

BİTKİ BÜYÜMESİNE İLİŞKİN OLARAK TOPRAK HAVALANMASI

İbrahim DEMİRALAY (1)

Bitkilerde ve muhitlerinde yer alan çeşitli biyolojik, fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar neticesinde vukubulan konsantrasyon veya nisbi basınç gradiantları sebebiyle muhit ve bitkiler arasında gaz değişimi yer almaktadır. Yeşil bitkilerin takriben tüm fizyolojisini direkt olarak kontrol etmeleri nedeniyle, CO₂ ve O₂ değişimi büyük önemi haiz ve mutlak lüzumludur. Bitkiler respirasyon için O₂'e ihtiyaç gösterir ve CO₂ istihsal ederler. Fotosentez için ise bunun aksi olmaktadır. Yeşil bitkilerin toprak üstü aksamı içerisindeki ve etrafındaki CO₂ noksanlığı, fotosentezi geriletir ve bundan bitki kısımlarının hepsi olumsuz yönde etkilenir. Diğer taraftan, kök atmosferinde O₂ noksanlığı, bitilerin çoğunda aerobik kök respirasyonunun gerilemesine, toksik bileşiklerin istihsaline ve bitki gıda elementlerinin alınımının güçleşmesine sebep olmak suretiyle, bütün bitki kısımlarında metabolizma aktivitelerini geriletmektedir (Grable, 1966). İşte bu gerçek, kök havalanması üzerinde önemli bir sorun olarak du-
rulmasına yol açmıştır.

Toprak yolu ile bitkiler ve atmosfer arasındaki gaz değişimi "toprak

havlanması" olarak ve bizzat bitki içerisindeki hücreler arası hava boşlukları yolu ile bitki ve atmosfer arasındaki gaz değişimi "bitki havalanması" olarak tanımlanmaktadır (Luxmoore ve çalış-
ma arkadaşları, 1970 a). Bitki havalanması yerine "dahili havalanma" terimi de kullanılmaktadır (Grable, 1966). Su bitkilerinin kökleri ve çeltik kökleri için dahili havalanma ve tarla bitkilerinin çoğunun kökleri için toprak havalanması hakim proses olarak kabul edilmektedir (Myers ve van Bavel, 1963). Toprak havalanmasında atmosferden köklere O₂ takviyesi ve köklerden atmosfere CO₂ uzaklaşması söz konusudur.

Toprak Havalanmasının Mekanizması

Kökler ve atmosfer arasındaki gaz değişimi esas itibarıyla difüzyon yolu ile ve tali derecede kütle akışı şeklinde vukubulmaktadır.

Kütle Akışı

Toprak havasının kütle akışı ile yenilenmesi, meteorolojik faktörlerin (sıcaklık derecesindeki farklılıklar, baro-

(1) Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak İlimi Bölümü Dr. Asistanı, Erzurum.

Dergi Komisyonuna geliş tarihi: 20.4.1973.

metrik basınç değişmeleri, rüzgâr, yağış) tesiri ile vukubulabilir. Bu faktörlerin tesirlerinin mekanizmaları Baver (1966) tarafından izah edilmektedir. Toprak ve atmosfer sıcaklık derecelerinin farklı oluşu ve toprak içerisindeki sıcaklık derecesi farklılıkları kütle akışı ile toprak havasının yenilenmesinde etkili olacaktır. Aynı şekilde barometrik basınç değişmeleri de kütle akışına sebep olacaktır. Rüzgârın basınç veya emme tesirleri toprak havasının yenilenmesini sağlayabilir. Mamafih, Rommel (Baver, 1966) bu tesirlerin normal toprak havalanmasının ancak 1/100-1/1000'i gibi çok küçük nisbetlerde olabileceğini hesapla tahmin etmiştir.

