

Potential and Future Prospects for Using Certain Organic Acids in Sustainable Horticultural Crop Culture

Beyza Hafçı^{1*}, Fadimana Özel¹, Yaşar Ertürk¹

¹Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, 40100, Kırşehir, Türkiye.

Abstract

In modern horticultural production, minimizing the use of chemical inputs to protect soil health is a cornerstone of sustainability. In this context, humic, fulvic, and low molecular weight organic acids (citric, malic, amino acids, etc.) are widely discussed in the literature as biostimulants that promote plant growth. Low molecular weight organic acids temporarily lower the pH in the root zone, facilitating the chelation and uptake of microelements such as phosphorus and iron bound in the soil. Amino acid and fulvic acid applications activate the plant's antioxidant defense system (enzyme activities such as SOD, POD, and CAT) against stress factors such as drought, salinity, and extreme temperatures. Scientific studies have proven that organic acids increase chlorophyll synthesis, optimize photosynthetic activity, and promote the accumulation of sugars and vitamin C in fruits. In the future, it is expected that organic acid applications will be integrated with "Precision Agriculture" technologies. In particular, it is foreseen that controlled release of organic acids to targeted tissues via nano-carriers using nanobiotechnology will be applications that increase effectiveness while reducing application doses. Furthermore; One of the biggest expectations for the near future is that "biological cocktails," combining microbial synergies in nature—plant growth-promoting bacteria (PGPR)—and organic acids will be the strongest candidates to replace chemical fertilizers. In addition, the development of specific organic acid formulations, acting as "plant vaccines" against the irreversible environmental stresses caused by the accelerating climate change the world has been experiencing in recent years, is considered critical for global food security. Organic acid applications are not only a means of increasing yield but also a sustainable management strategy that protects the ecosystem. Future research is expected to focus on the effects of acids on molecular-level signal transduction pathways. This article evaluates the effects of organic acids on plant physiology and their potential future applications.

Key Words: Sustainable Agriculture, Biostimulants, Organic Acids, Nutrient Availability, Plant Physiology.

Bazı Organik Asitlerin Sürdürülebilir Bahçe Bitkileri Kültüründe Kullanım İmkanları ve Gelecek Perspektifi

Özet

Modern bahçe bitkileri üretiminde, kimyasal girdi kullanımını minimize ederek toprak sağlığını korumak sürdürülebilirliğin temel taşıdır. Bu bağlamda, humik, fulvik ve düşük molekül ağırlıklı organik asitler (sitrik, malik, amino asitler vb.), bitki gelişimini teşvik eden biyostimülantlar olarak literatürde geniş yer bulmaktadır. Düşük molekül ağırlıklı organik asitler, kök bölgesindeki pH'ı geçici olarak düşürerek, toprakta bağlı bulunan fosfor ve demir gibi mikro elementlerin şelatlanmasını ve bitki tarafından alımını kolaylaştırır. Amino asitler ve fulvik asit uygulamaları; kuraklık, tuzluluk ve aşırı sıcaklık gibi stres faktörlerine karşı bitkinin antioksidan savunma sistemini (SOD, POD ve CAT gibi enzim aktiviteleri) aktive eder. Organik asitlerin klorofil sentezini artırdığı, fotosentetik aktiviteyi optimize ettiği ve meyvelerde şeker ile C vitamini birikimini teşvik ettiği bilimsel çalışmalarla kanıtlanmıştır. Gelecekte organik asit uygulamalarının "Hassas Tarım" teknolojileriyle entegre olması beklenmektedir. Özellikle; nanobiyoteknoloji ile organik asitlerin nano-taşıyıcılar aracılığıyla hedeflenen dokulara kontrollü salınımı, uygulama dozlarını düşürürken etkinliği artırıcı uygulamalar şeklinde olacağı öngörülmektedir. Ayrıca; doğadaki mikrobiyal sinerjinin bitki gelişimini teşvik eden bakteriler (PGPR) ve organik asitlerin kombine edildiği "biyolojik kokteyller" şeklinde, kimyasal gübrelerin yerini alacak en güçlü adaylar olması yakın geleceğin en büyük beklentilerinden biridir. Bunun yanında dünyanın son yıllarda maruz kaldığı ve giderek hızlanan iklim değişikliğinin İslah edilemeyen çevresel streslere karşı "bitki aşısı" niteliğinde spesifik organik asit formülasyonlarının geliştirilmesi, küresel gıda güvenliği için kritik öneme sahip olacağı da düşünülmektedir. Organik asit uygulamaları, sadece bir verim artış aracı değil, aynı zamanda ekosistemi koruyan sürdürülebilir bir yönetim stratejisidir. Gelecekteki araştırmaların, asitlerin moleküler düzeydeki sinyal iletim yolları üzerindeki etkilerine yoğunlaşması öngörülmektedir. Bu makale, organik asitlerin bitki fizyolojisi üzerindeki etkilerini ve gelecekteki kullanım potansiyellerini değerlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Tarım, Biyostimülantlar, Organik Asitler, Besin Elementi Yarayırlılığı, Bitki Fizyolojisi.



Giriş

Sürdürülebilir bahçe bitkileri üretimi, artan küresel nüfus, iklim değişikliği ve doğal kaynakların sınırlılığı nedeniyle günümüzde tarımsal araştırmaların en önemli odak alanlarından biri haline gelmiştir. Geleneksel tarım uygulamalarının yoğun kimyasal gübre ve pestisit kullanımına dayalı olması; toprak sağlığının bozulması, biyolojik çeşitliliğin azalması ve çevresel kirlilik gibi ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda, daha çevre dostu ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesi amacıyla organik ve biyostimülant temelli yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Özellikle düşük molekül ağırlıklı organik asitler (DMAOA'lar), hem bitki fizyolojisi hem de toprak-bitki-mikroorganizma etkileşimleri açısından önemli fonksiyonel bileşikler olarak dikkat çekmektedir. Sitrik, malik, oksalik, laktik ve asetik asit gibi bileşikler kapsayan organik asitler, bitki kökleri tarafından rizosfere salgılanabilmekte veya dışarıdan uygulanabilmektedir. Bu bileşiklerin sürdürülebilir tarımda kullanım potansiyeli, özellikle besin elementlerinin mobilizasyonu, toprak mikrobiyal aktivitesinin artırılması ve bitki stres toleransının geliştirilmesi gibi mekanizmalar üzerinden açıklanmaktadır. Örneğin, düşük molekül ağırlıklı organik asitlerin fosfor gibi bitkiler için sınırlayıcı olan besin elementlerinin çözünürlüğünü artırarak bitki tarafından alınabilirliğini önemli ölçüde yükselttiği gösterilmiştir (Zhu vd., 2022). Benzer şekilde, organik asitlerin toprak mikrobiyal toplulukları üzerinde doğrudan etkili olduğu ve mikroorganizmalar için kolay kullanılabilir karbon kaynağı sağlayarak mikrobiyal aktiviteyi artırdığı rapor edilmiştir (Macias-Benitez vd., 2020). Bu durum, organik maddenin mineralizasyonunu hızlandırmakta ve bitki besin maddelerinin döngüsünü desteklemektedir. Ayrıca, organik asitlerin rizosfer

ortamında pH düzenleyici etkisi sayesinde besin elementlerinin çözünürlüğünü artırdığı ve böylece bitki büyümesini teşvik ettiği bilinmektedir.

Sürdürülebilir bahçe bitkileri üretiminde organik asitlerin bir diğer önemli rolü, abiyotik stres koşullarına karşı bitki direncini artırmalarıdır. Tuzluluk, kuraklık ve yüksek sıcaklık gibi stres faktörleri, bitkilerde verim ve kalite kayıplarına neden olmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, organik asitlerin bu stres koşulları altında bitkilerin fizyolojik ve biyokimyasal tepkilerini düzenleyerek dayanıklılığı artırdığını göstermektedir. Organik asit uygulamalarının, iyon dengesini düzenlediği, antioksidan savunma sistemlerini aktive ettiği ve bitkilerin stres koşullarında daha iyi performans göstermesine katkı sağladığı bildirilmiştir (Luo vd., 2026).

Bahçe bitkilerinde yapılan uygulamalı çalışmalar da organik asitlerin pratik kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır (Ghazijahani vd., 2014; Ahmed, 2023). Bununla birlikte, organik asitlerin etkileri yalnızca bitki fizyolojisi ile sınırlı olmayıp, toprak özelliklerinin iyileştirilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Organik asitlerin toprak yapısını iyileştirdiği, agregat stabilitesini artırdığı ve su tutma kapasitesini geliştirdiği bilinmektedir. Ayrıca, toprakta bulunan toksik elementlerle kompleks oluşturma (şelasyon) özellikleri sayesinde ağır metal stresini azaltarak bitki gelişimini dolaylı olarak desteklemektedir. Bu özellikler, özellikle bozulmuş ve tuzlulaşmış toprakların rehabilitasyonunda organik asitlerin önemli bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Luo vd., 2026). Son yıllarda yapılan araştırmalar, organik asitlerin yalnızca bir besin maddesi veya metabolik ara ürün değil, aynı zamanda bitki büyümesini düzenleyen biyostimülantlar olarak da değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, organik asitlerin sürdürülebilir bahçe bitkileri üretim sistemlerinde kullanımı; kimyasal girdilerin azaltılması, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve ürün kalitesinin artırılması açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, farklı organik asit türlerinin etki mekanizmalarının tam olarak anlaşılması, optimum uygulama dozlarının belirlenmesi ve uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi gibi konular hâlen araştırılmaya devam etmektedir.

