTS Symposium* (309-317 pp), (Goddard Space Flight Center), DC: NASA, NASA SP-351, Washington.
- Smart, R.E., & Bingham, G.E. (1974). Rapid estimates of relative water content. *Plant Physiology*, 53, 258-260.
- Sönmez, N.K., Aslan, G.E., & Kurunç, A. (2015). Farklı tuz stresi altındaki domates bitkisinin spektral yansıma ilişkileri. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 21, 585-595.
- Zia, S., Romano, G., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., et al. (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.