Toprak içerisine infiltre olan yağmur suyu da gözeneklerdeki toprak havasına yer değiştirmek suretiyle toprak havasının yenilenmesinde etkili olacaktır. Yağmur suyu, aynı zamanda, suda erimiş oksijen taşıyıcısı olarak da önemi haiz olabilir. Zira, 25 C° de ve 1 atm. basınçtaki hava ile denge durumundaki su, takriben 6 ml./l. nisbetinde O₂ ihtiva eder ki, bu miktar, takriben 1 g. kuru ağırlıktaki çok aktif kökler tarafından bir saatte kullanılan O₂ miktarına eşdeğerdir (Grable, 1966).

Oksijen, perkolasyon veya transpirasyon suyundan absorbe edilebilir. Hesaplamalar transpirasyon suyunun O₂ ihtiyacının % 1'inden daha fazlasını karşılayamadığını göstermiştir (Grable, 1966).

Islak topraklarda, hava-dolu boşlukların çoğu devamlı olmayıp su filmleri tarafından bloke edilmişlerdir ve O₂ difüzyonu çok yavaştır. Böyle durumlarda, total basınç (izotermal + izobarik) farklılıkları bir miktar kütle akışına sebep olmaya yeterli olabilir

ve bu şekilde respirasyon mahallerine O₂ nakli büyük önemi haiz olabilir. Nitekim, Cannon (Grable, 1966), bir çok bitki türünün bir gün veya daha uzun süre hayatiyetini devam ettirmesine yalnız % 1-2 O₂ konsantrasyonunun yeterli olabildiğini bulmuştur.

Özet olarak; kütle akışı ile toprak havasının yenilenmesini sağlaması muhtemel faktörlerin çoğu devamlı olmayıp fasıllı olarak vukubulduğundan, bunların toplam katkısının toprağın havalanma ihtiyacının % birkaçını geçmeyeceği anlaşılmaktadır.

Difüzyon

Hava ve sıvılar içerisinde ve gözenekli ortamlarda gaz moleküllerinin konsantrasyon veya nisbi basınç gradyanları sebebiyle yer değiştirmesi "difüzyon" olarak tanımlanmaktadır. Toprak havası atmosferden daha fazla CO₂ ve daha az O₂ ihtiva ettiğine göre, topraklarda difüzyon prosesi esas itibarile topraktan atmosfere CO₂ ve atmosferden toprak içerisine O₂ hareketi şeklinde tecelli eder. Toprak havalanmasında, (1) atmosfer ve toprağın hava dolu boşlukları arasında ve (2) toprak hava boşlukları ve bitki kökleri arasında gazların difüzyonu söz konusudur. Çünkü toprak daneleri ve canlı dokular hidrate durumda olduğuna göre, toprak havası ve aktif mahaller arasında gaz değişiminin muhtelif kalınlıklardaki su filmleri içerisinde difüzyon ile olması gerekir.

Topraklar ve bitkiler içerisinde gaz hareketi için muhtelif difüzyon formülleri kullanılmış olup; hepsi, 1885'de ortaya atılmış olan Fick'in birinci kanununu esas almaktadırlar.

Fick'in birinci kanunu :

$$q = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

Burada, c = gaz konsantrasyonu ($g./cm^3$), x = gaz hareketinin yer aldığı iki nokta arasındaki mesafe (cm), dc/dx = konsantrasyon gradiyatı, A = kesit alanı, $q = dc/dx$ konsantrasyon gradyanı altında A kesit alanından birim zaman (san.) zarfında geçen gaz miktarı ($g./san.$) ve D = orantı sabitesi veya difüzyon katsayısı ($cm^2/san.$).

Difüzyon katsayısı, D , difüzyon ortamının ve gazın bir özelliği olup; sıcaklık derecesi tarafından etkilenmektedir (Tablo 1). Görüleceği gibi, her iki gazın difüzyon katsayıları havada suya nazaran takriben 10^4 defa daha büyüktür. Bundan çıkarılacak sonuç şudur ki, toprak profili boyunca

