

Sıvı Yosun Gübresi ve Mikorizanın Arpa Gelişimi ve Rizosferin Biyolojik Özelliklerine Sinerjik Etkileri

Synergistic Effects of Liquid Seaweed Fertilizer and Mycorrhiza on Barley Growth and Rhizosphere Biological Properties

Abdulcenap CEVHERİ¹ , Çiğdem KÜÇÜK^{2*} 

¹Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Hidrobiyoloji Anabilim Dalı, Şanlıurfa

²Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Genel Biyoloji Anabilim Dalı, Şanlıurfa

Eser bilgisi/Article info

Araştırma makalesi / Research article

DOI: 10.17474/artvinofd.1707271

*Sorumlu yazar/Corresponding author

Çiğdem KÜÇÜK

e-mail: ckucuk@harran.edu.tr

Gönderilme tarihi/Submission date

27.05.2025

Kabul tarihi/Acceptance date

05.08.2025

Yayınlanma tarihi/ Publication date

24.02.2026

Anahtar kelimeler:

Mikoriza

Deniz yosunu

Doz

Toprak enzim aktivitesi

Keywords:

Mycorrhiza

Seaweed

Dose

Soil enzyme activity

Öz

Yosun gübresi tarımda besin takviyesi, biyogübre ve toprak için biyostimülant olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Mikoriza ise bitkilerin besin alımını, hastalık direncini, kuraklığa dayanıklılığını, bitkilerin verimini artırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, sıvı yosun gübresi ve mikorizanın ayrı ayrı ve kombinasyonlarının arpa fidelerinin büyümesi ve rizosferin bazı enzimatik aktiviteleri üzerine etkilerini değerlendirmektir. Sıvı yosun gübresi beş farklı (0 (kontrol), 0.4, 0.6, 1, 1.5 g/l) dozda, mikoriza (mikorizalı, mikorizasız) iki farklı dozda kullanılmış ve her iki biyostimülantın kombinasyonları da toprağa uygulanmıştır. Sıvı yosun gübresi (1 g/l) ve mikoriza kombinasyonunun toprağa eklenmesi, arpa fidelerinin bitki boyu ve kök uzunluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle 1g/l yosun gübresi x mikoriza ve 1.5 g/l yosun gübresi x mikoriza uygulamaları diğer uygulamalarla karşılaştırıldığında yaprakların klorofil a ve b miktarını artırmıştır. Artan dozlarda yosun gübresi ile mikorizanın birlikte uygulanması rizosfer toprağının dehidrogenaz, alkalın fosfataz, β-glukosidaz ve katalaz enzim aktivitelerinde artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar ile özellikle yosun gübresinin 1 g/l'lik ve 1.5 g/l dozunun mikoriza ile birlikte toprağa uygulanmasının toprağın enzim aktivitelerini iyileştirebildiği ortaya konmuş dolayısıyla mikroorganizma popülasyonunun artmasıyla toprak kalitesinin artacağı görüşü desteklenmiştir. Toprakta oluşacak bu değişiklikler fide büyümesini teşvik edebilir, bitkisel üretimin artmasına katkı sağlayabilir.

Abstract

Seaweed fertiliser is widely used in agriculture as a nutrient supplement, biofertiliser and biostimulant for soil. Mycorrhiza increases nutrient uptake, disease resistance, drought resistance and yield of plants. The aim of this study was to evaluate the effects of liquid seaweed fertiliser and mycorrhiza separately and in combination on the growth of barley seedlings and some enzymatic activities of the rhizosphere. Liquid seaweed fertiliser (0 (control), 0.4, 0.6, 1, 1.5 g/l) was used in five different doses, mycorrhiza (with mycorrhiza, without mycorrhiza) was used in two different doses and combinations of both biostimulants were applied to the soil. The addition of liquid seaweed fertiliser (1 g/l) and mycorrhiza combination to the soil significantly increased plant height and root length of barley seedlings. Especially, 1 g/l seaweed fertiliser x mycorrhiza and 1.5 g/l seaweed fertiliser x mycorrhiza treatments increased the amount of chlorophyll a and b in leaves compared to other treatments. Co-application of increasing doses of seaweed fertiliser and mycorrhiza increased dehydrogenase, alkaline phosphatase, β-glucosidase and catalase enzyme activities of rhizosphere soil. With the results obtained, it was revealed that the application of 1 g/l and 1.5 g/l doses of seaweed fertiliser to the soil together with mycorrhiza can improve the enzyme activities of the soil, thus supporting the view that soil quality will increase with the increase of microorganisms population. These changes in the soil may encourage seedling growth and contribute to the increase in plant production.

