

SULAMA SUYU YÖNETİMİNDE UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANIMI

Eyüp Selim KÖKSAL

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Samsun

Sorumlu yazar: eselim@omu.edu.tr

Geliş Tarihi: 21.09.2006

Kabul Tarihi: 11.02.2007

ÖZET: Sulama suyu yönetimi bitki, toprak ve iklim faktörlerini kapsayan oldukça karmaşık bir temele dayanır. Herhangi bir bitkinin ne zaman ve ne kadar sulama suyuna gereksinim duyduğunun ve / veya bir yetiştirme döneminde ne kadar bitki su tüketimi (ETc) gerçekleştiğinin belirlenmesi veya tahmin edilmesi amacı ile bir çok yöntem geliştirilmiştir. Son zamanlarda bitki izlemeye dayalı yöntemlerden, uzaktan algılama teknikleri öne çıkmaktadır ve bu konudaki araştırmalar 1960' lı yıllara dayanmaktadır. Ülkemizde uzaktan algılama tekniklerinin sulama suyu yönetiminde kullanım olanaklarını ortaya koymayı hedefleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Hazırlanan bu makale ile amaçlanan, son kırk yılda konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan önde gelenlerini sonuçları ile birlikte derlemektir.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan algılama, Sulama, Spektral indisler, Su stres indeksleri

USING REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR IRRIGATION MANAGEMENT PURPOSE

ABSTRACT: Irrigation water management is depends on a complex basis which consider crop, soil and climatic factors. A lot of methods were developed for calculation or estimation of irrigation scheduling and /or crop evapotranspiration (ETc) in a growing season of a given crop. Recently, remote sensing is very popular which is one type of crop monitoring based methods and researches related to this techniques depends on the studies of 1960's. In our country limited researches were carried out on use possibilities of remote sensing for irrigation water management purposes. The aim of this paper is, to compile the most known studies with their results.

Key Words: Remote sensing, Irrigation, Spectral indices, Water stres indices

1. GİRİŞ

Tarımda suyun bilinçli bir şekilde kullanılması, başta toprak ve su olmak üzere doğal kaynakların sürdürülebilirliğinde etkili olduğu gibi, gelecek nesillerin tarıma dayalı gereksinimlerinin karşılanması ve gıda güvenliğinin sağlanmasında da önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle tarla, sulama şebekesi ve havza düzeyinde en iyi sulama suyu, gübre ve ilaç uygulamaları için etkili karar destek araçları kullanılmalıdır. Günümüzde uzaktan algılama doğal kaynakların yönetiminde öne çıkan karar destek araçlarından birisidir.

Uzaktan algılama, genel olarak 1960'lı yıllarda gelişmeye başlamıştır. Başlangıcından bu güne tarım, uzaktan algılanmış verilerin başlıca kullanıcılarından birisi olarak düşünülmüştür (Jackson 1984). Son kırk yılda yapılan araştırmalara göre tarımsal sistemlerin yönetiminde gerekli bilgilerin bir çoğu, çeşitli uzaktan algılayıcı sensörler aracılığıyla elde edilmektedir. Küresel yer belirleme sistemi (GPS) alıcıları, bilgisayarlar, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve bitki simulasyon modelleri ile bir arada kullanıldığında uzaktan algılama teknolojileri tarımsal üretimde oldukça büyük bir potansiyele sahiptir (Pinter ve ark., 2003). Uydu görüntüsüne dayalı uzaktan algılama teknikleri, özellikle bitki ve toprak koşullarının sezon boyu değişimlerin gözlenmesinde, önemli bilgiler sağlayabilmektedir. Fakat kullanılan araçlara bağlı olarak, görüntülerin sabit spektral bantlarla algılanması, çözünürlüklerin düşük olması, görüntüleme periyodunun ve görüntünün kullanıcıya

ulaşma zamanının uzunluğu gibi bazı kısıtlayıcı faktörlere sahiptir (Moran ve ark., 1997).

Uzaktan algılama teknikleri, gerek el radyometreleri ile tarla düzeyinde, gerekse farklı araçlar kullanılarak havadan bitkilerin gelişme durumlarının izlenmesine olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra yüzey enerji dengesi bileşenlerinin bir bölümü uzaktan algılama ile tespit edilebilmektedir. Özellikle yüzey sıcaklığının uzaktan algılamayla ölçülmesi, yüzey enerji dengesine dayalı bitki ve bulunduğu topraktan meydana gelen buharlaşmanın zamansal ve mekansal olarak belirlenmesine olanak tanımaktadır (Brown ve Rosenberg, 1973; Stone ve Horton, 1974; Hatfield ve ark., 1984; Sequin ve ark., 1994). Ayrıca, yapılan araştırmalara göre bitki katsayısı (Kc) ile spektral vejetasyon indeksleri arasında önemli istatistiksel ilişkiler bulunmaktadır (Fitzgerald ve ark., 2003; Hunsaker ve ark., 2003a; Hunsaker ve ark., 2003b). Bitkinin içerisinde bulunduğu su stresi düzeyinin tespit edilmesi için uzaktan algılanmış verilere dayalı çeşitli su stresi ve vejetasyon indeksleri geliştirilmiştir (Jackson ve ark., 1977b; Jackson ve ark., 1980; Idso ve ark., 1990; Kustas ve Daughtry, 1990; Moran ve ark., 1994; Penuelas ve ark., 1994; Alves ve Pereira, 2000; Kimura ve ark., 2004). Bu sayede, sulama zamanı, sulama suyu ihtiyacı uzaktan algılamaya dayalı olarak tespit edilebilmektedir.

Bu makalede, sulama suyu yönetiminde kullanım potansiyeline sahip, infrared yüzey sıcaklığı ve spektral yansıma oranı verileri (uzaktan algılanmış

veriler) ile belirlenen su stresi ve vejetasyon indekslerine ilişkin çalışmaların önemli bir bölümü bir araya getirilmiştir. Bu derleme ışığında, uzaktan algılama tekniklerinin sulama suyu yönetiminde kullanım olanakları tartışılmıştır.

2.İNFRARED YÜZEY SICAKLIĞI KULLANILARAK SULAMA SUYU YÖNETİMİ

Bitkilerde yeteri kadar terlemenin oluşması ile bitki örtü sıcaklığı hava sıcaklığından ($T_c - T_a$) daha düşük (yaklaşık -5 ile -10 °C arasında) gerçekleşmektedir. Su stresi bitki örtü sıcaklığının hava sıcaklığına yaklaşmasına ve üzerine çıkmasına neden olmaktadır (Walker ve Hatfield, 1979). Jackson ve ark., (1986)'na göre, radyometrik bir biçimde ölçülen bitki örtü sıcaklığı referans bir sıcaklık ile karşılaştırıldığında (hava sıcaklığı), su stresine ilişkin önemli bir gösterge niteliğindedir. Örneğin, Wiegand ve Namken (1966) tarafından pamuk bitkisinde yapılan bir çalışmanın sonuçlarına göre, yaprak oransal su içeriğinde % 83-59 arasında bir azalma yaprak sıcaklığında $3,6$ °C artışa, bir birim güneş radyasyonu artışı ise yaprak sıcaklığında $9-10$ °C yükselmeye neden olmaktadır. Buğdayda yapılan bir çalışmanın sonuçlarına göre, ıslak toprak koşullarında $T_c - T_a$ sabah saatlerinden saat 10:00'a kadar ve saat 14:00'ten akşam saatlerine kadar negatif, diğer zaman diliminde sifıra yakın veya pozitifdir. Kuru toprak koşullarında ise $T_c - T_a$ sabah saatlerinden sonra hızlı bir biçimde artmıştır ve saat 14:00' den sonra yavaş bir azalma izlenmiştir. Saat 10:00'dan sonra $T_c - T_a$ pozitif değerdir (Ehrler ve ark., 1978). Sadler ve ark., (2000) tarafından yapılan çalışmada, şiddetli kuraklığın olduğu dönemlerde, gözle belirgin olan stres alanlarında $T_c - T_a$ 10 °C' dan daha yükseğe çıkmış, diğer alanlarda bu değer 2 °C' dan daha düşük kalmıştır. Ayrıca, 46 mm' lik bir yağışın ardından tüm alanda bu fark sıfır dereceye yaklaşmıştır.

