



Taze Fasulyede Su Stresinin Belirlenmesinde Termal Görüntülerin ve Spektral Verilerin Kullanımı

Gökhan Çamoğlu^{1*} Levent Genç¹

¹ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, 17020, Çanakkale.

*Sorumlu yazar: camoglu@comu.edu.tr

Özet

Bitkilerin fizyolojik aktivitelerindeki değişim kalıcı hale gelmeden önce su stresini belirlemek önemlidir. Bunun sonucunda ciddi oranda verim kaybı yaşanabilir. Birçok araştırmacı, bitki taç ve yapraklarından toplanan termal ve spektral verilerin bitki su stresinin belirlenmesinde kullanılabilecek potansiyel araçlar olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmanın amacı, taze fasulye (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Gina) bitkisinde, spektral yansıma verilerini ve termal görüntüleme tekniğini kullanarak su stresinin belirlenmesidir. Bu amaçla, dört farklı sulama konusu (tüketilen suyun %100'ü (kontrol), %75'i, %50'si ve %25'i) oluşturulmuştur. Araştırmada, termal görüntüler kızılötesi termal kamerayla, spektral veriler ise spektrometreyle elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, konulara uygulanan toplam sulama suyu miktarları 232–681 mm ve elde edilen mevsimlik bitki su tüketimi değerleri 379–804 mm arasında bulunmuştur. Sınıflandırma ve regresyon ağacı analizlerine göre, su stresinin özellikle I–100 seviyesinde termal indeksler ile daha iyi açıklanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada, spektral indekslerden Yapısal Bağımsız Pigment İndeksi (SIPI) ve Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksinin (NDVI), termal indekslerden de amprik esasa dayalı hesaplanan bitki su stresi indeksi (CWSI_e) ve yapay referans yüzeylere göre hesaplanan bitki su stresi indeksinin (CWSI_a) taze fasulyede su stresinin belirlenmesinde kullanılmaları önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: Su stresi, Taze fasulye, Bitki su stresi indeksi, Spektral yansıma.

Abstract

Use of thermal imaging and spectral data to detect water stress in green bean

It is important to detect water stress before physiological activities of plants permanently change. Otherwise production might decrease dramatically. Many researches showed that thermal imaging or spectral data, collected from plant leaves or canopy, have potential to determine plant water stress. In this study, our objective was to determine water stress on green beans (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Gina) using both thermal imaging technique and spectral reflectance data. In order to determine water stress of green bean, experiment were formed with four irrigation levels (100% of the water consumed (I–100), 75% (I–75), 50% (I–50), and 25% (I–25). Thermal images and spectral data were collect using infrared thermal camera and spectro–radiometer respectively. It was found that the total amount of irrigation and seasonal evapotranspiration were found between 232–681 mm and 379–804 mm, respectively. According to the classification and regression tree analysis, it was found that water stress could be better explained by thermal indices especially in I-100 level. In this study, It was concluded that there are several indices calculated both from thermal images (crop water stress indices calculated empirically (CWSI_e) and based on reference surface (CWSI_a)) and spectral data (Structural Independent Pigment Index (SIPI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)), could be used to determine the green beans water stress levels.

Key Words: Water stress, Green bean, Crop water stress index, Spectral reflectance.

Giriş

Bitkilerde su stresi yaprak su potansiyeli, yaprak su içeriği, stoma iletkenliği, klorofil içeriği ve fotosentez oranı gibi bir çok özellik ile belirlenebilmektedir (Hsiao, 1973; Penuelas ve ark., 1993). Ancak, söz konusu parametrelerin genellikle bireysel yapraklar üzerinde ölçülmesi nedeniyle elde edilen veriler noktasal olmakta ve tüm alan hakkında bilgi vermemektedir. Bu ölçümlerin çok sayıda yaprak üzerinde yapılması oldukça fazla işgücü gerektirdiği gibi bitkilerde zararlara da yol açmaktadır (Meyer ve ark., 1985). Bu teknikler yerine uzaktan algılama yöntemleriyle su stresinin bitkiye zarar vermeden hızlı ve az işgücüyle belirlenmesi, günümüzde araştırmalara konu olmaktadır (Penuelas ve ark., 1997; Jones, 1999a).

Uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilen yaprak veya taç sıcaklığı, bitki su tüketimi ile doğrudan ilişkilidir. Bitkilerde, su stresine bağlı olarak transpirasyon azalmakta, stomalar kapanmakta ve böylece bitki sıcaklıkları da artış göstermektedir. Bu nedenle, taç sıcaklığının belirlenmesi su stresinin izlenmesinde etkin bir şekilde kullanılabilmektedir (Jackson, 1982; Jones ve ark., 2002). Ancak, bitki sıcaklıklarındaki artışlar sadece bitki su durumundan değil aynı zamanda o anki meteorolojik koşullardan da kaynaklanabilmektedir (Diaz-Espejo ve ark., 2007). Bu nedenle, yalnızca



yaprak sıcaklıklarının ölçümü su stresinin belirlenmesinde yeterli olmamaktadır (Jones ve ark., 1997). Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla bitki su stresi indeksi (CWSI) tanımlanmıştır (Idso ve ark., 1981). Bu indeks, farklı alt ve üst baz referansları kullanılarak modifiye edilmiştir. Hesaplama, üst baz hattı için kuru referans yüzeyler, alt baz hattı için de ıslak referans yüzeyler kullanılmıştır (Jones 1999a). Bitki sıcaklıklarının belirlenmesinde uzun yıllardır kullanılan kızılötesi termometrelere ek olarak son yıllarda hızla yaygınlaşan termal kameralar da kullanılmaya başlanmıştır. Kızılötesi termometreler ile elde edilen sıcaklık değerleri yaprak düzeyinde ve noktasal olmakta, alanın tamamı hakkında bilgi vermemekte, ancak kameralar yardımıyla alınan görüntülerde görüntü içerisine giren tüm öğelerin sıcaklıkları ayrı ayrı belirlenebilmektedir. Bu da sıcaklığın yersel dağılımı konusunda bize önemli bilgiler vermekte ve bu sayede istenilen objenin sıcaklığı görüntülerden ayrılabilir. Böylece bitki dışındaki diğer objeler çıkarılabilmekte ve daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Jones ve Schofield (2008) termal görüntülerin bitki su stresinin teşhisinde ve stoma iletkenliğinin belirlenmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Spektral yansıma ölçümleri, bitkilerdeki su stresine bağlı olarak bitki su içeriği ve pigment değişimini gösterebilmekte, bu da su stresine bağlı semptomların uzaktan algılanabilmesine olanak sağlamaktadır (Penuelas ve ark., 1997; Jones ve Schofield, 2008). Ancak, sadece yansıma ölçümleri su stresinin belirlenmesinde yetersiz kalabilmektedir. Bunun için bitkilerdeki pigment ve su içeriğine bağlı olarak değişen ve yansıma verilerinden hesaplanan spektral indeksler geliştirilmiştir. Söz konusu indeksler doğru bantlar kullanılarak iki banda ait yansıma değerlerinin farkı, birbirine oranlanması veya farklı matematiksel işlemlerle hesaplanabilmektedir. İndeks hesaplamalarında kullanılacak bantların aralıkları, bitkilerin solar enerjiyi emme, yansıma ve iletme özelliklerine bağlıdır. Özellikle seçilecek bantlardan birine ait yansıma değeri vejetasyonun sağlıklılık durumuna göre artması ile azalırken (kırmızı bant), diğer banttaki yansımanın vejetasyonun artması ile artmalıdır (kızıl ötesi bant) (Jackson ve ark., 1980).

