

BITKİ SU STRESİ İNDEKSİNİ (CWSI) BELİRLEME YÖNTEMLERİ

Ruhi BAŞTUĞ

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

Özet : Bitkilerde su stresinin sayısal olarak ifade edilmesi durumunda, artan su stresini bitkilerin verimliliği, elde edilecek ürünün miktarı ve kalitesi ile ilişkilendirmek mümkün olur. Su stresinin optimum düzeyi tanımlanacak olursa, bu bilgi yetiştirici tarafından sulama programlaması ve işletmeciliği kararlarında kullanılabilir.

Bitki su stresi indeksi (CWSI) belirli bir bitki veya tarlada su stresini saptamak için geliştirilmiş bir indeks olup infrared termometre tekniği ile ölçülen bitki tacı sıcaklıkları ve buna karşılık gelen havanın buhar basıncı açığını (VPD) kullanır.

Bu makalede, bitki su stresi indeksini (CWSI) belirlemede kullanılan teorik (enerji dengesi) yöntem, empririk (deneysel= grafiksel) yöntem ve uygulamalı yöntemin açıklanması amaçlanmıştır.

The Methods of Determining Crop Water Stress Index (CWSI)

Abstract : If water stress of a plant can be numerically quantified, it can be correlated the effect of increasing water stress on crop productivity, amount of yield and product quality. When an optimum level of water stress has been defined, the information can be used by the grower in irrigation scheduling and management decisions.

The crop water stress index (CWSI), uses canopy temperatures measured with the infrared thermometry technique and a corresponding air vapor pressure deficits (VPD) to determine the water stress of a particular plant or field.

The purpose of this article is to explain the methods for determining CWSI, the theoretical (energy balance) method, the emprical (graphical) method and the applied method.

Giriş

Bitki dokularındaki su eksikliği sonucunda oluşan bitki su stresi, bitkilerin büyüme süreçlerini sürdürme yeteneklerini azaltır. Genel olarak bitki su stresi kuru tarım yapılıyorsa kuraklık, sulu tarım yapılıyorsa yetersiz ve düşük randımanlı sulamalar sonucunda ortaya çıkar (1). Toprak içindeki suyun, bitkilerin atmosferik buharlaşma isteminden daha az bir hızda transpirasyon yapmasına neden olacak düzeyde yetersiz kalması bitki su stresine yol açar. Doğal olarak, büyüme mevsimi boyunca daha az su stresi çeken bitki daha çok ürün verecektir (2).

Sulama programlamasında bitkisel su eksikliği ölçütlerinin kullanımına yönelik birçok yöntem önerilmiştir. Bu amaçla yaprak sıcaklığının, bitki su eksikliğinin bir ölçütü olabileceği ileri sürülmüştür (3,4). Daha sonraki araştırmalar, yaprak suyu potansiyelinin de bu amaçla kullanılabilir bir ölçüt olabileceğini göstermiştir (5,6). Ancak yöntem zaman alıcı ölçümler gerektirdiğinden, tarla koşullarında kullanımı sınırlıdır. Bunun üzerine bitki su stresini karakterize etmede bitki sıcaklığı ölçümlerine olan ilgi artmıştır.

Başlangıçta bitki (yaprak) sıcaklığı ölçümleri, yapraklara temas eden veya yaprak içine gömülen sensörlerle yapılmıştır (7). Ancak sıcaklık ölçümlerinin tekil yapraklar üzerinde yapılması nedeniyle, noktasal ölçümlere özgü olumsuzluklar söz konusu olmuştur. Daha sonra Ehrler ve ark. (8), yaprak-hava sıcaklığı farkının atmosferik buhar basıncı açığı (VPD) ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu bulgudan sonra infrared termometre tekniği üzerinde bir çok çalışma yapılmıştır (9-12).

Sulama programlamasında infrared termometre tekniği, yapraklardan transpirasyon yoluyla buharlaşan suyun enerji tüketimi sonucunda yaprakları serinlettiği gerçeğine dayanır. Buharlaşma ve enerji tüketim hızı yaprağın içinde büyüdüğü atmosferin buhar basıncı açığına bağlıdır. Bitki tarafından kullanılan su sınırlandıkça transpirasyon azalır ve yaprak sıcaklıkları artar, giderek çevresindeki atmosferden daha sıcak olur (13).

Infrared termometrelerdeki gelişmeler, çok sayıda bitkinin hızlı bir biçimde incelenmesini ve onların birleşik sıcaklıklarının (bitki taç sıcaklığı) ölçülmesini sağlayarak

noktasal ölçümlerin olumsuzluklarını en az düzeye indirmiştir. Günümüzde infrared termometrelerin elle taşınabilir, hızlı ölçüm yapabilir, ve görüş alanı açısı (FOV) içindeki tüm bitki yüzeylerinin sıcaklıkları ortalamasını verebilir özellikle olmaları bitki taç sıcaklığı ölçümleri için en uygun alet niteliğini kazanmalarını sağlamıştır (13).