Bitki örtü sıcaklığı bitki su tüketimi ve su stresine ilişkin önemli bir göstergedir ve ilk zamanlarda bitkiye temas ile ölçümler yapılmıştır ve bu amaçla termokopl kullanılmıştır (Blad ve Rosenberg 1975). Uzaktan algılama ile yüzey sıcaklığının belirlenmesi amacı ile geliştirilen enstrümanlar termal infrared bölgede gerçekleşen spektral yansıma oranını ölçmekte ve yüzey emissivitesinden yararlanmaktadır. Emissivitenin belirlenmesi amacı ile Fucs ve Tanner (1966) tarafından yapılan bir çalışma ile yonca ve çim bitkilerinin emissivite değerlerinin $0,97$ ve $0,98$ arasında değiştiği, fasulye ve tütünün yaprak emissivite değerlerinin sırası ile $0,96$ ve $0,97$ olduğu belirlenmiştir.

Bitki yüzey sıcaklığı su stresi ve tarımsal uygulamalardan etkilendiği gibi, hava sıcaklığı, VPD ve güneş şiddeti gibi iklim faktörlerinden de etkilenmektedir ve gün içerisinde güneşin doğuşundan batışına kadar değişmektedir. Bu nedenle ölçüm zamanı amaca göre belirlenmelidir. Bitki yüzey sıcaklığının ölçümünde su stresi izlemeye bir standart zaman olarak 13:00 ile 14:00 arası (Jackson ve ark.,

1977b; Ehrler ve ark., 1978), yüzey enerji dengesine dayalı anlık buharlaşmadan yararlanılarak günlük buharlaşmanın hesaplanmasında bitki katsayısı yaklaşımının kullanımı söz konusu iken saat 10:45 ile 11:15 arası önerilmektedir (Allen ve ark., 2005).

Uzaktan algılama ile yüzey sıcaklığı uyduların termal bantları kullanılarak belirlenebileceği gibi, uydular ile aynı temele dayalı tarla düzeyinde ölçüm kabiliyetindeki infrared termometrelerle de ölçülebilir. İnfrared termometre cihazları belli bir görüş açısına sahiptir ve bu açı çeşitli marka ve modellere göre değişmektedir. Ayrıca görüş açısı, cihazın cisimden uzaklığına ve gözlem açısına göre görüş alanını belirlemektedir. Yüzey sıcaklığı su ile doymuş ve kuru çiplak toprakta, tam sulanmış ve su stresi altındaki bitki örtüsünde oldukça farklıdır (Moran et al., 1994). Bu nedenle infrared termometrenin görüş alanında sadece bitki, bitki-toprak bir arada veya sadece toprak bulunması amaca göre tercih edilmektedir. Örneğin $T_c - T_a$ verisi bitki su stresi belirlemede veya transpirasyon hesaplamada kullanılacak ise sadece bitki gözlenmeli, evapotranspirasyon hesabı söz konusu ise bitkinin bulunduğu ortam gözlenmelidir. Tam örtü oluşmamış ve / veya sıra bitkilerinde sadece bitkinin yüzey sıcaklığının ölçümü gerekli ise, gözlem sırasında cihazın zenith (düşey eksenindeki) ve azimuth (yatay eksenindeki) açısı önem kazanmaktadır. Zenith açısının doğru tespiti görüş alanında sadece bitki bulunmasını, çeşitli azimuth açılarından gözlem yapılması ise güneş ışınlarına direk maruz kalmaktan ve gölgelemeden kaynaklanan sıcaklık farklılıklarının elemine edilmesini sağlamaktadır. Fucs ve ark., (1967) tarafından yapılan çalışmada, bitki yüzey sıcaklığı infrared termometre ile çeşitli azimuth ve zenith açılarında ölçülmüştür. Çalışma sonuçlarına göre tam örtüye sahip bitkilerin gözleminde söz konusu açılar büyük bir öneme sahip değildir. Bununla birlikte sıra bitkilerinde, güneşin etki ettiği yüzey ile gölgede kalan yüzeyin sıcaklığı arasında $1-3$ °C farklılık olduğu tespit edilmiştir. Hatfield (1979) sıra bitkilerinin ve tam örtüye sahip bitkilerin sıcaklıklarının ölçümünde uzaktan algılama tekniklerini değerlendirilmiştir ve çalışmada bitki olarak fasulye ve buğday kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre infrared termometreler ölçüm sırasında belirli bir düşey açı ile konumlandırılmalıdır ve tam örtüye sahip olmayan bitkilerin ölçümünde oldukça dikkatli olunmalıdır. Diğer bir çalışmada, infrared termometre ile yüzey sıcaklığı ölçümlerinde, güneşin yatay konumu ve cihazın ölçüm sırasındaki gözlem açısının etkileri soya fasulyesinde irdelenmiştir. Güneşin azimuth açısı ile infrared termometre ölçümü sırasındaki cihazın azimuth açısı farkı 0° den 110° ye arttıkça infrared termometre ile ölçülen örtü sıcaklığı doğrusal bir biçimde azalmıştır. Bu fark 110° nin üzerinde artmıştır ve gözlenen örtü sıcaklığı dört ana yönden yapılan ölçümün ortalamasının $0,3$ °C daha üzerinde sabit kalmıştır (Nielsen ve ark., 1983). Ölçüm cihazlarının bitkiye göre yatay açılarının radiatif yüzey sıcaklık ölçüm

değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacı ile yapılan diğer bir çalışmada sonuçlar, cihazın görüş doğrultusunun bitkiye dik olduğu ve dik olmadığı koşullarda ölçümler arasında 5 K düzeyinde bir farklılık oluştuğunu ortaya koymuştur (Chenbouni ve ark., 2001).

Tc-Ta başlı başına bitki su koşullarını ortaya koyabilen bir göstergedir. Stricevic ve Caki (1997) sorgumda toprak su içeriği, YSP ve Tc-Ta ilişkilerinin yüksek bir korelasyona sahip olduğunu tespit etmiştir. Smith ve ark., (1989), bitki yüzey sıcaklığı kullanılarak toprak yapısı ve elverişli toprak su düzeyinin istatistiksel analiz kullanılarak tespit edilebileceğini ortaya koymuştur. Choudhury ve Idso (1984) ayçiçeğinde yaptıkları çalışmada, yüksek toprak su içeriği koşullarında, bitki örtü sıcaklığı üzerinde hava ve çiğlenme sıcaklıklarının etkili olduğunu belirlemiştir.

Sulama suyu uygulama zamanını belirlemede, Tc-Ta' ya dayalı göstergeler geliştirilmek üzere bir çok çalışma yapılmıştır. Jackson ve ark., (1977a) Stres Düzey Günü (SDD) adı ile bir gösterge geliştirmiştir ve bir sulamanın ardından SDD'nin pozitif değerlerinin toplamının bir sonraki sulama zamanının tespitinde bir gösterge niteliğinde olduğu ortaya koyulmuştur. Bunun yanı sıra çalışmada buğday için SDD değerlerinin başaklanmadan hasada kadar olan toplamının verim ile önemli bir ilişkiye sahip olduğu belirlenmektedir. Jackson ve ark., (1977b) SDD' yi kullanarak sulama zamanı ve sulama suyu miktarının belirlenme olanaklarını irdelenmiştir ve sonuçta SDD' nin sulama zamanı ve miktarının belirlenmesinde iyi bir ön gösterge olduğu sonucuna varılmıştır. Kamat ve ark., (1985) tarafından yapılan çalışmada SDD' nin buğdayda dane verimi ile yüksek düzeyde korelasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Kumar ve ark., (1999) SDD' nin hava sıcaklığı ve doyunluk açığına dayalı normalize edilen SDD ile toprak suyu arasında önemli istatistiksel ilişkiler belirlemiştir.