Bu çalışma kapsamında, belirli organik asitlerin sürdürülebilir bahçe bitkileri üretimindeki kullanılabilirliği ve gelecekteki potansiyelleri kapsamlı bir şekilde ele alınarak, mevcut literatür ışığında değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Organik Asitlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Toprak organik asitleri (OA'lar), rizosferde salınan organik moleküllerin suda çözünebilen kısımlarının önemli bir bölümünü oluşturur. Çoğu tarım toprağının normal bileşenleridir ve toprak besin maddelerinin kullanılabilirliği, ekolojisi ve verimliliğinde önemli roller oynarlar.

Genel olarak, organik asitler (OA'lar) zayıf asitlerdir ve suda tamamen çözünmezler. Toprak OA'ları genel olarak iki gruba ayrılabilir: yüksek molekül ağırlıklı OA'lar ve düşük molekül ağırlıklı OA'lar. Yüksek molekül ağırlıklı OA'lar, birkaç yüz ila bir milyon Dalton (DA) arasında değişen yüksek molekül ağırlıklarıyla karakterize edilir. Suda çözünmezler. Düşük molekül ağırlıklı OA'lar ise 46 DA ile birkaç yüz DA arasında değişen nispeten düşük molekül ağırlığına sahiptir. Yüksek molekül ağırlıklı OA'lara kıyasla daha fazla çözünürdürler (Perminova vd., 2003). Düşük molekül ağırlıklı organik asitler genellikle bir ila üç karboksil grubu içerirken, Yüksek molekül ağırlıklı OA'lar üçten fazla karboksil grubu içeren OA'lardır. Sitrik, oksalik, malik, süksinik, malonik ve maleik asitler, diğerlerinin yanı sıra, düşük molekül ağırlıklı organik asitlere örnek teşkil eder (Jiang vd., 2012), yüksek molekül ağırlıklı organik asitler ise hümitik asit ve fulvik asitleri içerir (Haynes & Mokolobate, 2001, Perminova vd., 2003).



Toprak ekolojik sistemindeki organik asitlerin çoğu bitki, mikrobiyal ve organik madde ayrışmasıyla ilişkilendirilmiştir (Jones vd., 2003, Mimmo vd., 2008, Nwoke vd., 2008). Bitkiyle ilişkili organik asitler genellikle kök salgılarından, yağmur suyuyla taşınmadan ve yaprak döküntülerinin yıkanmasından kaynaklanır (Dakora & Phillips, 2002). Mikroorganizmalar arasında bakteri, mantar ve liken türleri önemli miktarda toprak organik asidi üretir. Organik asitler toprak ortamındaki mikroorganizmalar tarafından biyotik ve abiyotik streslere karşı bir adaptasyon mekanizması olarak sentezlenebilir ve salgılanabilir (Morgan vd., 2005). Benzer şekilde, ayrılmış organik madde de toprak ortamını zenginleştiren yüksek konsantrasyonlarda organik asitlere katkıda bulunur (Lian vd., 2008, Aoki vd., 2012). Karbon döngüsü, organik asitlerin bitkilerin bileşenleri olan CO₂, su ve güneş ışığından üretildiği, daha sonra organik maddeye dönüştüğü ve sonrasında CO₂, su ve enerjiye geri döndüğü kapalı bir sistem olarak tanımlanmıştır (Fenton & Helyar, 1999). Bu döngünün bir kısmı, biyolojik türlerden (mikroplar, bitkiler ve hayvanlar) gelen organik asitler ile kaya arasındaki etkileşimi içerir. Bu, bitki büyümesi için kationların salınmasına neden olan ayrışma sürecinin ilk kısmıdır. Örneğin, glukonik asit, fosfat çözünürlüğünü indüklemeye yeteneğiyle sıklıkla rapor edilen bir metabolittir (Uroz vd., 2009).

Toprakta bulunan çok çeşitli organik asitler arasında, oksalik, sitrik, malik, asetik, formik ve tartarik asitler gibi düşük molekül ağırlıklı organik asitlerin toprak verimliliğinde önemli roller oynadığı belirlenmiştir. Organik asitlerin toprak biyolojik süreçlerindeki etkinliği, en az etkili olan trikarboksilik düşük molekül ağırlıklı organik asitlerden (sitrik ve tartarik asitler), en etkili olan dikarboksilik düşük molekül ağırlıklı organik asitlere (maleik ve fumarik asitler) ve en etkili olan monokarboksilik düşük molekül ağırlıklı organik asitlere (oksalik ve asetik asitler) doğru azalan bir sırayı takip eder (Andrade vd., 2013).

Çeşitli ekosistemlerde, toprak çözeltisindeki organik asitlerin (OA) konsantrasyonu, di/trikarboksilik asitler (oksalik, malonik, malik, süksinik, tartarik ve sitrik asit) için tipik olarak 0 ila 50 µM ve monokarboksilik asitler (formik, asetik, propiyonik, bütirik, valerik ve laktik asit) için 0 ila 1 mM arasında değişmektedir. Bununla birlikte, bu konsantrasyonların toprak tipine ve diğer faktörlere bağlı olarak oldukça değişken olabileceği vurgulanmıştır (Strobel vd., 2005).

Düşük Molekül Ağırlıklı Organik Asitler

Düşük molekül ağırlıklı organik asitler, bitkilerin köklerinde, yapraklarında ve meyvelerinde yaygın olarak bulunur ve birincil lezzet ve besin bileşenleri olarak görev yapar. Atmosferdeki organik asitler ise çoğunlukla fotokimyasal reaksiyonlar, araç emisyonları ve kömür yanması sonucu oluşur (Huang vd., 2005). Sadece bitkilerde besin emilimi ve stomatal açılma gibi fizyolojik metabolik süreçlere katılmakla kalmaz, aynı zamanda çeşitli hücrel metabolik yollar için bağlantı görevi görerek bitki büyüme ve gelişimi üzerinde olumlu bir etki gösterirler (Ferne & Martinoia 2009). Toprak çözeltisinde organik asitlerin konsantrasyonu genellikle şu sırayı izler: propiyonat > sitrat > oksalat, ortalama toplam konsantrasyon $8.7 \pm 2.3 \mu\text{mol/L}$ 'dir. Sitrat ve oksalat konsantrasyonları genellikle 1–100 µmol/L aralığındadır (Westergaard & Hansen, 1998). Bu bileşikler özellikle rizosfer süreçlerinde önemli rol oynar (Jones, 1998; Lundström &, 2000).

- Fe ve fosfatın mobilizasyonu
- Al toksisitesine karşı koruma
- Mineral ayrışmasının hızlandırılması
- Fe ve Al taşınımı

Ayrıca podzolizasyon gibi uzun vadeli toprak oluşum süreçlerinde kritik rol oynarlar (van Hees vd., 2000). Minerallerle yüzey reaksiyonları sayesinde; metal taşınımı, kirlenici dönüşümü ve biyoyararlanım üzerinde etkili olurlar (Errecalde & Campbell, 2000). Ayrıca:

- Sitrik asit: Fosfor ve mikro elementlerin çözünürlüğünü artırır.
- Malik asit: Kök büyümesini teşvik eder ve stres toleransını artırır.
- Oksalik asit: Metal iyonlarının şelatlanmasında rol oynar.
- Laktik ve asetik asit: Mikrobiyal aktiviteyi düzenler.

Bu organik asitler, özellikle besin elementlerinin şelatlanması ve bitki tarafından alınabilir forma dönüştürülmesinde kritik rol oynamaktadır (Jones, 1998). Yüzey ekosisteminde karbon döngüsü ile kirlenici dinamikleri arasında köprü vazifesi gören bu organik asit türleri "aktif" moleküllerdir. Fotokimyasal üretimleri ve mikrobiyal mineralizasyonları arasındaki denge, su kütlelerinin ve toprakların ekolojik sağlığını belirler (Xiao & Wu 2014). Düşük molekül ağırlıklı organik asitler ağır metaller ve toksik organik bileşiklerin çevresel davranışını düzenler; bunu adsorpsiyon ve şelasyon/kompleksleşme mekanizmalarıyla gerçekleştirir (Gao vd., 2010). Biyosferde madde ve enerji taşıyıcıları olarak önemli rol oynayan bu bileşikler, mikroorganizmalar tarafından tüketilerek biyokütle artmasına katkı sağlar. Aynı zamanda organizmaların salgıları ve makromoleküler organik maddenin parçalanması sonucu yeniden ortama salınırlar (Kleerebezem vd., 1999).