Idso ve ark.(14), Ehrler ve ark.(8)'nin gözlemlerini birkaç yörede mikro çevre ile ilişkili olarak doğrulamışlardır. Araştırmacılar, anılan ilişkinin farklı çevresel etkileşimlerde bitki taç-hava sıcaklığı (Tc-Ta) biçiminde normalize olduğunu ileri sürerek bitki su stresini ölçümlemek için bitki su stresi indeksini (CWSI) geliştirmişlerdir. Idso (15), havanın açık olduğu koşullarda 26 farklı bitki çeşidi için "su stressiz baz çizgileri" belirlemiş ve bu baz çizgilerinin belirli bitkilerde fenolojik evrelere göre farklılık gösterdiğini saptamıştır. Jackson ve ark.(10) ise, CWSI'nin teorik formülasyonunu geliştirmişlerdir. CWSI'nin ve bitki taç sıcaklığının sulama zamanının belirlenmesinde kullanımına ilişkin birçok çalışma yapılmıştır (16,2,1).

Bitki taç sıcaklığı-çevresel hava sıcaklığı farkı(Tc-Ta) ile VPD arasındaki basit doğrusal ilişki CWSI baz çizgisi olarak adlandırılır. Bu makalede, baz çizgilerini geliştirmek, dolayısıyla CWSI'ni belirlemek için Jackson ve ark.(10) tarafından önerilen teorik (enerji dengesi),Idso ve ark (14)-tarafından önerilen empirik (deneyimsel=grafiksel) ve Garrot (17) tarafından önerilen uygulamalı yöntem olmak üzere kullanılan üç yöntemin açıklanması amaçlanmıştır.

Teorik Yöntem (Enerji Dengesi Yöntemi)

Bitki yüzeyindeki enerji dengesi aşağıdaki biçimde ifade edilebilir (18):

$$R_n + G + H + \lambda E = 0 \quad (1)$$

burada R_n , net radyasyon akısı ($W m^{-2}$), G toprağa olan ısı akısı ($W m^{-2}$), H hissedilir ısı akısı ($W m^{-2}$), λ buharlaşma gizli ısısı ($J kg^{-1}$) ve E buharlaşma akısı ($kg m^{-2} s^{-1}$) olup, bitki yüzeyine doğru olan tüm terimler pozitif olarak tanımlanmıştır. Hissedilir ısı akısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$H = - \rho C_p (T_c - T_a) / r_a \quad (2)$$

eşitlikte ρ havanın yoğunluğu (kg m^{-3}), C_p sabit basınçta havanın özgül ısısı ($\text{J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{kg}^{-1}$) ve r_a ise bitki tacı aerodinamik direnci (s m^{-1}) dir. Gizli ısı akısı aşağıdaki biçimde tanımlanabilir:

$$\lambda E = - \rho C_p (e^*_c - e_a) / [\gamma (r_a + r_c)] \quad (3)$$

burada e^*_c , T_c sıcaklığındaki doymun buhar basıncını (kPa), e_a çevresel havanın buhar basıncını (kPa), γ psikrometrik sabiti ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) göstermekte olup [$P C_p L^{-1} \text{s}^{-1}$, burada P barometrik basınç (kPa) ve ϵ su ve havanın mol ağırlıkları oranı (0.622) dir] biçiminde tanımlanır, r_c ise bitki tacı difüzyon direnci (s m^{-1}) dir.

Eşitlik 1, 2 ve 3'ün birleştirilmesi, G 'nin ihmal edilebilir kabul edilmesi ve Δ 'nın doymun buhar basıncı-sıcaklık ilişkisinin eğimi olarak tanımlanması (yani, $\Delta = (e^*_c - e^*_a) / (T_c - T_a)$, birimi $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) sonucunda, taç ve hava sıcaklıkları arasındaki farkı havanın buhar basıncı açığı: $(e^*_c - e_a)$, net radyasyon, aerodinamik ve bitki dirençleri ile ilişkilendiren aşağıdaki eşitlik elde edilir (10):

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma (1 + r_c / r_a)}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} - \frac{e^*_a - e_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (4)$$

burada e^*_a çevresel hava sıcaklığındaki doymun buhar basıncı (kPa) dir. Öte yandan $e^*_a - e_a = \text{VPD}$ dir.

