

**BITKİ SU STRESİNİN NİCELİKSEL İFADE BİÇİMLERİ VE SULAMA
ZAMANININ BELİRLENMESİNDE KULLANILMALARI**

Ruhi BAŞTUĞ

Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi,
Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Antalya.

Özet: Sulama programlaması, sulama zamanının ve uygulanacak su miktarının belirlenmesi olarak tanımlanan ve su kullanımının optimizasyonunu sağlayan bir kavramdır.

Günümüzde, sulama programlamasında toprağı, meteorolojik verileri ve bitkiyi esas alan bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bitkiler, hem atmosfer hem de toprağına ilişkin çevrelerine tepki gösterdiklerinden doğrudan bitkiye ilişkin bazı parametrelerin ölçülmesi yoluyla sulama programlaması daha doğru bir yaklaşım olmaktadır.

Bu makalenin amacı, bitkiyi esas alan ölçümlerden yararlanarak bitki su stresini niceliksel olarak ifade eden değişik stres indekslerinin açıklanması ve bunların sulama zamanının belirlenmesinde kullanılmalarının değerlendirilmesidir. Bu amaçla Stresli Gün İndeksi (SDI), Stres-Derece-Gün (SDD) Kavramı, Sıcaklık Stresli Gün (TSD) indeksi, Taç Sıcaklığı Değişkenliği (CTV), Kritik Nokta Modeli (CPM) ve Bitki Su Stres indeksi (CWSI) olarak bilinen indeksler gözden geçirilmiştir.

The Methods of Quantification of Plant Water Stress and Their Usage for Irrigation Timing

Summary: The irrigation scheduling which is described as the determination of irrigation time and the amount of water that should be applied, is a concept for optimizing of water use for land.

Nowadays, there are a number of methods which are widely used for irrigation scheduling based on soil data, meteorological data and plant data. Because plants respond to aerial environment as well as soil environment, the irrigation scheduling which is based on direct measurements of some plant parameters is more adequate approach than other methods.

The purpose of this article was to describe the stress indices, which were quantified the plant water stress based on measurements of plants, and their usage for irrigation timing was evaluated. For this purpose Stress Day Index (SDI) Stress Degree Day (SDD) Concept, Temperature Stress Day (TSD) Canopy Temperature Variability (CTV), Critical Point Model (CPM) and Crop Water Stress Index (CWSI) were reviewed.

Giriş

Tüm dünyada, sulama için ayrılan su miktarındaki azalma ve çevresel kaygılar birim sudan en yüksek faydaya ulaşmayı zorunlu kılmaktadır. Su kullanımının optimizasyonunu sağlayan kavramlardan biri de sulama programlamasıdır. Sulama zamanının ve uygulanacak su miktarının belirlenmesi olarak tanımlanan sulama programlaması su kullanım randımanını etkiler. Ancak, sulama zamanının belirlenmesi bitkilerin kritik büyüme dönemlerinde aşırı su eksikliğinin bitki verimi ve kalitesinde giderimi mümkün olmayacak azalmayla sonuçlanması nedeniyle daha fazla önem kazanan bir sulama programlaması unsurudur (1).

Genel olarak sulama programlaması tekniklerini toprağı, meteorolojik verileri ve bitkiyi esas alan teknikler olmak üzere üç sınıfa ayırmak olasıdır. Bazen bu üç sınıfın birleşimleri de kullanılır. Toprağı esas alan tekniklerde, tarla kapasitesi ve solma noktası gibi bilgilere dayanılarak toprağın su içeriğı izlenir. Toprak su içeriğı belirli bir değere düşünce toprak profilini tarla kapasitesine getirmek için gerekli su miktarı uygulanır. Gravimetrik örnekleme, alçı ve naylon bloklar, tansiyometreler ve giderek yaygınlaşan nötronmetreler (2) toprağı esas alan tekniklerdendir. Söz konusu tekniklerde arazinin bir veya bir kaç noktasında ölçüm alındığından arazinin her yerinde toprak özelliklerinin yeknesak olduğu varsayılır. Ayrıca, bu tekniklerde kullanılan tek bitkisel tepki parametresi tamamen dolaylı bir parametre olan solma noktasıdır.

Birçok araştırmacı (3,4,5,6,7,8) tarafından geliştirilen meteorolojik yöntemler esas olarak bir zaman periyodunda tüketilen su miktarını hesaplayan modellere girdi olarak hava sıcaklığı, net radyasyon, buhar basıncı ve rüzgar hızı gibi meteorolojik verileri kullanırlar. Evapotranspirasyon belirli bir değere ulaşınca sulamanın gerektiğine karar verilir. Anılan yöntemler kök bölgesinin altına drenajı doğrudan dikkate almazlar ve bitki katsayıları dışında doğrudan bitkiye ilişkin bilgi kullanmazlar.

Bitkiler hem atmosfere ve hem de toprağına ilişkin çevrelerine tepki gösterdiklerinden, bazı bitkisel parametrelerin doğrudan ölçümü sulama zamanının belirlenmesinde üstün bir yöntem olarak ortaya çıkar. Böylesi yöntemler, genellikle bitki yaprakları ve yaprak sapları gibi bireysel bitki parçalarının ölçülmesini gerektirirler. Bu tekniklere örnek olarak, yaprak ve yaprak sapı su içeriğı ölçümleri (9), gövde çapının ölçülmesi (10), basınç odacığı (11), yaprak difüzyon parametresi (12) verilebilir. Bunlar zaman alıcı ve araziyi temsil için çok sayıda ölçüm gerektiren yöntemlerdir.