toprak ve atmosfer arasındaki gaz değişiminde etkili difüzyonun hava dolu boşluklar içerisinde yer alması gerekir. Bunun içindir ki topraktaki hava dolu boşluk miktarı, difüzyon prosesinde etkili kesit alanını tayin etmesi bakımından çok önemli bir faktördür. Zira, formül (1)'den anlaşılacağı gibi, gaz difüzyon nisbeti kesit alanı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Gerçekte, çoğu tarla şartları altında toprak ve atmosfer arasında difüzyon yolu ile gaz değişiminin atmosferinkinden çok farklı olmayan bir toprak oksijen konsantrasyonu sağlayacak derecede süratli vukubulduğu anlaşılmaktadır. Fakat toprak nem miktarı arttıkça, gaz difüzyonu için etkili toprak kesit alanı azaldığından, gaz difüzyon nisbeti azalmaktadır [Buckingham, Baver (1966); Taylor, 1949]. Toprak sıkışma derecesindeki artışlar da benzer bir tesir icra etmektedir (Taylor, 1949).

Tablo 1. 25 C°'de su ve hava içerisinde O_2 ve CO_2 'nin difüzyon katsayıları ($cm^2/san.$) (Grable, 1966'dan alınmıştır).

	O_2	CO_2
Havada	0,226	0,181
Suda	$2,60 \times 10^{-5}$	$2,04 \times 10^{-5}$

Atmosferik hava içerisinde gaz hareketi serbest olup, toprak gibi gözenekli bir ortamda gaz hareketi mukavemetle karşılaşmaktadır. Bunun neticesi olarak bir gazın toprak içerisindeki difüzyon katsayısı serbest hava içerisindekinden daha küçüktür. Difüzyon katsayısındaki azalmayı Penman (1940 a, 1940 b), kısmen gaz moleküllerinin hareketi için elverişli kesit alanının azalmasına ve kısmen moleküllerin takip etmesi gereken yolun, etkili boşluk kanallarının

dolambaçlı olması sebebiyle, uzamasına atfetmiştir.

Mamafih, Penman (1940 a, 1940 b), farklı gözenekli ortamlardaki gaz difüzyon nisbetlerinden aşağıdaki bağıntıyı elde etmiştir:

$$D/D_0 = 0,66S \quad (2)$$

Burada, D = toprak havası içerisinde gaz difüzyon sabitesi, D_0 = serbest hava içerisinde gaz difüzyon katsayısı ve S = toprak hava dolu boşluk yüz-

desi veya etkili kesit alanıdır. D_0 , muayyen bir sıcaklık derecesi için sabittir, fakat D sabit kalmayıp S 'deki değişme ile orantılı olarak değişmektedir.

Daha sonraki çalışmalarda (Blake ve Page, 1948; Taylor, 1949; Van Bavel, 1952), formül (2) deki parametreler arasında takriben benzer bağıntı bulunmuştur. Bu sonuçlar, serbest difüzyon ve topraktaki difüzyon arasında, hava ve su arasında olduğu gibi, büyük bir fark olmadığını göstermektedir.

Toprak havası ve respirasyon mahalleri arasında yegane engel su filmleridir. Ancak su filmlerinin O_2 ve CO_2 difüzyon nisbetlerine etkisi, bunların suda erime nisbetlerinin farklı oluştundan dolayı farklı olacaktır. $25\text{ }^\circ\text{C}$ ve 760 mm. basınç şartları altında; O_2 ve CO_2 'in suda erirlikleri, sırası ile 0,039 ve 1,45 g./l. olup; CO_2 'in suda erirliği O_2 ' ninkinden 37 defa fazladır (Dittmar ve Grebe, 1958). Bunun, hava-su temas yüzeyinde, O_2 'e nazaran daha yüksek CO_2 konsantrasyonu gradyantına ve difüzyon nisbetine sebep olması gerekir. Örneğin, bitkiye zarar verecek seviyede yüksek bir CO_2 konsantrasyonuna ulaşılmadan önce, O_2 konsantrasyonları çok düşük seviyelere düşecektir (Boone ve Kuipers, 1970). Mamafih, Lemon (1962), toprak-bitki sisteminin muayyen bir yerinde (örneğin kök yüzeyinde) bitki hayatı için kritik bir O_2 konsantrasyonu tesbit edilebildiğinde, konsantrasyon gradyanti kurvesinin gerçek şeklinin pratiki bakımdan küçük önemi haiz olacağını beyan etmiştir.