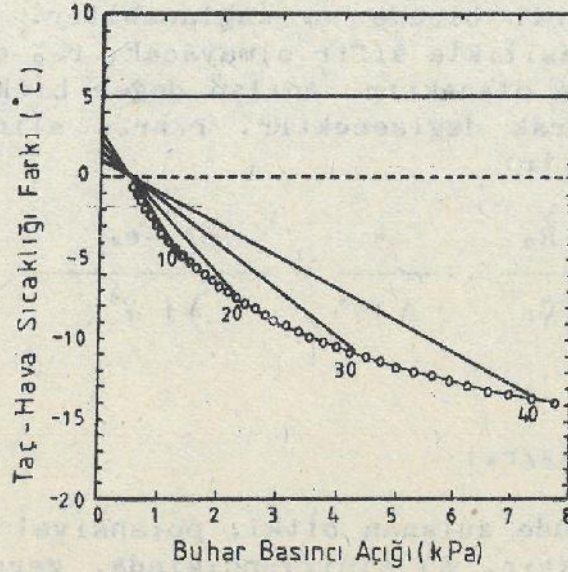
$T_c - T_a$ 'nın üst sınırı, bitki direncinin sınırsız artmasına izin verilerek (yani $r_c \rightarrow \infty$ iken) Eşitlik 4'den aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$T_c - T_a = r_a R_n / \rho C_p \quad (5)$$

Alt sınır ise, Eşitlik 4'de $r_c = 0$ 'a eşitlenerek (serbest su yüzeyi r_c 'ü oynayan ıslak bitkilerdeki durum) bulunur:

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{(e^*_a - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad (6)$$

Eşitlik 4 ve 6, $T_c - T_a$ ve buhar basıncı açığı ($e^*_a - e_a$) arasındaki doğrusal ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu nedenle, belirli bir sıcaklık için alt sınır, $e^*_a - e_a = 0$ (doygun hava) daki arakesitten $e^*_a - e_a = e^*_a$ (tamamen kuru hava) değerine kadar uzanan bir çizgidir (Şekil 1). Δ , hem eğim ve hem de ara kesitte görüldüğünden, her iki terim de sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle alt sınır sıcaklığa bağlı olup, her bir sıcaklık için



Şekil 1. Taç - hava sıcaklığı farkının üst ve alt sınırları. Yuvarlaklar; belirli bir sıcaklıkta, o sıcaklık için maksimum buhar basıncı açığındaki alt sınırı göstermektedir. Grafik üzerindeki rakamlar gösterilen doğru çizgilerin hesaplandığı sıcaklıkları belirtmektedir. Üst sınır, $r_a = 10 \text{ s m}^{-1}$ ve $R_n = 600 \text{ W m}^{-2}$ varsayımı ile hesaplanan $T_c - T_a = 5$ yatay çizgisiyle gösterilmiştir (10).

bir dizi çizgiden oluşur. Şekil 1'de $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ve 40°C olmak üzere dört sıcaklık için çizgiler gösterilmiştir. Şekildeki yuvarlaklar, 0° den 41°C 'a kadar 1°C 'lık artımlarla çizgilerin bitim noktalarını göstermektedir.

Şekil 1'de yuvarlaklarla gösterilen alt sınır, genellikle pek karşılaşılmayan bir durum olan tamamen kuru atmosfer içindir. Yine, bu sınırın hesaplanmasında net radyasyon ve direnç terimleri gibi çeşitli etmenler sabit tutulmuştur. Doğal koşullarda hava tamamen kuru değildir ve onu etkileyen çeşitli çevresel etmenler söz konusudur. Bu nedenle, Şekil 1'deki eğrisel alt sınırla uygulamada karşılaşılmaz, ancak deneysel olarak Idso ve ark.(14) tarafından gözlemlendiği gibi

doğrusala yakın bir ilişki elde edilebilir.

Eşitlik 6, potansiyel düzeyde buharlaşmanın olduğu serbest su yüzeyinden (ıslak bitki yüzeyinden) buharlaşma koşulunu temsil etmektedir. Ancak sulanan alanlarda bitkinin potansiyel düzeyde buharlaşma yapması için yüzeyinin ıslak olması zorunluluğu sözkonusu değildir. Bitki yüzeyi kuru kalırken toprağa yeterli ölçüde su sağlanabilir. Bu durumda taç direnci büyük olasılıkla sıfır olmayacak, r_{op} olarak gösterilecek bir değerde olacaktır. Anılan değer bitki cinsi ve çeşidine bağlı olarak değişecektir. $r_c=r_{op}$ alınırca aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma^*}{\Delta + \gamma^*} - \frac{e^*_a - e_a}{\Delta + \gamma^*} \quad (7)$$

Burada,

$$\gamma^* = \gamma (1 + r_{op}/r_a) \quad (8)$$

dır. Yeterli ölçüde sulanan bitki, potansiyel düzeyde transpirasyon yapacaktır. Su sınırlandığında, gerçek evapotranspirasyon potansiyelden daha az olacaktır. O halde, gerçek evapotranspirasyonun potansiyele oranı bitki su durumunun bir indeksi (ölçütü) olmalıdır. Eşitlik 1,2 ve 3 birleştirilir ve λE için çözümlerse aşağıdaki eşitlik bulunur:

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (e^*_a - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (9)$$

Bu, evapotranspirasyonu taç ve aerodinamik dirençlere bağlı olarak ifade eden Penman-Monteith eşitliğidir (18). Gerçek evapotranspirasyonun (herhangi r_c için λE 'nin), potansiyele ($r_c=r_{op}$ için λE_p 'ye) oranı; γ^* 'nin Eşitlik 8'deki gibi tanımlanmasıyla aşağıdaki eşitliği verecektir:

$$E/E_p = \frac{\Delta + \gamma^*}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (10)$$

Jensen (19) ile Howell ve ark. (20), $r_{op}=0$ yani $\gamma^* = \gamma$ durumu için Eşitlik 10'u tartışmışlardır. Eşitlik 10'un yeniden düzenlenmesi, r_c 'yi E/E_p terimleriyle verecektir.

