TEKNİK MAKALE • SULAMA YÖNETİMİ VE TOPRAK SAĞLIĞI

Sulama Suyunda pH ve EC Dengesi: Tuzluluk Stresini Yönetirken Su ve Besin Alımını Korumak

Tarımsal sulama yönetiminde pH'ı düşürmek, besin elementlerinin bitki tarafından alınabilirliğini artırmak açısından temel bir adımdır; ancak bu müdahale tek başına yeterli değildir. Sulama suyunda ve kök bölgesinde (rizosfer) elektriksel iletkenlik (EC) dengesinin eş zamanlı olarak gözetilmesi gerekir. Yüksek EC, ortamdaki çözünür tuz yükünü artırarak bitkilerin su ve besin alımını doğrudan zorlaştırır. Küresel ölçekte tuzlu-alkali toprakların 1,381 milyar hektara (toplam kara alanının %10,7'sine) ulaşması ve sulanan tarım arazilerinin yaklaşık %10'unun tuzlulaşmadan etkilenmesi, pH ve EC yönetiminin sürdürülebilir tarım açısından taşıdığı kritik önemi ortaya koymaktadır (Zhang ve ark., 2025).

Yüksek EC ve Tuzluluk Yükü Bitki Fizyolojisini Nasıl Etkiler?

Kuraklık, yetersiz yağış ve yüksek buharlaşma gibi iklimsel koşullar, tarım topraklarının yüzeyinde çözünür tuzların birikmesine, toprak pH'ının yükselmesine ve suda çözünür tuz içeriğinin artmasına yol açmaktadır (Yang ve ark., 2024). Sulama suyu veya toprak çözeltisindeki yüksek EC değerleri, bitkilerde birbiriyle bağlantılı üç temel fizyolojik stres mekanizmasını tetikler:

- **Ozmotik Stres ve Su Alımının Kısıtlanması:** Ortamdaki yüksek çözünür tuz konsantrasyonları (özellikle NaCl), kök bölgesindeki ozmotik basıncı artırarak bitkinin su alımını sınırlar, kök gelişimini baskılar ve buna bağlı olarak besin maddesi edinimini kısıtlar (Zhang ve ark., 2025).
- **İyon Toksisitesi ve Besin Dengesizliği:** Aşırı sodyum (Na^+) birikimi, bitki gelişimi için temel olan potasyum (K^+) ve kalsiyum (Ca^{2+}) iyonlarının alımını engeller; klorür (Cl^-) birikimi ise hücresel yapılara zarar vererek fotosentezi bozar, yapraklarda kloroza ve gelişim geriliğine neden olur (Zhang ve ark., 2025).
- **Oksidatif Hasar:** Hücresel iyon dengesinin (homeostazisinin) bozulması, reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı birikimine yol açarak hücre zarlarında lipid peroksidasyonunu (artan MDA düzeyi) ve protein yıkımını hızlandırır (Zhang ve ark., 2025).

Sadece pH Düşürmek Neden Yeterli Değildir?

Tuzlu-alkali toprakların ve yüksek pH'lı sulama sularının ıslahında tek yönlü yaklaşımlar çoğu zaman beklenmeyen yan etkiler doğurur. Geleneksel kimyasal veya hidrolik ıslah yöntemleri yüksek su tüketimi ve maliyet gerektirebildiği gibi, ortama yeni tuz iyonları ekleyerek tuz geri dönüşü riskini artırabilmektedir (Yang ve ark., 2024).

Benzer bir denge gereksinimi, organik toprak düzenleyicilerin kullanımında da geçerlidir. Örneğin, yüksek gözenekliliği ve su tutma kapasitesiyle bilinen biyokömür (biochar), tek başına tuzlu-alkali topraklara uygulandığında içerdiği karbonatlar ve inorganik iyon salınımı nedeniyle başlangıç döneminde toprak pH'ını ve suda çözünür tuz yükünü artırabilmektedir. Yang ve ark. (2024)

tarafından yürütülen çalışmada, 30. günde kontrol grubunda (CK) 0,15 mS/cm olan toprak elektriksel iletkenliğinin (EC), tek başına biyokömür uygulanan gruplarda 1,01–1,60 mS/cm seviyesine yükseldiği raporlanmıştır.