Öte yandan bitkiyi esas alan ölçümlerden yararlanmak yoluyla bitki su stresini niceliksel olarak ifade etmek ve bu değerleri, sulama zamanının belirlenmesi amacıyla kullanmak

olanaklıdır. Bu noktada "su stresi" ve "su eksikliği" terimleri arasındaki ayrımı belirtmekte yarar vardır. "Su stresi", aşırı bitki "su eksikliği" nin bitkide neden olduğu olumsuz etkiyi ifade etmektedir.

Bu makalede, bitkiyi esas alan ölçümlerden yararlanarak bitki su stresini niceliksel olarak ifade etmek için geliştirilmiş çeşitli bitki su stresi indekslerinin açıklanması ve sulama zamanının belirlenmesinde kullanılmasının irdelenmesi amaçlanmıştır.

Stresli Gün indeksi (SDI)

Hiler ve Clark (13) tarafından ileri sürülen Stresli Gün indeksi (SDI), bitkiyi büyüme mevsimi boyunca etkileyen su stresinin belirlenmesi için niceliksel bir yöntem sağlayan ilk indekstir ve aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$SDI = \sum_{i=1}^n (CS_i \times SD_i) \quad (1)$$

Eşitlikte, CS= bitki duyarlılık etmeni, SD= stresli gün etmeni olarak adlandırılır. n ise göz önüne alınan bitki gelişme evresi sayısıdır. CS, bitkinin cinsine ve gelişme evresine bağlı olup farklı gelişme evrelerinde su eksikliğine karşı bitkinin duyarlılığını gösterir. SD ise, bitki su eksikliğinin derecesi ve süresinin bir ölçüsüdür.

Bitki duyarlılık etmeni (CS), verilen bir büyüme evresi süresince belirli bir düzeydeki su eksikliği sonucunda verimdeki azalma oranı biçiminde deneysel olarak belirlenebilir (14).

$$CS_i = \frac{X - X_i}{X} \quad (2)$$

Eşitlikte, X= gelişme mevsimi süresince iyi sulanan (su eksikliği çekmeyen) kontrol konusundan elde edilen pazarlanabilir verim, X_i= yalnızca i'inci gelişme evresinde su eksikliği olan konudan elde edilen verimdir. Çizelge 1, sulanan çeşitli bitkiler için CS değerlerini göstermektedir.

Stresli gün etmeni (SD), bitkinin su eksikliğinin bir ölçüsüdür. SD' nin bitkiyi baz alan (yaprak su potansiyeli, yaprak-hava sıcaklığı farkı, yaprak difüzyon direnci v.b.), toprağı baz alan (toprak su potansiyeli, kullanılabilir toprak suyunun tüketilen yüzdesi v.b.), toprak ve iklimi baz alan (potansiyel evapotranspirasyon x toprak su potansiyeli) bir gösterge ile karakterize edilebileceğini ifade eden Hiler ve ark. (14), günlük SDI (günlük SD x bitki gelişme evresine özgü CS) önceden belirlenmiş kritik bir değere (SDI₀), ulaştığında sulama yapmak suretiyle sulama zamanının belirlenebileceğini ileri sürmüşlerdir. SDI₀, sulama suyunun bulunabilirliğine ve maliyetine bağlı olacaktır. Örneğin su sınırlı

ise, SDI₀ yüksek belirlenecek ve yalnızca en duyarlı periyotlarda sulama yapılacaktır.

Çizelge 1. Sulanan Çeşitli Bitkilerde Bitki Duyarlılık Etmeni (CS) Değerleri (14).

Bitki	Gelişme Evresi	CS
Pamuk	Çiçeklenme başlangıcı	0.21
	Pik çiçeklenme	0.32
	Çiçeklenme sonu	0.20
Mısır	Vejetatif	0.25
	Tepe ve koçan püskülü-süt olumu	0.50
	Süt olumundan sonra	0.21
Dane Sorgum	Vejetatif 6-8 yaprak	0.25
	Sapa kalkma	0.36
	Püskül çıkarmadan süt olumuna kadar	0.45
	Süt olumundan sonra	0.25
Soya	Vejetatif	0.12
	Çiçeklenme başı-pik çiçeklenme	0.24
	Çiçeklenme sonu ve ilk bakla gelişimi	0.35
	Bakla geliş. sonu-olgunlaşma	0.13
Yerfıstığı	Vej.-pik çiçek. ve ilk ginofor oluş.	0.36
	Pik ginofor oluş. ve meyve geliş.	0.24
	Meyve geliş. sonu ve olgunlaşma	0.12

Örnek olarak, sulamacının SDI kavramını dane sorgumu sulamak için kullandığını varsayalım. Bir önceki yıl sulamacı, yaprak su potansiyeli -12 bar'a ulaştığında sulama yaparak başarılı bir sonuç (iyi bir verim) aldığı için su eksikliğinin (SD'nin) göstergesi olarak yaprak su potansiyelinin mutlak değerini kullanmak istesin. Sulamacı, SDI yaklaşımını kullanmak için önce SDI₀ değerini saptamalıdır. Bir önceki yıla ilişkin sonuçlardan memnun olduğu için SD değerini 12 olarak seçen sulamacı bu değeri Çizelge 1'den aldığı CS'lerle çarparak SDI değerlerini bulur. SDI'lerin ortalamasını hesaplayarak SDI₀ değerlerini belirler ($SDI_0 = \text{ort. SDI} = 15.93/4 = 3.98 \approx 4.0$ bar). Son adım, her büyüme evresi için sulama zamanındaki SD değerlerini belirlemektir. Bu, her gelişme evresi için SDI₀'ın sözkonusu evreye özgü CS'ye bölünmesiyle elde edilir (Çizelge 2).

