

Azalan Toprak Nem İçeriğinin Tuzlu ve Tuzlu Olmayan Şartlarda Buharlaşmaya Etkisi¹

Z. Coşkun²

F. Konukcu³

²Bağcılık Araştırma Enstitüsü, Tekirdağ

³Trakya Üniversitesi Tekirdağ Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Tekirdağ

Toprak kururken buharlaşmanın hem mekanizması hem de miktarı önemli ölçüde değişmektedir. Nemli bir toprak profilinde akım problemlerinin çözümünde üst sınır şartlarını tanımlamak amacıyla genellikle Penman metodu kullanılmaktadır. Ancak Penman metodu toprak nem içeriği ne olursa olsun, toprak yüzeyinde doygun buhar basıncı olduğunu varsayarak potansiyel evaporasyonu hesaplamaktadır. Staple (1974) doygun buhar basıncı yerine, toprağın gerçek buhar basıncını koyarak Penman metodunu değiştirmiş. Bu çalışmanın amacı aerodinamik (laboratuvar) ve aerodinamik + radyasyon (açık hava) şartlarında kurumakta olan tuzlu ve tuzsuz toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmayı Staple (1974) metodunu kullanarak tahmin etmek ve metotta buharlaşmayı daha hassas bir şekilde kestirilebilmesi için yapılabilecek iyileştirmeleri belirlemektir. Deneysel çalışmalarda, killi toprak örnekleri önce tatlı ve tuzlu (16 dS/m) su ile satire edilmiş, sonra laboratuvar ve açık hava koşullarında buharlaşmaya maruz bırakılmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, laboratuvar ve açık hava koşulları için simüle edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir ($R^2 = 0.90$ civarında). Ancak denem başlangıcı ve sonunda bu uyum zayıftır. Bu zayıf uyum da modelde toprak ve atmosfer sıcaklığının eşit varsayılmasına bağlanmıştır. Model tuzlu ve tuzlu olmayan koşullar için yaklaşık olarak aynı sonuçları vermiştir. Toprak tekstürünü dikkate almak için ise matrik potansiyel-su içeriği ve su içeriği oransal nem ilişkileri her bir toprak tekstürü için tanımlanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Penman, kuruyan toprak, su içeriği, tuzluluk, buharlaşma.

Effects of Decreasing Soil Water Content on Evaporation under Saline and Non-Saline Conditions

Evaporation changes in mechanism and magnitude as the soil dries. Evaporation are closely related to the soil moisture. Penman's method is used most widely to define the upper boundary condition in computing evaporation from a relatively wet bare soil surface. It assumes saturated vapour pressure at the soil surface and calculates potential evaporation independent of the soil water content. It was modified by Staple (1974) including in it the soil's relative humidity of partially dried surface to predict evaporation from drying soils. The objective of this study was to investigate the rate of evaporation under aerodynamic (in door) and aerodynamic + radiation (out door) conditions for saline and non saline drying soil surface using Staple modified Penman equation seeking for further improvements. Soil samples (clayey) were first saturated with fresh and saline (16 dS/m) water and then exposed to evaporation. Generally, the agreements between simulated and measured rates for out/indoor conditions were good ($R^2 = 0.90$). However more deviation occurred at the beginning and the final stage, attributable to the difference in soil surface and air temperature. While the model calculated roughly the same rates for saline and non-saline conditions, the effect of soil texture is accounted by defining matric potential-water content and soil relative humidity-water content relationships.

Keywords: Penman, drying soil, water content, salinity, evaporation.

¹ Zafer Coşkun' nun yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır

Giriş

Açık su veya toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmanın hassas bir şekilde tahmin edilmesi su kaynaklarının ve su yapılarının planlanmasında çok büyük öneme sahiptir. Bu nedenle buharlaşma hesaplamaları hidrologlar, ziraat, inşaat ve çevre mühendisleri tarafından teorik veya deneysel olarak yoğun bir şekilde çalışılmıştır

Penman (1948; 1956) veya değiştirilmiş Penman yöntemleri buharlaşma tahmininde kullanılan en yaygın metot(lar) olduğu gibi, buharlaşma ve bitki su tüketimi modellerinde toprak üst sınır koşulları da bu yöntemler ile tanımlanmaktadır (Feddes, 1985). Bu yöntemlerde toprak yüzeyinden meydana gelen aerodinamik buharlaşma toprak yüzeyinde varsayılan doygun buhar basıncı ile atmosferik şartlara bağlı olarak hesaplanan gerçek buhar basıncı farkının bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Toprağın tarla kapasitesine yakın veya daha fazla nem içermesi koşullarında bu doğru olabilir. Ancak yağışlar veya sulamalardan sonra toprak yüzeyi kurumaya başlamakta, toprak oransal nemi ve buna bağlı olarak da toprak buhar basıncı düşmektedir. Bu durumda Penman yönteminde

varsayılan doygun buhar basıncı gerçekliğini kaybetmektedir. Toprağın oransal nemi veya buhar basıncı havanıninkine eşit oluncaya kadar düşmektedir. Böylece saturasyon koşullarında potansiyel olan buharlaşma da azalarak buhar basıncı açığının kapanmasıyla sıfırlanmaktadır. Bu nedenle birçok araştırmacı toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmayı hesaplamak için, toprak üst sınır koşullarını yeniden tanımlayan bir çok model geliştirmiştir (Malik et al.,1992).

Staple (1974) azalan nem içeriğini dikkate alınarak Penman (1948) metodunu değiştirilmiştir. Staple (1974), Penman eşitliğinde varsayılan toprak yüzeyi saturasyon buhar basıncı yerine torağın gerçek buhar basıncını kullanmıştır. Staple (1974) hesaplamalarda toprak sıcaklığının hava sıcaklığına eşit olduğunu kabul etmiştir.