Wiegand ve Lemon (1958) ve Lemon (1962), toprak bitki sisteminin havalanması için, sabit kalınlıkta bir su filmi ile çevrilmiş silindirik bir kök mo-

deline karatılı durumda radyal difüzyonu esas alan bir teori geliştirmişlerdir. Kök yüzeyindeki oksijen konsantrasyonu toprak havalanma indeksi olarak tayin edilmiştir. Kök yüzeylerinde oksijen konsantrasyonunun toprak nem tansiyonunun logaritması ile linear olarak arttığı bulunmuştur (Wiegand ve Lemon, 1958). Tarla kapasitesindeki killi bir toprağın 12 inç (30 cm.) derinliğinde, toprak havasında O_2 konsantrasyonunun % 19 civarında olmasına rağmen, kök yüzeyinde O_2 konsantrasyonunun takriben % 12'ye yaklaştığı tesbit edilmiştir (Wiegand ve Lemon, 1958). Örneğin bu değer ($4,45 \times 10^{-6}$ g./cm³'e eşdeğer), $25\text{ }^\circ\text{C}$ 'de soğan kökleri (kök ucundan itibaren 1,0 - 1,5 cm. kök dilimi) için kritiki kök yüzeyi konsantrasyonu olarak rapor edilmiştir (Berry, 1949). Bu husus yalnız, toprak hava boşlukları içindeki O_2 konsantrasyonunun düşük oluşunun değil, fakat kökler etrafındaki su filmi kalınlığının da normal kök respirasyonunu tahdit edebileceğini göstermektedir.

Yukarıdaki model teoride, dahili havlanma yolu ile köke oksijen takviyesi (longitudinal difüzyon) hesaba alınmamış ve aynı zamanda kök respirasyon nisbetinin kök boyunca pozisyon ile ve oksijen konsantrasyonundaki değişmeler ile değişmediği kabul edilmiştir. Halbuki respirasyon nisbeti, oksijen konsantrasyonu ve kök boyunca pozisyon ile önemli derecede değişmektedir (Berry 1949; Berry ve Norris, 1949; Luxmoore ve çalışma arkadaşları, 1970 b). Mamafih, Luxmoore ve çalışma arkadaşları (1970 a), radyal difüzyon ve longitudinal difüzyon ile kök içerisine gaz akışını ve aynı zamanda kök boyunca pozisyon ile respirasyon nis-

betinin değiştiğni hesaba alarak, toprak bitki sisteminin havalanması için bir model ve formüller geliştirmişlerdir.

Letey ve çalışma arkadaşları (1962), toprak havalanması için bir indeks olarak oksijen difüzyon nisbeti üzerinde durarak, oksijen difüzyon nisbetinin 20×10^{-8} 9./cm²./dak.'dan daha az olduğunda ayçiçeği köklerinin gelişme göstermediğini tesbit etmişlerdir. Genel bir kaide olarak, 40×10^{-8} g./cm²./dak.'dan daha büyük difüzyon nisbetlerinin ayçiçeğinde sürgün büyümesi, kök büyümesi ve gıda statüsü bakımından takriben optimum sayılabileceğini rapor etmişlerdir.

Kritik Toprak Hava Porozitesi

Toprak havalanması için gerçek bir indeks olabilecek toprak özelliğinin henüz tesbit edilememiş olduğu anlaşılmaktadır. Mamafih, bitki büyümesi ve mahsul veriminde önemli bir gerilemeye sebep olmayacak şekilde yeterli bir havalanma için bir minimum toprak hava boşlukları miktarına ihtiyaç olacağı muhakkaktır. Bunun için, toprak (toprak canlıları) ve bitki kökleri tarafından ne miktar oksijen kullanıldığının ve ne miktar karbondioksit istihsal edildiğinin ve hangi konsantrasyonlara tolerans edilebildiğinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu hususların bitki ve toprak özelliklerine bağlı olarak değiştiği muhakkaktır.