Hiler ve ark. (14), dane sorgum ve pamuk bitkilerinde sulama zamanının belirlenmesinde, sabit bir toprak su potansiyeli, sabit bir yaprak su potansiyeli ve stresli gün indeksi (SDI)'ni kriter olarak aldıkları çalışmalarında, SDI konusunun su kullanım randımanında artış sağladığını ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, SDI konusunda SD olarak yaprak su potansiyelinin mutlak değerini kullanmışlardır.

Çizelge 2. Dane Sorgum Bitkisinde Her Bitki Gelişme Evresi için Sulama Zamanındaki SDİ. Değerinin Hesaplanması ve SD'nin Belirlenmesi (14).

Gelişme Evresi	CS	SD (bar)	SDI (bar)	SDİ. (bar)	Sulama Zamanında SD (bar)
6-8 yaprak	0.25	12.0	3.00	4.0	16
Sapa kalkma	0.36	12.0	4.32	4.0	11
Püskül çık.süt ol.	0.45	12.0	5.40	4.0	9
Süt olum. sonra	0.25	12.0	3.00	4.0	16
Σ 15.93					

Stegman ve ark.(15), stresli gün indeksini, hava sıcaklığı ve toprak nemini dikkate almak için değiştirmişlerdir.

Mogensen (16), stresli gün etmeni (SD) kavramından hareketle arpa bitkisinin çeşitli büyüme dönemlerindeki kuraklığa duyarlılığını sayısal olarak saptamış, bunu kurak periyotlardaki su stresi ve süresi ile birleştirmiştir. Araştırmacı kuraklık duyarlılığını oransal verim azalması olarak ifade etmiştir.

Bitki Taçı Sıcaklığına Dayalı Stres İndeksleri

Ehrler (17)'in, bitkilerin yaprak sıcaklıklarının stresin iyi bir göstergesi olduğunu ileri sürmesinden günümüze dek bitkilerin yaprak sıcaklıklarının bitki su stresi ile ilişkisini araştıran bir çok çalışma yapılmıştır. Bu konudaki çalışmaları gözden geçiren Jackson (18), bireysel yapraklardan bitki tacına kadar uzanan sıcaklık ölçümlerine dayalı araştırmaların termal radyasyonu ölçen aletlerin (infrared termometrelerin) gelişmesi ile yaygınlaştığını belirtmiştir. Bitki taçı (yüzey) sıcaklığının infrared termometrelerle kolayca ölçümü, bitki taçı sıcaklığı ölçümlerine dayalı bir çok stres indeksinin geliştirilmesine temel oluşturmuştur.

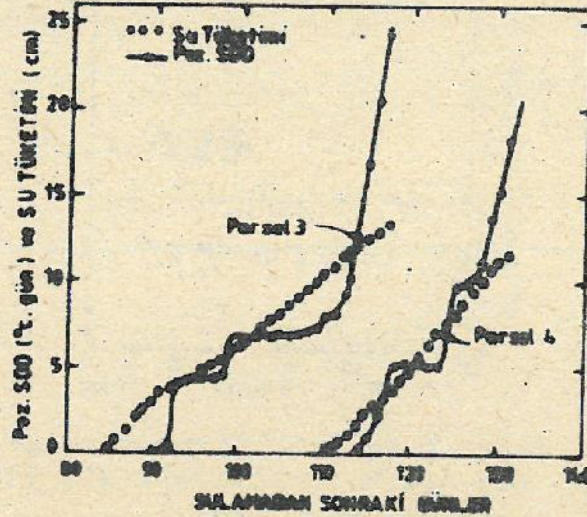
Stres-Derece-Gün (SDD) Kavramı

Idso ve ark.(19) ve Jackson ve ark.(20), buhar basıncı, net radyasyon ve rüzgar hızı gibi çevresel etmenlerin bitki taçı sıcaklığını büyük oranda belirleyeceğini varsayarak Stres-Derece-Gün (SDD) kavramını aşağıdaki biçimde tanımlamışlardır.

$$SDD = \sum_{n=1}^N (T_c - T_a)_n \quad (3)$$

Eşitlikte, T_c = Bitki taçı sıcaklığını ($^{\circ}C$), T_a = Hava sıcaklığını ($^{\circ}C$), SDD ise i 'inci günden başlayan N günlük toplamı göstermektedir.

Idso ve ark.(19), kurak iklim koşullarında SDD pozitif olduğu zaman buğday veriminin azaldığını göstermişlerdir. SDD'yi sulama programlama aracı olarak değerlendiren Jackson ve ark. (20), SDD'yi negatif olduğu zaman sıfır olarak hesapladıkları pozitif SDD ile su tüketimini ekimden sonra geçen günlerin fonksiyonu olarak grafiklemişlerdir. Denemedeki iki parselle ilişkin sonuçlar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İki buğday parseli için ekimden sonraki günlerin fonksiyonu olarak pozitif SDD'ler ve su tüketimi. Ordinattaki rakamsal değerler her iki etmen için aynıdır (20).