Ülkemizde kızılötesi termometreler ile bitki sıcaklıklarını belirleyerek su stresinin saptanmasına yönelik çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen (Gençoğlan ve Yazar, 1999; Akkuzu ve ark., 2010; Köksal ve ark., 2010), termal görüntülerden ve spektral yansıma verilerinden yararlanarak su stresinin belirlenmesine ilişkin çalışmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Bu tekniklerin birlikte kullanımıyla su stresinin daha doğru belirlenebileceği araştırmacılar tarafından da bildirilmektedir (Jones ve Leinonen, 2003; Jones ve Schofield, 2008).

Bu çalışmada, arazi şartlarında kaydedilen termal görüntüler ve yansıma verileri kullanılarak hesaplanan indekslerin taze fasulye bitkisinde su stresinin belirlenmesinde kullanım olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla, sınıflama ve regresyon ağacı yöntemini kullanarak, termal ve spektral indekslerin su stresini ayırt etme kabiliyeti karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Çalışma Alanı ve Deneme Düzeni

Deneme, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Dardanos Araştırma ve Uygulama Birimi'nde arazi koşullarında yürütülmüştür. Bitki materyali olarak taze fasulye (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Gina) kullanılmıştır. Tohumlar 12 Mayıs 2012 tarihinde, sıra arası 60 cm ve sıra üzeri 10 cm olacak şekilde ekilmiştir.

Araştırma alanındaki toprak serilerinin çoğu killi tın ve kumlu killi tın bünyelidir. Toprak katmanlarına bağlı olarak hacim ağırlıkları 1,42–1,54 gr cm⁻³ arasında ve etkili bitki kök bölgesindeki tarla kapasitesi ve solma noktası değerleri de sırasıyla 215,0 mm ve 126,6 mm'dir. Denemede kullanılan sulama suyunun pH ve elektriksel iletkenlik değerleri sırasıyla 7,5 ve 1,1 dS m⁻¹'dir. Yetiştirme periyodu boyunca (Mayıs ve Ağustos ayları arasında) gerçekleşen ortalama sıcaklık ve toplam yağış değerleri sırasıyla 24°C ve 106 mm olmuştur.

Deneme, tesadüf blokları deneme desenine göre 4 konu, 3 tekerrürlü olarak kurulmuş ve deneme desenine uygun olarak damla sulama sistemi tesis edilmiştir. Sulama konuları, 0–60 cm toprak derinliğindeki kullanılabilir nemin %40'ı tüketildiğinde eksilen nemin tarla kapasitesine tamamlandığı kontrol konusu (I–100) ve I–100 konusunda tüketilen suyun %75'i (I–75), %50'si (I–50) ve %25'inin (I–25) uygulandığı üç su stresi düzeyi olmak üzere toplam dört konudan oluşmuştur.

Deneme parsellerinin boyutları 3 x 3 m. olarak düzenlenmiştir. Her bir parselde 5 bitki sırası oluşturulmuş ve parseller arasında konuların birbirine etkileşimini engellemek amacıyla 1,5 m boşluk

birakılmıştır. Her parselin kenar sıraları ile ortadaki sıraların başı ve sonunda yer alan bitkiler kenar etkisi için ayrılmıştır.

Sulamalar, etkili bitki kök bölgesindeki kullanılabilir su miktarının yaklaşık %40'ı tüketildiğinde yapılmıştır. Deneme alanında, 0–30 cm, 30–60 cm ve 60–90 cm toprak katmanlarındaki nem içerikleri, I–100 konusunda toprak nem sensörleri (10HS, Decagon) yardımıyla, diğer konularda ise gravimetrik yöntem ile takip edilmiştir. I–100 konusunda belirlenen eksik nem belirtilen oranlarla çarpılıp, örtü yüzdesi ile düzeltilerek deneme parsellerine uygulanmıştır.

Her deneme konusuna ilişkin bitki su tüketim miktarları, su bütçesi yöntemine göre Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır (James, 1988).

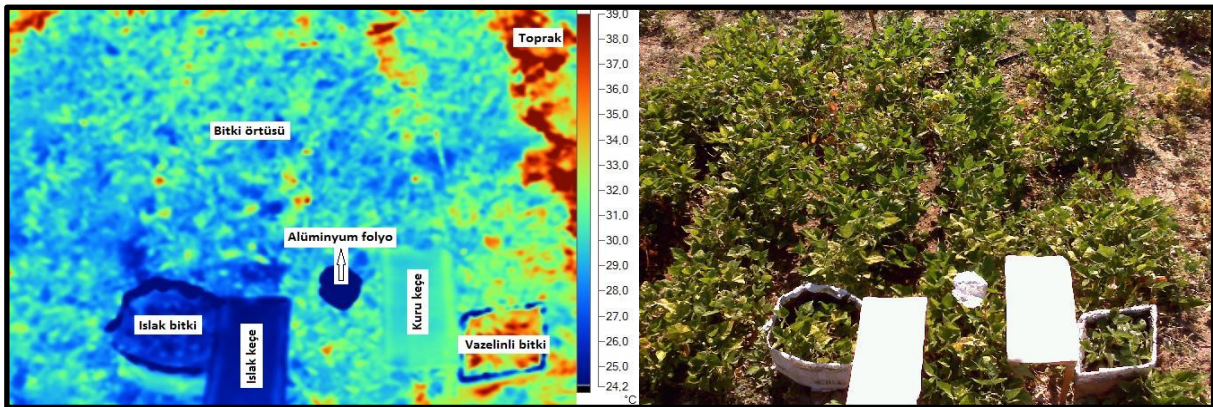
$$ET = I + P - D - R \pm \Delta S \quad (1)$$

Eşitlikte; ET: Bitki su tüketimi (mm), I: Sulama suyu (mm), P: Yağış (mm), D: Derine sızma (mm), R: Yüzeysel akış (mm), ΔS : İki örnekleme arasındaki nem değişimi (mm). Denemede damla sulama yöntemi kullanıldığı için yüzeysel akış sıfır kabul edilmiştir.

Yetiştirme periyodu boyunca damla sulama sisteminde yer alan gübreleme sistemiyle toplam üç kez gübreleme yapılmıştır. İlki, ekimden hemen önce dekara 10 kg Novatech Solub 16–30 (%16 NO₃ ve %30 P₂O₅) olarak verilmiştir. Diğer gübreler ise çiçeklenme ve hasat dönemleri arasında olmak üzere iki kez uygulanmıştır. Bu uygulamalarda dekara 5 kg Novatech Solub 21 (%21 NO₃) gübresi kullanılmıştır.