E/E_p oranı, 1 (suyun bol olduğu, r_c/r_{cp} durumu) ile 0 (kullanılabilir suyun olmadığı, $r_c \rightarrow \infty$ durumu) arasında değişir. Bitki-su ilişkileri çalışmalarında bitkinin stressiz koşullardan stres koşullarına gittiği düşünülür. Bu nedenle, stres indeksinin 0'dan 1'e gitmesi istenir. Sonuç olarak, bitki su stresi indeksi (CWSI) şöyle tanımlanabilir:

$$CWSI = 1 - E/E_p = \frac{\gamma (1 + r_c/r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma (1 + r_c/r_a)} \quad (11)$$

Eşitlik 10 veya 11'i kullanarak CWSI veya E/E_p 'yi hesaplamak için r_c/r_a değerleri gerekir. Bu, Eşitlik 4'ün yeniden düzenlenmesiyle bulunur. Sonuçta r_c/r_a 'yı net radyasyon, taş ve hava sıcaklıkları, buhar basıncı açığı ve aerodinamik direnç terimleriyle veren aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{\gamma r_a R_n / (\rho C_p) - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e^* - e_a)}{\gamma [(T_c - T_a) - r_a R_n / (\rho C_p)]} \quad (12)$$

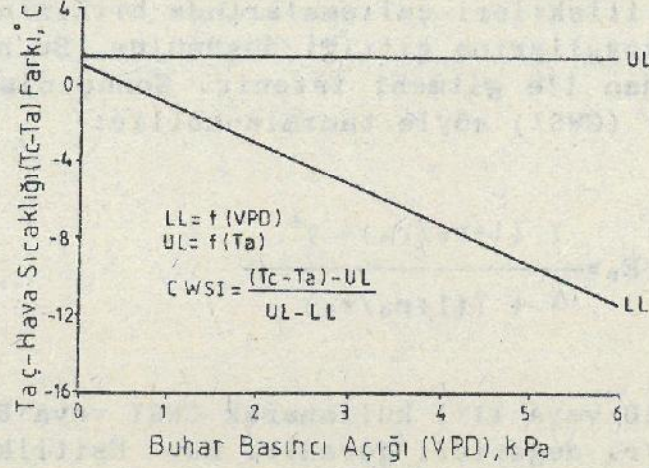
Uygulamada CWSI'yi elde etmek için, Eşitlik 12 kullanılarak bulunan r_c/r_a , Eşitlik 11'de yerine konulur (10).

Empirik (Deneyimsel=Grafiksel) Yöntem

Bitki su stresi indeksi (CWSI)'nin empirik (deneyime dayalı, gözlemsel) olarak ilk sunuluşu Idso ve ark.(14) tarafından verilmiştir ve su stresi çekmeyen bitkiyi temsil eden alt baz çizgisi ile transpirasyon yapmayan (su stresi çeken) bitkiyi temsil eden üst baz çizgisi olmak üzere iki çizgiden oluşur. Şekil 2, kışlık buğdayda başaklanma öncesi dönem için alt ve üst baz çizgisini göstermektedir. Bu durumda,

$$CWSI = [(T_c - T_a) - LL] (UL - LL)^{-1} \quad (13)$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Burada UL, transpirasyonun olmadığı üst baz çizgisini, LL ise su stresinin olmadığı alt baz çizgisini temsil etmekte olup belirli bir T_a ve VPD'de belirlenirler.



Şekil 2. Kışlık buğdayda, basaklanma öncesi dönem için alt ve üst baz çizgileri ile bitki su stresi indeksinin gösterimi (21).