Sulamaların pozitif SDD'ler 10 değerine ulaştığı zaman yapılması gerektiği sonucuna ulaşılan çalışmada araştırmacılar, pozitif $T_c - T_a$ değerleri toplamının sulama zamanının belirlenmesinde iyi bir indeks olabileceğini saptamışlardır.

Sıcaklık Stresli Gün (TSD) indeksi

Gardner ve ark. (21), öğle üzeri yapılan bitki tacı sıcaklığı ölçümlerinde $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'in üzerinde standart sapma görülmesinin parsellerin sulama gereksinimine işaret ettiği sonucuna ulaşmışlardır.

Gardner ve ark. (22) ise, bilinmeyen stres düzeyindeki tarla ile aynı bitkinin ekili olduğu aynı tip topraktaki iyi sulanmış (su stresine uğramamış) bir tarlanın tac sıcaklıkları arasında aynı zamanlı bir karşılaştırmayı gerektiren, Sıcaklık Stresli Gün (TSD) ismini verdikleri bir stres indeksi geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, TSD indeksini şöyle tanımlamışlardır:

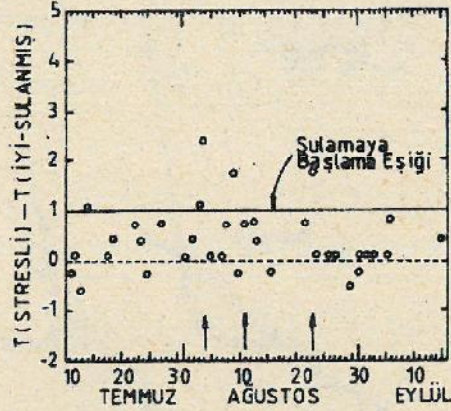
$$TSD = T_c - T_{ow}$$

(4)

Eşitlikte, T_c = Bitki tacı sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), T_{ow} = İyi (tam) sulanmış parselde bitki tacı sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)'dir. TSD indeksinde iyi sulanmış parselin kıyas olarak kullanılması hava sıcaklığı

ğı ve buhar basıncı açığı gibi çevresel etkileri dengeler(18)

Şekil 2, strese uğramış ve iyi sulanmış iki parselin taç sıcaklıkları arasındaki farkın (TSD'nin) değişimini göstermektedir.



Şekil 2. Strese uğramış ve iyi sulanmış mısır parselleri arasındaki taç sıcaklıkları farkları (TSD). Oklar sulamaları göstermektedir (23).

Anılan şekilde gösterilen konu için sulamalar, belirli bir zaman periyodunda strese uğramış parselde ölçülen tüm taç sıcaklıkları ortalamasının iyi sulanmış parseldeki ortalama taç sıcaklığından 1 °C daha sıcak olduğu zamanlarda uygulanmıştır. Diğer bir deyişle sulamaların başlatılması için eşik değeri 1'dir.

Diaz ve ark. (24), farklı tarihlerde ekilen buğdayın evapotranspirasyon ve verim tahmini için TSD indeksinin kullanılabilirliğini, Clawson ve ark. (25) ise, TSD'nin çevresel parametrelere bağlılığını incelemişlerdir.

Taç Sıcaklığı Değişkenliği (CTV)

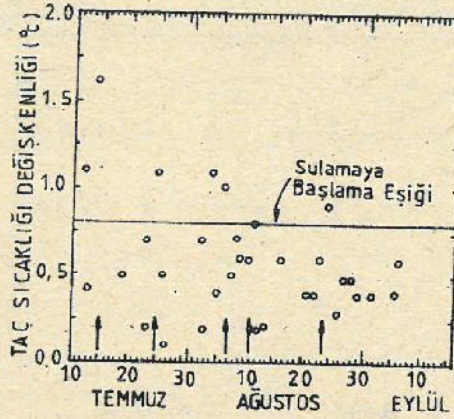
Clawson ve Blad (23), belirli bir ölçüm periyodu süresince bir parsel içinde infrared termometre ile ölçülen tüm sıcaklıkların değişim aralığını (maksimum ve minimum taç sıcaklıkları arasındaki farkı) günlük olarak Taç Sıcaklığı Değişkenliği (CTV) olarak tanımlamışlardır. Şekil 3, sulamaların CTV değeri 0.8'e ulaştığında yapıldığı bir konudaki durumu göstermektedir.

Jackson (18), TSD ve CTV yöntemlerinin uygulanabilir sulama programlama tekniği olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

Kritik Nokta Modeli (CPM)

Geiser ve ark. (26), mısır bitkisinde yaptıkları çalışmada çoklu regrasyon analizini kullanarak bitki taç sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki farkı (ΔT) net radyasyon,

bağıl nem ve sabit (%50) kullanılabilir su düzeyi ile ilişkilendiren bir eşitlik geliştirmişler ve eşitliği grafiklemişlerdir. Araştırmacılar, ölçülen net radyasyon ve bağıl neme



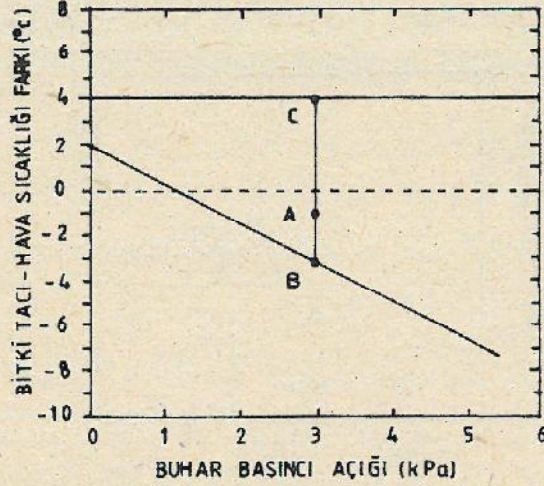
Şekil 3. Büyüme mevsimi süresince mısır bitkisinde taç sıcaklığı değişkenliği (CTV). Oklar, sulamaları göstermektedir (23).