Bu çalışmanın amacı aerodinamik (laboratuar) ve aerodinamik + radyasyon (açık hava) şartlarında kurumakta olan tuzlu ve tuzsuz toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmayı Staple (1974) metodunu kullanarak tahmin etmek ve buharlaşmayı daha hassas bir şekilde kestirilebilmesi için metotda yapılabilecek iyileştirmeleri belirlemektir.

Materyal ve Metot

Materyal

Çalışma Güneydoğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'nde (Diyarbakır) laboratuarda sadece aerodinamik, açık havada ise aerodinamik ve radyasyon koşullarında yürütülmüştür.

Laboratuar ve açık hava koşullarında yürütülen çalışmalar sırasında iklimsel veriler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Laboratuar şartlarında sıcaklık ve oransal nem hobo kayıt cihazı ile saatlik olarak ölçülmüş, rüzgar hızı ise el anamometresi ile ölçülerek ortalama değer alınmıştır.

Açık alanda gerçekleştirilen denemede ise iklim verileri Diyarbakır Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir.

Çalışmada ortalama 9 cm çapında 5.2 cm derinliğinde özellikle bu çalışma için galvanize saçtan yapılmış kaplar kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan toprak örnekleri enstitü deneme tarlasından 0-25 cm derinlikten alınmıştır. Yeteri kadar ve bir defada alınan toprak örneği havada kurutulup 2-mm' lik elekten geçirildikten sonra mekaniksel ve fiziksel analizler yapılmıştır (Çizelge 2).

Normal ve tuzlu şartlar altında toprak yüzeyinden meydana gelen evaporasyonu ölçmek amacıyla, toprak örneklerinin satire edilmesinde şehir suyu (0.1 dS/m) ve tuzlu çözelti (16 dS/m) kullanılmıştır. Çalışmada 0.1 g hassasiyetinde 2 kg kapasiteli hassas terazi kullanılmıştır.

Çizelge 1. Deneme alanların bazı önemli iklimsel verileri

Table 1. Some important climatologic data of the research area.

İklim elemanları/Climatol. element	Laboratuar/Laboratory	Açık hava/Open air
Ort. sic./Aver. temp (°C)	22.6	28.7
Maks. sic./Max. sic. (°C)	25.0	35.9
Min. sic./Min. sic. (°C)	19.9	19.3
Oransal nem/Rel. hum. (%)	39.4	16.9
Güneşlenme süre./Sunshine dura (h)	-	11.9
Rüzgar hızı/Wind speed (m/s)	1.70	3.8

Çizelge 2. Deneme toprağına ait bazı önemli özellikler.

Table 2. Some important characteristics of experimental soil.

Su içeriğı/Water cont.(m ³ /m ³)			Tekstür/	pH	Organ ma.	EC
Satur.	Tarla ka./Field ca.	Solma n./Wilt. p.	Texture		(%)	(dS/m)
0.54	0.46	0.31	killi/clay	7.6	2.0	0.1

Yöntem

Deneyisel Çalışmalar: Hava kurusu bozulmuş toprak örnekleri granül hale getirilip, 2-mm'lik elekten geçirildikten sonra buharlaşma kaplarına 1g/cm³ hacim ağırlığında paketlenmiştir. Her bir kaba paketlenen toprak ağırlığı kabın hacminden hesaplanmıştır. Kaplar numaralandıktan sonra kapların daraları ve her birine paketlenen toprak miktarı kaydedilmiştir. Paketleme işleminden sonra topraklar şehir suyu ve daha önceden hazırlanan tuzlu su (16 dS/m) ile sature edilmiştir. Kaplara eklenecek su miktarı, toprak hacminin (veya 1g/cm³ olduğu için ağırlığının) % 52'si alınarak hesaplanmıştır. Deneme toprağının saturasyon su içeriğı %54'tür. Ancak toprak hava kurusu şartlarda %2 nem içerdiğinden bu miktar dikkate alınmıştır. Topraklar sature edilirken, eklenen suyun toprak yüzeyinde aşınmaya neden olmaması ve yapısını bozmaması için su çok yavaş bir şekilde pipetle uygulanmıştır. Saturasyon işleminden sonra kaplar tekrar tartılarak dara + toprak ağırlığı + su ağırlığı eşit olup olmadığı kontrol edilmiş, yüzeyleri kapatılarak ertesi gün belirli bir saatte evaporasyona maruz bırakılmak üzere muhafaza edilmiştir. Buharlaşmanın başlamasından sonra her 24 saatte bir kaplar hassa terazi ile tartılarak günde meydana gelen evaporasyon kap yüzey alanından faydalanılarak hesaplanmıştır. Deneme, ilave edilen suyun tamamı buharlaşmaya kadar sürdürülmüştür. Denemede 3'er adet şehir suyu

ve tuzlu su ile sature edilmiş kapların yanında bir adet te açık su yüzeyinden meydana gelecek buharlaşmayı ölçmek amacıyla su doldurulmuş kap olmak üzere toplam 7 kap kullanılmıştır (2 konu x 3 tekrerrür). Denemeler önce laboratuvar şartlarında yürütülmüş daha sonrada aynı şekilde açık hava koşullarında tekrar edilmiştir.