GİRİŞ

Dünya genelinde birim alandan daha fazla verim alabilmek için aşırı kullanılan kimyasal gübreler, toprakların bozulmasına ve çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu nedenle, bitkilerin besin gereksinimlerini karşılamak ve kimyasal gübre kullanımını azaltmak için biyogübrelerin kullanımı dikkat çekmektedir (Agarwal ve ark. 2018). Biyogübreler; içerikleri ile bitkilerin gelişimini ve toprak kalitesini artırdığı gibi (Yakhin ve ark. 2017), toprağın fizikokimyasal özelliklerini iyileştirme ve toksik maddelerin topraktan uzaklaştırılmasında da avantajlara sahiptir (Rouphael ve Colla 2020). Mikoriza ve deniz yosunu gübresinin birlikte veya ayrı ayrı kullanımının bitkiler üzerinde etkili olduğu, yapılan çalışmalarda da (Küçük ve ark. 2024, Yıldırım ve ark. 2024, uz Zaman ve ark. 2025) bildirilmiştir. Mikoriza mantarları ve yosun özütü; organik, çevre dostu ve uygun maliyetli olup, makro ve mikro elementler, vitaminler, enzimler ve büyüme düzenleyicileri açısından oldukça zengin

kaynaklardır. Bu yüzden sürdürülebilir toprak verimliliğinde önemli rol oynadıkları için kullanımlarının yararlı olduğu açıklanmıştır (Di Mola ve ark. 2019).

Günümüzde, yararlı toprak mikroorganizmalarına ilaveten, sıvı yosun özütü organik bir gübre şeklinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Basavaraja ve ark. 2018). Deniz yosunu özlerinin ıspanaktaki fotosentetik pigmentlerin içeriğini artırabildiği, bunun sonucunda da bitkinin fotosentetik kapasitesini ve verimliliğini arttırdığı bildirilmiştir (Kulkarni ve ark. 2019). Ayrıca, sıvı yosun gübresi kullanımının bitkilerin çeşitli çevresel streslere karşı toleransı üzerinde de olumlu bir etkiye sahip olduğu ve bitkileri strese karşı korumada önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir (Sharma ve ark. 2019, Vafa ve ark. 2022). Sıvı yosun gübresi; hormonlar, amino asitler, proteinler, şekerler, lipitler, vitaminler, hümkik maddeler, fenolik bileşiklerin karışımı ile karbonhidratlar ve organik bileşikler bakımından oldukça zengindir. Bu özelliklerinin yanında toprak özelliklerini iyileştiren, bitkiler tarafından kolayca alınan yüksek miktarda azot, fosfor, potasyum ve diğer mineralleri de içermektedir (Du Jardin 2015, Agarwal ve ark. 2018). Böylece, bu özütler solunum döngüsü ile fotosentezi aktive ederek, bitki yaşlanmasını geciktirerek bitki büyümesini olumlu yönde etkilemektedir (Türkmen ve Su 2019). Betain bileşikleri içeren deniz yosunlarının bitkilere inoküle edilmesi ile yaprakların fotosentetik kaybının azaldığı bildirilmiştir (Di Mola ve ark. 2019). Sıvı yosun ekstraktlarının tohum çimlenmesini tetiklediği, meyve tutumunu ve verimi arttırdığı bildirilmiştir (Colla ve ark. 2017, Di Mola ve ark. 2019).