Toprak-bitki sistemi için kritik bir O₂ konsantrasyonu hakkında bir beyanda bulunmayı geleceğe bırakmak yerinde olacaktır Fakat CO₂ konsantrasyonu hakkında bazı beyanlarda bulunmak mümkündür. Bu maksatla, aşağıdaki satırlar Boone ve Kuipers (1970)'den aktarılmaktadır: "Uzun bir zaman CO₂ muhtevasının % 1 (c/v)'den

daha az olması gerektiği zannedilmiştir fakat bitkilerin çoğu için, kısa bir süre herhangi bir nisbette, % 10'a kadar konsantrasyonların zararlı olmadığı ispat edilmiştir. Hâttâ % 1-3 (v/v) arasındaki konsantrasyonların bitki üzerinde teşvik edici tesirleri rapor edilmiştir. Pratikde daha yüksek konsantrasyonlar ekseriye bulunmayacaktır, zira CO₂'in suda erirliği çok yüksektir."

Baver (1966) ve Wesseling ve van Wijk (Grable, 1966), toprak hava porozitesi ve bitki büyümesi münasebetini ilgilendiren daha önceki çalışmaların çoğunu elden geçirmişlerdir. Wesseling ve van Wijk, řu hükme varmışlardır: ilk yaklaşım olarak, hacim esasmdan % 10 hava boşlukları toprakta gazların değiştirilebileceği en düşük değer olarak kabul edilebilir ki, bu değer, bir drenaj operasyonunda elde edilmesi icab eden minimum hava satürasyonudur."

Köklerin Su Altında Kalması Şartlarında Bitki Büyümesi

Toprak nemi satürasyon noktasına doğru arttığında, toprak yolu ile kökler ve atmosfer arasında gaz değişim nisbeti gittikçe azalacaktır. Hâttâ tam satürasyon durumuna ulaşılmadan önce, toprak hava boşlukları, su filmleri tarafından bloke edilmeleri neticesinde, devamlılıklarını kaybedecekler ve gaz difüzyonu pratik olarak sıfır olacaktır. Böyle bir durumda, kökler respirasyon için lüzumlu oksijeni aerobik respirasyon yolu ile temin edemeyecekleri için fermentasyon (anaerobik respirasyon) başlayacaktır (Kramer, 1965; Woolley, 1965). Aerobik respirasyonun 1 mol glikozdan 6 mol CO₂ ve 686 kcal. enerji istihsalı ile neticelenmesine karşılık, fermentasyon 1 mol glikoz-

dan 2 mol CO₂ ve 2 mol alkol (etanol) istihali ve ancak 54 kcal. enerjinin açığa çıkması ile neticelenmektedir (Grable, 1966). Diğer bir ifade ile, her iki hal için CO₂ çıkışı eşitse, fermentasyon halinde aerobik hale nazaran glikoz sarfiyatı % 200 fazla fakat enerji çıkışı ancak % 24 kadar olacaktır. İstihl edilen bu enerji normal metabolizma için yeterli değildir. Bu nedenle, topraklar uzun süre satürasyon şartlarında (su altında) kaldığında, birçok kök hücreleri ölür ve hâttâ tüm bitki ölebilir. Tarla bitkileri su altında kalmaya gösterdikleri tolerans bakımından farklılıklar arz etmektedirler. Bu farklılıkların ve satüre topraklarda veya havalandırılmayan gıda çözeltilerinde normal veya normale yakın bitki gelişmesinin nasıl vukubulduğunun izahını bitki havlanması bulabiliyoruz.

Bugün artık bitkilerin tepesinden köklere doğru ve aksi istikamette, hücreler arası hava boşlukları yolu ile, gaz nakli olduğu bilinmektedir. Bu husustaki literatür oldukça tatmin edici bir şekilde Grable (1966) tarafından elden geçirilmiştir. Bazı bitkilerde kök içerisindeki hücreler arası hava boşlukları yolu ile köklerin respirasyon mahallerine önemli miktarda O₂'in bitki havlanması sayesinde sağlandığı bulunmuştur (Barber ve çalışma arkadaşları, 1962; jensen ve çalışma arkadaşları, 1968; Kramer, 1965). Bitki havlanması ile köklere oksijen takviye nisbeti kısmen kök hava porozitesine bağlı görünmektedir.