Idso ve ark. (1981) tarafından geliştirilen bitki su stres indeksi (CWSI) günümüzde en çok kullanılan göstergelerden birisidir. CWSI hesabı Tc-Ta ve havanın buhar basıncı açığının (VPD) doğrusal regresyonu ile elde edilen alt limit ve üst limite dayalıdır ve burada alt limit potansiyel düzeyde transpirasyonun olduğu, üst limit ise transpirasyonun gerçekleşmediği bitki koşullarından elde edilmektedir. CWSI, mevcut bitki koşulunda Tc-Ta' ya karşın VPD kesişim noktasının, üst limit ile farkının, üst limit ile alt limit farkına oranıdır. Idso ve ark., (1990) tarafından, su stresinin olmadığı düzeyi belirlemede (alt limit) hava sıcaklığı ve VPD ölçümlerinin yapıldığı yerin sonuca etkisini belirlemeye yönelik yapılan çalışmada, yeteri kadar sulanmış bitkilerde hava sıcaklığı ile VPD ölçümünün yapıldığı yerin, alt limit hattının eğimi üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Jackson ve ark., (1981) yaptıkları çalışmada, Idso ve ark., (1981) yönteminde deneysel olarak belirlenen alt limit ve üst limit hatlarının, enerji dengesine dayalı olarak teorik bir

biçimde belirlenme esaslarını ortaya koymuştur. Bu yolla hesaplanan CWSI' nin, Penman-Monteith'e göre hesaplanan gerçek ET'nin potansiyel ET' ye oranının, 1'den farkına eşit olduğu (CWSI=1-ETa/ETp) belirtilmiştir. Ayrıca, Jackson ve ark., (1986)' da bitki yetiştirmede uzaktan algılanmış verilere dayalı bitki stresine ilişkin bazı temeller ortaya koyulmuştur. Alves ve Pereira (2000), Idso ve ark., (1981) yönteminin daha önce tamamlanmış tarla denemelerine dayalı bir biçimde olmasını ve Jackson ve ark., (1981) yöntemindeki teorinin bitkinin yüzey direncine dayalı olmasını kısıt olarak görmüştür. Bu çalışma ile bitki su stresi hesabında, kolaylıkla ölçülebilen veya tahmin edilebilen atmosferik verilere dayalı yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yuan ve ark., (2004) yaptıkları çalışmada bitki su stres indeksi hesabına ilişkin üç ayrı yaklaşımı (Idso, Jackson ve Alves) Kuzey Çin'de yetiştirilen buğday bitkisi için değerlendirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, Jackson ve Alves yaklaşımı söz konusu bölge ve bitki için daha uygun bulunmuştur. Jackson modeli daha makul, Alves modeli ise daha pratik olarak değerlendirilmiştir. Olufayo ve ark., (1996) sorgumda toprak su içeriği, CWSI ve YSP ilişkilerini irdelenmiştir ve bu parametrelerin bir biri üzerinde çok etkili olduğunu belirtmiştir. Howell ve ark., (1984) pamukta yaptıkları çalışmada CWSI ile kök bölgesi elektriksel iletkenliği arasında (sırası ile $r=0,90$ ve $r=0,88$) istatistiksel bakımdan önemli ilişkiler belirlemişlerdir. Çalışmada CWSI'nin matrik potansiyele ve matrik potansiyelin olmadığı koşullarda osmotik potansiyele duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Mısırdaki yapılan diğer bir çalışmada toprak suyu ile CWSI istatistiksel ilişkisinin korelasyon katsayısı 0,78 olarak hesaplanmıştır (Sadler ve ark., 2000). Orta ve ark., (2001) ve Nielsen ve Anderson (1989) ayçiçeğinde CWSI ile toprak suyu arasında yüksek korelasyonlar tespit etmişlerdir. Yuan ve ark., (2004) ve Howell ve ark., (1986)' da yer verilen istatistiksel analiz sonuçlarına göre, buğdayda başaklanmadan önce ve sonra CWSI ile YSP arasında önemli istatistiksel ilişkiler bulunmaktadır. Alderfasi ve Nielsen (2001) CWSI' nin buğdayda bitki su düzeyinin izlenmesinde ve sulama zamanı planlamasında etkili olduğunu belirtmektedir. Sepaskhah ve Kashefipour (1994) yaptıkları çalışmada, ıhlamur ağaçlarında CWSI ile YSP istatistiksel ilişkisinin korelasyon katsayısını -0,47 olarak hesaplamıştır. Çoklu regresyon analizine tabi tutulan CWSI ve YSP' ye VPD eklenmiştir ve bu yolla korelasyon katsayısı 0,80 değerine yükselmiştir. Howell ve ark., (1984) pamukta, Nielsen (1990) soya fasulyesinde, Nielsen ve Anderson (1989) ayçiçeğinde CWSI ile YSP arasında istatistiksel bakımdan önemli ilişkiler belirlemişlerdir. Harran ovası koşullarında ikinci ürün mısırdaki yapılan bir çalışmanın sonuçlarına göre ortalama CWSI ile verim arasında istatistiksel bakımdan önemli ilişkiler tespit edilmiştir (Kırnak ve Gencoğlan 2001). Yazar ve ark., (1999) ve Irmak ve ark., (2000) yaptıkları araştırmada, CWSI' nin mısırdaki

sulama zamanı planlamasında kullanım olanaklarının yanı sıra verim tahmininde de etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Ihlamurda yapılan bir çalışmada CWSI ve YSP ile verimin istatistiksel analizlerinden korelasyon katsayıları sırası ile 0,77 ve 0,88 olarak elde edilmiştir. Meyve büyüklüğü ile CWSI ve YSP korelasyon katsayıları ise sırası ile 0,93 ve 0,84 olarak hesaplanmıştır (Sepaskhah ve Kashefipour 1994). Howell ve ark., (1984) pamukta yaptıkları çalışmada CWSI ile verim arasında ($r=0,99$) istatistiksel bakımdan önemli bir ilişki belirlemişlerdir. Reginato (1983) ve Kayam ve Beyazgül (2001) pamukta, Abdul-Jabbar ve ark., (1985) yoncada benzer sonuçları ortaya koymaktadır. Yoncada yapılan diğer bir çalışmada her bir hasat döneminde yapılan ölçümler ile verim ayrı değerlendirilmiştir ve bu dönemlerde CWSI ve verimin istatistiksel analizlerine göre korelasyon katsayısı 0,88 ile 0,97 arasında değişmektedir (Hattendorf ve ark., 1988). Orta ve ark., (2001) farklı sulama suyu uyguladıkları ayçiçeğinde CWSI ile verim arasında yüksek bir korelasyon ($r=0,90$) tespit etmişlerdir.

Moran ve ark., (1994) bitki vejetasyon düzeyini dikkate alan, infrared yüzey sıcaklık ölçümlerine dayalı farklı bir gösterge olarak Su Eksiklik İndeksini (WDI) geliştirmiştir. Söz konusu indeks, bitki örtü sıcaklığı (potansiyel transpirasyon ve transpirasyonsuz), kuru toprak sıcaklığı, doymun toprak sıcaklığı ile atmosfer sıcaklığı farklarını ve spektral vejetasyon düzeyini bir trapez biçiminde işleyerek, mevcut bitki yüzey sıcaklığına dayalı bir biçimde hesaplanmaktadır. Ayrıca geliştirilen bu indeks ile ET arasındaki ilişki bir eşitlikle belirtilmiştir.

Bilindiği gibi gerçek bitki su tüketiminin (ETc) belirlenmesinde en güvenilir yöntem, tartılı lizimetre yöntemidir ve bu yöntem uygulamadan daha çok araştırma ve çeşitli yöntemlerin kalibrasyonu, bitki katsayılarının belirlenmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Diğer bir yöntem olarak toprak su bütçesinden söz edilebilir. Toprak su bütçesinin en önemli bileşeni olan toprak suyunun bitki etkili kök derinliğinden yaklaşık 80-100 cm daha derine kadar izlenmesi gereklidir (R.G. Allen kişisel görüşme) ve büyük tarım arazilerinde toprak suyunun izlenmesi çoğu zaman imkansızdır ve bunun ötesinde noktasal bir değeri vardır. ETc'nin referans bitki su tüketimi (ETo) ve Kc yaklaşımı ile hesaplanması (Allen ve ark., 1998), gerçeğe yakın sonuçlar verebilirken bitki katsayılarının bitki, toprak ve iklim koşullarına göre farklılık göstermesi ve ETo hesaplamada gerekli iklim verilerinin teminindeki zorluklar bu yöntemin kısıtlıdır.

Enerji dengesi kullanılarak bir yüzeyden meydana gelen buharlaşmanın hesaplanması olanaklıdır (Bastiaanssen ve ark., 1998a). Yüzey enerji dengesi net radyasyon (R_n), toprak ısı değişimi (G), hissedilebilir (H) ve hissedilemeyen (LE) ısı değişimlerini dikkate almaktadır. H 'nin hesabında aerodinamik direncin yanı sıra T_c-T_a önemli bir

değişkendir (Monteith ve Unsworth 1991). Yüzey enerji dengesi bileşenlerinden R_n ve T_c-T_a 'nin belirlenmesinde uzaktan algılanmış verilerin kullanımı, yüzeyden meydana gelen buharlaşmada yüzeye ilişkin sıcaklık ve absorbe edilen güneş radyasyonu değerlerinin kullanımını olanaklı kılmaktadır (Hatfield ve ark., 1984) ve bu sayede hesaplanan buharlaşma, buharlaşmanın meydana geldiği yüzeye ait gerçekleşen nitelikleri dikkate almaktadır.