Mikorizalar bitkilerin büyümesini önemli ölçüde iyileştiren yararlı toprak mikroorganizmaları olup, organik tarımda kullanılan doğal gübre kaynağıdır (Varma ve ark. 2018). Bu simbiyotik ilişkide mikoriza, bitkilerin büyümeleri ve gelişmeleri için saldıkları fotosentetik materyalin yaklaşık %20'sini tüketir (Wipf ve ark. 2019). Buna karşılık, mikoriza bitki köklerinin yayılım alanını genişletmekte, topraktan su ve besin maddesi alımına yardımcı olmaktadır. Ayrıca topraktaki fosfor ve besin elementlerini çözerek bitkilerin kullanımına da sunmaktadır (Xiao ve ark. 2020). Genel olarak, mikorizal simbiyoz, bitkinin su alımını, verimini ve kalitesini artırırken toprak verimliliğinin korunmasında ve toprak yapısının stabilize edilmesinde önemli rol oynamaktadır (Bona ve ark. 2017). Tarraf ve ark. (2017), mikoriza simbiyozunun; mısırın gelişimini teşvik ettiği, verimini, kuru maddesini ve sürgündeki fosfor konsantrasyonunu artırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca mikorizanın bitki sekonder metabolitlerinin biyosentezinde ve birikiminde etkili olduğu, bitki enzimlerinin aktivitesini de artırabileceği saptanmıştır (Kaur ve Suseela 2020). Mikoriza ile simbiyotik ortaklık, bitkilerde fotosentetik verimliliği artırmıştır (Bona ve ark. 2017). Bu nedenle biyogübreler, özellikle sebzelerde verim miktarını ve kalitesini iyileştirebilir. Bir yandan artan küresel nüfus ve artan nüfusun beslenme ihtiyacı, diğer yandan da çevresel stresin etkilerini yoğunlaştıran, bitkilerin büyümesini ve verimini daha da kısıtlayan iklim değişiklikleri, bitki verimini iyileştirmeye yönelik daha fazla araştırmalara odaklanılmasına yol açmıştır. Özellikle dünyanın kurak ve yarı kurak bölgelerinde stres etkilerini azaltmak, arpa gibi stratejik bitkilerin verimini artırmak için yeni yöntemler uygulamak, özellikle üretim, istikrar ve çevresel etkiler göz önünde bulundurulduğunda önemlidir. Arpa, ülkemizde ekim ve üretim bakımından buğdaydan sonra ikinci sırada gelmektedir (Oral ve ark. 2017). Ülkemizde arpanın büyük bir kısmı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde üretilmekte olup, bölgede en fazla arpa yetiştiriciliği Şanlıurfa'da yapılmaktadır (Oral ve ark. 2017). Üreticilerin daha fazla ürün alabilmek için bilinçsizce kullandıkları kimyasal gübreler, toprağı yormakta, kirletmekte ve verim kaybına yol açmaktadır (Cüre 2022). Kullanılan kimyasal gübrelerin tarıma ve çevreye vermiş oldukları zarar, sürdürülebilir yeni tarımsal metotlara olan gereksinimi ortaya koymuştur. Mikoriza ve sıvı deniz yosunu gibi organik biyostimülantlar, toprak sağlığını koruma potansiyeline sahiptir. Mikoriza ve sıvı yosun gübresinin kimyasal gübrelerle alternatif olarak kullanımı; toprak yapısını ve kalitesini de iyileştirdiğinden, toprağın gübrenmesi ve bitki gelişiminin teşvik edilmesi için yenilikçi çözümler sunmaktadır (Güler ve Küçük 2024). Bu odakla, çalışmada, arpanın fide gelişimi ve rizosferin bazı biyolojik özellikleri üzerine sıvı yosun gübresi ve mikorizanın etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Deneme Kurulumu

Denemede kullanılan arpa (*Hordeum vulgare* L.) tohumu, sıvı yosun gübresi (Sea Plus; *Ascophyllum nodosum*, *Laminaria*, *Sargassum*'dan oluşan) ve mikoriza (Shubhodaya (üç farklı *Glomus* Mikoriza mantarının (*Glomus* VAM) konsorsiyumdan oluşmuştur); 1×10^6 propagül/50 g pkt) ticari olarak satın alınmıştır. Sıvı yosun gübresi %12 organik madde, %3 suda çözünür potasyum oksit, %0.3 aljinit asit içermekte olup, EC değeri 13.56 dS/m ve pH içeriği 6'dır. Tohum ekiminden önce; toprak 121 °C'de 1.2 atmosfer basınçta 15 dakika otoklavlanarak toprak kaynaklı mikroorganizmaların giderilmesi amacıyla sterilize edilmiştir. Denemede kullanılan toprak nadasa bırakılan tarladan alınmış olup, pH'sı 7.16, organik madde içeriği %1.22; kireç içeriği %2.27; azot içeriği ise %0.09 olup killi bünyeye sahiptir. Steril edilen topraklar, 2 kg'lık plastik saksılara doldurulmuş, mikorizal gübre ekim öncesi tohum yatağına uygulanmıştır. Denemede yosun gübresinin beş dozu (0, 0.4, 0.6, 1, 1.5 g/l) ile mikoriza gübresi (8 g/saksı) (mikorizalı ve mikorizasız) ve kombinasyonları topraklara uygulanmıştır. Her bir saksıya beş arpa tohumu ekilmiş, çimlenme sonrası üçe seyreltilmiştir. Çimlenme sonrası yosun gübresinin her bir dozu saksılara ayrı ayrı 50 ml olacak şekilde hasat zamanına kadar 15 gün ara ile verilmiştir. Bitkiler her 3 günde bir, büyümenin başlangıcında 30 ml, ardından 2 hafta sonra 50 ml musluk suyu ile sulanmıştır. Kontrol bitkilerine; mikoriza ve yosun gübresi uygulanmamıştır. Hasat, ekim işleminden 13 hafta sonra yapılmıştır. Deneme, tesadüf parselleri faktöriyel deneme desenine göre üç tekrarlı olarak serada kurulmuştur.