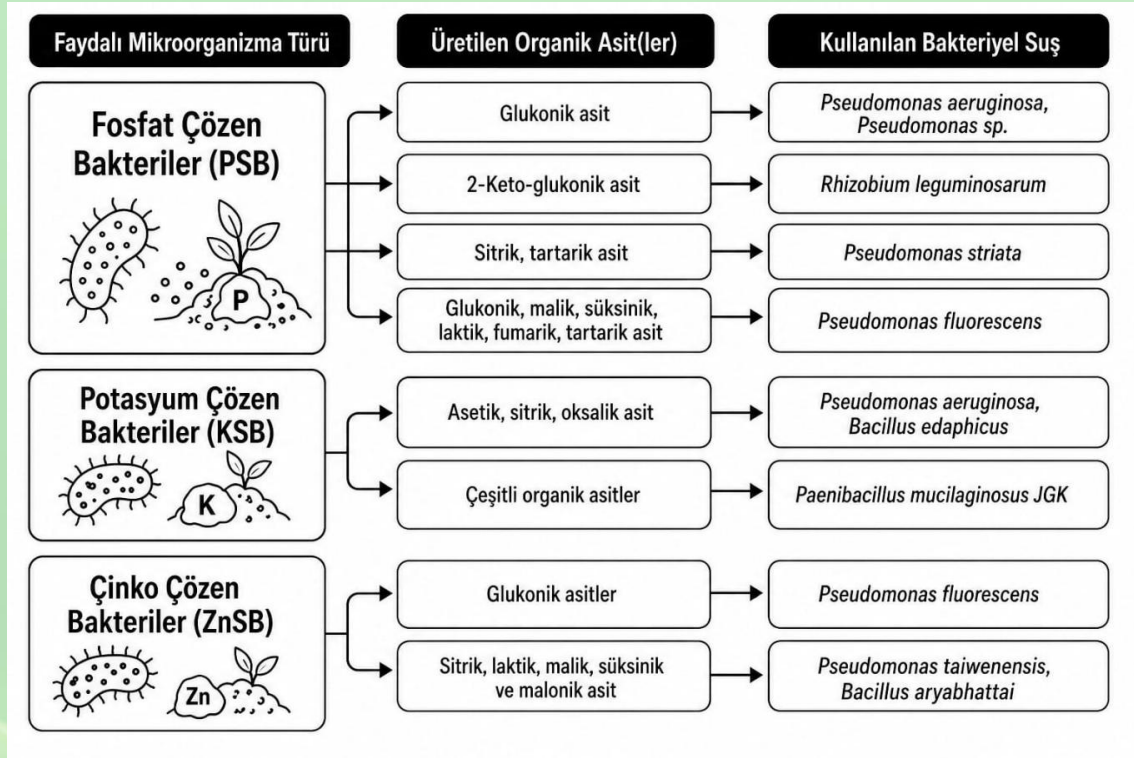
Mikrobiyal Kaynaklı Organik Asitler

Organik asitler, karbon, hidrojen ve oksijen elementlerinin katılımına göre farklılık gösterir. Mikrobiyal aktivite ile üretilen başlıca organik asit türleri sitrik asit, süksinik asit, laktik asit, itakonik asit, laktobiyonik asit, glukonik asit, fumarik asit, propiyonik asit ve asetik asittir (şekil 1 ve şekil 1)



Tablo 1. Faydalı mikroorganizmalar tarafından üretilen organik asitler

Faydalı Mikroorganizma Türü	Üretilen Asit(ler)	Organik	Kullanılan Bakteriyel Suş	Referanslar
Fosfat Çözen Bakteriler (PSB)	Glukonik asit		<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas sp.</i>	van Schie vd. (1985); Illmer and Schinner (1992)
	2-Keto-glukonik asit		<i>Rhizobium leguminosarum</i>	Halder vd. (1991)
	Sitrik, tartarik asit		<i>Pseudomonas striata</i>	Gaur (1990)
	Glukonik, malik, süksinik, laktik, fumarik, tartarik asit		<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Henri vd. (2008)
Potasyum Çözen Bakteriler (KSB)	Asetik, sitrik, oksalik asit		<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus edaphicus</i>	Badr vd. (2006); Sheng & He (2006)
	Çeşitli organik asitler		<i>Paenibacillus mucilaginosus</i> JGK	Chen vd. (2020)
Çinko Çözen Bakteriler (ZnSB)	Glukonik asitler		<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Simine vd. (1998)
	Sitrik, laktik, malik, süksinik ve malonik asit		<i>Pseudomonas taiwenensis</i> , <i>Bacillus aryabhattai</i>	Vidyashree vd. (2018)



Şekil 1. Faydalı mikroorganizmalar tarafından üretilen organik asitler

Toprak mikroorganizmaları tarafından üretilen organik asitler, rizosfer ekolojisinde önemli bir yere sahiptir. Özellikle fosfat çözücü bakteriler tarafından salgılanan organik asitler, çözünmeyen fosfor formlarını bitkiler için kullanılabilir hale getirmektedir (Rodríguez & Fraga, 1999). Ayrıca bu mikroorganizmalar, organik asit üretimi yoluyla toprak pH'sını düşürmekte ve besin elementlerinin mobilitesini artırmaktadır (Macias-Benitez vd., 2020). Bu durum, sürdürülebilir tarım uygulamalarında mikrobiyal gübrelerle birlikte organik asitlerin kullanımını daha da önemli hale getirmektedir.

Organik Asitlerin Toprak Özellikleri Üzerine Etkileri

Organik asitler, toprak ekosisteminde fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri etkileyerek bitki gelişimi açısından kritik rol oynamaktadır. Özellikle rizosfer bölgesinde salgılanan düşük molekül ağırlıklı organik asitler, besin elementlerinin mobilizasyonu, toprak pH düzenlenmesi ve mikrobiyal aktivitenin artırılması gibi mekanizmalarla toprak verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Jones, 1998).



Organik Asitlerin Toprak Özellikleri Üzerine Etkileri

Organik asitler, toprak ekosisteminde fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri etkileyerek bitki gelişimi açısından kritik rol oynamaktadır. Özellikle rizosfer bölgesinde salgılanan düşük molekül ağırlıklı organik asitler, besin elementlerinin mobilizasyonu, toprak pH düzenlenmesi ve mikrobiyal aktivitenin artırılması gibi mekanizmalarla toprak verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Jones, 1998).

Organik Asitlerin Toprak Kimyası Üzerine Etkileri

Organik asitler, toprak kimyasını etkileyen en önemli biyokimyasal bileşik gruplarından biri olup, özellikle besin elementlerinin çözünürlüğü ve hareketliliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Düşük molekül ağırlıklı organik asitler (sitrik, malik, oksalik, laktik ve asetik asit gibi), toprak çözeltisinde metal iyonları ile kompleks oluşturarak besin elementlerinin bitkiler tarafından alınabilirliğini artırmaktadır (Jones vd., 2003; Richardson vd., 2009; Dakora & Phillips, 2002). Bu bağlamda organik asitlerin en önemli etkilerinden biri şelatlama mekanizmasıdır. Organik asitler, Fe^{3+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} ve Cu^{2+} gibi mikro elementlerle kompleks oluşturarak bu elementlerin çözünür formda kalmasını sağlar (Marschner, 2012). Özellikle kireçli ve alkali topraklarda demirin çözünürlüğü ciddi şekilde sınırlı olduğundan, organik asitlerin varlığı bitki beslenmesi açısından kritik hale gelmektedir (Hinsinger, 2001). Bunun yanı sıra organik asitler, fosforun mobilizasyonunda önemli rol oynamaktadır. Fosfor, çoğu toprakta kalsiyum, demir ve alüminyum bileşikleriyle bağlanmış durumda bulunur ve bitkiler tarafından doğrudan alınmaz. Organik asitler bu bağları kırarak fosforun çözünür hale geçmesini sağlar. Özellikle sitrik ve oksalik asidin fosfor çözünürlüğünü artırmada etkili olduğu birçok çalışmada ortaya konmuştur (Ryan vd., 2001; Gerke, 2015).

Çalışma sonuçlarında ve yayınlarda organik asitlerin toprak kimyası üzerindeki etkileri genel olarak olumlu değerlendirilmekte birlikte, bu etkilerin; toprak tipi, pH, organik madde içeriği, mikrobiyal aktivite gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Bu durum, farklı çalışmalar arasında elde edilen sonuçların neden tam olarak örtüşmediğini açıklamaktadır.

Organik Asitlerin Bitki Beslenmesi Üzerine Etkileri

Organik asitler, bitki beslenmesi üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı etkiler gösteren önemli bileşiklerdir. Bu etkiler, besin elementlerinin çözünürlüğünü artırmaları, kök morfolojisini değiştirmeleri ve hücresel düzeyde metabolik süreçleri düzenlemeleri ile ilişkilidir (Jones, 1998; Dakora & Phillips, 2002; Marschner, 2012). Organik asitlerin bitki beslenmesine katkısının temelinde, besin elementlerinin biyoyararlanımını artırma yetenekleri bulunmaktadır.