karşılık grafikten bulunacak ΔT değerini kritik değer (ΔT_c) olarak tanımlamışlardır. Çalışmada, ölçülen ΔT değeri (ΔT_m) ile ΔT_c karşılaştırılarak $\Delta T_m \geq \Delta T_c$ olduğunda bitkinin sulama gereksinimi duyduğuna karar verilmiş ve yöntemin sulama programlaması amacıyla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Anılan yöntem, daha sonra Kritik Nokta Modeli (CPM) olarak adlandırılmıştır (27).

Bitki Su Stresi indeksi (CWSI)

Jackson ve ark. (28), enerji dengesi eşitliğinden yararlanarak, bitki su stresini güvenilir biçimde ifade eden Bitki Su Stresi İndeksini (CWSI) geliştirmişlerdir. Bu yöntemde bitki su stresinin nicelikselsel olarak ifade edilebilmesi için Idso ve ark. (29), tarafından geliştirilen deneysel yaklaşım ve Jackson ve ark. (28) tarafından geliştirilen teorik yaklaşım olmak üzere iki yaklaşım söz konusudur. Her iki yaklaşımda da bitki tacı ve hava sıcaklığı arasındaki karşılaştırma ($T_c - T_a$), hesaplama yönteminin temelini oluşturur.

Idso yönteminde potansiyel olarak iyi sulanmış bitkinin $T_c - T_a$ değerini gerçek $T_c - T_a$ değeri ile karşılaştırmak için sıcaklık farkı, buhar basıncı açığı (VPD) ile birleştirilmiştir. Şekil 4'deki alt baz çizgisi iyi sulanmış bitkinin maksimum hızdaki transpirasyonunu göstermektedir ve VPD artarken $T_c - T_a$ 'nın azaldığı görülmektedir. Üst baz çizgisi transpirasyonun olmadığı (maksimum bitki stresi) durumundaki $T_c - T_a$ 'yı göstermektedir ve sıcaklık farkları VPD'ye karşılık değildir. Ölçülen herhangi bir $T_c - T_a$ ve VPD değerinin oluşturduğu nokta teorik olarak bu iki baz çizgisinin arasına düşecektir. Bitki su stresi indeksi, bitkinin transpirasyon kaybının olmadığı durum için 1, bitkinin maksimum düzeyde transpirasyon yaptığı durum için 0 olmak üzere 0 ile 1 ara-



Şekil 4. Idso yöntemi ile CWSI'nin hesaplanması.

sında değişen değerdedir.

Bitki su stresi indeksini (CWSI) hesaplamak için gerekli karşılaştırma aşağıdaki biçimde formüle edilir (30).

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_i]}{[(T_c - T_a)_u - (T_c - T_a)_i]} \quad (5)$$

Eşitlikte, $(T_c - T_a)_i$ alt baz çizgisini $(T_c - T_a)_u$ ise üst baz çizgisini göstermektedir. Alt baz çizgisi iyi sulanan bitkide VPD'nin değişim sınırlarını elde etmek için bir gün boyunca yapılan gözlemlerden doğrusal regresyonla belirlenir. Üst baz çizgisi ise Idso ve ark. (29) yöntemiyle belirlenir.

Idso yöntemiyle CWSI'nin belirlenmesine ilişkin bir örnek Şekil 4'de görülmektedir. Örnekte bitki tacı ve hava sıcaklıkları arasındaki fark -1°C ($T_c - T_a = -1^\circ\text{C}$) ve havanın buhar basıncı açığı 3 kPa ($VPD = 3$) ölçülmüştür. Bu iki değer kesim noktası şekilde A noktası ile gösterilmektedir. A dikey çizgisi alt (B) ve üst (C) baz çizgilerine kadar uzatılır. $CWSI = AB/CB = [-1 - (-3.2)] / [4 - (-3.2)] = 0.30$ olarak hesaplanır.

Enerji dengesi eşitliğinin tümünü kullanan Jackson yöntemi de, 0 (stresiz) ile 1 (tam stresli) arasında değişen bir stres indeksi hesaplar. Bu yöntem; net radyasyon, VPD ölçümleri ile kısıtlama olmaksızın su sağlanması durumunda aerodinamik direnç ve taç direnci hesabını gerektirir. Jackson yöntemiyle CWSI aşağıdaki biçimde hesaplanır.

$$CWSI = 1 - ET_a / ET_p = \frac{\tau (1 + r_c / r_a) - \tau^*}{\Delta + \tau (1 + r_c / r_a)} \quad (6)$$