Laboratuvar Çalışmaları

Hasat zamanı arpa fidelerinin bitki boyu, sürgün ve kök yaş ağırlığı, kök uzunluğu kaydedilmiştir. Sürgün ve kök ağırlığı ayrı ayrı analitik bir terazi (0.01 mg doğrulukla) kullanılarak, uzunlukları ise cetvel yardımıyla ölçülmüştür. Arpa fidelerinin yaş yaprak örneklerinde klorofil miktarını belirlemek için Arnon (1967) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Yapraklardan alınan 1 g örnek, %80 (v/v) aseton ile homojenize edilerek klorofil miktarı 645 ve 663 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Tüm spektrofotometrik ölçümler spektrofotometre (Shimadzu, Japonya) kullanılarak ölçülmüştür.

Tabatabai ve Bremner (1969) tarafından açıklanan yöntem kullanılarak yapılan rizosferin alkalın fosfataz enzim aktivitesinde ise pH 11'e ayarlanmış tampon (MUB), substrat olarak sodyum p-nitro-fenilfosfat kullanılmıştır. Reaksiyon, NaOH ve CaCl_2 kullanılarak sonlandırılmış ve p-nitrofenolden kaynaklanan renk yoğunluğu (sarı) spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. Toprağın dehidrogenaz aktivitesi, inkübasyon zamanında trifenilformazana indirgenen bir substrat olarak 2, 3, 5-trifeniltetrazolium klorid kullanılarak Pepper ve ark. (1995)'e göre belirlenmiştir. β -Glukosidaz (EC 3.2.1.21) aktivitesinin değerlendirilmesinde ise örnekler, p-nitrofenil- β -D-glukopiranosid ile 37 °C sıcaklıkta bir saat süreyle inkübe edilmiş, içeriğin absorbansı Mukherjee ve ark. (2021) tarafından belirlenen yöntemle göre 400 nm'de absorbansta ölçülmüştür. Enzim analizlerinde tüm ölçümler, spektrofotometre ile belirlenmiştir. Katalaz (EC 1.11.1.6) enzim aktivitesi, toprak örneklerine fosfat tamponu (pH 7) ve %3 hidrojen peroksit çözeltisi eklenmesi ile değerlendirilmiştir. Reaksiyonun etkinliği, beş dakikalık bir süre boyunca 25°C'lik sıcaklıkta salınan oksijen hacminin ölçülmesiyle Beck (1971) tarafından önerilen metot kullanılarak ölçülmüştür.

İstatistik Analiz

Hasat sonunda elde edilen tüm değerler JMP software paket program (JMP 2020) kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İncelenen gruplar arasındaki istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları incelemek için Tukey HSD testi uygulanmıştır. Sonuçlar $p < 0.05$ olduğunda istatistiksel olarak anlamlı olarak yorumlanmıştır.