Toprak Mikrobiyal Aktivitesi Üzerine Etkileri

Mikroorganizmalar; organik madde ayrışması, besin elementlerinin mineralizasyonu ve biyokimyasal döngülerin sürdürülmesinde kritik rol oynar. Organik asitler, özellikle rizosfer ortamında mikroorganizmalar tarafından üretilen veya bitki kökleri tarafından salgılanan düşük molekül ağırlıklı bileşikler olarak, mikrobiyal aktiviteyi doğrudan ve dolaylı yollarla etkileyen önemli düzenleyicilerdir (Jones, 1998; Macias-Benitez vd., 2020; Dakora & Phillips, 2002). Organik asitlerin mikrobiyal aktivite üzerindeki en önemli etkilerinden biri, mikroorganizmalar için kolay erişilebilir karbon kaynağı sağlamalarıdır. Sitrik, malik ve oksalik asit gibi düşük molekül ağırlıklı organik asitler, mikroorganizmalar tarafından hızlı bir şekilde metabolize edilerek enerji üretiminde kullanılır. Bu durum, mikrobiyal biyokütlede artışa ve solunum hızının yükselmesine neden olur.

Toprak Organik Maddesi ve Yapısal Özellikler Üzerine Etkileri

Toprak organik maddesi, toprak verimliliği, su tutma kapasitesi, agregat stabilitesi ve mikrobiyal aktivitenin temel belirleyicilerinden biridir. Organik asitler, hem bitki kök eksudatları hem de mikrobiyal metabolizma sonucu oluşarak toprak organik maddesinin dönüşümü ve stabilizasyonunda önemli rol oynar (Kalbitz vd., 2000; Lehmann & Kleber, 2015). Düşük molekül ağırlıklı organik asitler, organik maddenin çözünürlüğünü artırarak çözünür organik karbon fraksiyonunu yükseltir. Bu durum, mikrobiyal aktiviteyi teşvik ederek organik maddenin mineralizasyonunu hızlandırır. Ancak bu süreç, kısa vadede karbon kaybına neden olabilirken, uzun vadede mikrobiyal dönüşüm yoluyla daha stabil organik bileşiklerin oluşumuna katkı sağlayabilir (Kuzuyakov, 2010) (şekil 2).

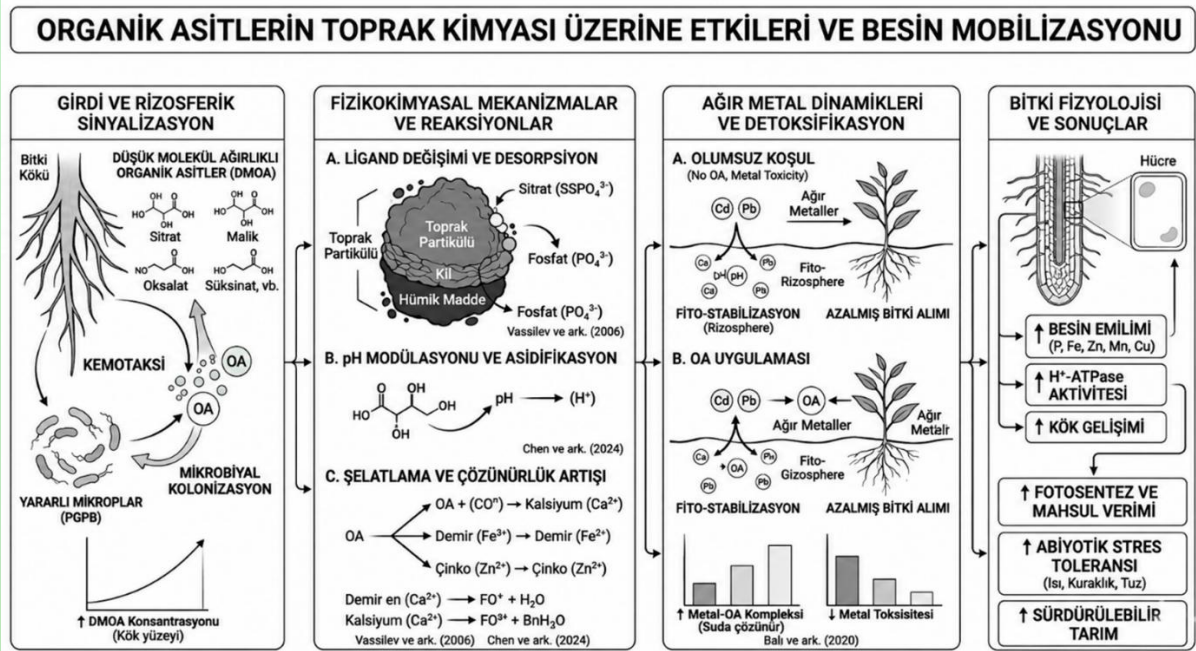
Bitki Fizyolojisi Üzerindeki Etkileri

Kök Gelişimi ve Rizosfer Etkileşimleri

Sürdürülebilir bahçe bitkileri yetiştiriciliğinde, bitki kök sistemi ile onu çevreleyen toprak matrisi arasındaki dinamik arayüz olan rizosfer, tarımsal verimliliğin temel belirleyicisidir (Oburger & Schmidt, 2016; Kuzuyakov & Razavi, 2019). Bu mikro-çevredeki biyokimyasal etkileşimler büyük ölçüde bitkiler ve mikroorganizmalar tarafından salgılanan düşük molekül ağırlıklı organik asitler (DMOA) ile topraktaki hümfikasyon süreçlerinden türeyen yüksek molekül ağırlıklı organik asitler (YMOA) tarafından şekillendirilir (Bais vd., 2006; Nardi vd., 2021). Organik asitlerin kök gelişimi üzerindeki en dramatik etkilerinden biri, kök mimarisinin plastisitesini



artırmalarıdır. Yapılan çalışmalar, hümit ve fülvik asitlerin plazmalemma ve tonoplastta bulunan H⁺-ATPaz enzim pompalarını aktive ederek hücre zarı hiperpolarizasyonuna yol açtığını ve "asit büyüme teorisi" (acid growth theory) bağlamında hücre duvarı esnekliğini artırdığını kanıtlamıştır (Zandonadi vd. 2007; Zandonadi vd., 2010). Bu süreç, özellikle yanal kök (lateral root) ve kök emici tüy (root hair) oluşumunu teşvik ederek bitkinin toprakla olan temas yüzeyini geometrik olarak genişletir (Conselvan vd., 2017; Jindo vd., 2012).



Şekil 2. Organik asitlerin toprak kimyası üzerine etkileri (izosfer dinamiklerinde organik asitlerin (OA) merkezi rolünü 'girdi-mekanizma-sonuç' ekseninde özetlemektedir. OA'lar bir yandan toprak kimyasını (pH düşüşü ve ligand değişimi) modüle ederek besin biyoyararlanımını optimize ederken, diğer yandan abiyotik stres (tuzluluk, kuraklık) altında bitki dayanıklılığını artırır. Bu çok fonksiyonlu mekanizma, kimyasal gübre bağımlılığını azaltan sürdürülebilir tarım modelleri için temel bir biyokimyasal stratejidir.

Besin Alımı ve Taşınımı

Organik asitlerin bahçe bitkilerinde besin elementi alımı ve vasküler dokulardaki taşınımı üzerindeki etkileri, sürdürülebilir bitki beslemenin omurgasını oluşturur (Rouphael & Colla, 2020). Fosfor (P), toprakta genellikle kalsiyum, demir veya alüminyum ile kompleksler oluşturarak çözünmez formlarda fiks olur ve bitkiler tarafından doğrudan alınamaz (Shen vd., 2011). Ancak, bitkiler fosfor eksikliği algıladıklarında kök apikal meristemlerinden ve küme köklerinden (cluster roots) yüksek miktarda sitrat, malat ve oksalat salgırlar (Neumann & Römheld, 1999; Lambers & Pieter., 2003). Bu DMOA'lar, anyon değişim (ligand exchange) mekanizması aracılığıyla mineral yüzeylerindeki fosfat iyonlarının yerini alarak inorganik fosforu toprak çözeltisine serbest bırakır ve biyoyararlılığını (bioavailability) maksimize eder (Hinsinger, 2001; Vance vd., 2003; Richardson vd., 2009;).

Fotosentez ve Metabolik Süreçler

Fotosentetik kapasite ve karbon (C) metabolizması, bitkisel üretimin nihai verimini tayin eden en kritik fizyolojik parametrelerdir. Organik asitlerin foliar (yapraktan) veya topraktan uygulanması, fotosentetik aygıtın etkinliğini yapısal ve biyokimyasal düzeyde önemli ölçüde modifiye eder (Berbara & García, 2014). Hümit ve fülvik asitler, kloroplastlarda klorofil a ve b biyosentezi için elzem olan demir ve magnezyum alımını artırmanın yanı sıra, porfirin halkası sentezinden sorumlu enzimlerin spesifik aktivitelerini uyarır (Nardi vd., 2002; Chen vd., 2004).

Hüresel solunum ve temel metabolik yollar (Trikarboksilik Asit - TCA döngüsü) açısından DMOA'lar, sadece birer uyarıcı değil, doğrudan metabolik ara ürünler olarak işlev görürler (Juszczuk & Rychter, 2003). Sitrik, malik ve süksinik asit gibi karboksilatlar, bitki dokularında karbon depolama, enerji (ATP) üretimi ve hüresel pH regülasyonu süreçlerinde merkezi bir görev üstlenir.