Uzaktan algılanmış yüzey sıcaklığı ve vejetasyon unsurlarının yüzey enerji dengesinde kullanımını konu alan çok sayıda araştırma yapılmıştır. Brown ve Rosenberg (1973) yaptıkları çalışmada şeker pancarı ETc hesabında enerji denge yaklaşımı ile lizimetre kullanmışlar ve aralarında %5 farklılık tespit etmişlerdir. Hatfield ve ark., (1984)'de verilen çalışmada ABD'nin birçok bölgesinde kurulan tartılı lizimetrelerde farklı bitkiler yetiştirilmiş ve örtü sıcaklığı yüzey enerji dengesine girdi olarak kullanılmıştır ve ET lizimetrede ve ampirik yöntemlere dayalı olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre tüm bölgelerde yüzey enerji dengesine göre belirlenen ETc ile tartılı lizimetreler kullanılarak belirlenen ETc değerleri iyi bir korelasyona sahiptir. Tam örtü koşullarında hesaplanan ETc gerçeğe göre en fazla % 10 hatalı bulunmuştur. İnfrared yüzey sıcaklığına dayalı günlük ET hesabına ilişkin yapılan diğer bir çalışmada, enerji denge eşitlikleri, Penman-Monteith ve van-den-Honert eşitlikleri bir araya getirilmiştir ve tam su ve kısıtlı su koşullarında günlük ETc değişimleri tartılı lizimetre ile izlenmiştir. Buğday için günlük ETc hesabında yapılan hatanın % 10'dan daha az ve 10 günlük hata düzeyinin % 5'in altında olduğu belirlenmiştir (Choudhury ve ark., 1986). Seguin ve ark., (1994)'de belirtilen çalışmada, T_c-T_a ve ET bölgesel düzeyde, uydu verisine dayalı bir biçimde tespit edilmiştir. Çalışmada uydu verilerinin T_c-T_a ve ET belirleme amaçları ile kullanım olanakları ortaya koyulmuştur. Diğer bir çalışmada spektral yansıma oranı ve yüzey sıcaklığı ile Penman – Monteith eşitliği bir araya getirilmiş, tam bitki örtüsüne sahip olmayan alanlarda herhangi bir bitki örtü yüzdesi ve bitki direnci bilgisine gerek kalmaksızın, ET hesabında uzaktan algılama tekniklerinin kullanım olanaklarının ortaya koyulması amaçlanmıştır. Geliştirilen yöntemin özellikle kurak ve yarı-kurak bölgeler için daha uygun olduğu belirtilirken, temel olarak, Penman – Monteith eşitliği enerji denge eşitliği ile bir araya getirilerek çıplak toprak ve vejetasyon örtüsüne ilişkin dört temel düzey dikkate alınmıştır. Bu düzeyler arasında çeşitli vejetasyon seviyeleri ve yüzey sıcaklık değerleri için yapılan enterpolasyonlar ile ET hesaplanmıştır. Yaklaşım ilk olarak tarla düzeyli spektral yansıma oranı ve yüzey sıcaklık ölçümleri ile test edilmiştir ve oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Ardından söz konusu yöntem, Landsat TM uydu görüntüleri ile test edilmiştir ve tarla düzeyli çalışmaya eşdeğer sonuçlar elde edilmiştir (Moran ve ark., 1996). Yunhao ve ark.,

(2005) enerji dengesine dayalı iki tabakalı bir uzaktan algılama modeli kullanarak günlük buharlaşma hesabında uydulardan elde edilen yüzey sıcaklığı ve vejetasyon unsurlarını kullanmıştır ve modelin doğruluğunu yer istasyonlarından elde edilen veriler ile test etmiştir.

Uzaktan algılama ile veri elde etmede en etkili araçlar tarla düzeyli el radyometrelerinin ötesinde uydular ve hava düzenekleridir ve bu araçlar belli frekanslarda anlık ölçümler yapma yeteneğindedir. Bu nedenle, uzaktan algılanmış verilerin kullanıldığı yüzey enerji dengesine dayalı ET_c hesaplamada en önemli kısıt, bir saniyelik bir zaman dilimi için hesaplanan ET_c değerinin, bir güne ve hatta veri alma frekansına kadar bir zaman dilimine dönüştürülmesidir. Jackson ve ark., (1983), anlık ET_c' nin, günlük ET_c' ye dönüştürülmesinde güneş radyasyonunu (R_s) dikkate alan bir eşitlik geliştirmiştir ve elde edilen sonuçları tartılı lizimetre ile kontrol etmiştir. Eşitlik anlık ET_c' nin, hesaplandığı sıradaki anlık R_s ile günlük toplam R_s oranına bölümü ile günlük ET_c' nin hesaplanmasını öngörmektedir. Çalışma sonucunda bu yolla dönüştürülen günlük ET_c ile gerçek ET_c arasında yaklaşık % 10 fark belirlenmiştir. Bastiaanssen ve ark., (1998a) tarafından geliştirilen SEBAL metodunda buharlaşma faktörü (EF) kullanılarak anlık ET_c günlük ET_c' ye dönüştürülmüştür. SEBAL modelinde EF, anlık ET_c' nin "R_n-G" ye oranına eşittir ve bu oranının ölçüm anında ve günlük toplamda eşit olduğu varsayılmaktadır. SEBAL yönteminin kullanım esasları uygulamalı olarak ayrıntılı bir biçimde Bastiaanssen ve ark., (1998b)' de verilmiştir. Yüzey enerji dengesine ilişkin diğer bir yöntem ise METRIC' tir (Allen ve ark., 2005). METRIC genel olarak SEBAL ile benzerdir ve iki noktada ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, H' nin uydu görüntüsünün her bir birimi için kalibrasyon yöntemindeki farklılıktır. İkincisi ise anlık ET_c' nin günlük ET_c' ye dönüştürülmesi işlemindedir. METRIC bu dönüştürmede ASCE-EWRI (2004)' de esasları verilen, yonca bitkisi için hesaplanan ETo' a dayalı bir referans ET fraksiyonunu (ET_{rF}) kullanmaktadır ve özünde ET_{rF} yaygın bir biçimde kullanılan ve bilinen K_c (Allen ve ark., 1998) ile aynıdır. ET_{rF}, anlık ET_c' nin ETo' a oranına eşittir. METRIC yöntemi Landsat uydu görüntüleri kullanılarak çalıştırılmış ve tartılı lizimetre ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu yöntemin büyük alanlarda sulama suyu yönetimi, izleme ve değerlendirilmesinde kullanılabilceğini ortaya koymaktadır (Allen ve ark., 2005, Tassumi ve ark., 2005, Allen ve ark., 2006)

3. SPEKTRAL İNDİSLERİN SULAMA SUYU YÖNETİMİNDE KULLANIMI

Jackson ve ark., (1980)'e göre spektral yansımaya oranlarına dayalı hesaplanan, spektral indisler, yaprak alan indeksi, kuru madde, yeşil ağırlık, kuru ağırlık, örtü yüzdesi gibi bitki karakteristiklerinin, spektral veriler kullanılarak tahmin edilmesinde önemli

araçlardır. İki banda ait yansıma değerlerinin bir birine oranlanmasıyla, doğru bantlar seçildiğinde oldukça yararlı vejetasyon indeksleri elde edilebilir. Bitkilerin biyofiziksel niteliklerinin izlenmesinde 350-1050 nm dalga boyu aralığı oldukça etkilidir (Thenkabail ve ark., 2000). Bunun yanı sıra spektral yansımaya oranlarının ölçüldüğü zaman dilimi, ölçüm cihazı güneş ve bitki örtüsü arasındaki açılmalık farklılıklar sonuç üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Asrar ve ark., 1989). Yer yüzüne dik ve belli açılarda ölçümlerin irdelendiği bir çalışmaya göre, açılı ölçümlerde basit oran (SR) ve normalize edilmiş vejetatif değişim indeksi (NDVI) diğer indislere göre daha etkili bulunurken, yere dik konumda yapılan ölçümlerde, normalize edilmiş pigment klorofil indeksi (NPCl) ve su indeksinin (WI) daha etkili olduğu belirtilmiştir (Aparicio ve ark., 2004).