BULGULAR

Bitki boyu en fazla yosun gübresinin 1 g/l'lik dozu x mikoriza, yosun gübresinin 1.5 g/l'lik dozu x mikoriza uygulanan bitkilerde belirlenmiş, bunu sırasıyla yosun gübresinin 1 g/l'lik dozu ve yosun gübresinin 1.5 g/l'lik dozu uygulamaları izlemiştir (Çizelge 1). Hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrolle karşılaştırıldığında; yosun gübresinin 1 g/l'lik dozu x mikoriza uygulamasında bitki boyu %17.2, yosun gübresinin 1.5 g/l'lik dozu x mikoriza uygulamasında ise %14.5 artış elde edilirken, sadece yosun gübresinin 1 g/l'lik dozu uygulandığında %13.7, yosun gübresinin 1.5 g/l'lik dozu uygulandığında bitki boyu %12.3 artmıştır. Bitki boyu uzunluğu kontrole göre azda olsa artış göstermesine rağmen, uygulamaların hiçbir kontrolle karşılaştırıldığında istatistiki olarak önemli bulunmamıştır ($p>0.05$). Uygulamaların kök uzunluğuna olan etkileri de Çizelge 1'de verilmiştir. Hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrolle karşılaştırıldığında en fazla artış (%126) yosun gübresinin 1 g/l'lik dozu x mikoriza uygulamasında alınırken, sadece mikoriza uygulaması ile karşılaştırıldığında yosun gübresinin 1 g/l'lik dozu x mikoriza uygulamasında kök uzunluğu %94.6 artmıştır (Çizelge 1). Sadece mikoriza aşılması yapıldığında yeşil aksam ağırlığı hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrole göre en yüksek değeri vermiş olup, artış %56.3'tür. Yosun gübresinin 0.6 g/l'lik dozu x mikoriza uygulaması ile sürgün yaş ağırlığı %49.5, yosun gübresinin 1 g/l'lik dozu x mikoriza uygulamasında ise sürgün ağırlığı %42.5 artmıştır. Uygulamalar arasındaki farklılık istatistiki olarak önemli bulunmuştur ($p<0.05$) (Çizelge 1). Uygulamalar kontrolle karşılaştırıldığında kök yaş ağırlık benzer sonuçlar vermiş, en yüksek kök yaş ağırlığı ise yosun gübresinin 0.4 g/l uygulama dozunda belirlenmiş olup bu artış istatistiki anlamda önemlidir.

Çizelge 1. Arpa bitkisinin büyüme ile ilgili özellikleri üzerine mikoriza (M) aşılmasının ve yosun gübresinin (g/l) etkileri

Gübreleme	Bitki boyu (cm)	Sürgün yaş ağırlığı (g/bitki)	Kök yaş ağırlığı (g/bitki)	Kök uzunluğu (cm)
Kontrol*	37.3 e	8.14 d	1.06 d	12.8 ef
0.4g/l	38.2 de	8.19 d	2.41 a	11.7 f
0.6 g/l	38.8 de	10.40 c	1.58 bc	12.0 f
1 g/l	42.4 ab	9.83 c	1.64 b	14.2 de
1.5 g/l	41.9 a-d	7.93 d	1.13 d	12.2 f
Mikoriza	38.8 de	12.73 a	1.06 d	14.8 cd
0.4 g/l xM	39.6 b-e	10.39 c	1.44 c	15.1 bcd
0.6g/l xM	38.9 cde	12.17 ab	1.20 d	16.6 b
1g/l xM	43.7 a	11.60 b	1.17 d	28.9 a
1.5 g/l xM	42.0 abc	10.08 c	1.10 d	15.9 bc
LSD ($p<0.05$)	3.15	0.67	0.17	1.65

*Kontrol (mikoriza mantarı ve deniz yosunu gübresi olmadan). Farklı harfler $p<0.05$ 'e göre anlamlı farklılıkları göstermektedir.

Uygulamaların yaprakların klorofil içeriğine etkileri farklı olmuştur. Hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrolle karşılaştırıldığında; en yüksek klorofil a miktarı yosun gübresinin 1.5 g/l'lik dozu x mikoriza uygulamasında belirlenmiş olup artış %119.4'tür. Topraklara mikoriza eklendiğinde ise uygulanan yosun gübresinin artan dozları klorofil a miktarını artırmıştır.

Mikoriza uygulanan kontrolle karşılaştırıldığında; 0.4 g/l yosun gübresi x mikorizanın birlikte uygulanması ile klorofil a ve klorofil b %49; 0.6 g/l yosun gübresi x mikorizanın birlikte uygulanması ile klorofil a %54.2 ve klorofil b %52; 1 g/l yosun gübresi x mikorizanın birlikte uygulanması ile klorofil a %86 ve klorofil b %103.5; 1.5 g/l yosun gübresi x mikorizanın birlikte uygulanması ile klorofil a %80.1 ve klorofil b içeriği %100.8 oranında artmıştır (Çizelge 2). Bu artışlar kontrolle karşılaştırıldığında istatistiki olarak önemli bulunmuştur.