Büyüme Düzenleyici Etkiler

Fitohormonal dengenin modülasyonu sadece büyümeyi değil, bitkinin savunma mekanizmalarını da yönetir. Örneğin, abiyotik stres koşullarında (ağır metal toksisitesi, pH dalgalanmaları), bitkilerin kendi iç mekanizmalarıyla DMOA (özellikle oksalik ve sitrik asit) üretimi tetiklenir ve bu asitler toksik iyonların (örneğin Al³⁺) vakuollerde sekestre edilmesinde (hüresel izolasyon) görev alarak bitki büyümesini korur (Kochian vd., 2004).



Stres Koşullarında Organik Asitlerin Rolü

Bitkiler çeşitli ve karmaşık etkileşimlerle karşı karşıyadır. (Ghadirnezhad Shiade vd. 2023 a,b) Çok sayıda çevresel faktörü içeren biyotik ve abiyotik strese maruz kaldıklarında, bitkiler metabolik süreçlerinde bozulmalar yaşarlar, bu da genel büyümede azalmaya ve verimlilikte düşüşe yol açar (González Guzmán vd. 2022; Ghadirnezhad Shiade vd. 2023c). Abiyotik stres, bitki büyümesini önemli ölçüde etkiler ve tarımsal ürünlerde önemli kayıplara neden olmada temel bir rol oynar. Gözlemlenen büyüme kaybı, bitki türlerinin büyük çoğunluğu için %50'yi aşabilmektedir (Rejeb vd., 2014). Ayrıca, biyotik stres, bitkiler üzerinde güçlü bir baskı uyguladığı ve patojenlerin saldırılarından kaynaklanan hasarı şiddetlendirdiği için ek bir zorluk oluşturur. Organik asitler bu streslere karşı bir kalkan görevi görür.

Abiyotik Stresler

Kuraklık, toprak tuzluluğu, aşırı sıcaklık değişimleri (sıcak ve soğuk), ağır metal toksisitesi ile pestisit kalıntıları gibi çeşitli abiyotik stres faktörleri, bitkilerin fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler mekanizmalarını etkileyerek tarımsal üretimde ciddi verim düşüşlerine sebep olmaktadır (Sindhu vd. 2020).

Çeltik bitkilerinin, özellikle yüksek şiddetteki tuz stresinin zararlı etkilerini hafifletmek amacıyla artan miktarlarda prolin, CAT ve SOD sentezlediği görülmüştür (Ghadirnezhad vd., 2020; Ghadirnezhad Shiade vd. 2023b). Bununla birlikte farklı bir araştırmada, ışık stresine maruz bırakılan buğday bitkilerinde tepki olarak bitki boyunun uzadığı, gövde kalınlığının azaldığı, başakçıkların uzadığı ve fotosentetik aktif radyasyonun (PAR) düştüğü ortaya konmuştur (Abdolmaleki vd., 2022).

Uzun süren kuraklık stresine karşı verilen tepkilerde, diğer organik asitlere kıyasla en belirgin artışı gösteren bileşiklerin süksinik asit, malik asit ve galakturonik asit olduğu düşünülmektedir. Gao ve arkadaşları (2012), uzun süreli kuraklığa maruz kalan bitkilerdeki malik asit miktarının düzenli sulananlara göre iki katına çıktığını belirtmiştir. Ayrıca malik asit benzeri LMWOA'lar (Düşük Molekül Ağırlıklı Organik Asitler), tuz stresi durumunda sodyum (Na⁺) alımını köklerde kısıtlayıp ozmotik denge kurarak biber gibi hassas türlerde verim düşüşüne engel olmaktadır. Patates genotiplerinde görülen galakturonik asit redüktaz aşırı ekspresyonunun ise askorbik asit seviyesini yükselterek bitkinin su stresine karşı toleransını geliştirdiği bilinmektedir (Conclin, 2001). Öte yandan, uzun süreli su stresi koşullarında incelenen organik asit yıkımlarında; kontrol grubuna göre metilmalonik asidin %36, sitrik asidin %49, gliserik asidin %55 ve izositrik asidin ise %49 oranında azaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde Sassi vd., (2010), stres altındaki hassas fasulye (*Phaseolus vulgaris*) genotiplerine ait yapraklarda organik asit düzeylerinin düştüğünü rapor etmiştir.

Ağır Metal Stresi

Toprak ekosistemlerinde ağır metallerin (Cd, Pb, Cu, Zn, Cr) etkinliği, katı faz ile sıvı faz arasındaki dinamik dengeye bağlıdır ve bu dengeyi belirleyen en kritik parametrelerden biri düşük moleküler ağırlıklı organik asitlerin (DMAOA) varlığıdır. Bitki kök eksüdatları ve mikrobiyal faaliyetler sonucunda ortama salınan sitrik, oksalik, malik ve tartarik asit gibi bileşikler, içerdikleri çoklu karboksil ve hidroksil grupları sayesinde metal iyonlarıyla yüksek afiniteli şelat kompleksleri oluşturma yeteneğine sahiptir (Qin vd., 2004). Bu organik asitlerin metal mobilitesi üzerindeki etkisi temel olarak üç mekanizma üzerinden şekillenir: asidifikasyon, ligand değişimine dayalı desorpsiyon ve mineral matrislerinin çözünmesi. DMAOA'lar, proton bırakarak toprak pH'ını düşürmekte ve bu sayede pH bağımlı yük taşıyan toprak kolloidlerine bağlı metallerin serbest kalmasına yol açmaktadır. Özellikle yapılan son çalışmalar, oksalik asidin demir ve alüminyum oksitlerin indirgeyici çözünmesini tetikleyerek, bu minerallerin kristal kafeslerinde hapsolmuş toksik metalleri mobil hale getirdiğini kanıtlamıştır. Bu süreç, ağır metallerin toprak profilinde dikey hareketini hızlandırarak yeraltı sularına karışma riskini artırmakta, ancak aynı zamanda fitoremediasyon uygulamalarında kirleticinin bitki tarafından alınabilirliğini optimize etmektedir (Maciaszczyk vd., 2020) (şekil 3.)

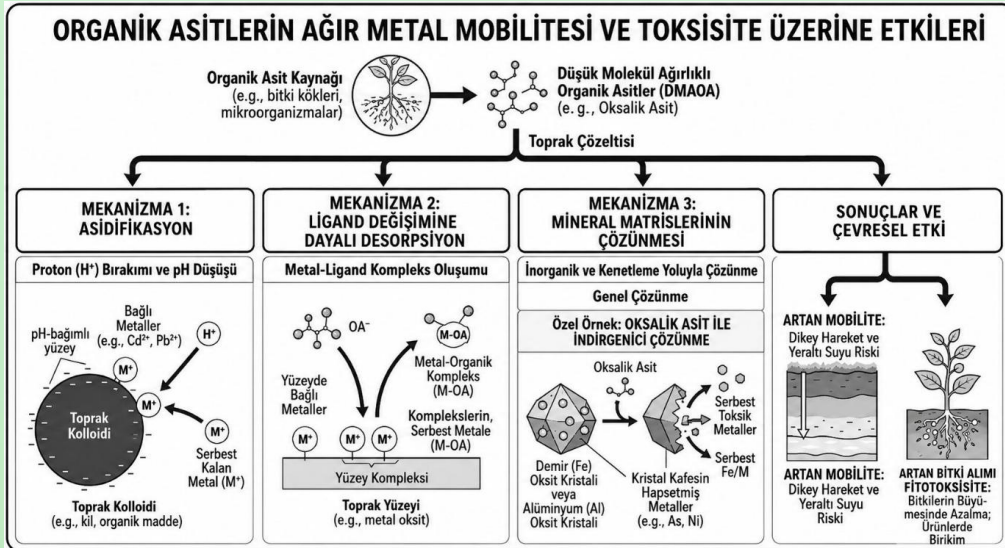
Organik Asit Uygulamalarının Bahçe Bitkilerinde Kullanımı ve Sonuçları

Bahçe bitkileri türlerinin yetiştiriciliğinde gerek konvansiyonel gerekse organik ve sürdürülebilir tarım alternatifi olarak kullanım imkanları açısından yapılan bilimsel çalışmalarda birçok morfolojik, anatomik ve fizyolojik sonuç rapor edilmiştir. Bu sonuçlara ilişkin özet tablo tablo da verilmiştir. Tablo 2. den de görüleceği üzerine organik asitler (sitrik, malik, oksalik, askorbik asitler ve sinyal molekülü olarak salisilik asit), bahçe bitkilerinde büyüme, gelişme ve stres toleransı üzerinde çok yönlü etkilere sahiptir.

Organik Asitlerin Sürdürülebilir Tarım Açısından Değerlendirilmesi

Sürdürülebilir tarım, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını tehlikeye atmadan bugünün gıda talebini karşılama ilkesine dayanır. Bu bağlamda organik asitler (fülvik, hümkik, amino asitler ve düşük molekül ağırlıklı organik asitler), kimyasal girdi bağımlılığını azaltan, toprak sağlığını koruyan ve ekosistem döngülerini destekleyen kritik biyostimülantlar olarak kabul edilmektedir (Rouphael & Colla, 2020).