Eşitlik 4'ün, empririk olarak belirlenen ve aşağıdaki biçimde ifade edilen "su stressiz baz çizgisi" ile aynı olduğu Idso (22) ile O'Toole ve Real (23) tarafından gösterilmiştir.

$$Tc - Ta = a - b \text{ VPD} \quad (14)$$

Eşitlikte a ($^{\circ}\text{C}$) ve b ($^{\circ}\text{C kPa}^{-1}$) doğrusal regresyon katsayıları (sırasıyla arakesit ve eğim) dir. O'Toole ve Real(23), Eşitlik 14 ile gösterilen doğrusal ilişkinin, farklı teorik hesaplamalar (sabit R_n , r_a ve r_c) için en iyi yaklaşım olduğunu saptamışlardır. Gerçekte teorik hesaplamalar e_a sabit tutulup T_a değiştirildiğinde iç bükey, T_a sabit tutulup e_a değiştirildiğinde dış bükey olmaktadır. Ayrıca, Δ 'yı hesaplama yöntemi, teorik hesaplamaları etkileyebilir. Jackson ve ark.(10) Δ 'nın T_c ve T_a 'nın ortalama sıcaklığında hesaplanmasını önerirken Idso(22), Δ 'nın $(e^*c - e^*a)(Tc - Ta)^{-1}$ olarak hesaplanmasını önermişlerdir.

Eşitlik 4'de görüldüğü gibi, taç-hava sıcaklığı farkı; net radyasyon, hava sıcaklığı, çevresel buhar basıncı, barometrik basınç, rüzgar hızı, atmosferik stabilite ve r_c 'yi belirleyen, bitkiye özgü birçok faktör gibi çok sayıdaki parametre ile karmaşık bir ilişki gösterir. Yinede, bazı çevrelerde ilişki daha karmaşık olduğu halde [örneğin, Geiser ve ark.,(16); Hipps ve ark.,(24)] diğer bazı çevrelerde taç-hava sıcaklığı farkı ilişkisi sadece VPD'ye bağlı [örneğin, Idso,

(15);Howell ve ark.(1)] görünmektedir. Öte yandan alt baz çizgisi, gölgeleme koşulları ve küçük taneli tahıllarda vejetatif evreden generatif evreye geçişte olduğu gibi bitki morfolojisi ile büyük ölçüde değişir (15).

Idso ve ark. (14), transpirasyonun olmadığı üst baz çizgisinin VPD'ye bağlı olmayacağını ileri sürmüş ve transpirasyon yapmayan bitkilerde Tc-Ta'yı hesaplamak için aşağıdaki yöntemi sunmuştur.

$$Tc-Ta = a-b VPG$$

(15)

burada a ve b, su stressiz alt baz çizgisi eşitliğinden (Eşitlik 14) belirlenir ve VPG ise, sıfır taç-hava sıcaklığı gradienti için gerekli negatif atmosferik buhar basıncı gradientidir [$VPG = e^*(Ta) - e^*(Ta+a)$ olup e^* sözkonusu sıcaklıkta doygun buhar basıncıdır]. Böylece, bu yöntemin kullanılmasıyla belirlenen UL yalnızca Ta (hava sıcaklığına) ya bağlı olacaktır.

Jackson ve ark.(10)'nın verdiği Eşitlik 5, empirik bulguların çoğuluyla uyumlu olarak, pozitif bir UL tahmin eder. O'Toole ve Hatfield (25), r_a 'nın rüzgar hızıyla ters ilişkili olabileceği nedeniyle Idso ve ark.(14)'nin UL yönteminin de, Eşitlik 5'le tahmin edildiği gibi rüzgar hızına bağlı olması gerektiğini belirlemişlerdir. Hipps ve ark.(24) da, diğer çevresel parametrelerin, özellikle net radyasyon ve rüzgar hızının, CWSI için baz çizgilerinin geliştirilmesi ve yorumlanmasında kullanılmasına yol açan teorik geliştirmeleri tartışmışlardır.

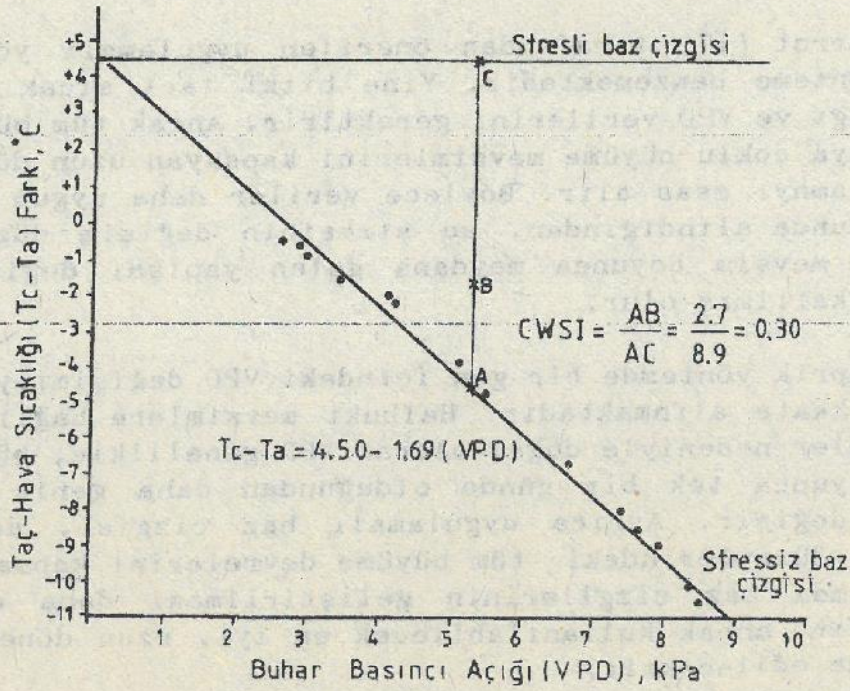
Empirik yöntemle CWSI belirlemesi bir örnek değerlendirme ile açıklanacaktır. Bu amaçla, stressiz baz çizgisini geliştirmek için sulama yapılarak fazla suyun drenajına izin vermek ve bitkinin daha önceden geçirmiş olabileceği herhangi bir su stresinin etkisinden kurtulmasına olanak vermek amacıyla sulamadan sonra 2-3 gün beklenir ve genellikle 9:00-16:00 arasında olmak üzere bir gün boyunca yarım saatte bir ölçüm alınır. Çizelge 1, örneğe ilişkin ölçülen değerleri göstermektedir. Örnekteki bitki taç sıcaklığı değerleri kuzey doğu, güney ve batı yönlerden olmak üzere dört yönden alınan ölçümlerin ortalamasıdır.