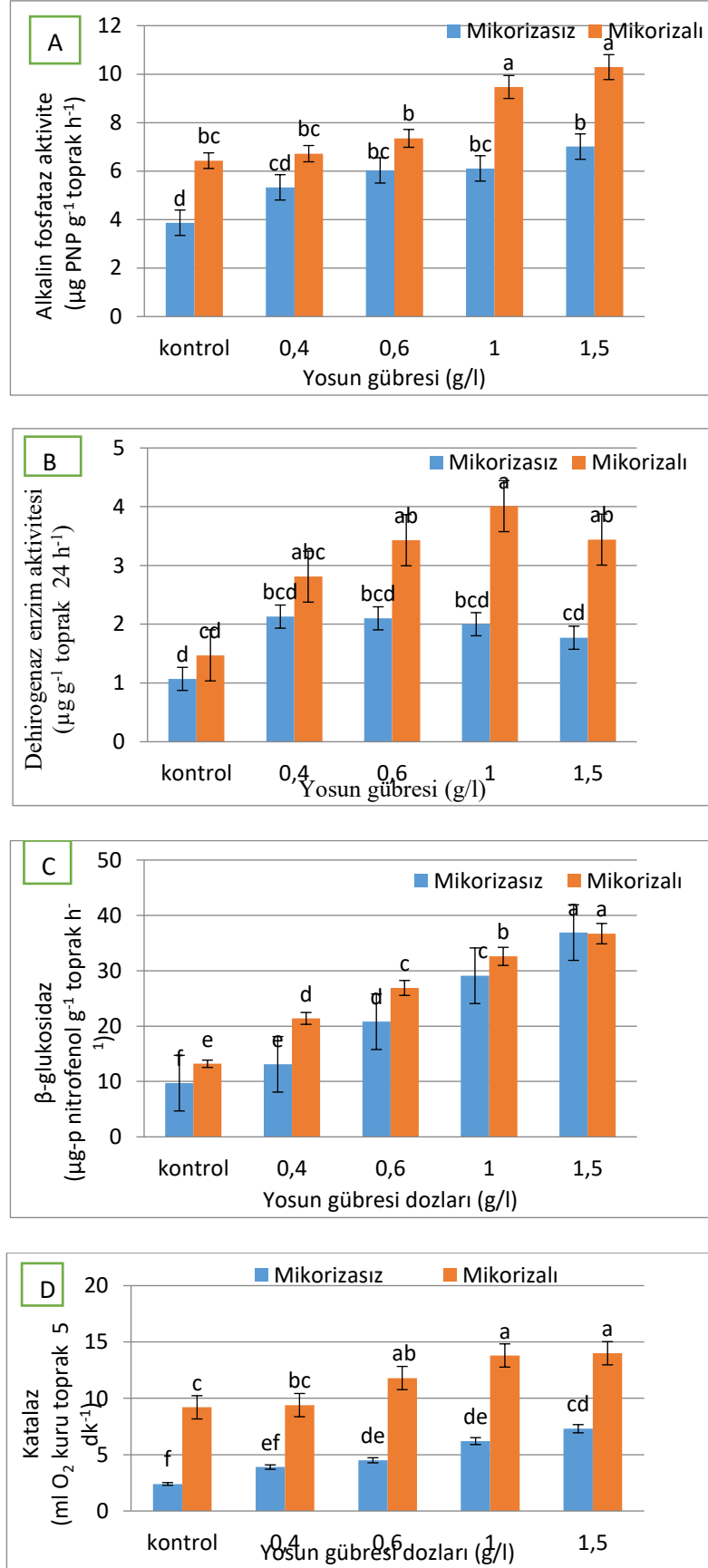
Farklı uygulamaların arpa fidelerinin rizosfer toprağının alkalın fosfataz, dehidrogenaz, β -glukosidaz ve katalaz enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri incelenmiş, sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir. Yosun gübresinin artan dozları incelenen enzim aktivitelerini artırmıştır. En düşük alkalın fosfataz aktivitesi hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrolde belirlenmiştir. Kontrolle karşılaştırıldığında, en yüksek aktivite 1.5 g/l yosun gübresi x mikoriza ve 1g/l yosun gübresi x mikoriza uygulaması ile alınırken, sadece yosun gübresi uygulamasında ise en yüksek değer 1.5 g/l yosun gübresi uygulamasında belirlenmiştir. Kontrolle karşılaştırıldığında uygulamalar; alkalın fosfataz aktiviteyi artırmış, uygulamaların neden olduğu artış istatistiki olarak önemli bulunmuştur. Benzer sonuçlar dehidrogenaz enzim aktivitesinde de belirlenmiştir. En yüksek dehidrogenaz aktivite 1 g/l yosun gübresi x mikorizanın uygulanması ile alınırken, en düşük aktivite mikoriza ve yosun gübresi uygulanmayan kontrolde elde edilmiştir. Dehidrogenaz aktivitesinde de uygulamalar aktiviteyi kontrole göre önemli ölçüde artırmıştır. Uygulamaların sebep olduğu artışlar istatistiki olarak önemlidir. Hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrol grubunda β -glukosidaz enzim aktivitesi en düşük sonucu vermiş, yosun gübresinin artan dozları ile aktivite artmıştır. Mikoriza uygulandığında kontrole göre β -glukosidaz aktivitesinde %35 oranında artış belirlenmiştir. Mikoriza uygulanan toprakla karşılaştırıldığında, yosun gübresinin farklı dozları ve mikorizanın birlikte uygulanması ile aktivitede artış; yosun gübresinin uygulama dozlarına bağlı olarak artmıştır. Yosun gübresinin 0.4 g/l’lik dozu x mikoriza uygulaması ile aktivitedeki artış %63.3, yosun gübresinin 0.6 g/l’lik dozu x mikoriza uygulanması ile aktivitedeki artış %105.3, yosun gübresinin 1 g/l’lik dozu x mikoriza uygulaması ile aktivitedeki artış %148.8, yosun gübresinin 1.5 g/l’lik dozu x mikoriza uygulaması ile aktivitedeki artış ise %180.1 olarak tespit edilmiştir (Şekil 1).