Şekil 3. Organik asitlerin ağır metal mobilitesi ve toksite üzerine etkileri ((Asidifikasyon: Proton salınımı ile pH düşer ve kolloidlere bağlı metaller serbest kalır. Ligand Değişimi: Organik asitler (OA-), metallerle kararlı kompleksler oluşturarak onları yüzeyden koparır. Mineral Çözünmesi: Demir ve Alüminyum oksit kristallerinin yapısını bozarak içine hapsolmuş toksik metalleri (As, Ni vb.) açığa çıkarır).

Tablo 2. Organik Asitlerin Bahçe Bitkilerinde Kullanım Alanları ve Etkileri

Uygulama Yapılan Bitki Türü	Uygulanan Organik Asitler ve Dozları	Morfolojik, Anatamik ve Fizyolojik Etkileri	Literatür (Çalışmayı Yapanlar ve Yıl)
Domates (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Sitrik, Malik ve Süksinik Asit (Rizosferik biyostimülant spray)	Düşük molekül ağırlıklı bu organik asitlerin (LMWOA) rizosfer mikroflorası için bir karbon kaynağı ve kemotaktik sinyal olarak işlev görmesi; patojeni baskılayan faydalı bakterilerin kolonizasyonunun artması. Fito-hormonal dengenin (özellikle IAA sentezinin) mikrobiyal sekresyonlar yoluyla iyileştirilmesi sonucu kök mimarisinin derinleşmesi.	Macias-Benitez vd., 2020
Çilek (<i>Fragaria × ananassa</i>)	Salisilik Asit (Foliar spray, 0.5 – 1.0 mM)	Tuz stresine (NaCl) bağlı reaktif oksijen türlerinin (ROS) birikimini baskılayan antioksidan enzim (SOD, CAT, POX) aktivitelevlerinin artırılması; yaprak hücrel membran lipid peroksidasyonunun sızıntıyı önleyecek şekilde stabilize edilmesi. Nekrotik yaprak lezyonlarının engellenmesi; stres altında dahi klorofil a/b içeriğinin korunarak bitki boyu ve taç gelişiminin sürdürülmesi.	Karlıdag vd., 2009
Nar	Salisilik asit (2 mM, hasat öncesi)	Meyve kalitesi, raf ömrü ve antioksidan kapasite artışı	Sayyari vd., 2009
Tatlı Biber (<i>Capsicum annum</i>)	Salisilik Asit (SA) (1-10 mmol spray, 100-1000 ppm kök uygulaması)	Yüksek elektriksel iletkenlik (EC/Tuzluluk) stresine karşı klorofil floresansında (PSII canlılığı) maksimum ışık adaptasyonunun sağlanması; SPAD indeksinde artış; kalsiyum eksikliğine bağlı hücre içi sinyal bozulmalarının onarılması. Biber meyvelerinde apikal çiçek burnu çürüklüğü (blossom-end rot) oranında dramatik azalma; aeroponik sistemde kök/gövde oranının dengelenmesi.	Sobczak, 2023
Şaraplık/Sofralık Üzüm (<i>Vitis vinifera</i>)	Malik Asit (%5 ve %10'luk konsantrasyonlar)	Rizosferdeki Topluluk Düzeyi Fizyolojik Profilin (CLPP) değiştirilmesi; Bacillaceae ve Woeseiaceae gibi P ve K çözücü mikroorganizma popülasyonlarının teşvik edilmesi; meyvedeki potasyum ve C vitamini içeriğinin moleküler düzeyde artışı. Üzüm salkımlarında şükroz/asit rasyosunun lezzet puanını artıracak yönde evrilmesi; yapraklarda N ve P birikiminin hücrel düzeyde optimize edilmesi.	Si vd 2022
İtalyan Marulu (<i>Lactuca sativa</i>)	Sitrik Asit Tabanlı Karbon Noktaları (Mg, N-CDs nano formasyonu)	Karbon nanonoktalarının yüksek penetrasyon yeteneği sayesinde kloroplastlara doğrudan girerek PAM klorofil floresansını maksimize etmesi; RuBisCO enzim etkinliğini destekleyerek fotosentetik elektron taşınımını hızlandırması. Kontrol grubuna kıyasla marul taze ağırlığında %39.5'e varan devasa artış; yaprak ayasında (lamina) morfolojik kalınlaşma ve renk kalitesinin artması.	Huang vd., 2022
Çilek (<i>Fragaria × ananassa</i> cv. Winter Dawn)	Salisilik Asit ve Hekzanal (Hasat sonrası / Postharvest düşük sıcaklık muamelesi)	Meyve yumuşamasına neden olan pektin metilesteraz (PME) ve poligalakturonaz (PG) gibi hücre duvarı bozucu enzimlerin down-regülasyonu (baskılanması); solunum hızının yavaşlatılması ile biyokimyasal kalitenin oksidatif bozulmadan korunması. Fizyolojik ağırlık kaybının sadece %7.52 ile sınırlandırılması; çürüme insidansının düşmesi (meyve sağlamlığının 3.96 kg/cm ² 'de tutulması) ve raf ömrünün uzaması.	Sah vd., 2026
Gül (Rosa)	Sitrik Asit (150-200 mg/L)	İletim demetlerindeki (ksilem) bakteriyel tıkanmanın önlenmesi. Fizyolojik: Vazo ömrünün %40 uzaması.	Kazemi vd. 2012
Gül (Rosa)	Salisilik asit (1,5 mM)	1,5 mM konsantrasyonda hasat öncesi SA uygulaması, membran stabilitesini iyileştirerek ve lipid peroksidasyon özelliklerini azaltarak kesme güllerin vazo ömrünü uzattı.	Kazemi vd. 2018



Çevresel Etkiler: Toprak Sağlığı ve Yeraltı Sularının Korunması

Organik asitlerin en önemli çevresel katkısı, toprak ekosistemindeki besin elementlerinin mobilitesini ve biyoyararlanımını düzenleyerek çevresel kirliliği minimize etmesidir. Konvansiyonel tarımda aşırı azotlu ve fosforlu gübre kullanımı, bu elementlerin yeraltı sularına sızmasına (leaching) ve su kaynaklarında ötrofikasyona neden olmaktadır. Organik asitler, özellikle fosforun toprakta kalsiyum, demir veya alüminyum ile sabitlenmesini (fiksasyon) engelleyen güçlü şelatlayıcı ajanlardır.

Ekonomik Sürdürülebilirlik: Girdi Maliyetleri ve Verimlilik Dengesi

Ekonomik açıdan organik asit kullanımı, "Gübre Kullanım Etkinliği" (NUE-Nutrient Use Efficiency) kavramı üzerinden değerlendirilir. Birim alandan alınan verimi artırırken, kullanılan birim gübre miktarını düşürmek tarımsal işletmelerin kârlılığını belirleyen en temel unsurdur. Araştırmalar, organik asit takviyeli gübreleme programlarının, bitkisel üretimde verimi %15 ile %35 arasında artırdığını göstermektedir (Colla vd., 2015).

Organik Tarım ile Uyumluluk ve Biyolojik Çeşitlilik

Organik asitler, doğada bulunan bitkisel atıkların, linyit kömürünün (leonardit) veya hayvansal yan ürünlerin doğal ayrışma süreçlerinden elde edildikleri için organik tarım yönetmelikleriyle (EC 2018/848 ve USDA-NOP) tam uyumluluk gösterirler. Sentetik kimyasalların yasak olduğu organik üretim sistemlerinde, toprağın biyolojik aktivitesini sürdürmek için organik asitler vazgeçilmez bir araçtır. Bu asitler, rizosferde (kök bölgesi) yaşayan faydalı mikroorganizmalar (bakteri ve mantarlar) için temel bir besin kaynağı (karbon substratı) sağlar.

Karbon Ayak İzi ve Ekolojik Katkılar

Ekolojik ayak izi açısından bakıldığında, organik asit kullanımı sayesinde sentetik azotlu gübre üretim ihtiyacının azalması, küresel ısınmaya neden olan sera gazı emisyonlarını (özellikle nitröz oksit - N₂O) düşürür. Azotlu gübrelerin üretimi yüksek enerji gerektiren (Haber-Bosch süreci) ve yüksek karbon salınımına neden olan bir endüstridir. Organik asitler aracılığıyla sağlanan azot kullanım verimliliği, bu endüstriyel süreçlerin yükünü hafifleterek tarımın toplam karbon ayak izini %10-20 oranında azaltma potansiyeline sahiptir (Lassaletta vd., 2014). Sonuç olarak organik asitler, agroekolojik dönüşümün hem bilimsel hem de pratik temel taşlarından birini oluşturmaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Organik asitler (amino asitler, fülvik asitler, humik asitler ve diğer alifatik asitler), günümüz tarımında kimyasal girdi bağımlılığını azaltan ve bitki-toprak ekosistemini onaran en güçlü biyostimülant gruplarından biridir. İklim değişikliğinin neden olduğu kuraklık, tuzluluk ve ekstrem sıcaklık gibi abiyotik stres faktörleri göz önüne alındığında, bu biyoaktif moleküllerin kullanımı artık bir "alternatif" değil, sürdürülebilir tarım için bir "zorunluluk" haline gelmiştir. Düşük molekül ağırlıklı organik asitler bitkide acil stres yönetimi ve hücrel sinyalizasyon sağlarken, yüksek molekül ağırlıklı polimerler toprağın fizikokimyasal ve mikrobiyolojik altyapısını uzun vadede iyileştirmektedir. Kısacası organik asitler, agronomik verimlilik ile ekolojik koruma arasındaki köprüyü kuran temel yapıtaşlarıdır. Bunun yanında uygulamalarda; fenolojik hassasiyeti oldukça dikkat edilmelidir. Nitekim, biyostimülantlar mucizevi ilaçlar değildir; doğru zamanda uygulandıklarında etkilidirler. Organik asit uygulamaları tohum kaplama (priming), fide şaşırtma, çiçeklenme öncesi ve meyve tutumu gibi bitkinin enerjiye en çok ihtiyaç duyduğu kritik fenolojik evrelerle senkronize edilmelidir. Bunun yanında; sinerjik kullanım açısından, organik asitler sentetik gübrelerin tam ikamesi (yerine geçen) olarak düşünülmemelidir. Bunun yerine, NPK gübreleri veya mikro elementler (Zn, Fe, Ca) ile birlikte (şelatlayıcı ajan olarak) kullanılarak, bitkinin "Gübre Kullanım Etkinliği" (GKE) maksimize edilmeli ve kimyasal gübre dozajları %20-30 oranında kademeli olarak düşürülebilir. Piyasada standardize edilmemiş çok sayıda ticari ürün bulunmaktadır. Uygulayıcılar, serbest amino asit (L-formunda) içeriği, organik karbon oranı ve şelasyon kapasitesi laboratuvar analizleriyle kanıtlanmış, güvenilir ürünleri tercih etmelidir.