Eşitlikte, ET_a = Gerçek evapotranspirasyon, ET_p = Potansiyel

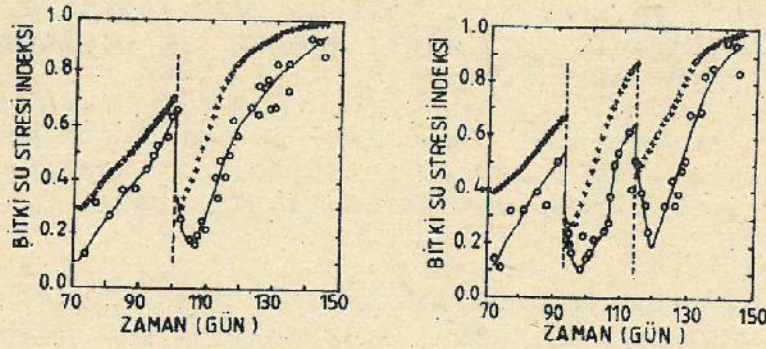
evapotranspirasyon, r = Psikrometrik sabit ($\text{Pa}/^\circ\text{C}$), r_c = Taç direnci (s/m), r_a = Aerodinamik direnç (s/m), r_s = Potansiyel psikrometrik sabit ve Δ = Doygun buhar basıncı-sıcaklık eğrisinin eğimi ($\text{Pa}/^\circ\text{C}$) dir. r_c/r_a oranı ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{r r_a R_n / (q C_p) - (T_c - T_a) (\Delta + r) - (e_a^* - e_a)}{r [(T_c - T_a) - r_a R_n / (q C_p)]} \quad (7)$$

Eşitlikte, R_n = Net radyasyon ($\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$), q = Havanın yoğunluğu (kg/m^3), C_p = Havanın özgül ısısı ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$), e_a^* = T_c sıcaklığında doymuş buhar basıncı (Pa), e_a = Havanın gerçek buhar basıncı (Pa) dir.

Bu yaklaşım CWSI'nin hesaplanmasında oldukça hassas bir yöntem sağlar, ancak aerodinamik ve taç direnci değerlerinin belirlenmesi güçtür. Hatfield ve ark (31) aerodinamik direncin hesaplanmasında, toprak yüzeyinin örtülme derecesi ve atmosferdeki sıcaklık gradientleri gibi bazı sınırlamaları ortaya koymuşlardır.

Şekil 5'de çıkıştan sonra bir ve iki kez sulanmış buğday parsellerinde ölçülen CWSI'nin mevsimlik değişimi kullanılabilir suyun tüketilen yüzdesi ile birlikte grafiklenmiştir. Şekilde kesiksiz çizgiler göz kararı geçirilmiştir. Görüldüğü üzere iki etmen arasında mantıksal bir korelasyon bulunmaktadır.



Şekil 5. Farklı iki buğday parselinde CWSI (o) ve kullanılabilir suyun tüketilen yüzdesi (+)'nin mevsimlik değişimi. Kesikli dikey çizgiler sulamaları göstermektedir (28).

CWSI'nin teorik ve deneysel geçerliliği bir çok araştırmacı tarafından gösterilmiştir (32,33,34,35). Araştırmacılar CWSI'nin sulamaların programlamasında yararlı bir indeks olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Reginato (34), Howell ve ark. (35), pamuk bitkisinde CWSI'nin sulama rejimine ve bitkinin gelişme evresine bağlı olarak 0.2-0.5 arasında değiştiğini göstermişlerdir. Reginato ve Howe (36), pamuk bitkisinde bitki su stresinin göstergesi

olarak yaprak sapı su içeriği ve CWSI değerlerini karşılaştırmışlar ve CWSI'nin daha iyi bir stres göstergesi olduğunu belirlemişlerdir.

CWSI'nin sulama programlamasındaki etkinliği pamuk (34, 35,37), soya (38,39), mısır (40), yonca (41), arpa (42), buğday (43) ve peyzaj bitkileri (44) gibi birçok bitkide araştırılmıştır. Yine birçok çalışmada pamuk bitkisinin lif veriminin mevsimlik ortalama CWSI değeri ile negatif ilişkili olduğu saptanmıştır (34,35,45).

Yöntemlerin Karşılaştırılması ve Sonuçlar

Diaz ve ark. (24), yaptıkları çalışmada taç sıcaklığını esas alan üç indeksin (SDD, TSD, ve CWSI) evapotranspirasyon ve verim tahmini için kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir. Araştırmacılara göre, diğerlerine oranla çok üstün özellikli bir indeks yoktur. Ancak en az veri gerektirmesi ve evapotranspirasyon, verim ile iyi uyum göstermesi açısından SDD, kullanıma en uygun bulunmuştur.

Çim alanlarda taç sıcaklığına dayalı SDD, CWSI ve CPM indekslerini farklı su stresi düzeylerinde karşılaştıran Throssel ve ark. (27), SDD ve CWSI yöntemlerinin çim alanlarda kullanım için daha büyük bir potansiyele sahip olduklarını, ancak üç indeksin de tarla koşullarında kullanımı için bazı iyileştirmelere gerek olduğunu belirtmişlerdir.

Clawson ve ark. (25), TSD ve CWSI indekslerinin birleştirilmesini önermiş ve birleştirmenin bir başlangıç değerlendirmesini yapmışlardır.

Bitki su stresini niceliksel olarak ifade etmek amacıyla geliştirilmiş bir indeks olan SDI'nin SD unsurunu belirlemek için bitkiye, toprağa ve iklime ilişkin zaman alıcı ölçümlere gerek vardır.