Çizelge 2. Farklı uygulamaların yaprakların klorofil miktarına etkileri

Uygulamalar	Klorofil a (mg/g yaş ağırlık)	Klorofil b (mg/g yaş ağırlık)
Kontrol*	6.03±0.20f [#]	4.49±0.06 f
0.4g/l	6.37±0.10 f	5.95± 0.12e
0.6 g/l	8.30± 0.15d	6.17±0.14 e
1 g/l	8.37±0.12d	8.0±0.014 b
1.5 g/l	10.03±0.13 c	8.0±0.014 b
Mikoriza	7.11±0.10 e	4.73±0.10 f
0.4 g/l xM	10.06±0.09 c	6.71±0.14 d
0.6g/l xM	10.97±0.10 b	7.19±0.16 c
1g/l xM	12.81±0.08 a	9.50±0.15 a
1.5 g/l xM	13.23±0.07 a	9.63±0.14 a
LSD(p<0.05)	0.54	0.45

*Kontrol (mikoriza mantarı ve yosun gübresi olmadan); yosun gübresi (g/l), M (mikoriza). Farklı harfler istatistiki olarak farklıdır (p<0.05)

Uygulamalar kontrole göre değerlendirildiğinde elde edilen artışlar, dehidrogenaz aktivitede istatistiki anlamda önemli bulunmuştur. Uygulamalar rizosfer toprağının katalaz aktivitesine de etkili bulunmuştur. Yosun gübresinin artan dozları ile katalaz aktivitesinde artış belirlenmiştir. Hiçbir uygulamanın yapılmadığı kontrol ile karşılaştırıldığında katalaz aktivitesindeki artış; yosun gübresinin 0.4 g/l uygulamasında %62.5, yosun gübresinin 0.6 g/l uygulamasında %87.5, yosun gübresinin 0.4 g/l uygulamasında %158.3, yosun gübresinin 1.5 g/l’lik uygulamasında ise %204’dür. Mikoriza uygulamasının katalaz aktivite üzerindeki etkisi önemli bulunmuş, artan dozlardaki yosun gübresi ve mikorizanın birlikte uygulanması ile aktivite artmıştır (Şekil 1). Mikoriza uygulaması ile mikoriza ve yosun gübresinin farklı dozlarının kombinasyonları aktiviteyi hiçbir uygulama yapılmayan kontrole göre artırmıştır. Artışlar, istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.