Kızılötesi Termal Görüntülerin Elde Edilmesi ve Termal İndeksler

Kızılötesi termal görüntüler, 8–14 μ m spektrum aralığında ölçüm yapan, 23°x17° standart lense (geniş açılı lensle 46°x34°), 240x180 piksel çözünürlüğünde dedektöre, 1.67 mrad geometrik çözünürlüğe ve $\leq 0,05$ °C termal hassasiyete sahip termal kamera (FLUKE Ti27 model, FLUKE, USA) ile elde edilmiştir. Termal ölçümler, her iki sulamada bir, sulama öncesinde ve gün içinde stresin en fazla görüldüğü saat 10.00 ile 14.00 arasında yapılmıştır. Ölçümlere ekimden sonraki 48. günde (ESG₄₈) başlanmış ve ESG₁₀₄'de bitirilmiş. Aletin emissivite değeri yetiştirilen bitki fasulye olduğu için 0,98 alınmıştır (Lopez ve ark., 2012). Ölçümler, geniş açılı lensle yaklaşık 2,3 m yükseklikten 2,5 m² (1,84x1,38 m.)'lik bir alan görecekte gerçekleştirilmiştir. Bu alan içerisinde kalan bitkilerden bir kısmı ıslak ve kuru referans, bir kısmı da taç sıcaklıklarını belirlemek için kullanılmıştır (Şekil 1.). Ölçümler, her sulama konusunun her bir tekerrüründe yapılmıştır. Arka plan sıcaklığının belirlenmesinde alüminyum folyodan yararlanılmıştır (Jones ve ark., 2002). Görüntü işleme ve analizlerin yapılmasında SmartView 3,1 programı kullanılmıştır. Termal görüntü içerisinde ortalama taç sıcaklığının belirlenmesi için üç farklı dörtgen alan (bitki tacının merkezinden en az 10.000 piksel) seçilmiştir. İlave olarak yine aynı görüntü içerisinde ıslak ve kuru referans sıcaklıklarının belirlenmesi için de iki farklı dörtgen alan seçilmiştir. Bu alanların tümü taç ve referans yüzeylerin ortalama sıcaklıklarını belirlemek için Ms Excel paket programına aktarılmıştır. Islak ve kuru referans yüzeylerin sıcaklıkları eşik değer olarak kullanılmış ve eşik değerlerin dışında kalanlar analizden çıkarılmıştır (Jones ve ark., 2002). Kalan sıcaklık değerlerinin ortalaması alınarak ortalama taç sıcaklıkları hesaplanmıştır.



Şekil 1. Termal kamera ile sıcaklık ölçümleri



Termal ölçümlerin tamamı rüzgâr hızının 2 m. s⁻¹'den daha az olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Hava sıcaklığı, yerden 1,5 m yükseklikte gölgeli bir alana yerleştirilmiş psikrometre ile ölçülmüştür.

Aralarında ters ilişki olan bitki su stresi indeksi (CWSI) ve stoma iletkenliği indeksi (I_G) sırasıyla Eşitlik 2 ve 3 yardımıyla hesaplanmıştır (Jones, 1999a).

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

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

Eşitliklerde; T_{taç}: ortalama taç sıcaklığı, T_{ıslak}: ıslak referans yüzeyin sıcaklığı, T_{kuru}: kuru referans yüzeyin sıcaklığı.

Eşitliklerdeki T_{ıslak} ve T_{kuru} değerleri üç farklı yöntemle belirlenmiştir.

1. Yöntem

Bu yöntemde, referans yüzeylerin sıcaklıklarını belirlemek için petrolyum jel (vazelin) ve su kullanılmıştır. Islak referans sıcaklığını belirlemek için ölçümden yaklaşık bir dakika önce üç bitkinin tüm yapraklarının her iki tarafı ıslatılmıştır. Bunun yanı sıra kuru referans sıcaklığını belirlemek için transpirasyonu tamamen engelleyecek şekilde yine üç bitkinin tüm yapraklarının her iki tarafı petrolyum jel ile kaplanmıştır (Jones ve ark., 2002). Söz konusu referans yüzeylerden hesaplanan termal indeksler, CWSI_p ve I_{Gp} olarak gösterilmiştir.

2. Yöntem

Bu yöntemde, referans yüzeylerin sıcaklıkları amperik eşitlikler kullanılarak belirlenmiştir. T_{ıslak}, Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanırken (Monteith ve Unsworth, 1990; O'Shaughnessy ve ark., 2011), T_{kuru}, ölçülen hava sıcaklığına 5 ilave edilerek tahminlenmiştir (Cohen ve ark., 2005; Möller ve ark., 2007).

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

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) ve γ: psikrometrik sabite (kPa °C⁻¹).

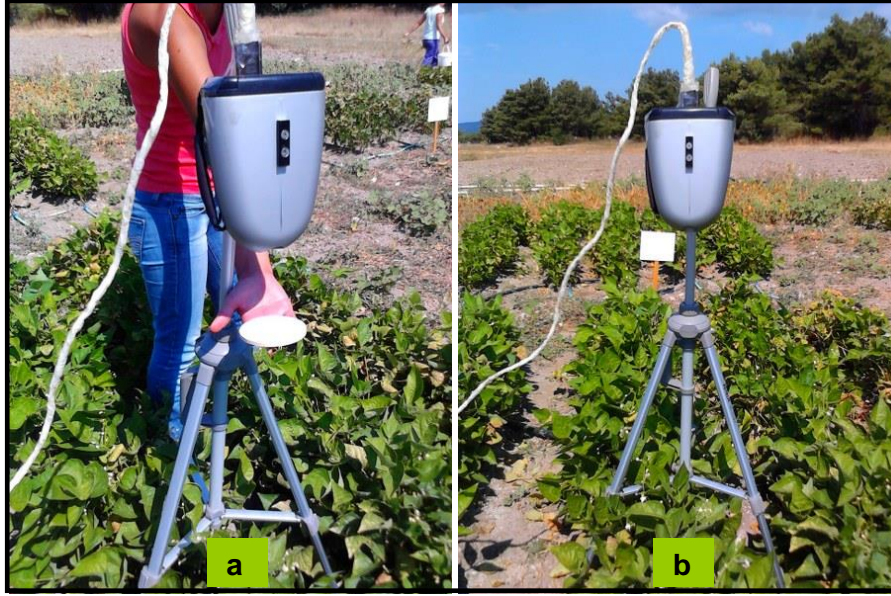
Söz konusu referans yüzeylerden hesaplanan termal indeksler, CWSI_e ve I_{Ge} olarak gösterilmiştir.

3. Yöntem

Bu yöntemde, referans yüzeylerin sıcaklıklarını belirlemek için yapay yüzeyler (gri renkli keçe) kullanılmıştır. Idso ve ark. (1978) tarafından önerilen iyi sulanan ve hiç sulanmayan bitkiler için alt ve üst baz hatlarını taklit eden ıslatılmış (T_{ıslak}) ve kuru bırakılmış (T_{kuru}) keçelerden yararlanılmıştır (O'Shaughnessy ve ark., 2011). Söz konusu referans yüzeylerden hesaplanan termal indeksler, CWSI_a ve I_{Ga} olarak gösterilmiştir.

Hiperspektral Yansıma Ölçümleri ve Spektral İndeksler

Bitkilerden olan spektral yansımalar, 325–1075 nm spektrum aralığına sahip spektrometre (FieldSpec Pro, Analytical Spectral Devices, Boulder, CO, USA) yardımıyla ölçülmüştür. Spektral ölçümler, her iki sulamada bir termal ölçümlerle eş zamanlı olarak 10.00–14.00 saatleri arasında, havanın bulutsuz ve güneşli olduğu zamanlarda yapılmıştır. Her ölçüm öncesinde spektralon ile referans alınmıştır (Şekil 2a.). Ölçümler, her konunun her bir tekerrüründe seçilen 3 bitkide, bitki örtüsü düzeyinde, 25°'lik lens kullanılarak, nadir pozisyonunda, ardı ardına 5 ölçümün ortalaması alınarak yapılmıştır (Şekil 2b.). Tüm ölçümler, bitkiden yaklaşık 70 cm yükseklikten 15,5 cm çapında bir alanı görecektir şekilde yapılmıştır.