Bireysel bantlarının yansıma oranları ile YAI gibi tarımsal parametreler arasında önemli ilişkiler bulunmamaktadır (Hatfield ve ark., 1985) ve spektral yansıma oranlarının tarımsal yönetimde daha etkili bir biçimde kullanımı için çeşitli spektral indislere gereksinim bulunmaktadır. Bu indislerin belirlenmesinde kullanılacak bantların seçiminde en önemli ölçüt, bantlardan birisine ilişkin yansıma verisi vejetasyonun artması ile azalmalı, diğerinde vejetasyon artması ile artmalıdır. Normalize edilmiş değişim ile indis hesaplamada ise farklı iki banda ilişkin yansıma değerlerinin toplam ve farklarının oranlanması gereklidir (Jackson ve ark., 1980). Hatfield ve ark., (1985) tarafından yapılan çalışmada, tüm yetiştirme dönemi irdelendiğinde yakın kızıl ötesi (NIR) ve kırmızı (Red) bant oranı ile YAI' inin istatistiksel bakımdan önemli ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar Boegh ve ark., (2002)' de verilen çalışmada da yer almaktadır. Kimura ve ark., (2004)' de NIR/Red, NIR/Green, NDVI, yeşil normalize edilmiş vejetatif değişim indeksi (GNDVI), modifiye edilmiş yansıma oranında klorofil absorpsiyonu indeksi (MCARI), dönüştürülmüş yansıma oranında klorofil absorpsiyonu indeksi (TCARI), toprak yansımalarını dikkate alan vejetasyon indeksi (SAVI), optimize edilmiş SAVI (OSAVI) ve modifiye edilmiş SAVI (MSAVI) ve YAI için vejetasyon indeksi (VILAI) gibi spektral vejetasyon indekslerinin YAI tahmin etmede oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Yeşil fasulyede NDVI, SAVI, SR ile YAI arasında yüksek korelasyonlar tespit edilmiştir (Köksal ve ark., 2006). Qi ve ark., (1993) tarafından yapılan çalışmada, SAVI' nin bitki gelişim düzeylerini izlemede daha etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmada tam örtüye sahip olmayan bitkilerin gözlenmesinde NDVI' in toprak neminden SAVI' ye nazaran daha fazla etkilendiği belirtilmiştir. Moran ve ark., (1989) yoncada SR (NIR/Red) ile kuru madde arasında önemli bir ilişki belirlemiştir. Çalışmada, yoncada kuru madde belirlemede SR kullanımının bitki stresinin etkilerini en düşük seviyeye indirdiği belirtilmiştir. Kleman ve Fagelund (1987) SR'nin

arpada kuru maddeyle iyi bir korelasyona sahip olduğunu belirtmektedir. Kamat ve ark., (1985), buğdayda, nohutta ve hardalda kuru madde ile SR arasında önemli istatistiksel ilişkiler (sırası ile $r = 0,87$, $r=0,66$ ve $r=0,67$) ortaya koymuştur. Raun ve ark., (2001) tarafından yapılan çalışma, buğdayda çeşitli fenolojik zamanlarda yapılacak spektral ölçümler ile başta NDVI olmak üzere spektral indekslerin buğday veriminin önceden tahmin edilmesinde etkin bir biçimde kullanılabileceği ortaya koyulmuştur. Kleman ve Fagelund (1987)' da arpada hasattan iki ay önce yapılacak ölçümler ile belirlenen SR'nin verim ile önemli istatistiksel ilişkiye sahip olduğu belirtilmektedir.

Yukarıda verilen, Jackson ve ark., (1980)' de belirtilen spektral indislerin belirlenmesinde doğru bant seçimine ilişkin yaklaşım spektral indisler ile vejetasyon düzeylerinin tahmin edilmesine yönelik olmasına rağmen, spektral yansım oranı verilerinden yararlanılarak su stresi, bitki-yaprak su içeriği vb. bitki karakteristiklerinin belirlenmesi amacı ile geliştirilecek indisler için de yol gösterici niteliktedir. Örneğin, Penuelas ve ark., (1997) bu yaklaşımla WI' i ($R900/R970$) geliştirmiştir. Bununla birlikte, genel olarak spektral yansım oranına dayalı vejetasyon indeksleri su stresinden daha çok su stresinin bitkideki etkilerine duyarlıdır (Jackson ve ark., 1986, Penuelas ve ark., 1993). Kamat ve ark., (1985) tarafından yapılan çalışmaya göre spektral parametrelerin fizyolojik değişkenler ve verim ile yüksek düzeyde korelasyona sahip olması, bu parametrelerin bitkilerde azot ve su stresinin belirlenmesinde kullanımını olanaklı kılmaktadır.

Tucker (1980)' de, bitki örtüsü su içeriğini belirlemede, 700-2500 nm dalga boyu aralığı içerisinde, 1550-1750 dalga boyu aralığı en uygun aralık olarak belirtilmektedir. Bowman (1989), yaprak oransal su kapsamı (YOSK), toplam su potansiyeli ve turgor potansiyeli ile 810, 1665 ve 2210 nm dalga boylarındaki spektral yansım oranları arasında istatistiksel bakımdan önemli ilişkilere sahip olduğunu ve NIR bölgede gerçekleşen yansım oranlarının, yaprak su kapsamının bir fonksiyonu olarak değiştiğini belirtmektedir. Carter (1991) yaprak su içeriğindeki azalmanın, 400-2500 nm dalga boyları aralığında genellikle yansımada artışa neden olduğunu bildirmektedir. Carter (1993) yaptığı çalışma sonucunda pigmentlerin azalan soğurmasının bir sonucu olarak, su stresine girmiş yapraklarda, görünür dalga boylarındaki yansımının arttığını ve 535-640 nm ve 685-700 nm dalga boyu aralıklarının su stresine en duyarlı spektral bölgeler olduğunu, NIR yansım oranlarının ise su stresine duyarlı olduğunu tespit etmiştir. Ceccato ve ark., (2001)' ya göre kısa dalga kızıl ötesi (SWIR) bölge bitki eşdeğer su yüksekliğine (EWT) duyarlıdır, fakat tek başına EWT'ye bir gösterge olarak yetersizdir. Çalışma sonuçlarına göre, yaprak düzeyinde EWT' nin belirlenebilmesinde SWIR ile NIR bölgede oluşan yansım oranlarının bir arada kullanılması zorunludur. Penuelas ve ark.,

(1994) yaptıkları çalışmada, su ve azot stresi altında olan bitkilerin diğerlerine göre (özellikle azotu kısıtlı olanlar) görünür dalga boylarında yüksek ve yakın kızıl ötesi dalga boylarında düşük yansım oranına sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bowman (1989) yaptığı çalışmada NIR bölgede meydana gelen spektral yansım oranlarına dayalı indekslerin, pamuğun bitki su içeriği ve dolayısı ile sulama zamanı planlamasında kullanım olanaklarını irdelemiştir. Pamukta % 80-100 arasındaki YSİ, 810 nm dalga boyunda gerçekleşen yansım oranı ile önemli istatistiksel ilişkilere sahipken, % 80-90 arasındaki YSİ ile ilişkisi önemsizdir. Thomas ve ark., (1971) tarafından pamukta benzer bir çalışma yapılmıştır. Çalışmaya göre spektral indeksler genel olarak sulama zamanı planlamada kullanılabilir olarak nitelense de, su stresi belirtilerindeki küçük değişikliklere duyarlı olarak nitelenmiştir. Cohen (1991), Riggs ve Running (1991) ve Danson ve ark., (1992) NIR yansım oranlarının bitki su stresi belirlemede kullanımını kısıtlı bulmuşlardır. Bunun ötesinde tüm bu çalışmalarda, NIR bölgesinde meydana gelen yansım oranlarına dayalı hesaplanan indekslerin su düzeyinin yaklaşık olarak tespit edilmesinde etkili olabileceği, kesin bir hesaplamanın mümkün olamayacağı belirtilmektedir. Pinol ve ark., (1998) doğal bitki örtüsünde gerçekleştirdikleri çalışmada, bitkilerin su düzeyleri tespitinde NDVI ve WI' in etkili olduğunu belirtmektedir. Penuelas ve ark., (1997) tarafından yapılan araştırmada bitki su konsantrasyonu (PWC) ile WI ilişkisinin önemli bir korelasyona sahip olmasının yanı sıra WI - NDVI oranı ile PWC' nin daha yüksek bir korelasyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Danson ve ark., (1992) tarafından yapılan çalışmaya göre, spektral yansım oranlarının ilk türevinin yaprak yapısındaki yoğun değişiklikler ve YSİ ile yüksek korelasyona sahiptir, YSİ' nin tahmin edilmesinde yaprak spektral yansımının ilk türevi orijinal yansım verisinden daha etkilidir. Bu çalışmanın sonuçları, NIR bölgedeki yüksek spektral çözünürlüğe sahip verilerinin bitki örtüsü su düzeyi tahminlerinde yararlı olabileceğini göstermektedir. Penuelas ve ark., (1993) yaptıkları çalışmada bitki su düzeyine bir gösterge olarak 950-970 dalga boylarındaki yansım oranlarını değerlendirmişlerdir. Yapılan çalışmada bitki su düzeyine ilişkin yeni uzaktan algılama indisleri geliştirilmiştir. Bu indislerden ilki, su absorpsiyon bantlarından birisi olan 970 nm' deki yansım ile referans dalga boyundaki (900 nm) yansımının oranıdır ($R970/R90$). İkinci indis ise yakın kızıl ötesi bölgede spektral yansım oranların ilk türevinin en küçüğü ($d_{NIRminimum}$) ve bu en küçük türevin bulunduğu dalga boyudur ($\lambda_{NIRminimum}$). Gerbera bitkisinde 950-970 nm aralığında yansım oranları kuruya bırakılması ile azalmıştır. Bu nedenle, $R970/R90$ indeksi, $d_{NIRminimum}$ ve $\lambda_{NIRminimum}$ indisleri YOSK, yaprak su potansiyeli (YSP) ve Tc-Ta değişimlerini çok yakından izlemiştir. Bununla birlikte bu su düzeyi indislerinin özellikle YOSK' un % 85' in altında olduğu koşullarda daha etkili olduğu