Teorik Çalışmalar: Toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmanın tahmininde ve toprak – su dengesinin hesaplanmasında kullanılan numerik modellerde üst sınır şartlarının tanımlanmasında Penman (1948, 1956)yöntemi en yaygın olarak kullanılan metottur. Penman yöntemi aerodinamik ve radyasyon ifadesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Buna göre:

$$ET_0 = \frac{R_n \Delta / \gamma + f(u)(e_{sat} - e_a)}{\Delta / \gamma + 1} \quad 1$$

Eşitlikte:

ET₀ :buharlaşma miktarı (mm/gün); Δ:buhar basıncı eğrisinin eğimi (KPa/ K); γ: sıcaklığa bağlı Psikrometrik katsayı (KPa/ K); e_{sat}:doğgun buhar basıncı (KPa/ K); e_a:atmosferik gerçek buhar basıncı (KPa/ K); R_n:yüzeydeki net radyasyon akışı (KJ/m²/s); f(u) :rüzgar fonksiyonu olup aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Burman and Pochop, 1994):

$$f(u) = 0.26 (1 + 0.54 u) \quad 2$$

u: 2 m yükseklikte rüzgar hızı (m/s). Staple (1974) Eşitlik (1)'deki doymuş buhar basıncı (e_{sat}) yerine toprağın gerçek buhar basıncını koyarak (e_{a-s}) Penman yöntemini değiştirmiştir. Buna göre eşitliğin son hali:

$$ET_0 = \frac{R_n \Delta / \gamma + f(u)(e_{a-s} - e_a)}{\Delta / \gamma + 1} \quad 3$$

Laboratuvar çalışmalarında kapalı alan olması nedeniyle radyasyon etkisi yok sayılmış ve günlük buharlaşma değerleri aerodinamik ifadeden $(f(u)(e_{a-s} - e_a) / \Delta / \gamma + 1)$ hesaplanmıştır. Açık hava şartlarında günlük buharlaşma değerleri aerodinamik ifade + radyasyon $(R_n \Delta / \gamma / \Delta / \gamma + 1)$ ifadesi den hesaplanmıştır.

Toprağın gerçek buhar basıncı havanınkinden benzer şekilde aşağıdaki gibi ifade edilir (Burman and Pochop, 1994).

$$e_{a-s} = h_s e_{sat-s} \quad 4$$

Eşitlikteki toprak oransal nemi (h_s) matrik potansiyele bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tuzlu şartlarda toprak oransal nemi, matrik (h_m) + osmotik (h_o) potansiyelin bir fonksiyonudur .

$$h_s = h_m h_o \quad 5$$

Eşitlik (5) deki h_m ve h_o aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir (Konukcu,1997).

$$h_m = \exp\left(\frac{M g \psi_m}{R T}\right) \quad 6$$

$$h_o = \exp\left(\frac{M g \psi_o}{R T}\right) \quad 7$$

Eşitlik (7) deki ozmotik potansiyel (ψ_o) ise Eşitlik (8) yardımıyla bulunabilir.

$$\psi_o = \left(\frac{R T C}{g \rho_w}\right) d \quad 8$$

e: gerçek buhar basıncı (kPa); h_s : toplam (matrik + ozmotik) toprak oransal nemi (-); h_m :toprak matrik oransal nemi (-); h_o :toprak ozmotik oransal nemi (-); e_s :saturasyon buhar basıncı (kPa); M:suyun moleküler ağırlığı (kg/mol); g:yerçekimi ivmesi (m/s^2); ψ_m :matrik potansiyel (-m); ψ_o : ozmotik potansiyel (-m); R:üniversal gaz sabiti (J/mol k); T:sıcaklık (K); C:tuz konsantrasyonu (M); ρ_w :su yoğunluğu (kg/m^3); d:Van't Hoff faktörü (-);

Matrik potansiyel ise topraksu içeriğinin bir fonksiyonu olarak $\psi(\theta)$ van Genuchten (1980) modellinden belirlenecektir. Buna göre:

$$\Psi_m = \frac{1}{\alpha} \left(\Theta^{\frac{-1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad 9$$

Θ değeri ise eşitlik(3.10) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad 10$$

θ_r :hava kuru toprağın nem içeriği (m^3/m^3); θ_s :saturasyonda toprağın hacimsel su içeriği (m^3/m^3); θ :toprağın hacimsel su içeriği (m^3/m^3). m,n ve α :toprak tekstürüne bağlı katsayılar olup, deneme de kullanılan toprak örneği için; m:0.230769; n :1.3; α :0.3 olarak bulunmuştur.