Çizelge 1. Alt Baz Çizgisini Geliştirmek İçin Ölçülen Değerler

Ölçüm Zamanı	Bitki Taç Sıc. Tc (°C)	Hava Sıc. Ta (°C)	Taç-Hava Sıc. Tc-Ta (°C)	VPD (kPa)
9:00	27.7	28.0	-0.3	2.6
9:30	28.2	28.6	-0.4	2.8
10:00	28.3	29.1	-0.8	3.0
10:30	28.4	29.8	-1.4	3.4
11:00	28.5	30.4	-1.9	4.1
11:30	28.5	30.5	-2.0	4.1
12:00	28.6	32.4	-3.8	5.1
12:30	28.8	33.5	-4.7	5.5
13:00	28.6	34.5	-5.9	6.1
13:30	28.7	35.4	-6.7	6.7
14:00	28.7	36.6	-7.9	7.4
14:30	28.5	37.4	-8.9	7.9
15:00	28.4	38.3	-9.9	8.4
15:30	28.6	38.9	-10.3	8.5
16:00	28.4	36.7	-8.3	7.6

Stressiz baz çizgisi, Tc-Ta ile VPD arasındaki iki değişkenli doğrusal regresyon ilişkisidir. Tc-Ta değerleri VPD'ye bağımlıdır. Bu nedenle VPD bağımsız, Tc-Ta bağımlı değişken olarak alınır. Çizelge 1'deki değerler kullanılarak elde edilen doğrusal ilişki $Tc-Ta=4.50-1.69 VPD$ olarak belirlenebilir (Şekil 3). Şekil 3'de, üstteki düz çizgi transpirasyonun olmadığı (stresli) baz çizgisidir.

Transpirasyonun olmadığı koşulda bitki tacından su kaybı olmadığından bitki yapraklarını serinletici evaporatif etki de sözkonusu değildir. Bu nedenle yaprağın güneşten absorbe ettiği enerji, güneş altındaki cansız yeşil objelere benzer biçimde ısının birikimine neden olur. Dolayısı ile Şekil 3'deki stresli baz çizgisi VPD'lerin geniş değişim sınırları içinde beklenebilecek en sıcak bitki tacını temsil etmektedir. Üst baz çizgisi hava sıcaklığı ve rüzgar hızına bağlı olarak değişmekle birlikte çoğu tarımsal bitkilerde 4.5°C'lık Tc-Ta farkına karşılıktır. Alt baz çizgisi ile birlikte üst baz çizgisinin geliştirilmesi de istenirse alt baz çizgisi ölçümleri yapılan yere yakın bir yerdeki bir grup bitkinin kök-



Şekil 3. Çizelge 1'de verilen değerler için Tc-Ta ile VPD ilişkisinin grafiksel gösterimi (Temel grafik).

leri kazılarak çıkartılır, ancak bir destekle taç içerisinde tutulur. İki-Üç gün kurumaya bırakılan bitkilerde alt baz çizgisi için alınan verilerin aynı toplanır.