Çeltik ve bataklık bitkileri köklerinin tarla bitkilerine nazaran daha büyük hava porozitesine sahip oldukları tesbit edilmiştir (Armstrong, 1964; Burstrom, 1959; Vlamis ve Davis, 1944).

Bu bitkilerin su altında normal büyüme gösterebilmeleri, kök porozitelerinin büyüklüğü sayesinde bitki havlanması yolu ile gaz naklinin köklerin respirasyon ihtiyaçlarını karşılayabilmesine atfedilmektedir.

Hosner ve Leaf (Grable, 1966), Jackson (1955, 1956), Kramer (1951), Luxmoore ve Stolzy (1969) ve Peter ve çalışma arkadaşları (1969), su altında bırakılmayı müteakip, birçok bitki türü üzerinde yeni ârizî köklerin (adventitious roots) geliştiğini müşahade etmişlerdir. Bu köklerin çoğu su tablası üzerinde gövdeden çıkmışlar ve bir kısmı toprak içerisine gitmiyerek su içerisinde asılı kalmışlardır. Yeni kökler, orijinal köklere nazaran daha kısa ve daha kalın olup; daha büyük hava porozitesi arz etmişlerdir. Büyük hava porozitesine sahip yeni kökler teşkili bitkilerin su altında kalma şartlarında bitki havlanması yolu ile yaşamlarını devam ettirebilme yeteneğine sahip olduklarının bir tezahürü olarak kabul edilmektedir. Bundan başka, su altında bırakılma şartlarında orijinal köklerin gelişmesi uzunluk ve hacim itibarıyla, normal şartlardakine nazaran gerilemiş ve fakat hava porozitelerinde artış olmuştur. Kök hava porozitesindeki bu artış, bazı türlerde önemli miktarda olmuş ve diğer bazılarında önemsiz bulunmuştur. Hâttâ aynı bitki türünün farklı varyeteleri, su altında bırakılma sebebiyle kök hava porozitesindeki artış bakımından farklılıklar göstermişlerdir. Peter ve çalışma arkadaşları (1969), kök porozitelerindeki bu değişme nisbetinin muhtemelen bitkilerin kalıtsal karakteristikleri olduğunu ve bunun gelecekte toprakta fazla suya kök toleransı için bir ölçü olarak benimse-

nebileceğini işaret etmişlerdir. Su altında bırakılma sebebiyle, orijinal köklerdeki uzunluk ve hacim olarak büyüme gerilemesi, kök hava porozitesi büyük olan türlerde daha az, fakat türlerin hepsinde önemli derecede olmuştur. Su altında bırakılma aynı zamanda, kök sistemi üzerindeki tesirlerin büyüklüğü ile orantılı olarak, bitki türlerinin vejetatif gelişmesinde, büyüme safhalarına ulaşmasında ve mahsül verimlerinde gerilemeye sebep olmuştur.

Özet olarak ; Peter ve çalışma arkadaşları (1969) tarafından beyan edildiği gibi, bitkiler büyük hava porozitesine sahip yeni ârizî köklerin sayısını arttırmak suretiyle uzun süreli su altında kalma şartlarında yaşamlarını devam ettirmeye muktedir olma ihtimaline sahip olmalarına rağmen, bitki havalanması yolu ile O₂ takviyesinin ancak minimum bitki responsu ve metabolik aktiviteler için yeterli olabileceği, fakat maksimum büyüme ihtiyaçları için yetersiz olduğu ortaya çıkmaktadır.