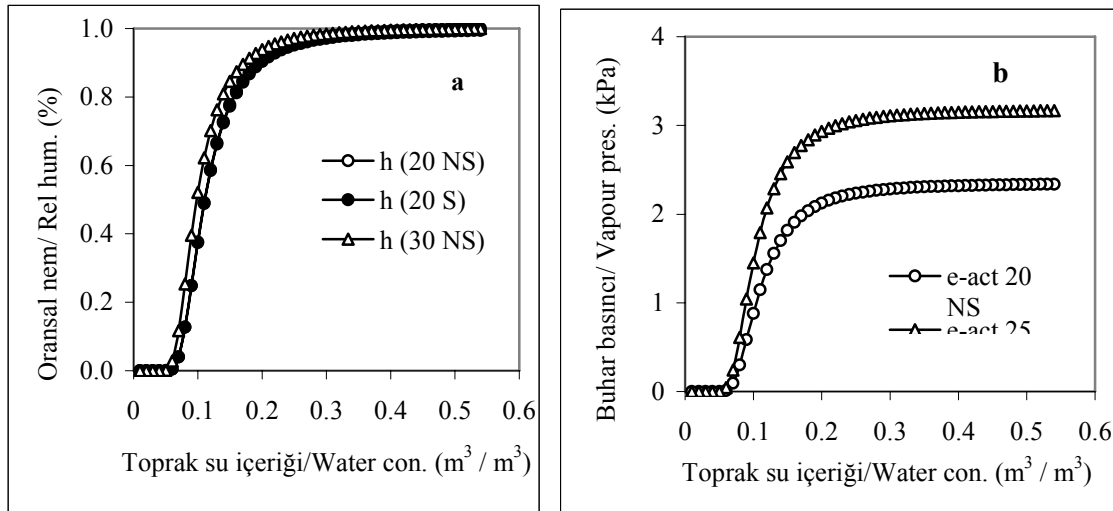
Bulgular ve Tartışma

Toprak Nem İçeriğine Bağlı Olarak Oransal Nem ve Gerçek Buhar Basıncı

Tuzlu ve tuzsuz ortamda ve farklı iki sıcaklıkta torağın su içeriğine bağlı olarak değişen oransal nem değerleri Eşitlik (5, 6, 7, 8, 9 ve 10) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil. 1a.'de gösterilmiştir.

Şekil 1a.' de görüldüğü gibi tuzlu ve tuzsuz ortamda hesaplanan oransal nem değerleri arasında bir fark yoktur. Konukcu (1997) ve Konukcu et al. (2004) de tuzluluğun etkisi olmadığını belirtmiştir. Ancak sıcaklığın $10^\circ C$ (% 50) artmasıyla oransal nem miktarında az bir artış kaydedilmiştir. Benzer sonuçlar Philip

and de Vries (1957) ve Staple (1974) tarafından da verilmiştir. Toprak su içeriğinin $0.30 m^3/m^3$ ile saturasyon arasında olması durumunda toprak oransal nemi 1.0 (% 100) olarak kabul edilebilir. Toprak nem içeriğinin $0.30 m^3/m^3$ 'den $0.08 m^3/m^3$ e düşmesiyle birlikte oransal nem değeri 1.0'dan 0.0' a düşmüştür. Kritik nem değerleri toprak tekstürüne göre değişmekle birlikte aynı trend Camillo and Gurney (1986), Konukcu (1997) ve Konukcu et al. (2004) tarafından da elde edilmiştir.



Şekil 1. Farklı sıcaklıkta, tuzlu (S) ve tuzsuz (NS) ortamda toprak su içeriğine bağlı olarak toprak oransal nemindeki (a) ve gerçek buhar basıncındaki (b) değişim.

Figure 1. Soil relative humidity (a) and actual vapour pressure (b) as a function of soil water content at different temperatures under saline (S) and non saline (NS) conditions

Hesaplanan toprak oransal nem değerleri Eşitlik (1)'de yerine konularak nem içeriğine bağlı toprak buhar basıncı iki farklı sıcaklık için hesaplanmış ve Şekil 1b.'de gösterilmiştir.

Toprak oransal nem değerlerinin aksine, toprak su içeriğine bağlı olarak toprağın gerçek buhar basıncı sıcaklık farkından önemli derecede etkilenmiştir. Oransal nemde sıcaklığın %50 değişimi (20 °C'den 30 °C'ye) maksimum %15 değişime neden olurken; gerçek buhar basıncında sadece % 25' lik artış (20 °C'den 25 °C'ye) %35'e kadar artışa sebep olmuştur. Ayrıca sıcaklıkla ilgili değişen buhar basınçları arasındaki fark toprak nem içeriğinin artmasıyla artmıştır.

Staple (1974) buhar basıncını dikkate almadan, oransal nemin sıcaklık ile birlikte fazla değişmediğini göz önüne alarak, atmosfer sıcaklığı ile toprak sıcaklığını eşit varsayıp, hesaplamalarını yapmıştır. Ancak buhar basınçlarının sıcaklığa karşı son derece hassas olması ve toprak sıcaklığının da atmosfer sıcaklığından çoğu zaman farklılık göstermesi hesaplamalarda önemli hatalara neden olabilecektir.

Buharlaşmanın erken evresinde (yani toprak

neminin oransal olarak yüksek olduğu durumlarda) buharlaşma yüksek olup, toprak sıcaklığını birkaç °C düşürmektedir. Toprak sıcaklığının düşmesi atmosfer ile toprak yüzeyi arasındaki buhar basıncı açığını azaltarak buharlaşma oranlarını da düşüreceklerdir. Böylece Staple (1974)'ün modifiye ettiği Penman metodu, deneme toprağı için 30 m³/m³ nem içeriğinin üstünde buharlaşmayı potansiyel buharlaşma olarak hesap edecektir. Evaporasyonun ilerleyen evresinde buharlaşma oranlarının düşmesi ile birlikte buharlaşmanın soğutma etkisi azalacak ve toprak sıcaklığı atmosfer sıcaklığı ile birbirine çok yakın bir değer alacaktır. Bu durumda Staple (1974) modeli evaporasyonu güvenilir bir şekilde tahmin etmektedir. Evaporasyonun son evresinde, buharlaşma oranının minimum bir değer alması nedeniyle soğutma etkisi azalacak, radyasyona bağlı olarak toprak sıcaklığı atmosfer sıcaklığından daha yüksek olabilecektir. Bu durumda Staple (1974) modeli olması gerekenden daha düşük bir buharlaşma oranı hesaplamaktadır. Ancak atmosfer ile toprak sıcaklığı arasındaki fark her zaman burada belirtildiği gibi seyretmeyebilir. Radyasyon, buharlaşma, toprak özellikleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilmektedir.