Şekil 3'de $VPD=5.25$ kPa iken bitki taç sıcaklığı 34.3 °C ve hava sıcaklığı 36.0 °C ölçülmüşse $T_c - T_a = 34.3 - 36.0 = -1.7$ °C olarak hesaplanır ve Şekil 3'de B noktası olarak gösterilmiştir. B noktasından ordinata çizilen paralelin alt ve üst baz çizgilerini kestiği noktalar sırasıyla A ve c olsun. Potansiyel Tc-Ta farkı $T_c - T_a = 4.50 - 1.69(5.25) = -4.4$ °C (Şekil 3'de A noktası) olacaktır. Potansiyel Tc-Ta farkından bitkide ölçülen değer farkı $-1.7 - (-4.4)$ olup $+2.7$ °C'ye eşittir (Şekil 3 de AB mesafesi). $VPD=5.25$ kPa daki Tc-Ta'nın potansiyel değişim sınırı -4.4 ile $+4.5$ °C toplamı (bu mesafeler mutlak değerlerdir ve CWSI hesaplamasında daima pozitif sayılardır) 8.9 °C'ye eşittir (Şekil 3'de AC mesafesi). CWSI, AB'nin AC ye bölümü olup $2.7/8.9 = 0.30$ olacaktır ve bu değer, bitkinin orta şiddette su stresine uğradığını göstermektedir.

Bir kez oluşturulan Tc-Ta ve VPD ilişkisinin (baz çizgilerinin veya temel grafiğin) bitki çeşidine bağlı olmakla birlikte geniş bir coğrafik alanda kabul edilebilir olduğu bildirilmiştir (26).

Uygulamalı Yöntem

Garrot (17) tarafından önerilen uygulamalı yöntem, em-prik yönteme benzemektedir. Yine bitki tacı sıcaklığı, hava sıcaklığı ve VPD verilerini gerektirir. Ancak tüm büyüme mevsimi veya çoklu büyüme mevsimlerini kapsayan uzun dönemli veri toplamayı esas alır. Böylece veriler daha uygun bir zaman periyodunda alındığından, su stresinin değişim düzeyleri ve bitkide mevsim boyunca meydana gelen yapısal değişimler de hesaba katılmış olur.

Emprik yöntemde bir gün içindeki VPD değişimi (yaklaşık 4 kPa) dikkate alınmaktadır. Halbuki mevsimlere bağlı iklimsel değişimler nedeniyle doğal olarak VPD genellikle, büyüme mevsimi boyunca tek bir günde olduğundan daha geniş bir sınır içinde değişir. Ayrıca uygulamalı baz çizgisi, değişen su stresi düzeylerindeki tüm büyüme devrelerini kapsayacaktır. Bu durumda baz çizgilerinin geliştirilmesi daha çok zaman alacaktır, ancak kullanılabilir en iyi, uzun dönemli veriler elde edilecektir.

Yöntemlerin Karşılaştırılması ve Sonuç

Teorik yöntemin üstün yanı, VPD'ye karşılık T_c-T_a ilişkisinin geliştirilmesi gereğinin olmamasıdır. Ancak bu yöntemde aerodinamik direnç (r_a) ve taç örtü direnci (r_c) değeri gereklidir. Bu parametrelere ilişkin tahminler literatürden, veya bitki tacı, kuru ve ıslak termometre ile net radyasyon ölçümlerinden hesaplanan değerlerden bulunabilir.

Emprik yöntemin üstün yanı, belirli bir bitki için alt baz çizgisinin bir gün içerisinde türetilebilmesi ve bitki tacı, kuru ve ıslak termometre sıcaklıklarının güneş öğlesinin merkez alındığı 6-8 saatlik bir periyotta oldukça sık (her 10 dakikada bir sıklığa kadar) ölçülerek belirlenebilmesidir. Böylece oransal olarak kısa bir zaman periyodunda genel olarak geniş bir VPD değişim aralığında ölçüm olanağı sağlanmış olur (27).

Teorik ve empirik yöntem arasındaki temel fark, empirik yöntemde T_c-T_a ve VPD arasındaki doğrusal ilişkinin r_c 'nin gün boyunca değiştiğini belirtmesidir. Halbuki, teorik yöntemde r_c 'nin sabit olduğu varsayılmaktadır. Ancak gerçek uygulamada, CWSI belirlenirken tarla ölçümleri genellikle güneş öğlesini 1-2 saat geçene dek yapılır ve r_c bu sınırlamalar altında sabit olarak dikkate alınabilir. Bu varsayım kulla-

nıldığında iki yöntem de sonuçta benzer CWSI verir. Tümüyle güneş ve tümüyle gölge koşullarda empirik yöntemde, r. değerlerinde ayarlama gerekmesine karşın her iki indeksin de çalışma için eşit iyilikte olduğu görülür (27).

Empirik yöntemin uzun dönemli verilerle uygulanması olan uygulamalı yöntem ise CWSI'nin doğruluk derecesini arttırır. Normal uygulamada empirik baz çizgisi mevsim başında hesaplanır ve sözkonusu mevsimde sulama programlaması için kullanılır. Eğer mevsim boyunca elde edilecek verilerle belirlenen uygulamalı baz çizgisi başlangıçtaki empirik baz çizgisi ile uyumlu ise sorun yoktur. Eğer farklı ise hangisinin en iyisi olduğu sonraki dönemde yapılacak deneme ile saptanabilir (17).

Sonuç olarak, infrared termometre tekniği ile bitki su stresi indeksinin belirlenmesinde, çiftçi düzeyinde uygulama kolaylığı açısından empirik yöntemin önerilebileceği söylenebilir.