Bu durum, asitlendirici veya düzenleyici girdilerin yalnızca pH üzerindeki etkisine değil, uygulanan çözeltinin ve kök bölgesinin EC değerine yaptığı katkıya da odaklanılması gerektiğini göstermektedir.

Pirolinyöz Asit (Odun Sirkesi) ile pH ve EC'nin Eş Zamanlı Yönetimi

Zeytin çekirdeği gibi tarımsal atıkların 700°C civarında oksijensiz ortamda piroliziyle elde edilen pirolinyöz asit (odun sirkesi), doğal asidik yapısı (pH ≈ 2–3,5), asetik asit ve fenolik bileşenleriyle tarımda hem pH düzenleyici hem de stres azaltıcı olarak öne çıkmaktadır (V-Pyro Teknik Dokümantasyonu; Agronomy Review, 2025). Ancak ham odun sirkesi yüksek organik asit içeriğine ve 3,30 mS/cm düzeyinde EC değerine sahip olduğundan, sulama suyunda tuzluluk yükü oluşturmadan pH düşürmek için doğru seyreltme oranıyla kullanılması zorunludur (Zhang ve ark., 2025).

Zhang ve ark. (2025) tarafından analiz edilen seyreltme profili, doğru oranda seyreltilen odun sirkesinin asidik karakterini korurken EC yükünü dramatik biçimde düşürdüğünü göstermektedir:

Tablo 1. Seyreltme oranlarına göre odun sirkesi çözeltisinin pH ve EC değerleri (Zhang ve ark., 2025)

Çözelti Durumu	pH	Elektriksel İletkenlik — EC (mS/cm)
Ham Odun Sirkesi	2,83	3,30
100× Seyreltme	3,05	0,20
300× Seyreltme	**3,23**	**0,13**
500× Seyreltme	3,33	0,08

Doğru dozda uygulanan pirolinyöz asit, tuzluluk ve yüksek pH baskısı altındaki bitkilerde çok yönlü bir iyileşme mekanizması çalıştırır:

- **Asit-Baz Nötralizasyonu ve İyon Homeostazisi:** İçerdiği asetik asit gibi organik asitler Na^+ iyonlarını şelatlayarak köklerden toksik sodyum alımını azaltırken, K^+ ve Ca^{2+} alımını artırır ve demir (Fe) gibi mikro elementlerin sürgünlere taşınımını destekleyerek klorofil sentezini korur (Zhang ve ark., 2025; Agronomy Review, 2025).
- **Tuzlu Ortamda EC ve Tuz Yükünün Azaltılması:** Yang ve ark. (2024) çalışmasında, odun sirkesi uygulaması 60. günde kontrol grubuna göre toprak pH'ını %12–24 oranında düşürmüş; suda çözünür toplam tuz içeriğini ortalama %29,30–%33,09 azaltmıştır. Aynı periyotta kontrol grubunda 2,31 mS/cm olan toprak EC değeri, odun sirkesi uygulamalarında 1,50–1,68 mS/cm bandına gerilemiştir.
- **Stres Altındaki Bitkilerde Yüksek Verim Yanıtı:** 65 bilimsel çalışmayı değerlendiren kapsamlı bir derleme, pirolinyöz asit uygulamasının genel olarak bitki biyokütlesinde %25 ve verimde %21

artış sağladığını; yüksek tuzluluk, kuraklık veya patojen stresi altındaki bitkilerde ise bu olumlu etkinin istatistiksel olarak anlamlı düzeyde ($p < 0,003$) daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur (Agronomy Review, 2025). Benzer şekilde, 100 mM NaCl tuz stresi altındaki buğday fidelerinde 300× seyreltilmiş odun sirkesi sürgün biyokütlesini %81, kök uzunluğunu ise %75 oranında artırmıştır (Zhang ve ark., 2025).

Biochar ve Pirolinyöz Asit Sinerjisi

Tek başına uygulandığında tuzlu topraklarda EC ve pH artışı riski taşıyabilen biyokömür, pirolinyöz asit ile birlikte kullanıldığında güçlü bir sinerji yaratır (Yang ve ark., 2024; V-Pyro Teknik Dokümantasyonu). Yang ve ark. (2024) verilerine göre, odun sirkesi ve biyokömürün kombine uygulanması (WB1), 60. günde toprak EC değerini kontrol grubundaki 2,31 mS/cm seviyesinden 0,90 mS/cm'ye kadar düşürmüş; değişebilir sodyum (Na^+) içeriğini kontrole kıyasla %23,61–%38,94 oranında azaltarak sodyum adsorpsiyon oranını (SAR) belirgin biçimde iyileştirmiştir.