Laboratuvar Koşullarında (Aerodinamik) Buharlaştırma

Laboratuvar ortamında sadece aerodinamik koşullar altında deneme süresince tuzlu ve tuzlu olmayan toprak yüzeyinden meydana gelen direkt ölçülmüş buharlaştırma değerleri Şekil 2a'da sunulmuştur. Toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaştırma miktarı açık su yüzeyinden meydana gelen buharlaştırma oranları ile karşılaştırılırsa, ilk 8 günlük sürede evaporasyonun potansiyel olduğu (birinci evre) kabul edilebilir. Sekizinci gün ile 28. gün arasında buharlaştırma miktarı laboratuvar koşullarının etkisiyle hafif dalgalanmalar göstererek minimum bir düzeye kadar azalmıştır. Bu periyot ikinci evre olarak kabul edilebilir. Yirmisekizinci günden sonraki ihmal edilebilir buharlaştırma dönemini üçüncü evre saymak mümkündür.

Toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaştırma toprak neminin belirli bir düzeyin altına düşmesi ile başlamıştır. Denemenin 8. gününde ölçülen toprak nemi $0.29 \text{ m}^3/\text{m}^3$ tür. Bu değer Şekil 1a'deki oransal nemin % 100 kabul edildiği $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ eşik değerine oldukça yakındır. Evaporasyon, toprak nem içeriğinin $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 'e düşmesine kadar devam etmiştir. Laboratuvar şartlarında havanın oransal nemi %

40 civarındadır ki bu da $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ su içeriğine karşılık gelmekte olup, $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ değerine kabul edilebilir ölçüde yakındır.

Deneme koşullarında tuzluluk buharlaşmayı çok az miktarda azaltmıştır (Şekil 2a). Ancak bu azalma istatistiksel olarak (ANOVA Testi) önemsizdir. Tuzlu toprakta evaporasyonun pratik olarak sıfır kabul edildiği zamanda nem içeriği yaklaşık olarak $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$ tür. Tuzlu olmayan koşullara göre nispeten daha yüksek su içeriğinde buharlaşmanın durmasının nedeni tuzların nemi absorbe ederek daha fazla kurumayı engellemesi ile açıklanabilir. Tamamen tuzla (NaCl) doymuş olan bir toprak % 75 oransal nem içeriğinden daha fazla kurumamaktadır (Robinson and Stokes, 1984; Konukcu et al., 2004). Deneme toprağı için $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$ nem içeriğine karşılık gelen toprak oransal nemi % 58'dir. % 75'ten küçük olması ise çalışmalarda toprak yüzeyinin tamamen tuz ile doymamış ve kristalleşmesinde de çok az görülmüş olması ile açıklanabilir. Deneme toprağının % 75' oransal neme karşılık gelen su içeriği ise $0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ civarındadır.

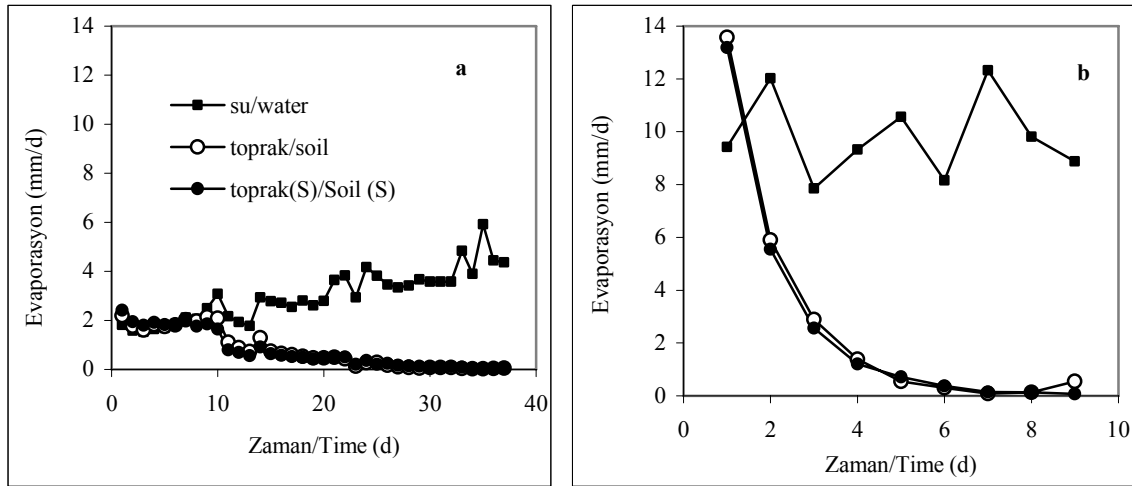
Açık Hava Koşullarında (Aerodinamik+ Radyasyon) Buharlaştırma

Açık hava koşullarında tuzlu ve tuzsuz topraklar ile yürütülen çalışmalarından kaydedilen günlük buharlaştırma değerleri Şekil 2b'de verilmiştir. Açık hava koşullarında yürütülen denemeler atmosferik buharlaştırma oranlarının çok yüksek olması nedeniyle (açık su yüzeyinden ortalama 10 mm/gün) ancak yedi gün sürmüştür. Buharlaştırma isteğinin çok yüksek olması nedeniyle, toprakların buharlaşmaya maruz bırakılmasıyla birlikte hızlı bir nem düşüşü ve buna bağlı olarak ta evaporasyonda ani bir düşüş görülmüştür. Böylece, açık hava koşullarında potansiyel evaporasyon evresi çok kısa sürmesi nedeniyle Şekil 2b.'de görülememektedir.