SDD kavramının kullanımı basittir, ancak hava koşullarındaki değişimi dikkate almadığından her mevsim ve yörede kullanımı kalibrasyon gerektirir. Bu nedenle kullanım alanı sınırlı olabilir. CWSI ve CPM, havadaki değişimleri hesaba kattığından farklı bölgelere en iyi uyarlanabilir görünürler. CWSI'nin stressiz baz çizgisi, buhar basıncı açığının fonksiyonu olduğundan yer özelliğinden bağımsızdır ve başka bir yer için kalibrasyon gerektirmez. CPM'nin, çevresel hava sıcaklığı, anlık solar radyasyon ve buhar basıncı açığını dikkate alması diğer alanlarda kullanım potansiyelini verir (27).

TSD indeksini hesaplamak için taç sıcaklığı ölçümleri dışında çeşitli atmosferik parametrelere ilişkin başka ölçümler gerekmez. Bu durum TSD'nin çekici yönünü oluşturur. Ancak TSD indeksinin kullanımı, çalışılan alanda iyi sulanmış bir parselin bulunmasını gerektirir (25).

TSD kavramının dikkatle incelenmesi onun çevresel etmenlerden tümüyle bağımsız olmadığını, ancak çevresel etmenlere SDD'den daha az bağımlı olduğunu gösterir. Bu nedenle TSD değerleri universal anlamda uygulanabilir değildir. Çünkü doğru bir bitki su stresi indeksi değerlendirmesi için çevresel etmenler dikkate alınmalıdır (25).

CTV hesaplaması, potansiyel olarak önemli örnekleme sorunlarına yol açtığından su stresinin şiddetinin belirlenmesinde CWSI'nın yanında etkin bir gösterge değildir (40).

CWSI, atmosferik buhar basıncı, rüzgar ve net radyasyon gibi çevresel etmenlerin bitkinin su durumu üzerindeki etkilerini hesaba katan bir indekstir (24). Bu özellikler nedeniyle günümüze dek yapılan çalışmalarda CWSI ile elde edilen sonuçlar diğer indekslere oranla daha memnuniyet verici bulunmuştur. Ancak, CWSI'nın belirlenmesinde infrared termometrelerin kullanımına ilişkin örnekleme alanı, toprak örtü yüzeyinin etkisi gibi sınırlamalar konusunda halen teknikte iyileştirmeler yapılması gereği vardır ve çalışmalar sürmektedir.

CWSI'nın sulama programlaması amacıyla kullanımı, çeşitli bitkilerin kritik CWSI değerini belirleyen çalışmaların tamamlanması, yukarıda anılan iyileştirmelerin yapılması ve infrared termometrelerin daha ucuza maledilmesi ile yaygınlaşacaktır.

Kaynaklar

1. Hiler, E.A., Howell, T.A., Bordovsky, D.G., Stress Day Indeks... A New Concept for Irrigation Timing. Proc. of "Optimization of Irrigation and Drainage Systems". Amer. Soc. of Civ. Eng., New York, 579-595, 1972.
2. Nakayama, F.S., Reginato, R.J., Simplifying Neutron Moisture Meter Calibration. Soil Sci. 133:48-52, 1982.
3. Heermann, D.F., Jensen, M.E., Adapting Meteorological Approaches in Irrigation Scheduling to High Rainfall Areas. National Irrigation Symposium Papers. pp.10, 1970.
4. Jensen, M.E., Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements. Irrig. Drain. Div., Amer. Soc. Civ. Eng., New York, 1974.
5. Kincaid, D.C., Heermann, D.F., Scheduling Irrigations Using a Programmable Calculator. U.S. Agric. Res. Serv. Rep. ARS-NC-12, 1-55, 1974.
6. Jensen, M.E., Wright, J.L., The Role of Evapotranspiration Models in Irrigation Scheduling. Trans. ASAE 21:82-87, 1978.

7. Wright, J.L., Jensen, M.E., Development and Evaluation of Evapotranspiration Models for Irrigation Scheduling. Trans ASAE 21: 88-96, 1978.
8. Heermann, D.F., Irrigation Scheduling. Operation Research in Agriculture. Ed. by D. Yaron, C. Tapiero. North-Holland Publ. Comp. pp. 501-516, 1980.
9. Longenecker, D.E., Lyerly, P.J., Moisture Content of Cotton Leaves and Petioles as Related to Environmental Moisture Stress. Agron. J. 61: 687-690, 1969.
10. Namken, N.M., Bartholic, J.F., Runkles, J.R., Monitoring Cotton Plant Stem Radius as an Indication of Water Stress Agron. J. 61: 891-893, 1969.
11. Grimes, D.W., Yamada, H., Cotton Growth Related to Plant's Water Status. Calif. Agric. Nov.-Dec., 13-14, 1982.
12. Idso, S.B., Allen, S.G., Kimball, B.A., Choudhury, B.J., Problems With Porometry: Measuring Net Photosynthesis by Leaf Chamber Techniques. Agron. J. 81: 475-479, 1989.
13. Hiler, E.A., Clark, R.N., Stress Day Index to Characterize Effect of Water Stress on Crop Yields, Trans. ASAE 14: 757-761, 1971.
14. Hiler, E.A., Howell, T.A., Lewis, R.B. Boss, R.B., Irrigation Timing by the Stress Day Index Method. Trans. ASAE 14: 393-398, 1974.
15. Stegman, E.C., Schiele, L.H., Bauer, A., Plant Water Stress Criteria for Irrigation Scheduling. Trans. ASAE 17: 850-855, 1976.
16. Mogensen, V.O., Drought Sensitivity at Various Growth Stages of Barley in Relation to Relative Evapotranspiration and Water Stress. Agron. J. 72: 1033-1038, 1980.
17. Ehrler, W.L., Cotton Leaf Temperature as Related to Soil Water Depletion and Meteorological Factors. Agron. J. 65: 404-409, 1973.
18. Jackson, R.D., Canopy Temperature and Crop Water Stress. Advances in Irrigation, Vol.1. (Ed. by D.Hillel). Academic Press. New York, 43-85, 1982.
19. Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J., Remote Sensing of Crop Yields. Science 196: 19-25, 1977.
20. Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B. Wheat Canopy Temperature : A Practical Tool for Evaluating Water Requirements. Water Resour. Res. 13: 651-656, 1977.