belirlenmiştir. Shibayama ve ark., (1993)' de belirtildiğine göre 1190-1320 nm ve 1600 nm bölgelerindeki yansımaları ve 1230 nm dalga boyundaki yansımalarının ilk türevi tam örtü koşullarında yüzey suyunun azalmasına duyarlıdır. 960 nm dalga boyundaki yansımalarının ilk türevi ise vejetasyonun su düzeyini tespit etme kabiliyetindedir. Çalışma bulgularına göre, yüksek spektral çözünürlükteki yansımaları ölçümleri ve bu ölçümlere ilişkin NIR ve orta kızıl ötesi (MIR) bölgedeki yansımalarının ilk türevleri çeltik bitkisinde su stresinin belirlenmesi için etkili bir metot sağlamaktadır.

Spektral indisler ile yüzey sıcaklığına dayalı indisler arasında da çeşitli ilişkiler bulunmaktadır. Pinter (1983) tarafından yonca bitkisi ile yapılan arazi denemesi sonuçları SR ile CWSI değerlerinin yetiştirme dönemi boyunca uyumlu bir biçimde değiştiğini göstermektedir. Saha ve ark., (1986)' ya göre SR, CWSI ile önemli bir istatistiksel ilişkiye sahiptir. Luquet ve ark., (2003) pamuk bitkisinde Tc-Ta ile NDVI arasında önemli bir istatistiksel ilişki belirlemiştir. Cure ve ark., (1989) su stresine maruz kalan ve kalmayan soya fasulyesinde spektral yansımaları ile örtü sıcaklığının, Tc-Ta' ya göre daha iyi bir korelasyona sahip olduğunu belirtmiştir.

Spektral yansımaya oranına dayalı indislerin sulama zamanına ilişkin bir gösterge olmalarının yanı sıra (Kc)' nin, toprak ısı değişiminin, albedonun tahmin edilmesi gibi çeşitli biçimlerde bitki su tüketimi hesaplarında da kullanımı söz konusudur. Örneğin Kustas ve Daughtry (1990) yaptıkları araştırmada enerji dengesi bileşenlerinden toprak ısı değişiminin (G), çeşitli bitki örtüleri için, spektral yansımaları oranlarından yararlanılarak net radyasyona (Rn) dayalı belirlenme olanaklarını ortaya koymuşlardır. Çalışma sonuçlarına göre, spektral vejetasyon indisleri ve Rn kullanılarak toprak ısı değişimi tahmin edilebilir ve bölgesel düzeyde yapılan buharlaşma çalışmalarında kullanılabilir. Yunhao ve ark., (2005) yaptıkları çalışmada, uydu görüntülerinden yararlanarak enerji dengesine dayalı buharlaşma hesaplamışlardır ve enerji dengesi bileşenlerinden Rn toprak ve vejetasyon için ayrı dikkate alınmış ve bu ayrımda vejetasyon fraksiyonu olarak NDVI' dan yararlanılmıştır. Bitki su tüketiminde spektral verilerin kullanımına ilişkin diğer bir çalışmada Kimura ve ark., (2004) gerçek ET (ETa) ile potansiyel ET (ETp) oranının (ETa/ETp) spektral veriler ile ilişkisini belirlemiştir. Bu amaçla, çeltikte VILAI ve klorofil konsantrasyonu için vejetasyon indeksi (VICC) 550, 680, 800 ve 980 nm dalga boylarındaki spektral yansımaları oranlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, ETa/ETp ile VICC ilişkisinin determinasyon katsayısı diğer indekslere göre daha yüksektir. Bu durum, dört adet görünür ve NIR dalga boyları ile elde edilen indekslerin, iki veya üç dalga boyu ile hesaplanan indekslere göre ETa-ETp oranını daha iyi ifade ettiğini göstermektedir. Bitki katsayılarının spektral indislerden yararlanılarak tahmin edilmesi

spektral indislerin bitki su tüketiminde kullanılabileceği diğer bir alandır. Allen ve ark., (2005)' e göre spektral indislerin bitki su stresi ve topraktan meydana gelen buharlaşmaya daha az duyarlı olmaları nedeniyle Kc ile bire bir değişimi olanaksızdır. Bu indislerden yararlanılarak bazal bitki katsayısının (Kcb) tahmin edilmesi ise mümkündür. Bu konuda yapılan bir çalışma sonucunda, pamuğun Kcb değerlerinin NDVI kullanılarak tahmin edilmesinde erken büyüme dönemi ve geç dönem için iki ayrı ilişki belirlenmiştir. Geç dönem için Kcb' nin NDVI ve büyüme gün düzeyi (GDD) ile çoklu regresyonundan yararlanılmıştır. NDVI- Kcb ilişkisi kullanılarak belirlenen ETc ile lizimetrede belirlenen gerçek ETc bir birine çok yakındır (Hunsaker ve ark., 2003a). Benzer bir çalışma buğdayda Hunsaker ve ark., (2005) tarafından yürütülmüştür ve NDVI' ya dayalı belirlenen Kcb ile hesaplanan günlük ETc değerleri gerçek değerlerden yaklaşık %10 sapma göstermiştir.

4. SONUÇ

Sulama suyu yönetiminde bitkinin ne zaman ne kadar suya gereksinim duyduğu temel bir bilgidir ve sulama alanı büyük, bitki deseni karışık olduğunda bu bilginin zamansal ve konumsal değişiminin saptanması, geleneksel yöntemler ile olanaksızken, uzaktan algılama tekniklerinin kullanımı ile mümkün olabilir. Bununla birlikte uzaktan algılanmış veriler kullanılarak bitki gelişim düzeyleri ve verim miktarları da tahmin edilebilir. Uzaktan algılama, özellikle sulama şebekelerinde suyun kullanıcılar arasında eş dağılımı ve adil kullanımının sağlanmasında ve proje performansının değerlendirilmesinde önemli bir karar destek aracıdır. Sulama suyu yönetiminde öne çıkan uzaktan algılamaya dayalı iki farklı bilgidir söz etmek mümkündür. Bu bilgiler infrared yüzey sıcaklığı ve spektral indislerdir.

Infrared yüzey sıcaklığı ile atmosfer sıcaklığı farkı, bitkilerde su stresinin bir göstergesi olmasının yanı sıra, enerji dengesi ile buharlaşma hesabının önemli bir bileşenidir. Tc-Ta' ya dayalı en çok bilinen su stresi indisleri SDD, CWSI ve WDI' dir. Bir çok tarla denemesi ile test edilen ve etkili bulunan bu göstergeler su stresinin zamansal ve konumsal değişimini ortaya koyma kabiliyetindedir ve bitkinin ne zaman suya gereksinim duyduğunun belirlenmesinde kullanılabilecekleri gibi verimin tahmin edilmesinde de yararlı araçlardır. Tc-Ta kullanılarak enerji dengesine dayalı belirlenen ETc ise bir sulama alanında uygulanan su miktarlarını ortaya koymada önemli olduğu gibi, sulama zamanı planlamada, su bütçesi ve sulama ramdımını hesabında da kullanılabilir nitelikte bir bilgidir.