Şekil 2. Spektroyometre ile yapılan yansımaya ölçümleri

Elde edilen yansımaya verilerinden yararlanılarak Çizelge 1.'de verilen spektral indeksler hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Araştırmada ele alınan spektral indeksler

| Spektral İndeks | Eşitlik | Kaynak |
|---|---|------------------------|
| Su İndeksi (WBI) | $WBI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$ | Penuelas ve ark., 1997 |
| Değişken Konumlu Su Band İndeksi (fWBI) | $fWBI = \frac{R_{900}}{\min(R_{930-980})}$ | Strachan ve ark., 2002 |
| Basit Oran (SR) | $SR = \frac{R_{900}}{R_{680}}$ | Jackson ve ark., 1980 |
| Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksi (NDVI) | $NDVI = \frac{R_{800} - R_{680}}{R_{800} + R_{680}}$ | Penuelas ve ark., 1997 |
| Toprak Yansımalarını Dikkate Alan Vejetasyon İndeksi (SAVI) | $SAVI = \frac{1.5(R_{800} - R_{680})}{(R_{800} + R_{680})}$ | Heute, 1988 |
| Yapısal Bağımsız Pigment İndeksi (SIPI) | $SIPI = \frac{(R_{800} - R_{445})}{(R_{800} - R_{680})}$ | Penuelas ve ark., 1995 |
| Fotokimyasal Yansımaya İndeksi (PRI) | $PRI = \frac{(R_{570} - R_{531})}{(R_{570} + R_{531})}$ | Gamon ve ark., 1992 |

İstatistiksel Analizler

Verilerin istatistiksel analizlerinde SPSS 13.0 (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA) paket programı kullanılmıştır. Veri grupları arasındaki farkın önemli olup olmadığı varyans analizi (PROC ANOVA) ile belirlenmiştir. Farkın önemli olması durumunda farklı çıkan gruplar Duncan testi ile saptanmıştır. İstatistiksel anlamlılık için P değeri %5 alınmıştır.

Çalışmada, sulama konularının termal ve spektral indekslere göre sınıflandırılması ve bu indekslerin sulama konularının ayırımında kullanım potansiyellerinin değerlendirilmesi amacıyla Sınıflama ve Regresyon Ağacı analizi kullanılmıştır (Breiman ve ark., 1984). Sınıflama ağaçları, R 2.15.1 programında rpart paketi kullanılarak oluşturulmuştur (R development Core Team, 2012). Çalışmada ele alınan sulama konuları modellerde bağımlı değişken olarak kullanılmış ve termal ile spektral indeksler için ayrı ayrı iki model oluşturulmuştur. Modellerin sınıflamadaki başarıları doğru sınıflama oranları ile kıyaslanmıştır.



Bulgular ve Tartışma

Toplam Sulama Suyu Miktarları ve Bitki Su Tüketimleri

Taze fasulye bitkisine yetiştirme periyodu boyunca uygulanan toplam sulama suyu miktarları (I) ile buna karşılık elde edilen aylık ve mevsimlik bitki su tüketimi (ET) değerleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2. Konulara göre elde edilen bitki su tüketimleri ve uygulanan toplam sulama suyu miktarları

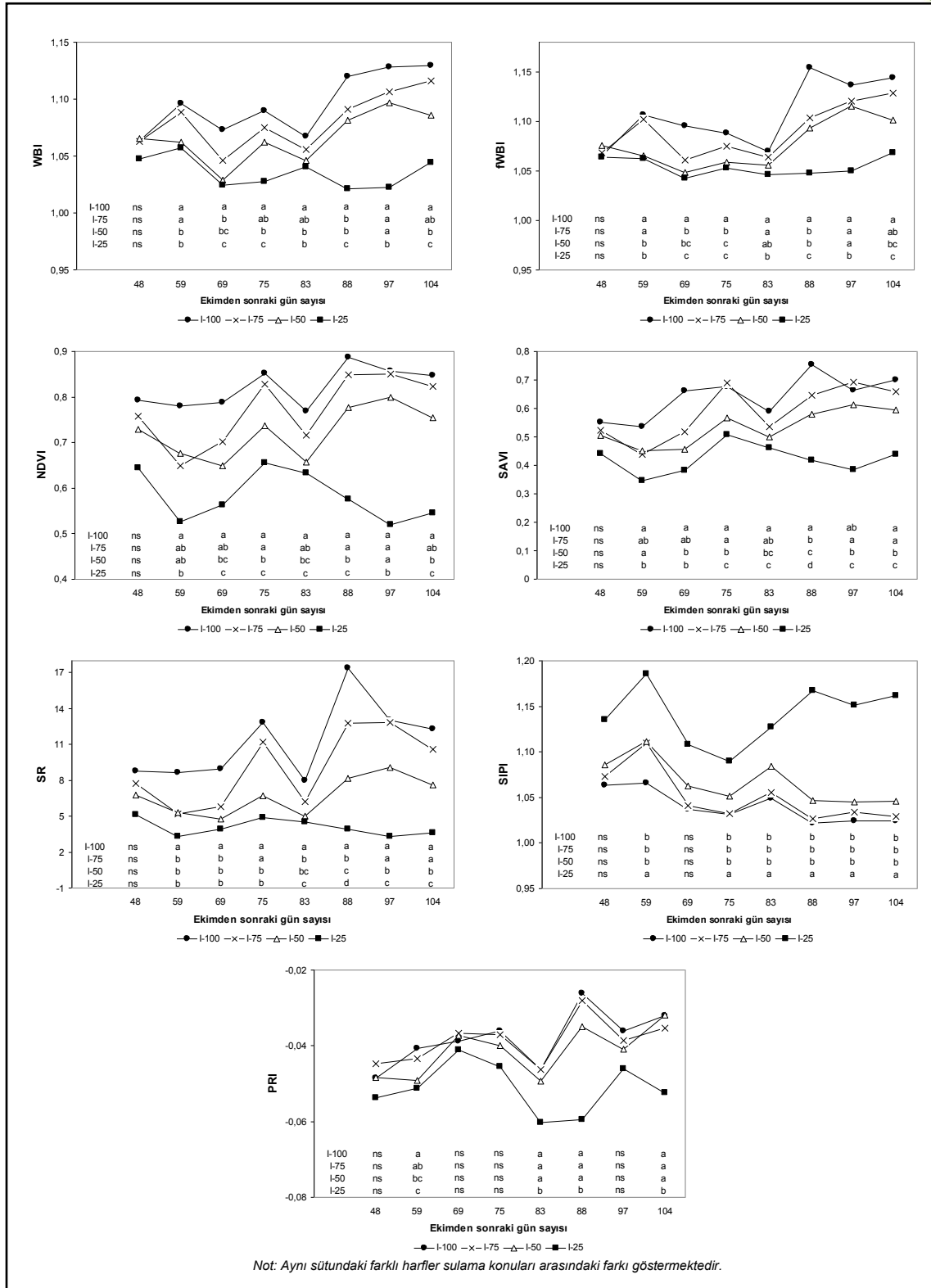
| Sulama Konuları | Aylık ET (mm) değerleri | | | | | Mevsimlik ET (mm) | I (mm) |
|-----------------|-------------------------|---------|--------|---------|-------|-------------------|--------|
| | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | | |
| I-100 | 83 | 152 | 254 | 274 | 41 | 804 | 681 |
| I-75 | 83 | 143 | 203 | 199 | 27 | 656 | 531 |
| I-50 | 83 | 135 | 144 | 138 | 19 | 519 | 381 |
| I-25 | 83 | 124 | 99 | 62 | 11 | 379 | 232 |

Not: I ve ET değerleri, 12 Mayıs–8 Eylül 2012 arası için hesaplanmıştır.