LİTERATÜR

- Armstrong, W. 1964. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants. *Nature* 204: 801-822.
- Barber, D. A., Ebert, M. ve Evans, N. T. S. 1962. The movement of O₁₅ through barley and rice plants. *J. Exp. Bot.* 13: 397-403.
- Baver, L. D. 1966. *Soil Physics*. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Berry, J. L. 1949. The influence of oxygen tension on respiratory rate in different segments of onion roots. *J. Cellular Comp. Physiol* 33:41.
- Berry, J. L. ve Norris, Jr, W. E. 1949. Studies of onion root respiration. I. Velocity of oxygen consumption in different segments of root at different temperatures as a function of partial pressures of oxygen. *Biochem. Biophys. Acta.* 3: 593-606.
- Blake, G. R. ve Page, J. B. 1948. Direct measurement of gaseous diffusion in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 13: 37-42.
- Boone, F. R. ve Kuipers, H. 1970. Remarks on soil structure in relation to zero-tillage. *Neth. J. Agric. Sci.* 18: 262-269.
- Burstrom, H. 1959. Growth and formation of intercellularies in root meristems. *Phys. Plant* 12: 371-385.
- Dittmar, D. S. ve Grebe, R. M. 1958. *Handbook of Respiration*. W. B. Saunders Co., Philadelphia.
- Grable, A. R. 1966. Soil aeration and plant growth. *Advanc. Agron.* 18: 57-106.
- Jackson, W. T. 1955. Role of adventitious roots in the recovery of shoots following the flooding of original root systems. *Amer. J. Bot.* 42: 816-819.

- Jackson, W. T. 1956. The relative importance of factors causing injuries to shoots of flooded tomato plants. *Amer. J. Bot.* 43: 637-639.
- Jensen, C. R., Stolzy, L. H. ve Letey, J. 1966. Tracer studies of oxygen diffusion through roots of barley, corn, and rice. *Soil Sci.* 103: 23-29.
- Kramer, P. J. 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. *Plant Physiol.* 26: 722-736.
- Kramer, P. J. 1965. Effects of deficient aeration on the roots of plants. Conference Proceedings: Drainage for efficient crop production. *Amer. Soc. Agr. Eng. S.* 13, 14 ve 33.
- Lemon, E. R. 1962. Soil aeration and plant root relations. I. Theory. *Agron. J.* 54: 167-170.
- Letey, J., Stolzy, L. H., Valoras, N. ve Szuszkiewicz, T. E. 1962. Influence of oxygen diffusion rate on sunflower growth at various soil and air temperatures. *Agron. J.* 54: 316-319.
- Luxmoore, R. j. ve Stolzy, L. H. 1969. Root porosity and growth responses of rice and maize to oxygen supply. *Agron. J.* 61: 202-204.
- Luxmoore, R. J., Stolzy, L. H. ve Letey, J. 1970 a. Oxygen diffusion in the soil-plant system. I A model. *Agron. J.* 62: 317-322.
- Luxmoore, R. J., Stolzy L. H. ve Letey, j. 1970 b. Oxygen diffusion in the soil-plant system II. Respiration rate, permeability, and porosity of consecutive excised segments of maize and rice roots. *Agron. J.* 62: 322-324.
- Myers L. E. ve van Bavel C. H. M. 1963. Measurement and evaluation of water table elevation. *Trans. 5 th Cong. Intern. Comm. Irrig. Drainage.* s. 17. 109-117. 119.
- Penman, H. L. 1940 a. Gas and vapour movements in the soil I. The diffusion of vapours through porous solids. *J. Agr. Sci.* 30: 437-462.
- Penman, H. L. 1940 b. Gas and vapour movements in the soil. II. The diffusion of carbon dioxide through porous solids. *J. Agr. Sci.* 30: 570-581.
- Peter, T. Y., Stolzy L. H. ve Letey, J. 1969. Survival of plants under prolonged flooded conditions. *Agron. J.* 61: 844-847.
- Taylor, S. A. 1949. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Amer. proc.* 14: 55-61.
- Van Bavel, C. H. M. 1952. Gaseous diffusion in porous media. *Soil Sci.* 73: 91-104.
- Vlaminck, J. ve Davis, A. R. 1944. Effects of oxygen tension on certain physiological responses of rice, barley, and tomato. *Plant Physiol.* 19: 33-51.
- Wiegand, C. L. ve Lemon, E. R. 1958. A field study of some plant-soil relations in aeration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 22: 216-221.
- Woolley, J. T. 1965. Drainage requirements of plants. Conference Proceedings: Drainage for efficient crop production. *Amer. Soc. Agr. Eng. S.* 2-5.