Spektral indisler su stresinin direkt olarak belirlenmesinden çok, su stresinin neden olduğu etkileri ortaya koymada daha etkindir. Yapılan araştırmalarda tespit edilen, Tc-Ta' ya dayalı su stresi indisleri ile spektral indisler arasında istatistiksel bakımdan önemli ilişkilerinin temel kaynağı budur.

Bu nedenle, spektral indislerin, sulama suyuna ilişkin planlamalarda doğrudan kullanımı istenen düzeyde hassasiyet sağlayamayabilir. Spektral indisler ile YAI ve kuru madde gibi bitkisel özelliklerin belirlenebilmesi, su stresinin neden olduğu bitki gelişim ve verim eksikliğinin tespit edilmesinde etkili araçlardır. Bunun yanı sıra, yapılan araştırmalara göre spektral indeksler enerji dengesi bileşenlerinden G' nin R_n yolu ile tahmin edilmesinde ve R_n' de toprak ve bitki payının ayırt edilmesinde kullanılabilir. Ayrıca spektral indislerden yararlanılarak albedo hesaplanabilmektedir. ETc hesaplamada yaygın olarak kullanılan Kc katsayısının tahmin edilmesinde de spektral indisler kullanılabilir bir bilgidir. Özellikle bazal Kc ile spektral indisler istatistiksel bakımdan önemli ilişkilere sahiptir.

5.KAYNAKLAR

- Abdul-Jabbar, A.S, Lugg, D.G., Sammis, T.W., Gay, L.W. 1985. Relationships between crop water stress index and Alfalfa yield and evapotranspiration. *Trans. ASAE*. Pp:454-461.
- Alderfasi, A.A., Nielsen, D.C. 2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in whet. *Agricultural Water Management*, 47:69-75.
- Allen, R. G. Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., 2005. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems*, 19:251-268.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration*, FAO, 300, Rome.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Kramber, W., Lorite, I. and Robison, W. 2006. Water management applications using evapotranspiration maps from satellite – based energy balance. *International Symposium on Water and Land Management for Sustainable Irrigated Agriculture*. Adana. Turkey.
- Alves, I., Pereira, L.S. 2000. Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach. *Irrigation Science*, 19:101-106.
- Aparicio, N., Viellegas, D., Royo, C., Casadesus, J., Araus, J.L. 2004. Effect of sensor view angle on the assessment of agronomic traits by ground level hyper-spectral reflectance measurements in durum wheat under contrasting Mediterranean conditions. *Int. J. Remote Sensing*, 25(6):1131-1152.
- ASCE – EWRI., 2005. The ASCE Standardized reference evapotranspiration equation. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Comm. Report. Available from URL: <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/asceewri/>
- Asrar, G., Myneni, R.B., Li, Y., Kanemasu, E.T. 1989. Measuring and modeling spectral characteristics of tall grass prairie. *Remote Sens. Environ.*, 27:143-155.
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F. Roerink, G. J., van der Wal, T., 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213:213-229.
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F. Roerink, G. J., van der Wal, T., 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology* 212-213:213-229.
- Blad, B. L., Rosenberg, N. J. 1975. Measurement of crop temperature by leaf thermocouple, infrared thermometry and remotely sensed thermal imagery, *Agronomy J.*, 65:635-641.
- Boegh, E., Soegaard, H., Broge, A., Hasager, C.B., Jensne, N.O., Schelde, K., Thomsen, A. 2002. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sens. Environ.*, 81:179-193.
- Bowman, W.D. 1989. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sens. Environ.* 30:249-255.
- Brown, K.W., Rosenberg, N.J. 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agronomy J.*, 65(3):341-347.
- Carter, G. A. 1993. Responses of leaf reflectance to plant stress. *American J. Botany*, 80:239-243.
- Carter, G. A. 1991. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American J. Botany*, 78:916-924.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Gregoire, J.M. 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sens. Environ.*, 77:22-33.
- Chenbouni, A., Nouvellon, Y., Kerr, Y.H., Moran, M.S., Watts, C., Prevo, L., Goodrich, D.C., Rembal, S. 2001. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site. *Remote Sens. Environ.*, 76:360-372.
- Choudhury, B.J., Idso, S.B. 1984. Simulating sunflower canopy temperatures to infer root-zone soil water potential. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31:69-78.
- Choudhury, B.J., Idso, S.B., Reginato, R.J. 1986 Analysis of a resistance-energy balance method for estimating daily evaporation from wheat plots using one-time-of-day infrared temperature observations. *Remote Sens. Environ.*, 19:253-268.
- Cohen, W.B. 1991. Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *Int. J. Remote Sens.* 12:1865-1876.
- Cure, W. W., Flagler, R., B., Heagle, A.S. 1989. Correlations between canopy reflectance and leaf temperature in irrigated and droughted soybeans. *Remote Sens. Environ.* 29:273-280.
- Danson, M., Steven M. D., Malthus, T. J., Clark, J.A. 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content, *Int. J. Remote Sensing*, 13:461-470.
- Ehrler, W.L., Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J. 1978. Diurnal changes in plant water potential and canopy temperature of wheat as affected by drought. *Agronomy J.*, 70:999-1009.
- Fitzgerald, G.J., Hunsaker, D.J., Barnes, E.M., Clarke, T.R., Lesch, S.M., Roth, R., Pinter Jr, P.J. 2003. Estimating Cotton Crop Water Use From Multispectral Aerial Imagery. In *Irrigation Associations Exposition And Technical Conference*, San Diego, Ca, Nov. 18-20. PP.138-148.
- Fuchs, M., Tanner, C.B. 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy J.*, 58:597-601.
- Fuchs, M., Kanemasu, E.T., Kerr, J.P., Tanner, C.B. 1967. Effect of viewing angle on canopy temperature measurements with infrared thermometers. *Agronomy J.*, 59:494-496.