İlk sulama, ekimden önce 30 cm toprak katmanındaki nem düzeyini tarla kapasitesine çıkaracak şekilde bütün konulara eşit olarak uygulanmıştır. Yeterli bitki çıkışları gerçekleşinceye ve belirli bir seviyede gelişme sağlanıncaya kadar tüm bitkiler eşit olarak sulanmıştır. Mayıs ayı boyunca tüm konuların ET değerleri sulama koşullarının eşit olmasından dolayı aynı olmuştur. Konulara göre ilk sulamaya etkili kök derinliğindeki (60 cm) kullanılabilir nemin %40'ının tüketildiği Haziran ayı sonunda (ESG₄₃) başlanmıştır. Bu yüzden konuların Haziran ayı ET değerleri birbirine yakın bulunmuştur. Diğer aylarda fark giderek artmış ve buna bağlı olarak bitkilerdeki stres düzeylerinde de artış gözlenmiştir. Su stresinin uygulanmadığı tam sulama konusunda elde edilen mevsimlik ET değerleri 804 mm bulunurken, en yüksek su stresinin uygulandığı I-25 konusunda 379 mm olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, en yüksek mevsimlik ET değerlerini, Üstün ve ark. (1997) 868 mm ve Koksal ve ark. (2007) 904 mm olarak elde etmişler ve su kısıtına bağlı olarak bu değerlerin azaldığını bildirmişlerdir. Çalışmalar arasındaki bu farklılıkların sulama yöntemine ve programına, iklim özelliklerine, uygulanan kültürel işlemlere ve fasulyenin çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterdiği düşünülmektedir.

Spektral İndeksler

Çalışmada incelenen spektral indekslerin tamamı su stresine tepki göstermişlerdir (Şekil 3.). Özellikle WBI, fWBI, NDVI, SAVI ve SR indeksleri ekimden sonraki ilk ölçüm günü dışında diğer tüm ölçümlerde konulara göre istatistiksel olarak farklılık göstermiştir. SIPI indeksi dışındaki diğer tüm indeksler su stresi arttıkça azalma eğilimi gösterirken, SIPI indeksi su stresine paralel olarak değişmiştir. Mısır bitkisinde yapılan çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir (Çamoğlu ve ark., 2010). Yetiştirme periyodu boyunca WBI indeksi 1,02 ile 1,13, fWBI indeksi 1,04 ile 1,15, NDVI indeksi 0,52 ile 0,89, SAVI indeksi 0,35 ile 0,75, SR indeksi 3,29 ile 17,42, SIPI indeksi 1,02 ile 1,18 ve PRI indeksi -0,06 ile -0,03 arasında değişmiştir. SIPI dışındaki tüm indekslerde en yüksek değer I-100 konusundan elde edilirken, en düşük değer I-25 konusundan elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde, genel itibarıyla en çok sulanan I-100 konusuna ilişkin eğrinin en üstte (SIPI dışında), en az sulanan I-25 konusuna ait eğrinin de en altta yer aldığı görülmektedir. Spektral indekslerin su stresini ayırt etmede kullanılabileceği önceki çalışmalarda da belirtilmiştir (Shiyabayama ve ark., 1993; Penuelas ve ark., 1994; Fujiwara ve ark., 2004; Köksal ve ark., 2008; Genc ve ark., 2011).



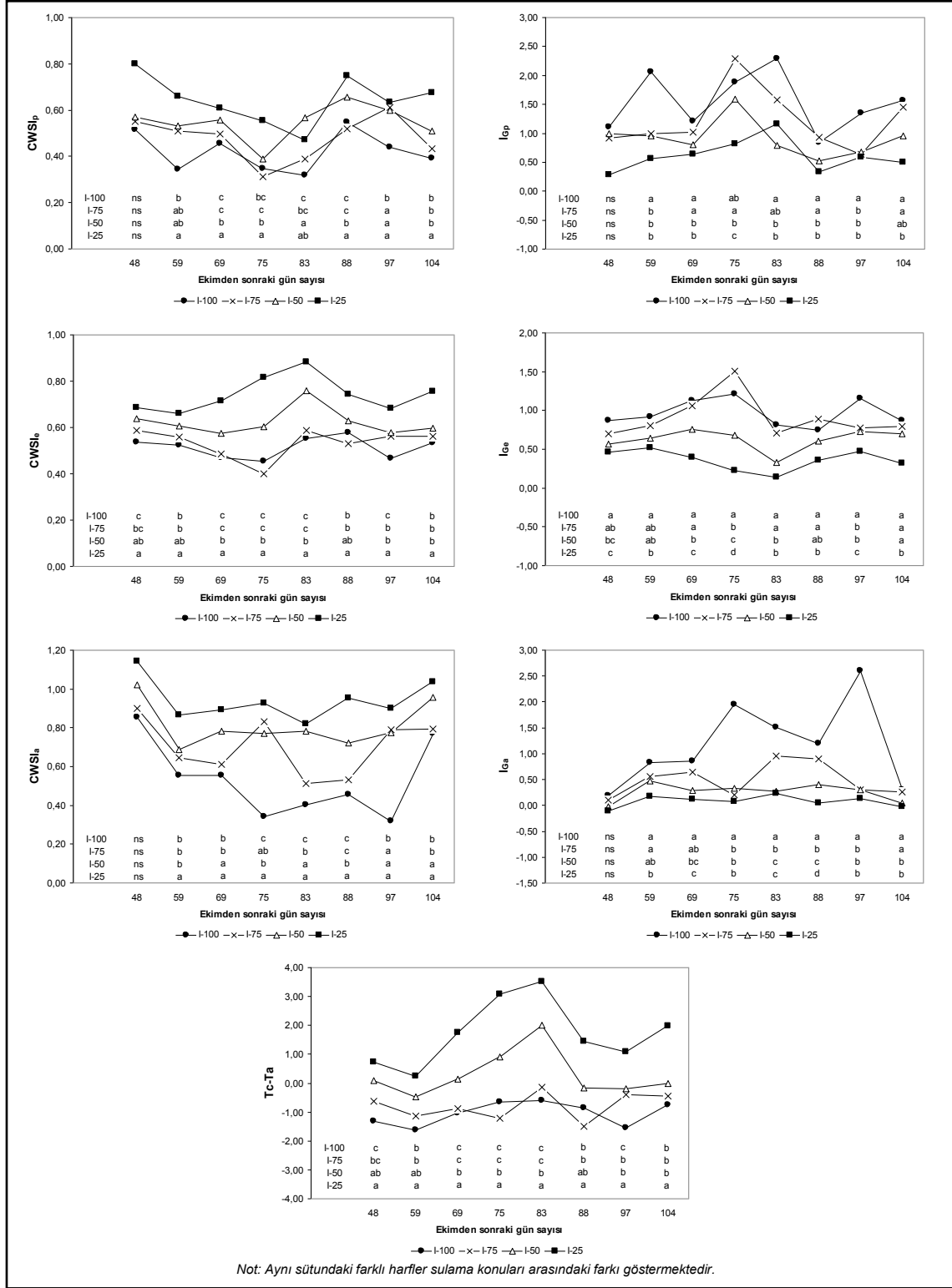
Şekil 3. Konulara ilişkin spektral indekslerin yetiştirme periyodu boyunca değişimi.