21. Gardner, B.R., Blad, B.L., Watts, D.G., Plant and Air Temperatures in Differentially Irrigated Corn Agric. Meteorol. 25: 207-217, 1981.
22. Gardner, B.R., Blad, B.L., Garrity, D.P., Watts, D.G., Relationships Between Crop Temperature, Grain Yield, Evapotranspiration, and Phenological Development in Two Hybrids of Moisture Stressed Sorghum. Irrig. Sci. 2: 213-224, 1981.
23. Clawson, K.L., Blad, B.L., Infrared Thermometry for Scheduling Irrigation of Corn. Agron. J. 74: 311-316, 1982.
24. Diaz, R.A., Matthias, A.D., Hanks, R.J., Evapotranspiration and Yield Estimation of Spring Wheat from Canopy Temperature. Agron. J. 75: 805-810, 1983.
25. Clawson, K.L., Jackson, R.D., Pinter, Jr., P.J., Evaluating Plant Water Stress with Canopy Temperature Differences. Agron. J. 81: 858-863, 1989.
26. Geiser, K.M., Slack, D.G., Allred, E.R., Stange, K.W., Irrigation Scheduling Using Crop Canopy-Air Temperature Difference. Trans. ASAE 25: 689-694, 1982.
27. Throssell, C.S., Carrow, R.N., Milliken, G.A., Canopy Temperature Based Irrigation Scheduling Indices for Kentucky Bluegrass Turf. Crop. Sci. 27: 126-131, 1987.
28. Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. Pinter, Jr. P.J., Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. Water Resour. Res. 17: 1133-1138, 1981.
29. Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, Jr. P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., Normalizing the Stress-Degree-Day Parameter for Environmental Variability. Agric. Meteorol. 24: 45-55, 1981.
30. Hatfield, J.L., Measuring Plant Stress with an Infrared Thermometer. HortScience. 25: 1535-1538, 1990.
31. Hatfield, J.L., Wanjura, D.F., Barker, G.L., Canopy Temperature Response to Water Stress Under Partial Canopy. Trans. ASAE 28: 1607-1611, 1985.
32. Idso, S.B., Reginato, R.J., Reicosky, D.C. Hatfield, J.L., Determining Soil-Induced Plant Water Potential Depressions in Alfalfa by Means of Infrared Thermometry. Agron. J. 73: 826-830, 1981.
33. Idso, S.B., Reginato, R.J., Farah, S.M., Soil-and Atmosphere-Induced Plant Water Stress in Cotton as Inferred from Foliage Temperatures. Water Resour. Res. 18: 1143-1148, 1982.

34. Reginato, R.J., Field Quantification of Crop Water Stress. Trans. ASAE 26: 772-775, 781, 1983.
35. Howell, T.A., Hatfield, J.L., Yamada, H., Davis, K.R., Evaluation of Cotton Canopy Temperature to Detect Crop Water Stress. Trans. ASAE 27: 84-88, 1984.
36. Reginato, R.J., Howe, J., Irrigation Scheduling Using Crop Indicators. J.Irrig. Drain. Eng. 111: 125-133, 1985.
37. Pinter, Jr., P.J., Reginato, R.J., A Thermal Infrared Technique for Monitoring Cotton Water Stress and Scheduling Irrigations. Trans. ASAE 25: 1651-1655, 1982 .
38. Nielsen, D.C., Scheduling Irrigations for Soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI). Field Crops Res., 23: 103-106, 1990.
39. Yazar, A., Utilization of Infrared Thermometry Technique for Assessing Crop Water Stress and Irrigation Scheduling for Soybean. Doğa Tr.J. of Agriculture and Forestry, 14: 517-533, 1990.
40. Nielsen, D.C., Gardner, B.R., Scheduling Irrigations for Corn with the Crop Water Stress Index (CWSI). Appl. Agr. Res. 2: 295-300, 1987.
41. Abdul-Jabbar, A.S., Lugg, D.G., Sammis, T.W., Gay, L.W., Relationships Between Crop Water Stress Index and Alfalfa Yield and Evapotranspiration. Trans. ASAE 28: 454-461, 1985.
42. Tubaileh, A.S., Sammis, T.W., Lugg, D.G., Utilization of Thermal Infrared Thermometry For Detection of Water Stress in Spring Barley. Agric. Water Management 12: 75-85, 1986.
43. Howell, T.A., Musick, J.T., Tolck, J.A., Canopy Temperature of Irrigated Winter Wheat. Trans. ASAE 29: 1692-1698, 1706, 1986.
44. Niemiera, A.X., Goy, M., Use of Crop Water Stress Index to Schedule Irrigation of Freeway Landscape Plants. HortScience 25: 302-305, 1990.
45. Wanjura, D.F., Hatfield, J.L., Upchurch, D.R., Stress Index Relationships with Crop Productivity. ASAE paper No. SWR 88-102, 1980.