Kaynaklar

1. 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.
2. Reginato, R.J., Field Quantification of Crop Water Stress Trans. ASAE, 26: 772-775,781, 1983.
3. Hiler, E.A., Clark, R.N., Stress Day Index to Characterize Effects of Water Stress on Crop Yields. Trans. ASAE, 14 : 757-761, 1971.
4. Hiler, E.A., Howell, T.A., Lewis, R.B., Boos, R.P., Irrigation Timing by the Stress Day Index Method. Trans. ASAE, 14:393-398, 1974.
5. Meron, M., Grimes, D.W., Phene, C.J., Davis, K.R., Pressure Chamber Procedures for Leaf Water Potential Measurements of Cotton. Irrig. Sci. 8:215-222, 1987.
6. Grimes, D.W., Yamada, H., Hughes, S.W., Climate-Normalized Cotton Leaf Water Potentials for Irrigation Scheduling. Agric. Water Manag., 12:293-304, 1987.

7. Ehrlter, W.L., Cotton Leaf Temperatures as Related to Soil Water Depletion and Meteorological Factors. *Agron. J.*, 65: 404-409, 1973.
8. Ehrlter, W.L., Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J., Diurnal Changes in Plant Water Potential and Canopy Temperature of Wheat as Affected by Drought. *Agron. J.*, 70:999-1004, 1978.
9. Idso, S.B., Reginato, R.J., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Jr., Measuring Yield-Reducing Plant Water Potential Depression in Wheat by Infrared Thermometry. *Irrig. Sci.*, 2:205-212, 1981.
10. Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J., Jr., Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resour. Res.* 17:1133-1138., 1981.
11. Idso, S.B., Reginato, R.J., Radin, J.W., Leaf Diffusion Resistance and Photosynthesis in Cotton as Related to a Foliage Temperature Based Plant Water Stress Index. *Agric. Meteorol.*, 27:27-34, 1982.
12. Pinter, P.J., Jr., Reginato, R.J., A Thermal Infrared Technique for Monitoring Cotton Water Stress and Scheduling Irrigations. *Trans. ASAE*, 25:1651-1655, 1982.
13. Jackson, R.D., Canopy Temperature and Crop Water Stress, *Advances in Irrigation*, Vol. 1 (Ed. D. Hillel), Academic Press, New York, 43-85, 1982.
14. Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Jr., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., Normalizing the Stress-Degree-Day Parameter for Environmental Variability. *Agric. Meteorol.*, 24:45-55, 1981.
15. Idso, S.B., Non-Water-Stressed Baselines: A Key to Measuring and Interpreting Plant water Stress. *Agric. Meteorol.*, 27:59-70, 1982.
16. Geiser, K.M., Slack, D.G., Allred, E.R., Stange, K.W., Irrigation Scheduling Using Crop Water Canopy-Air Temperature Difference. *Trans. ASAE*, 25:689-694, 1982.
17. Garrot, D.J., The User's Guide to Understanding the Crop

AG Multimeter Model 510B. Everest Interscience, Inc.
Model 510B Infrared AG Multimeter Owner's Manual, 1990.

18. Monteith, J.L., Principles of Environmental Physics, Edward Arnold, London, 241 pp., 1973.
19. Jensen, M.E., Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements, American Society of Civil Engineers, New York, 215 pp., 1974.
20. Howell, T.A., Jordan, W.R., Hiler, E.A., Evaporative Demand as a Plant Stress. Modification of Aerial Environment of Plants, Monogr. 2 (Ed. by B.J. Barfield and J.F. Gerber) 97-113, Amer. Soc. of Agric. Engineers, St. Joseph, Mich., 1979.
21. Howell, T.A., Musick, J.T., Tolk, J.A., Canopy Temperature of Irrigated Winter Wheat. Trans. ASAE, 29 : 1692-1698, 1706, 1986.
22. Idso, S.B., Stomatal Regulation of Evaporation from Well-Watered Plant Canopies: A New Synthesis. Agric. and Forest Meteorol., 27: 213-217, 1983.
23. O'Toole, J.C., Real, J., Estimation of Aerodynamic and Crop Resistances from Canopy Temperature. Agron. J., 78: 305-310, 1986.
24. Hipps, L.E., Asrar, G., Kanemasu, E.T., A Theoretically Based Normalization of Environmental Effects on Foliage Temperature. Agric. and Forest Meteorol., 35:113-122, 1985.
25. O'Toole, J.C., Hatfield, J.L., Effect of Wind on the Crop Water Stress Index Derived by Infrared Thermometry. Agron. J., 75:811-817, 1983.
26. Idso, S.B., Reginato, R.J., Reciosky, 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.
27. Reginato, R.J., Field Quantification of Crop Water Stress Trans. ASAE, 26: 772-775, 781, 1983.