Termal İndeksler

Çalışmada ele alınan termal indekslerin tamamı ilk ölçüm dışındaki diğer tüm ölçümlerde sulama konularına bağlı olarak istatistiksel olarak önemli oranda değişmiştir (Şekil 4). CWSI indeksleri su stresinin artışıyla paralel olarak artarken, I_G indeksleri ve T_c-T_a değerleri azalmıştır. Yetiştirme periyodu boyunca hesaplanan $CWSI_p$ indeksi 0,31 ile 0,80, $CWSI_c$ indeksi 0,40 ile 0,88, $CWSI_a$ indeksi 0,32 ile 1,14, I_{Gp} indeksi 0,29 ile 2,29, I_{Ge} indeksi 0,14 ile 1,51, I_{Ga} indeksi -0,11 ile



2,60 ve Tc-Ta değerleri -1,63 ile 3,51 arasında değişmiştir. Cohen ve ark. (2005) pamukta, termal görüntülerden hesapladıkları CWSI değerlerinin 0,10 ile 0,58 arasında değiştiğini ve stres artışına bağlı olarak indeks değerinin de arttığını belirtmişlerdir. Genel olarak, birbirine yakın konular arasında fark bulunmazken stres düzeyinin artmasıyla aralarında istatistiksel olarak fark oluşmuştur.



Şekil 4. Konulara ilişkin termal indekslerin yetiştirme periyodu boyunca değişimi.

O'Shaughnessy ve ark. (2011) da soya fasulyesi ve pamukta yaptıkları çalışmada, genel itibariyle stressiz ve az stresli ve I-67 konularına ilişkin CWSI_c değerleri arasında farklılık olmadığını



bildirmişlerdir. CWSI indekslerinde genel itibariyle en düşük değerler I–100 ve I–75 konularında, en yüksek değerler ise I–25 konusunda elde edilmiştir. I_G indeksinde ise tersi bir durum meydana gelmiştir. Diğer bir ifadeyle, I_G indeksleri sulama suyu miktarındaki artışa paralel olarak artmış, ancak bu artış I–75’den sonra belirgin olmamıştır.

CWSI indeksi 0 ile 1 arasında değişiklik göstermektedir ve 0’a yakın olması stres olmadığını, 1’e yakın olması ise stres olduğunu bir göstergesidir (Idso ve ark., 1981; Jones, 1999a). I_G indeksinde ise en düşük değer 0’dır ve bu değere yakın olması bitkinin stresli olduğunu göstermektedir. Stres derecesi azaldıkça bu indeks değeri de artmaktadır (Jones, 1999a; Jones, 1999b). Buna göre, ESG₄₈’de CWSI_a değerinin üst sınır olan 1’i aştığı, yine aynı ölçümdeki I_{Ga} indeksinin de negatif değer aldığı görülmektedir. Bu durum, kullanılan yapay referansa ilişkin kuru sıcaklık değerinin, ölçülen bitki sıcaklığından daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da bitkiler ile referans yüzey arasındaki termal ve ışınım (radiative) özelliklerindeki farklılıklar ile açıklanabilir (Leinonen ve Jones, 2004). Ancak, diğer ölçümlerde bu durum meydana gelmemiştir. Yapılan diğer çalışmalarda da termal görüntüler ile belirlenen indekslerin su stresinin belirlenebileceği ortaya konmuştur. Grant ve ark. (2007) ve Stoll ve Jones (2007) yaptıkları çalışmalarda, bitkilerdeki su stresini ayırt etmede termal görüntülerin kullanışlı birer araç olduğunu belirtmişlerdir. Jimenez-Bello ve ark. (2011), Trabzon hurması ve narenciyede, biri kontrol ve ikisi kısıtlı sulamadan oluşan denemede, taç sıcaklıklarının konulara göre farklılık gösterdiğini ve en düşük sıcaklığın kontrol konusundan elde edildiğini bildirmişlerdir. Fuentes ve ark. (2012), su stresi parametreleri ile termal indeksler arasında önemli ilişkiler olduğunu belirtmişlerdir. Baluja ve ark. (2012) bağda, amprik olarak hesaplanan termal indeks ile fizyolojik parametreler arasında önemli ilişkiler belirlemişlerdir. Padhi ve ark. (2012) pamukta, 2. yöntemle göre hesapladıkları I_G indeksinin su stresinin artışına bağlı olarak azaldığını ve bu azalmanın istatistiksel olarak önemli olduğunu bildirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar yapılan bu çalışma ile uyum içindedir.

Sınıflama ve Regresyon Ağacı Analizi

Spektral indeksler kullanılarak oluşturulan sınıflama ve regresyon ağacında, sulama konularına ait örnekler toplam 5 düğüm altında sınıflandırılmıştır (Şekil 5a.). Analiz sonucunda, sulama konularından I–100 konusu %54, I–75 konusu %75, I–50 konusu %83 ve I–25 konuları %79 doğrulukla sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmada, su stresini ayırt etmede SIPI başta olmak üzere NDVI, WBI, PRI ve fWBI indeksleri belirleyici olmuştur. Penuelas ve ark. (1997) farklı bitki türlerinde su stresinin belirlenmesinde WBI indeksinin kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Camoglu ve ark. (2013) da zeytinde su stresinin göstergesi olarak PRI, SAVI, NDVI ve NPCI indekslerinin kullanılabilirliğini bildirmişlerdir. Genç ve ark. (2013) mısırın su stresinin belirlenmesinde sınıflandırma ağacı analizini kullanmışlar ve en etkili indeksin NDVI benzeri olan yeşil band normalize edilmiş fark vejetasyon indeksi (GNDVI) olduğunu belirtmişlerdir.