Açık hava koşullarında evaporasyon toprak nem içeriğinin $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 'e düşmesine kadar devam etmiştir. Havanın oransal nemi % 17 civarında olup, $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ nem içeriğine karşılık gelmektedir. Toprağın oransal neminin

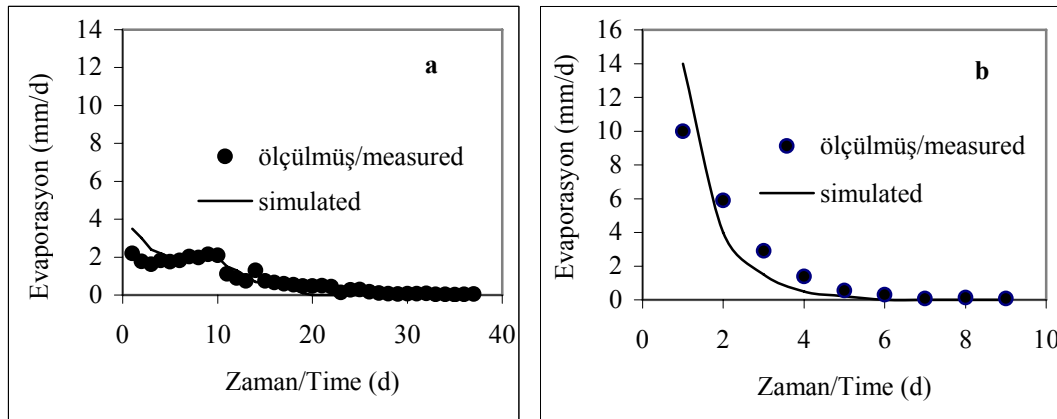
havanın oransal nemi ile dengeye gelmesiyle (% 17 oransal nem) veya bir başka deyişle toprak su içeriğinin $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 'e düşmesiyle buharlaşmanın da durması beklenirken, $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ su içeriğine düşmesine kadar devam etmiştir. İki değer arasında önemli bir fark vardır.

Açık hava koşullarında da tuzluluk evaporasyon oranını önemli derecede değiştirmemiştir. Tuzlu şartlarda buharlaşmanın durduğu nem içeriği $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ tür. Bu değere tuzlu olmayan koşullarda ölçülen minimum nem içeriğinden ($0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$) oldukça yüksek iken laboratuvar ortamında tuzlu koşullarda kaydedilen $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ten de daha küçüktür. Çünkü açık hava koşullarında daha fazla buhar basıncı açığı toprağı daha fazla kurumaya zorlamıştır. Açık hava koşullarında da toprakta ölçülen minimum nem içeriği aynı toprağın satüre olması durumunda sahip olabileceği minimum nem içeriğinden daha düşüktür.



Şekil 2. Laboratuvar (a) ve açık hava (b) koşullarında tuzlu (s), tuzsuz toprak ve açık su yüzeyinden meydana gelen ölçülmüş buharlaşma değerlerinin karşılaştırılması.

Figure 2. Comparison of measured rates of evaporation from water, soil and saline soil (S) surface under laboratory (a) and open air (b) conditions.



Şekil 3. Laboratuvar (a) ve açık hava (b) koşullarında toprak yüzeyinden meydana gelen ölçülmüş ve hesaplanmış buharlaşma değerlerinin karşılaştırılması.

Figure 3. Comparison of measured and simulated evaporation rates from soil surface under laboratory (a) and open air (b) conditions.

Laboratuvar Koşullarında Deneysel ve Teorik Buharlaşmaların Karşılaştırılması

Laboratuvar koşullarında toprak yüzeyinden meydana gelen günlük buharlaşma miktarları 37 gün süreyle ölçülmüş ve ölçülen bu değerler laboratuvar şartları ve deney toprağı için hesaplanmış değerler ile Şekil 3a.'da karşılaştırılmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında çok kuvvetli olmasa da iyi bir uyum vardır ($R^2 = 0.89$). Toprak-su-

atmosfer-bitki ilişkilerini ortaya koyan çoğu model toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmayı Penman yöntemi ile hesaplamaktadır. Örneğin: SWAP (Van Dam et al., 1997), SALTMED (Ragab, 2002). Penman yöntemi toprakta nem azalması ile birlikte azalan buharlaşmayı dikkate almamaktadır. Toprak koşulları ne olursa olsun, toprak yüzeyinde saturasyon buhar basıncının var olduğu kabul

ederek, atmosferik şartlara bağlı olarak buharlaşmayı hesaplamaktadır. Evapotranspirasyon için referans bitki su tüketimi bitki katsayıları ile çarpıldığı için fazla bir yanılmaya neden olmazken, açık toprak yüzeyi için önemli hatalara yol açmaktadır. Özellikle nadas sisteminin yaygın olduğu bölgelerde açık toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşma hassas olarak hesaplanamadığı için, bölgedeki havza yağış-akış ilişkileri de güvenilir bir şekilde hesaplanamamakta ve su kaynakları iyi bir şekilde planlanamamaktadır. Bu nedenle Staple (1974) modeli toprak-su-atmosfer-bitki ilişkilerini açıklayan modellerde üst sınır koşullarının tanımlanmasında önemli bir aşamadır.

Şekil 3a.'da ölçülen ve hesaplanan değerler zamana bağlı olarak değerlendirildiğinde: şu sonuçlara varılabilir. Deneme başlangıcında hesaplanan evaporasyon değerleri ölçülmüş değerlerin neredeyse iki katına yakın iken, altı gün içinde bu fark kaybolarak, sonraki 10 gün içerisinde açık olarak biri diğerinden ayrılamamaktadır. Onaltıncı günden itibaren hesaplanan değerler belirgin bir şekilde azalarak 20. günde sıfır değerini almıştır. Ölçülen değerler ise çok küçük de olsa 37. güne kadar devam etmiştir.