- Hatfield, J.L. 1979. Canopy temperatures: The usefulness and reliability of remote measurements. *Agronomy J*,71:889-892.
- Hatfield, J.L., Kanemasu, E.T., Asrar, G., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Jr., Reginato, R.J., Idso, S.B. 1985. Leaf-area estimation from spectral measurements over various planting dates of wheat. *Int. J. Remote Sensing*, 6(1):167-175.
- Hatfield, J.L., Reginato, R.J., Idso, S.B. 1984. Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 32:41-53.
- Hattendorf, M.J., Carlson, R.E., Halim, R.A., Buxton, D.R. 1988. Crop water stress index and yield of water-deficit-stressed alfalfa. *Agronomy Journal*, 80:871-875.
- Howell, T.A., Hatfield, J.L., Yamada, H., Davis, K.R. 1984. Evaluation of cotton canopy temperature to detect crop water stress. *Transact. ASAE*.Pp:84-88.
- Howell, T.A., Musick, J.T., Tolk, J.A. 1986. Canopy temperature of irrigated winter wheat. *Transact. ASAE*. Pp:1692-1698.
- Hunsaker, D. J., Pinter Jr, P.J., Kimball, B.A., 2005. Wheat Basal Crop Coefficients Determined By Normalized Difference Vegetation Index. *Irrigation Science*. 24:1-14.
- Hunsaker, D.J., Pinter Jr, P.J., Fitzgerald, G.J., Clarke, T.R., Kimball, B.A., Barnes, E.M. 2003b. Tracking Spatial And Temporal Cotton Dt Patterns With A Normalized Difference Vegetation Index. *Irrigation Associations Exposition And Technical Conference Proceedings*. Pp. 126-137.
- Hunsaker, D.J., Pinter, Jr. P.J., Barnes E. M., Kimball, B.A. 2003a. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrig. Sci*.22: 95-104.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Jr., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24:45-55.
- Idso, S.B., Pinter, Jr., P.J., Reginato, R.J. 1990. Non-water stressed baselines: the importance of site selection for air temperature and air vapour pressure deficit measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 53:73-80.
- Irmak, S., Haman, D.Z., Bastug, R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*. 92:1221-1227.
- Jackson, R. D., Pinter, Jr., P.J., Reginato, R.J., Idso, S.B. 1986. Detection and evaluation of plant stress for crop management decisions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24(1):99-106.
- 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. Phoenix, Ariz., February 25 –26, 1980.
- Jackson, R.D. 1984. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. Reprinted from SPIE Vol.475-Sixth in the SPIE Critical Reviews of Technology Series: Remote Sensing, 475:81-96.
- Jackson, R.D., Hatfield, J. L., Reginato, R.J., Idso, S.B., Pinter, P.J., Jr., 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural Water Management.*, 7:51-362.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. 1977a. Remote sensing of crop canopy temperatures for scheduling irrigations and estimating yields. *Proc.Symp. On Remote Sensing of Natural Resources*, Utah State University. Logan. UT.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4):1133-1138.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B. 1977b. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements, *Water Resources Research*, 13(3):651-656.
- Kamat, D. S., Gopalan, S. K. A., Shashikumar, N. M., Sinha, K. S., Chaturvedi, S. G., Singh, K. A. 1985. Assessment of water stress effects on crops, *Int J. Remote Sensing*, 6:577-589.
- Kayam, Y. ve Beyazgül, M. 2001. Infrared termometre tekniğinin pamuk sulamasında kullanıma olanakları. *Toprak ve Su Kaynakları Araştırma Yıllığı 2000. Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Toprak ve Su Kaynakları Şube Müdürlüğü, yayın No: 117. 312-326, Ankara.*
- Kırnak, H. ve Gencoğlan, C. 2001. Bitki su stresi indeksi (CWSI) tekniğinin ikinci ürün mısır bitkisinin sulamasında kullanımı. *HR.Ü.Z.F. Dergisi*. 5(3-4):67-75.
- Kimura, R., Okada, S., Miura, H., Kamichika, M. 2004. Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field. *Agricultural Water Management*, 69:83-100.
- Kleman, J., Fagerlund, E. 1987. Influence of different nitrogen and irrigation treatments on the spectral reflectance of barley. *Remote Sens. Environ.*, 21: 1-14.
- Köksal, E.S., Üstün, H., İlbeyi, A., Akgül, A. 2006. Effect of different irrigation treatments on the spectral reflectance characteristic of green bean. *International Symposium on Water and Land Management for Sustainable Irrigated Agriculture*. Adana. Turkey.
- Kumar, P.V., Ramakrishna, Y.S., Ramana Rao, B.V., Khandgonda, I.R., Victor, U.S., Srivastava, N.N., Rao, G.G.S.N. 1999. Assessment of plant-extractable soil water in castor beans (*Ricinus communis* L.) using infrared thermometry. *Agricultural Water Management*, 39:69-83.
- Kustas, W.P., Daughtry, C.S.T., 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 49:205-223.
- Luquet, D., Begue, A., Vidal, A., Clouvel, P., Dauzat, J., Olioso, A., Gu, X.F., Tao, Y. 2003. Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton. *Remote Sens. Environ.*, 84:411-421.
- Monteith J. L., Unsworth M. H., 1990. Principles of Environmental Physics. Second edition. 291 p.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., Vidal, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface – air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.*, 49:246-263.
- Moran, M.S., Inou, Y., Barnes, E.M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sens. Environ.*, 61:319-346.
- Moran, M.S., Pinter, P.Jr., Clothier, B.E., Allen, S.G. 1989. Effect of water stress on the canopy architecture and spectral indices of irrigated alfalfa. *Remote Sens. Environ.*, 29:251-261.
- Moran, M.S., Rahman, A.F., Washburne, J.C., Goodrich, D.C., Waltz, M.A., Kustas, W.P. 1996. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80:87-109.

- Nielsen, D.C. 1990. Scheduling irrigation for soybeans with the crop water stress index (CWSI). *Field Crops Res.* 23:103-116.
- Nielsen, D.C., Anderson, R.L. 1989. Infrared thermometry to measure single leaf temperatures for quantification of water stress in sunflower. *Agronomy Journal.* 81:840-842.
- Nielsen, D.C., Clawson, K.L., Blad, B.L. 1983. Effect of solar azimuth and Infrared thermometer view direction on measured soybean canopy temperature. *Agronomy J.* 76:607-610.
- Olufayo, A., Baldy, C., Ruelle, P. 1996. Sorghum yield, water use and canopy temperatures under different levels of irrigation. *Agricultural Water Management.* 30:77-90.
- Orta, A.H., Erdem, T. ve Erdem, Y. 2001. İnfrared termometre tekniği ile ayçiçeğinde bitki su stresi indeksi (CWSI) ve sulama zamanının belirlenmesi. Birinci ulusal sulama kongresi bildirileri., s. 145-153, 8-11 Kasım 2001, Antalya.
- 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. Remote Sensing,* 14(10):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 Sens. Environ.,* 48:135-146.
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., Fiella, I. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970), *Int. J. Remote Sensing* 18:2869-2875.
- Pinol, J., Filella, I., Ogaya, R., Penuelas, J. 1998. Ground-based spectroradiometric estimation of live fine fuel moisture of Mediterranean plants. *Agricultural and Forest Meteorology.,* 90:173-186.
- Pinter, P.J. JR. 1983. Monitoring the effect of water stress on the growth of alfalfa via remotely sensed observations of canopy reflectance and temperature. 18th Conference on Agriculture and Forest Meteorology, April 26-28, 1983. Boston Pp:91-94.
- Pinter, P.J. JR., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.m., Moran, S.M., Daughtry, C.S.T., Upchurch, D.R. 2003. Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering&Remote Sensing,* 69(6):647-664.
- Qi, J., Huete, A.R., Moran, M.S., Chehbouni, A., Jackson, R. D. 1993. Interpretation of vegetation indices derived from Multi-temporal SPOT images. *Remote Sens. Environ.,* 44:89-101.
- Raun, W. R., Solie, J.B, Johnson, G.V., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E., Schepers, J.S. 2001. In-Season of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal.,* 93:131-138.
- Reginato, R.J. 1983. Field quantification of crop water stress. *Transac. ASAE.* Pp:772-781.
- Riggs, G.A., Running, S.W. 1991. Detection of canopy water stress in conifers using the airborne imaging spectrometer. *Remote Sens. Environ.* 35:51-68.
- Sadler, E.J., Bauer, P.J., Busscher, W.J., Millen, J.A. 2000. Site-specific analysis of a drought corn crop: II. Water use and stress. *Agronomy J.,* 92:403-410.
- Saha, S.K., Gopalan, A.A.K.S., Kamat, D.S. 1986. Relation between remotely sensed canopy temperature, crop water stress, air vapour pressure deficit and evapotranspiration in chickpea. *Agricultural and Forest Meteorology.* 38:17-26.
- Seguin, B., Courault, D., Guerif, M. 1994. Surface temperature and evapotranspiration: Application of local scale methods to regional scales using satellite data. *Remote Sens. Environ.,* 49:287-295.
- Sepaskhah, A.R., Kashefipour, S.M. 1994. Relationships between leaf water potential, CWSI, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation. *Agricultural Water Management.* 25:13-22.
- Shibayama, M., Takahashi, W., Morinaga, S., Akiyama, T., 1993. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer. *Remote Sens. Environ.,* 45:117-126.
- Smith, R.C.G., Prathapar, S.A., Barrs, H.D. 1989. Use of thermal scanner image of water stressed crop to study soil spatial variability. *Remote Sens. Environ.,* 29:111-120.
- Stone, L.R., Horton M.L. 1974. Estimating Evapotranspiration using canopy temperatures: Field evaluation, *Agronomy J.,* 66:450-454.
- Stricevic, R., Caki, E. 1997. Relationships between available soil water and indicators of plan water status of sweet sorghum to be applied in irrigation scheduling. *Irrigation Science,* 18:17-21
- Tassumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Irrigation and Drainage Sysytms,* 19:355-376.
- Thenkabail, P.S., Smith, R.B., Pauw, E.D. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sens. Environ.,* 71:158-182.
- Thomas, J.R., Namken, L.N., Oether, G.F., Brown, R.G. 1971. Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agronomy Journal.,* 63:845-847.
- Tucker, C.J. 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sens. Environ.,* 10:23-32.
- Walker, G.K., Hatfield, J.L. 1979. test of stress-degree-day concept using multiple planting dates of red kidney beans. *Agronomy J.,* 71:967-971.
- Wiegand, C.L., Namken, L.N. 1966. Influences of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperature. *Agronomy J.,* 58:582-586.
- Yazar, A., Howell, T.A., Dusek, D.A., Copeland, S. 1999. Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn, *Irrigation Science,* 18:171-180.
- Yuan, G., Luo, Y., Sun, X., Tang, D. 2004. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management,* 64:29-40.
- Yunhao, C., Xiaobing, L., Jing, L., Peijun, S., Wen, D. 2005. Estimation of daily evapotranspiration using a two-layer remote sensing model. *Int. J. Remote Sensing,* 26(8):1755-1762.