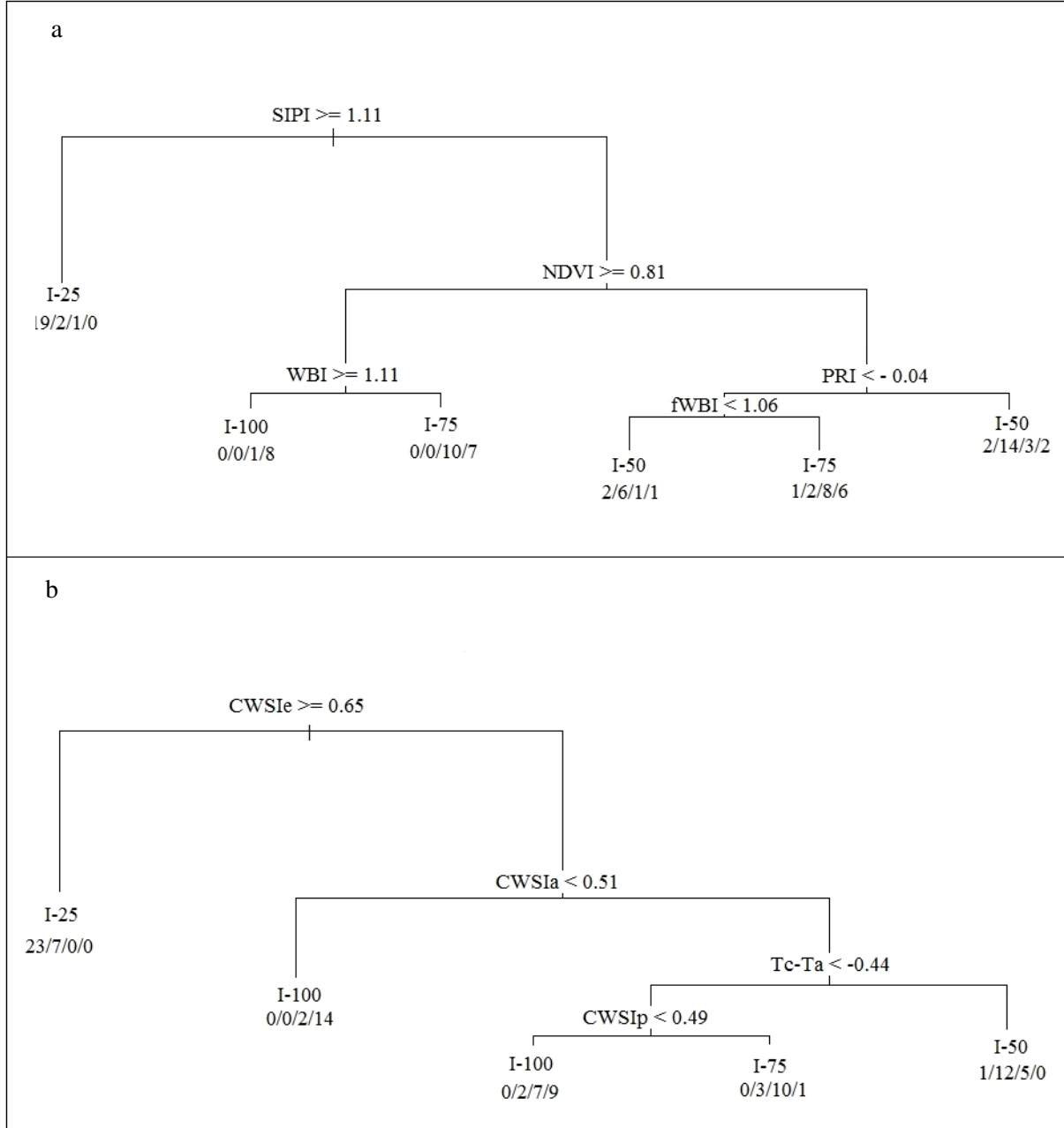
SIPI değeri ≥ 1.11 olduğu koşulda, 22 gözlemin 19’unun I–25 konusunda olduğu, diğer bir ifadeyle bitkilerin büyük çoğunluğunun ciddi stres seviyesinde olduğu söylenebilir. Stresin hiç olmadığı I–100 konusu, üç indekse bağlı olarak saptanabilmektedir. Bu koşulda, SIPI değerinin 1,11’e eşit veya küçük, NDVI değerinin 0,81’e eşit veya büyük ve WBI değerinin 1,11’e eşit veya büyük olması gerekmektedir. Bu durumda, 9 gözlemin 8’inin I–100 konusuna ait olduğu görülmektedir. Spektral indekslere ilişkin sınıflandırma ağaçlarında, sulama konularının net bir şekilde alt düğümlerde dağılmadığı görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, konulara ilişkin değerlerin birbiri içine girdiği anlaşılmıştır.

Termal indeksler kullanılarak oluşturulan sınıflama ve regresyon ağacında, sulama konularına ait örnekler toplam 4 düğüm altında sınıflandırılmıştır (Şekil 5b.). Analiz sonucunda, sulama konularından I–100 ve I–25 konuları %96, I–75 konusu %42 ve I–50 konusu %50 doğrulukla sınıflandırılmıştır. Buna göre I–100 ve I–25 konularının diğer konulardan belirgin bir şekilde ayrıldığı söylenebilir. Sınıflandırmada, termal indekslerden CWSI_e başta olmak üzere, CWSI_a, Tc–Ta ve CWSI_p sınıflamada etkili olan değişkenler olmuştur. O’Shaughnessy ve ark. (2011) da, CWSI_e indeksinin su stresini ayırt etmede kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Jones ve ark. (2002) ve Ben-Gal ve ark. (2009), termal görüntülerden yararlanılarak hesaplanan CWSI tabanlı indekslerin su stresinin belirlenmesinde etkin bir şekilde kullanılabilirliğini bildirmişlerdir. Grant ve ark. (2007), yaprak sıcaklıklarının ve CWSI indeksinin sulama düzeylerine göre istatistiksel olarak farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Çamoğlu (2013) Tc–Ta değerlerinin sulama konularını ayırt etmede kullanılabilirliğini



bildirmiştir. Diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile bu çalışmadan elde edilen bulgular paralellik göstermiştir.

Termal indekslerle ilgili modelde, $CWSI_e$ değeri 0,65'den yüksek olan 30 adet örneğin 23 tanesinin I-25 konusuna ait olduğu görülmüştür (Şekil 5b.). Bu durumda, I-25 konusunu diğer sulama konularından ayırt etmede söz konusu indeks kullanılabileceği söylenebilir. I-100 konusuna ait örneklerin sınıflandırılması, $CWSI_e$ değeri $\geq 0,65$ ve $CWSI_a$ değeri $< 0,51$ koşullarına göre gerçekleştiği görülmüştür. Buna göre, söz konusu koşullar sağlandığında, düğümde sınıflandırılan 16 örnekten 14'ünün I-100 konusuna ait olması belirtilen indekslerdeki sınır değerlerin stressiz bitkileri belirlemede kullanılabileceğine işaret etmektedir. Ayrıca, $T_c - T_a$ değeri -0,44'den ve $CWSI_p$ indeksi 0,49'dan küçük olduğunda, I-100 konusunu ayırt etme bakımından yapılan sınıflandırmanın doğruluğunun arttığı görülmektedir.



Şekil 5. Spektral (a) ve termal (b) indekslere ilişkin regresyon ağaçları.



Sonuç ve Öneriler

Çalışmada, taze fasulye bitkisine uygulanan toplam sulama miktarları ve buna karşılık elde edilen mevsimlik bitki su tüketimi değerleri sırasıyla 232–681 mm ve 379–804 mm arasında değişmiştir. Tam sulanan kontrol konusuna ilişkin en yüksek aylık bitki su tüketimi Ağustos ayında gerçekleşmiştir.

Araştırmada, incelenen spektral ve termal indekslerin tümü su stresine tepki göstermişlerdir. Sulama konularına bağlı olarak indekslerin çoğu özellikle ilk ölçümden sonraki tüm ölçümlerde istatistiksel olarak farklı bulunmuştur. Sınıflama ve regresyon ağacı analizi sonuçlarına göre, termal indekslerle oluşturulan modelin spektral indekslerle oluşturulan modelden su stresini ayırt etmede daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Termal indekslerde I–25 ve I–100 konularına ait örneklerin diğer sulama konularından başarılı şekilde ayrıldığı görülmüştür. Termal indekslerin bitkilerin stres koşullarını belirlemede başarılı bir şekilde kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır. Söz konusu indekslerden amprik esasa dayalı hesaplanan CWSI (CWSI_e) ile yapay referans yüzeylere göre hesaplanan CWSI (CWSI_a) indekslerinin hem stresi ayırt etmedeki başarısı hem de uygulandığındaki kolaylığı nedeniyle, taze fasulyede su stresinin belirlenmesinde bu iki indeksin kullanımı önerilebilir. Sınıflama ve regresyon ağacına göre, spektral indekslerin oluşturulan modelde stres altındaki bitkilerin ayırımında faydalı olabileceği görülmüş ve bu indekslerden de özellikle SIPI ve NDVI indekslerinin ön plana çıktığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, her iki uzaktan algılama tekniğinin de su stresinin belirlenmesinde kullanılabilmesi görülmüştür. Ayrıca, termal indekslerin kısa süreli, spektral indekslerin ise daha çok uzun süreli stresin etkisi göstermesi nedeniyle, su stresinin teşhisinde her iki tekniğin birlikte kullanılması önerilebilir.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (TOVAG-1110874 No'lu Araştırma Projesi). Denemenin kurulması aşamasında emeği geçen Dr. Kürşad DEMİREL'e, istatistiksel analizlerde yardımlarını esirgemeyen Dr. Fatih KAHRIMAN'a ve termal görüntüler konusundaki desteklerinden dolayı Prof. Dr. Hamlyn G. Jones'a teşekkürü bir borç biliriz.