Simülasyon sonuçlarının deneme başlangıcında ve sonunda doğru ölçülmüş değerlerden sapma göstermesi toprak sıcaklığı ile atmosfer sıcaklığının farklı olmasına bağlanabilir. Deneme başlangıcında toprak sıcaklığı buharlaşmanın soğutucu etkisinden dolayı atmosfere göre daha düşüktür. Düşük sıcaklıkta toprağın oransal neminin fazla değişmemesine rağmen (Şekil 1a.) gerçek buhar basıncı önemli oranda düşmektedir (Şekil 1b. Çünkü gerçek buhar basıncı oransal nem ile saturasyon buhar basıncının çarpımına eşittir (Eşitlik 4). Saturasyon buhar basıncı da sıcaklık ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Soğuk toprakta gerçek buhar basıncının düşmesi atmosfer ile toprak yüzeyi arasındaki buhar basıncı açığını azaltmaktadır. Böylece aynı atmosferik şartlar altında soğuk topraktan sıcak toprağa oranla daha az buharlaşma meydana gelmektedir. Ölçülen değerlerin hesaplanan

değerlere göre küçük olmasının nedeni budur. Çünkü hesaplanan değerlerde, toprak sıcaklığı takip edilmediği için atmosferik sıcaklık dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçlandırılıp, hesaplanmalara başlanmasıyla bu durum fark edildiği ve denemeleri tekrar düzenleme şansımızın olmadığı için toprak sıcaklığı ölçülemediği. Ancak bu konu ile ilgili ayrıntılı çalışmalar mutlaka yapılmalıdır.

Denemenin ilk haftasından sonra toprak nemi ile birlikte buharlaşma da azalmıştır. Buharlaşmanın azalmasıyla birlikte soğutucu etki azaldığından toprak sıcaklığı ile hava sıcaklığı birbirine yakın bir değer alacağı söylenebilir. Ara dönemdeki uyumda muhtemelen bundan kaynaklanmıştır.

Denemenin son aşamasında buharlaşma ve dolayısıyla da buharlaşmanın soğutucu etkisi son derece azalırken, radyasyonun etkisiyle toprak sıcaklığı atmosfer sıcaklığından daha yüksek bir değer almış olabilir. Bu nedenle ölçülmüş değerler daha yüksek ve buhar basıncı açığı artacağı için simülasyon sonuçlarının aksine gerçek şartlarda evaporasyon daha uzun süre devam etmiştir. Her ne kadar toprak sıcaklığı ölçülmemiş ise de burada açıklanan bilgileri doğrular veriler literatürde mevcuttur (Ashraf, 1997).

Laboratuvar koşullarında havanın oransal nemi % 40 civarındadır. Modelde sıcaklık farkı dikkate alınmadığı için toprak oransal nemi de % 40'a veya buna karşılık gelen $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ nem içeriğine düşünce atmosfer ile dengeye gelerek buharlaşma durmuştur. Ancak yukarıda ifade edildiği gibi toprak sıcaklığının fazla olması buhar basıncı açığını artırarak evaporasyonun toprak nemi $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 'e düşmesine kadar devam etmiştir.

Hesaplamalarda toprak tuzluluğu da matrik potansiyel ile birlikte ozmotik potansiyel de hesaplayarak dikkate alınmıştır. Denemelerde kullanılan tuz konsantrasyonunun yanında, tuza doymun durumun dikkate alınmasında bile hesaplamalarda önemli bir farklılık görülmemiştir. Bu nedenle Şekil 3.'te tuzluluk ile ilgili veriler yer almamıştır.

Açık Hava Koşullarında Deneysel ve Teorik ve Buharlaşımların Karşılaştırılması

Açık hava koşullarında toprak yüzeyinden meydana gelen günlük buharlaşma miktarları ölçülmüş ve ölçülen bu değerler atmosferik şartları ve deney toprağı için hesaplanmış değerler ile Şekil 3b.'de karşılaştırılmıştır. Ölçülen değerler ile simülasyon sonuçları arasındaki uyum nispeten iyidir ($R^2 = 0.90$) Açık hava koşullarında da laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak açık hava koşullarında deneme çok daha kısa sürmüştür.

Yine açıklanan nedenlerden dolayı deneme başlangıcında hesaplanan değerler daha yüksek, ortalarda birbiri ile kıyaslanabilir ve sonuna doğru ise hesaplanan değerler daha düşüktür.

Açık hava koşullarında deneme süresince kaydedilen ortalama oransal nem değeri % 17 civarında olup $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ toprak nem içeriğine karşılık gelmektedir. Ancak denemelerde açık hava koşullarında buharlaşma toprak nemi $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 'e düşünceye kadar devam etmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Toprak nem içeriğinin azalmasıyla birlikte azalan buharlaşma oranlarını hesaplayabilmek için Penman (1948) modeli, Staple (1974) tarafından eşitlikteki saturasyon buhar basıncı gerçek buhar basıncı ile değiştirilerek modifiye edilmiştir. Bu değiştirilmiş model laboratuvar şartlarında (aerodinamik) ve açık hava koşullarında (aerodinamik + radyasyon) tuzlu ve tuzlu olmayan toprak koşulları için test edilmiş, ilave değişiklikler yapıp, yapılamayacağı tartışılmıştır.