Aynı piroliz sürecinden elde edilen bu iki ürünün birlikte kullanımı, biyokömürün gözenekli yapısı sayesinde toprakta su tutma kapasitesini artırarak %25–30 sulama suyu tasarrufu ve gübre yıkanmasının önlenmesini sağlarken, pirolinyöz asit çözünür biyoaktif bileşenleriyle pH ve rizosfer kimyasını dengeler (V-Pyro Teknik Dokümantasyonu).

Uygulamada Kritik Kural: Doz–Etki Penceresini Korumak

Sulama suyunda pH düşürme hedefiyle aşırı dozda asidik ürün kullanmak, hem EC dengesini bozarak ozmotik baskıyı artırabilir hem de organik asit birikimine bağlı fitotoksisiteye yol açabilir.

> **V-Pyro Doz–Etki Haritası (Dose-Map) Temel İlkesi**
>
> *"Fazla doz her zaman daha iyi sonuç değildir; doğru doz doğru etki penceresidir."*

Bilimsel bulgular bu hassas dengeyi açıkça doğrulamaktadır:

- **Genel Tarımsal ve Stres Yönetimi Dozu:** 65 çalışmanın meta-analizinde optimum uygulama aralığı %0,5–%1 olarak belirlenmiştir (Agronomy Review, 2025); V-Pyro uygulama protokollerinde de bitki gelişimi, kök teşviki ve stres yanıtı için %0,1–%1 aralığı temel alınmaktadır (V-Pyro Teknik Dokümantasyonu).
- **Besin Çözeltisi ve Hidroponik Hassasiyeti:** Doğrudan besin çözeltisine eklenen pirolinyöz asit uygulamalarında %0,3'ün altındaki konsantrasyonlar olumlu etki gösterirken, %0,3'ün üzerindeki oranlarda olumsuz etkiler başlayabilmektedir (Agronomy Review, 2025).
- **Fitotoksisite Eşiği:** Zhang ve ark. (2025) çalışmasında 300× seyreltme tuz stresini en yüksek verimle hafifletirken, 100× seyreltme aşırı organik asit nedeniyle fitotoksisite göstermiştir. Genel literatürde %6'nın üzerindeki konsantrasyonların bitki gelişimini baskıladığı, %10'un üzerindeki oranların ise herbisidal etki oluşturduğu bildirilmektedir (Agronomy Review, 2025).

Damla sulama sistemlerinde doğru seyreltme oranıyla uygulanan TSE K 683 standartlarına uyumlu pirolinyöz asit ve TSE K 684 uyumlu biyokömür kombinasyonları, sulama suyunun pH'ını hedeflenen aralığa çekerken EC yükünü kontrol altında tutarak bitkilerin su ve besin alımını güvence altına alır.

Kaynakça

1. **Zhang, T., et al. (2025).** *Recycling Agricultural Waste into Plant Protectants: Mechanisms of Wood Vinegar in Alleviating Salt Stress in Triticum aestivum L.* Agronomy, 15(9), 2078. DOI: 10.3390/agronomy15092078
2. **Yang, L., Tang, G., Xu, W., Zhang, Y., Ning, S., Yu, P., Zhu, J., Wu, Q., & Yu, P. (2024).** *Effect of Combined Application of Wood Vinegar Solution and Biochar on Saline Soil Properties and Cotton Stress Tolerance.* Plants, 13(17), 2427. DOI: 10.3390/plants13172427
3. **Agronomy Review (2025).** *Pyroligneous Acid Effects on Crop Yield and Soil Organic Matter in Agriculture—A Review.* Agronomy, 15(4), 927. DOI: 10.3390/agronomy15040927
4. **V-Pyro Teknik Dokümantasyonu (2025–2026).** *V-Pyro Doz–Etki Haritası (Dose-Map), Zeytin Çekirdeği Odun Sirkesi Sunumu, Web Yenileme Strateji Raporu ve Aldo Grup 2025 Sürdürülebilirlik Raporu.*