Kaynaklar

- Ahmed, A. (2023). Foliar applications of ascorbic and citric acids with soil application of humic acid to improve growth, yield, and fruit quality of grape. *Al-Azhar Journal of Agricultural Research*, 48(2), 129-139. doi: 10.21608/ajar.2023.215513.1165
- Abdolmaleki, A. K., Pirdashti, H., Yaghoobian, Y., vd. (2022). Endophytic fungi improve growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under limited light conditions. *Gesunde Pflanzen*. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00816-x>
- Andrade, F. V., Mendonça, E. D. S., & Silva, I. R. D. (2013). Organic acid adsorption and mineralization in oxisols with different textures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(4), 976-985.
- Aoki, M., Fujii, K., & Kitayama, K. (2012). Environmental control of root exudation of low-molecular weight organic acids in tropical rainforests. *Ecosystems*, 15(7), 1194-1203.





- Badr M, Shafei A, Sharaf El-Deen S (2006) The dissolution of K and P-bearing minerals by silicate dissolving bacteria and their effect on sorghum growth. *Res J Agric Biol Sci* 2:5–11
- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G., Gilroy, S., & Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual review of plant biology*, 57, 233–266. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159>
- Berbara, R. L. L., García, A. C., & García, A. C. (2014). *Humic Substances and Plant Defense Metabolism* (pp. 297–319). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8591-9_11
- Chen, Q., Li, B., Zhang, X., Ge, S., & Jiang, Y. (2020). Split application of humic acid significantly improves the yield, quality and nitrogen utilization efficiency of ‘Fuji’ apple. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 26(4), 757–764. <https://doi.org/10.11674/zwyf.19232>
- Chen, Y., Clapp, C., & Magen, H. (2004). Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: The role of organo-iron complexes. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50, 1089 - 1095.
- Conklin, P. L. (2001). Recent advances in the role and biosynthesis of ascorbic acid in plants. *Plant, Cell & Environment*, 24(4), 383–394. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00686.x>
- Colla, G., Nardi, S., Cardarelli, M., Ertani, A., Lucini, L., Canaguier, R., & Roupheal, Y. (2015). Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.037>
- Conservan, G.B., Pizzeghello, D., Francioso, O., Foggia, M.D., Nardi, S., & Carletti, P. (2017). Biostimulant activity of humic substances extracted from leonardites. *Plant and Soil*, 420, 119–134.
- Dakora, F.D., Phillips, D.A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* 245, 35–47 <https://doi.org/10.1023/A:1020809400075>
- Fenton, G., & Helyar, K. R. (1999). The causes and management of acid soils. In *Invited paper for the Soils Workshop ‘Describing, analysing and managing our soil’* (25pp.) (pp. 22–26).
- Gao, Y.Z., Ren, L.L., Ling, W.T., Kang, F.X., Zhu, X.Z., Sun, B.Q., 2010. Effects of low-molecular-weight organic acids on sorption-desorption of phenanthrene in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74(1), 51–59.
- Gaur AC (1990) Phosphate solubilizing microorganisms as biofertilizer. Omega Scientific Publications, New Delhi, p 176
- Gerke, J. (2015). The acquisition of phosphate by higher plants: Effect of carboxylate release by the roots. A critical review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(3), 351.
- Ghadimezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Minkina, T., vd. (2023a). Biochar application in agroecosystems: a review of potential benefits and limitations. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03470-z>
- Ghadimezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., vd. (2023b). Plants' responses under drought stress conditions: effects of strategic management approaches—A review. *Journal of Plant Nutrition*, 0, 1–33. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720>
- Ghadimezhad Shiade, S. R., Pirdashti, H., Esmaeili, M. A., & Nematzade, G. A. (2023c). Biochemical and physiological characteristics of mutant genotypes in rice (*Oryza sativa* L.) contribute to salinity tolerance indices. *Gesunde Pflanzen*, 75, 303–315. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00701-7>
- Ghazijahani, N., Hadavi, E., & Jeong, B. R. (2014). Foliar sprays of citric acid and salicylic acid alter the pattern of root acquisition of some minerals in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Frontiers in plant science*, 5, 573. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00573>
- Halder AK, Mishra AK, Chakrabarty PK (1991) Solubilizing of inorganic phosphates by Bradyrhizobium. *Indian J Expt Biol* 29:28–31
- Haynes, R. J., & Mokolobate, M. S. (2001). Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 59(1), 47–63.
- Henri F, Laurette NN, Annette D, John Q, Wolfgang M, Francois- Xavier E, Dieudonne N (2008). Solubilization of inorganic phosphates and plant growth promotion by strains of *Pseudomonas fluorescens* isolated from acidic soils of Cameroon. *Afric J Microbiol Res* 2:171–178
- Hinsinger, P. (2001) Bioavailability of Soil Inorganic P in the Rhizosphere as Affected by Root-Induced Chemical Changes: A Review. *Plant Soil*, 237, 173–195. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Huang, X.F., Hu, M., He, L.Y., Tang, X.Y., (2005). Chemical characterization of water-soluble organic acids in PM2.5 in Beijing, China. *Atmos. Environ.* 39(16), 2819–2827.
- Huang, Zhiwei; Guo, Baoyan; Zou, Yujie; He, Jingyi; Hu, Chaofan; Zhuang, Jianle; et al. (2022). Different Kinds of Citric Acid Based Carbon Dots and Their Enhancement of the Growth of Italian Lettuce. ACS Publications. Collection. <https://doi.org/10.1021/acsagcitech.2c00088>
- Jiang, H., Li, T., Han, X., Yang, X., & He, Z. (2012). Effects of pH and low molecular weight organic acids on competitive adsorption and desorption of cadmium and lead in paddy soils. *Environmental monitoring and assessment*, 184(10), 6325–6335.
- Jindo, K., Martim, S.A., Navarro, E.C., Pérez-Alfocea, F., Hernández, T., García, C., Aguiar, N.O., & Canellas, L.P. (2012). Root growth promotion by humic acids from composted and non-composted urban organic wastes. *Plant and Soil*, 353, 209–220.
- Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 205, 25–44.
- Jones, D. L., Dennis, P. G., Owen, A. G., & Van Hees, P. A. (2003). Organic acids in soil. *Plant and Soil*, 248, 31–41. <https://doi.org/10.1023/A:1022304332313>
- Juszczuk, I. M., & Rychter, A. M. (2003). Alternative oxidase in higher plants. *Acta biochimica Polonica*, 50(4), 1257–1271.
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J.-H., Michalzik, B., & Matzner, E. (2000). Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 165(4), 277–304. <https://doi.org/10.1097/00010694-200004000-00001>
- Karlıdag, H., Yildirim, E., & Turan, M. (2009). Salicylic acid ameliorates the adverse effect of salt stress on strawberry. *Scientia Horticulturae*, 122(4), 514–518. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000200006>