Kaynaklar

- Akkuzu, E., Camoğlu, G., Kaya, U., 2010. Diurnal Variation of canopy temperature differences and leaf water potential of field-grown olive trees (*Olea europaea* L. Cv. Memecik). *Philippine Agricultural Scientist*, 93 (4): 399–405.
- Baluja, J., Diago, M.P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., Tardaguila, J., 2012. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science*, DOI 10.1007/s00271–012–0382–9.
- Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, U., Zipori, I., Presnov, E., Sprintsin, M., Dag, A., 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27: 367–376.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J., 1984. *Classification and regression trees*. Monterey, Calif., U.S.A. Wadsworth, Inc.
- 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.
- Çamoğlu, G., Aşık, Ş., Genç, L., 2010. Mısır bitkisinin su stresine karşı spektral tepkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3 (1): 37–43.
- Çamoğlu, G., 2013. The Effects of water stress on evapotranspiration and leaf temperatures. *Žemdirbystē=Agriculture*, 100 (1): 91–98.
- Çamoğlu, G., Kaya U., Akkuzu, E., Genc, L., Gurbuz, M., Pamuk Mengü, G., Kızıl, U., 2013. Prediction of leaf water status using spectral indices at young olive trees. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22 (8) (in press).
- Diaz-Espejo, A., Nicolas, E., Fernandez, J.E., 2007. Seasonal evolution of diffusional limitations and photosynthetic capacity in olive under drought. *Plant Cell Environment*, 30 (8): 922–933.
- Fuentes, S., De Bei R., Pech, J., Tyerman, S., 2012. Computational water stress indices obtained from thermal image analysis of grapevine canopies. *Irrigation Science*, DOI 10.1007/s00271–012–0375–8.
- Fujiwara, H., Endo, T., Yasuoka, Y., 2004. Evaluation of water stress on a crop using the portable hyper spectral imager. *The 25th Asian Conference & 1th Asain Space Conference on Remote Sensing*. 22–26 November, Thailand.
- Gamon, J.A., Penuelas J., Field, C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41: 35–44.



- Genc, L., Demirel, K., Camoglu, G., Asik, S., Smith, S., 2011. Determination of plant water stress using spectral reflectance measurements in watermelon. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 11 (2): 296–304.
- Genc, L., Inalpulat, M., Kızıl, U., Mirik, M., Smith, S.E., Mendes, M., 2013. Determination of water stress with spectral reflectance on sweet corn (*Zea mays* L.) using classification tree (CT) analysis. *Zemdirbyste-Agriculture*, 100 (1): 81–90.
- Gençoğlan, C., Yazar, A., 1999. Çukurova koşullarında yetiştirilen I. ürün mısır bitkisinde infrared termometre değerlerinde yararlanılarak bitki su stresi indeksi (CWSI) ve sulama zamanının belirlenmesi. *Tr. J. of Agriculture and Forestry*, 23: 87–95.
- Grant, O.M., Tronina, L., Jones, H.G., Chaves, M.M., 2007. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*, 58 (4): 815–825.
- Heute, A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing Environment*, 25: 295–309.
- Hsiao, T.C., 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24: 519–570.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J., 1978. Remote sensing for agricultural water management and crop yield prediction. *Agriculture Water Management*, 1: 299–310.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45–55.
- Jackson, R.D., Pinter, Jr., P.J., Reginato, R.J., Idso, S.B., 1980. Hand-held radiometry. A Set of Notes Developed for Use at the Workshop on Hand-Held Radiometry, February 25–26, Phoenix, Arizona.
- Jackson, R.D., 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation Research*, 1: 43–85.
- James, L.G., 1988. *Principles of Farm Irrigation Systems Design*. John Wiley and Sons, New York.
- Jimenez-Bello, M.A., Ballester, C., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S., 2011. Development and validation of an automatic thermal imaging process for assessing plant water status. *Agricultural Water Management*, 98: 1497–504.
- Jones, H.G., Aikman, D.A., McBurney, T., 1997. Improvements to infrared thermometry for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 449: 259–266.
- Jones, H.G., 1999a. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agric. Forest Meteorol.*, 95: 139–149.
- Jones, H.G., 1999b. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell Environ.*, 22: 1043–1055.
- Jones, H.G., Stoll, M., Santos T., de Saousa, 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.
- Jones, H.G., Leinonen, I., 2003. Thermal imaging for the study of plant water relations. *J. Agric. Meteorol.*, 59: 205–217.
- Jones, C.L., Schofield, P., 2008. Thermal and other remote sensing of plant stress. *Gen. Appl. Plant*, 34 (1–2): 19–32.
- Köksal, E.S., İlbeyi, A., Üstün, H., Özcan, H., 2007. Yeşil fasulye sulama suyu yönetiminde örtü sıcaklığı ve spektral yansımaya oranı değerlerinin kullanım olanakları. *Toprak, Gübre ve Su Kaynakları Araştırma Enstitüsü Yayınları*, 91s.
- Köksal, E.S., Kara, T., Apan, M., Üstün, H., İlbeyi, A., 2008. Estimation of green bean yield, water deficiency and productivity using spectral indexes during the growing season. *Irrig. Drainage Syst.*, 22: 209–223.
- Köksal, E.S., Üstün, H., İlbeyi, A., 2010. Bodur yeşil fasulyenin sulama zamanı göstergesi olarak yaprak su potansiyeli ve bitki su stres indeksi sınır değerleri. *U.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 24 (1): 25–36.
- Leinonen, I., Jones, H., 2004. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55 (401): 1423–1431.
- Lopez, A., Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Pena, A., 2012. Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography. *Scientia Horticulturae*, 137: 49–58.
- Meyer, W.S., Reicosky, D.C., Schaefer, N.L., 1985. Errors in field measurement of leaf diffusive conductance associated with leaf temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36 (1): 55–64.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.L., 1990. *Principles of Environmental Physics*. 2nd ed. Edward Arnold, London, United Kingdom, p. 414.
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., Cohen, S., 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 58: 827–838.
- 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.



- Padhi, J., Misra, R.K., Payero, J.O., 2012. Estimation of soil water deficit in an irrigated cotton field with infrared thermography. *Field Crops Research*, 126: 45–55.
- Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., Save, R., 1993. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *Int. J. of Remote Sensing*, 14: 1887–1905.
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., Field, C.B., 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48: 135–146.
- Penuelas, J., Baret, F., Filella, I., 1995. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31: 221–230.
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., Filella, I., 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *Int. J. of Remote Sensing*, 18: 2869–2875.
- R Development Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3–900051–07–0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Shibayama, M., Takahashi, W., Morinaga, S., Akiyama, T., 1993. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer. *Remote Sensing of Environment*, 45 (2): 117–126.
- Stoll, M., Jones, H., 2007. Thermal imaging as a viable tool for monitoring plant stress. *International Journal of Vine and Wine Sciences*, 41 (2): 77–84.
- 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.
- Üstün, H., Aran, A., Yıldırım, O., 1997. Ankara koşullarında damla sulama yöntemi ile sulanan taze fasulyenin sulama suyu ihtiyacı. *Köy Hizmetleri Ankara Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları*, 207, Rapor Seri No: R–113, 56 p, Ankara.