Bu amaçla toprağın matris (tuzlu olmayan koşullarda) ve matris + ozmotik potansiyelinin (tuzlu ortamda) bir fonksiyonu olarak toprak oransal nemi hesaplanmış ve bu oransal nem değerleri o sıcaklıktaki doymuş buhar basıncı ile çarpılarak toprağın gerçek buhar basıncı hesaplanmıştır. Penman yönteminde toprak yüzeyinde doymuş buhar basıncı yerine hesaplanan bu gerçek buhar basıncı kullanılmıştır.

Staple (1974) buhar basıncını dikkate almadan, oransal nemin sıcaklık ile birlikte fazla değişmediğini göz önüne alarak, atmosfer sıcaklığı ile toprak sıcaklığını eşit varsayıp, hesaplamalarını yapmıştır. Ancak buhar basınçlarının sıcaklığa karşı son derece hassas olması ve toprak sıcaklığının da atmosfer sıcaklığından çoğu zaman farklılık göstermesi hesaplamalarda önemli hatalara neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak bu çalışmada toprak sıcaklığı dikkate alınmamıştır. Bu konu ile ilgili kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmadaki azalma toprak neminin belirli bir düzeyin altına düşmesi ile başlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında çok kuvvetli olmasa da bir uyum vardır ($R^2 = 0.90$ civarında). Toprak-su-atmosfer-bitki ilişkilerini ortaya koyan çoğu model toprak yüzeyinden meydana gelen buharlaşmayı Penman yöntemi ile hesaplamaktadır. Penman yöntemi toprakta nem azalması ile birlikte azalan buharlaşmayı dikkate almamaktadır. Toprak koşulları ne olursa olsun, toprak yüzeyinde saturasyon buhar basıncının var olduğu kabul ederek, atmosferik şartlara bağlı olarak buharlaşmayı hesaplamaktadır. Bu nedenle Staple (1974) modeli toprak-su-atmosfer-bitki ilişkilerini açıklayan modellerde üst sınır koşullarının tanımlanmasında önemli bir aşamadır. Toprak sıcaklığının da dikkate alınması ile daha hassas tahminlerde bulunulacaktır.

Hem açık hava hem de laboratuvar koşullarındaki denemelerde toprak tuzluluğu evaporasyonu oranlarını çok az miktarda düşürmüştür. Ancak bu azalma istatistiksel olarak (ANOVA Testi) önemsizdir. Tuzlu şartlarda buharlaşmanın durduğu nem içeriği tuzlu olmayan koşullara göre daha yüksektir. Bu da tuzların nemi absorbe etmesi ile açıklanmıştır. Benzer şekilde simülasyonlarda da denemelerde kullanılan tuz konsantrasyonunun yanında, tuza doymuş durumun dikkate alınmasında bile önemli bir farklılık görülmemiştir.

Bu nedenle çalışmanın iklim şartlarının kontrol edilebildiği ortamlarda modeldeki her bir iklim elemanın kalibre edilmesinde yarar vardır. Bu nedenle benzer çalışmaların iklimsel verilerin hassas bir şekilde izlendiği ortamlarda ve farklı toprak tekstürleri için de yapılmasına ihtiyaç vardır.

Ayrıca benzeri çalışmalar haza yağış akış çalışmaları ile entegre edilerek su verimlerinin hassas bir şekilde hesaplanarak su kaynaklarının iyi bir şekilde yönetilmesine hizmet edilmelidir.

Kaynaklar

- Ashraf, M. 1997. Dynamics of soil water under non-isothermal conditions. Ph. D. Thesis. University of Newcastle upon Tyne, UK.
- Burman, R. and L. O. Pochop, 1994. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Elsevier, Amsterdam.
- Burnes, C.J. and G. B. Allison, 1983. The distribution of deuterium and ¹⁸O in dry soils, I. Theory. Journal of Hydrology 60: 141-156.
- Camillo, P.J. and R. J. Gurney, 1986. A resistance parameter for bare-soil evaporate models. Soil Science 141: 95-105.
- Feddes, R.A. 1985 Crop water use and dry matter production: state of art . In: A. Perrier and C. Kiou (Eds.), Proceedings Conference Internationale De La ICID Sur Les Besoins En Eau Des Cultures, Paris, 11-14 September 1984, pp: 221-235.
- Konukcu, F. 1997. Upward transport of water and salt from shallow saline watertables. PhD thesis. University of Newcastle upon Tyne, UK.
- Konukcu F, A. İstanbulluoglu and I. Kocaman, 2004. Determination of water content in the drying soils: incorporating transition from liquid phase to vapour phase. Australian Journal of Soil Research 42: 1-8.
- Malik, K. S., R. Anlauf and J. Richter, 1992. A simple model for predicting evaporation from bare soils. Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde 155: 293-299.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society (London), A103, pp: 120-146.
- Penman, H. L. 1956. Evaporation: An introductory survey. Netherlands Journal of Agricultural Science 4: 9-29.
- Philip, J. R. and de D. A. Vries, 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Transactions of the American Geophysical Union 38: 222-232.
- Ragab, R. 2002. An integrated modelling approach for irrigation water management using saline and non-saline water: the saltmed model. Acta Hort. (ISHS) 573: 129-138
- Robinson, R. A. and R. H. Stokes, 1984. Electrolyte Solutions. Butterworths Publications, London. Areas From Climatological And Irrigation Data. United States Soil Conservation Service No: 96, 36p.
- Staple, W. J. 1974. Modified Penman equation to provide the upper boundary condition in computing evaporation from soil. Soil Science Society of America Proceedings 38: 837-839.
- van Dam, J. C., J. Huygen, J. G. Wesseling, R. A. Feddes, P. Kabat, P. E. van Walsum, P. Groenendijk and C. A. van Diepen, 1997. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP) environment. Technical Document 45. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
- van Genuchten, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44: 892-898.