- Kazemi, M., Abdossi, V., Kalateh Jari, S., & Ladan Moghadam, A. R. (2018). Effect of pre- and postharvest salicylic acid treatment on physio-chemical attributes in relation to the vase life of cut rose flowers. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 93(1), 81–90. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1344571>
- Kazemi, M., Hadavi, E., & Hekmati, J. (2012). Effect of salicylic acid, malic acid, citric acid and sucrose on antioxidant activity, membrane stability and ACC-oxidase activity in relation to vase life of carnation cut flowers.
- Kleerebezem, R., Hulshoff Pol, L.W., Lettinga, G., 1999. Anaerobic degradation of phthalate isomers by methanogenic consortia. *Appl. Environ. Microb.* 65(3), 1152–1160.
- Kochian, L. V., Hoekenga, O. A., & Pineros, M. A. (2004). How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual review of plant biology*, 55, 459–493. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>
- Kuzyakov, Y. (2010). Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2010.04.003>
- Kuzyakov, Y., & Razavi, B. S. (2019). Rhizosphere size and shape: temporal dynamics and spatial stationarity. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 343–360.
- Lambers, H & Poot, Pieter. (2003). *Structure and functioning of cluster roots and plant responses to phosphate deficiency* / edited by H. Lambers and P. Poot. Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., & Garnier, J. (2014). 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: The relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters*, 9(10), 104011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104011>
- Lehmann, J., ve Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lundström, U. V., Van Breemen, N., & Bain, D. (2000). The podzolization process. A review. *Geoderma*, 94(2-4), 91–107.
- Luo, Y., Yu, H., Yu, J., Liu, F., Wang, Q., and Liu, J. (2026). The perspective functions of organic acids to restore salt-affected soils and plant stress resistance. *Plant Stress*, vol. 20, Art. no. 101321, Elsevier, 2026. doi:10.1016/j.stress.2026.101321.
- Macias-Benitez, S., Garcia-Martinez, A. M., Caballero Jimenez, P., Gonzalez, J. M., Tejada Moral, M., & Parrado Rubio, J. (2020). Rhizospheric Organic Acids as Biostimulants: Monitoring Feedbacks on Soil Microorganisms and Biochemical Properties. *Frontiers in plant science*, 11, 633. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00633>
- Maciaszczyk, P., Szwalbińska, M., & Krawczyk, J. (2020). Influence of low molecular weight organic acids on the mobility of heavy metals in soils. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 2572–2582. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02572-9>
- Marschner, H. (2012) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Vol. 89, Academic Press, London, 651 ISBN:978-0-12-384905-2
- Mimmo, T., Ghizzi, M., Marzadori, C., & Gessa, C. E. (2008). Organic acid extraction from rhizosphere soil: effect of field-moist, dried and frozen samples. *Plant and soil*, 312(1), 175–184.
- Morgan, J. A. W., Bending, G. D., & White, P. J. (2005). Biological costs and benefits to plant–microbe interactions in the rhizosphere. *Journal of experimental botany*, 56(417), 1729–1739.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A. and Vianello, A. (2002) Physiological Effects of Humic Substances on Higher Plants. *Soil Biology and Biochemistry*, Exeter, 34, 1527–1536. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8)
- Nardi, S., Schiavon, M., & Francioso, O. (2021). Chemical Structure and Biological Activity of Humic Substances Define Their Role as Plant Growth Promoters. *Molecules*, 26(8), 2256. <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>
- Neumann, G., ve Römheld, V. (1999). Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant and Soil*, 211(1), 121–130. <https://doi.org/10.1023/A:1004380832118>
- Nwoke, O. C., Diels, J., Abaidoo, R., Nziguheba, G., & Merckx, R. (2008). Organic acids in the rhizosphere and root characteristics of soybean (*Glycine max*) and cowpea (*Vigna unguiculata*) in relation to phosphorus uptake in poor savanna soils. *African Journal of Biotechnology*, 7(20).
- Oburger, E., & Schmidt, H. (2016). New methods to unravel rhizosphere processes. *Trends in Plant Science*, 21(3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.12.005>
- Perminova, I. V., Frimmel, F. H., Kudryavtsev, A. V., Kulikova, N. A., Abbt-Braun, G., Hesse, S., & Petrosyan, V. S. (2003). Molecular weight characteristics of humic substances from different environments as determined by size exclusion chromatography and their statistical evaluation. *Environmental science & technology*, 37(11), 2477–2485.
- Qin, F., Shan, X. Q., & Wei, B. (2004). Effects of low-molecular-weight organic acids and residence time on desorption of Cu, Cd, and Pb from soils. *Chemosphere*, 57(4), 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.010>
- Rejeb, I., Pastor, V., & Mauch-Mani, B. (2014). Plant responses to simultaneous biotic and abiotic stress: molecular mechanisms. *Plants*, 3, 458–475. <https://doi.org/10.3390/plants3040458>
- Richardson, A.E., Barea, J.M., McNeill, A.M. et al. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil* 321, 305–339 <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895>
- Richardson, A.E., Barea, J.M., McNeill, A.M. et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil* 321, 305–339 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895>
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology advances*, 17(4-5), 319–339. [https://doi.org/10.1016/s0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/s0734-9750(99)00014-2)
- Rouphael Y and Colla G (2018) Synergistic Biostimulatory Action: Designing the Next Generation of Plant Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Front. Plant Sci.* 9:1655. doi: 10.3389/fpls.2018.01655
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Ryan, P. R., Delhaize, E., & Jones, D. L. (2001). Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. *Annual review of plant biology*, 52(1), 527–560.





- Sah, A., Madhavi, M., Subbaramamma, P., Reddy, P. V. K., & Sivakumar, V. (2026). Hexanal and Salicylic acid: Improves postharvest quality and shelf life of strawberry (*Fragaria ananassa* cv. Winter Dawn) under low storage temperature. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 11(1), 88–93. <https://doi.org/10.26832/24566632.2026.1101013>
- Sassi, S., Aydi, S., Gonzalez, E. M., Arrese-Igor, C., & Abdelly, C. (2010). Understanding osmotic stress tolerance in leaves and nodules of two *Phaseolus vulgaris* cultivars with contrasting drought tolerance. *Symbiosis*, 52(1), 1–10.
- Sayyari, M., Babalar, M., Kalantari, S., Serrano, M., & Valero, D. (2009). Effect of salicylic acid treatment on reducing chilling injury in stored pomegranates. *Scientia Horticulturae*, 121(3), 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.02.012>
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant physiology*, 156(3), 997–1005. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Sheng XF, He LY (2006) Solubilization of potassium-bearing minerals by a wild-type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. *Can J Microbiol* 52:66–72
- Si P, Shao W, Yu H, Xu G and Du G (2022) Differences in Microbial Communities Stimulated by Malic Acid Have the Potential to Improve Nutrient Absorption and Fruit Quality of Grapes. *Front. Microbiol.* 13:850807. doi: 10.3389/fmicb.2022.850807
- Sidhu, G. S. (2016). Heavy metal toxicity in soils: sources, remediation technologies and challenges. *Adv Plants Agric Res*, 5(1), 445–446.
- Simine DC, Sayer JA, Gadd GM (1998) Solubilization of zinc phosphate by a strain of *Pseudomonas fluorescens* isolated from a forest soil. *Biol Fertil Soils* 28:87–94
- Sobczak, A., Kućko, A., Pióro-Jabrucka, E., Gajc-Wolska, J., & Kowalczyk, K. (2023). Effect of Salicylic Acid on the Growth and Development of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.) under Standard and High EC Nutrient Solution in Aeroponic Cultivation. *Agronomy*, 13(3), 779. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030779>
- Strobel, B. W., Borggaard, O. K., Hansen, H. C. B., Andersen, M. K., & Raulund-Rasmussen, K. (2005). Dissolved organic carbon and decreasing pH mobilize cadmium and copper in soil. *European Journal of Soil Science*, 56(2), 189–196.
- Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M. P., & Frey-Klett, P. (2009). The microbial weathering of soil minerals, ecology, actors and mechanisms. *Trends Microbiol*, 17, 378–387.
- van Hees, P.A.W., Lundström, U.S., Giesler, R., (2000). Low molecular weight organic acids and their Al complexes in soil solution-Composition, distribution and seasonal variation in three podzolized soils. *Geoderma* 94(2-4), 173–200.
- van Schie BJ, Hellingwerf KE, Vandijken J, Elferink MGL, Van Diji JM, Kuenen JG, Konings N (1985). Energy transduction by electron transfer via a pyrroquinoline quinine dependent glucose dehydrogenase in *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Acinetobacter calcoaceticum* (var. Lowoffi). *J Bacteriol* 163:493–499
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *The New phytologist*, 157(3), 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Vidyashree DN, Muthuraju R, Panneerselvam P, Mitra D (2018) Organic acids production by zinc solubilizing bacterial isolates. *Intern J Curr Microbiol Appl Sci* 7(10):626–633
- Westergaard, B., & Hansen, H. C. (1998). Determination of anions in soil solutions by capillary zone electrophoresis. *Analyst*, 123(4), 721–724.
- Xiao, M., & Wu, F. (2014). A review of environmental characteristics and effects of low-molecular weight organic acids in the surface ecosystem. *Journal of environmental sciences (China)*, 26(5), 935–954. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60570-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60570-7)
- Zandonadi, D. B., Canellas, L. P., & Façanha, A. R. (2007). Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺ pumps activation. *Planta*, 225(6), 1583–1595. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0454-2>
- Zandonadi, D. B., Santos, M. P., Dobbss, L. B., Olivares, F. L., Canellas, L. P., Binzel, M. L., Okorokova-Façanha, A. L., & Façanha, A. R. (2010). Nitric oxide mediates humic acids-induced root development and plasma membrane H⁺-ATPase activation. *Planta*, 231(5), 1025–1036. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1106-0>
- Zhu, H., Bing, H., & Wu, Y. (2022). Citric acid promotes the mobilization of phosphorus under the lower concentration of low molecular weight organic acids in acidic forest soil. *Applied and Environmental Soil Science*. <https://doi.org/10.1155/2022/5071907>