Şekil 1. Farklı uygulamalar yapılan rizosfer toprağının (A) alkaline fosfataz, (B) dehidrogenaz, (C) β -glukosidaz ve (D) katalaz enzim aktiviteleri. Farklı harfler önemli farklılıkları göstermektedir ($p < 0.05$)

TARTIŞMA

Çalışmalarda mikroorganizma bazlı (mikoriza vb.) uygulamaların; çeltik (Ruiz-Sanchez ve ark. 2010), buğday (Vafa ve ark. 2021), marul (Rasouli ve ark. 2022) ve hıyar (Mendez ve ark. 2023) bitkilerinin gelişimine katkı gösterdiği tespit edilmiş, bu etkinin mikroorganizmaların bitkinin besin maddelerine olan erişimini kolaylaştırmasına bağlanmıştır (Xie ve ark. 2022). Mikorizanın buğday bitkisinin gelişimi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, mikoriza uygulanmamış bitkilerle karşılaştırıldığında bitkinin su ve besin alımının artarak fotosentez içeriğine olumlu etki gösterdiği bildirilmiştir (Amrayi ve ark. 2016). Mevcut çalışmada, 1g/l yosun gübresi x mikorizanın birlikte uygulanması diğer uygulamalarla karşılaştırıldığında en yüksek bitki boyunu vermiştir. Uygulamaların etkisi farklılık göstermiş olup, kök uzunluğu, sürgün ve kök yaş ağırlığı üzerinde etkili olan tek bir uygulama belirlenememiştir.

Sürgün yaş ağırlığı üzerinde sadece mikoriza uygulaması etkili bulunurken, bunu sırasıyla 1g/l yosun gübresi x mikoriza, 1.5 g/l yosun gübresi x mikoriza uygulamaları izlemiştir. Kök yaş ağırlığı üzerinde de en yüksek değer sadece 0.4 g/l yosun gübresi uygulamasında belirlenmiş, bunu sırasıyla; 1 g/l yosun gübresi, 0.4 g/l yosun gübresi x mikoriza uygulamaları izlemiştir (Çizelge 1). Kök uzunluğu üzerinde yosun gübresi ve mikorizanın birlikte uygulanması, mikoriza ve yosun gübresinin bireysel uygulamasına göre daha etkili bulunurken, en yüksek kök uzunluğu sırasıyla; 1 g/l yosun gübresi x mikoriza, 1.5 g/l yosun gübresi x mikoriza ile belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, toprağa yosun gübresi ve mikoriza uygulanmasının toprak mineralizasyonunu artırdığını, bitkiler tarafından kullanılabilir besin maddelerinin konsantrasyonunu yükselttiğini düşünmekle beraber mevcut çalışmanın önceki çalışmalarla da uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapılan çeşitli çalışmalarda vejetatif büyümeyi destekleyen vitaminler, oksin, sitokinin, gibbrellin gibi çeşitli maddeleri içeren sıvı yosun özütünün, ürün gelişimini teşvik ettiği açıklanmıştır (Craigie 2011, Battacharyya ve ark. 2015). Mikoriza ile aşılanmış bitkilerde, mantar hiflerinin bir kısmı bitkinin kök sistemine girerek absisik asit seviyelerini azaltmış, sitokinin artırmıştır. Mikoriza bitki kök sistemini genişleterek bitkinin su alımını artırmış, malik asit gibi organik asitlerin salgılanmasını sağlayarak bitkinin topraktan fosfor alımını artırarak toprak üstü kısımlarının büyümesini desteklemiştir (Kinany ve ark. 2019). Mikoriza ile kök bölgesindeki simbiyoz; toprağın biyolojik özelliklerini iyileştirmenin yanında, bitkinin besin mineralleri (P, K, Fe, Zn ve Mn) alımında da önemli rol oynamıştır (Zhang ve ark. 2019). Sıvı yosun gübresi besin maddelerinin taşınmasını, bitkide fitohormon biyosentezini, protein birikimini uyarak, fotosentez verimliliğini, yaş ve kuru ağırlığını arttırmaya yardımcı olabilmektedir (Shukla ve ark. 2019). Bu bağlamda Colla ve ark. (2017), yosun gübresinin yaprak uygulamasının marulun yaş ve kuru ağırlığını arttırdığını bildirmiştir.

Mikroorganizmalar (arbüsküler mikorizal mantarlar ve bitki büyüme düzenleyici bakteriler) ve yosun özleri, sürdürülebilir tarım için önemli stratejilerden biridir (Ngoroyemoto ve ark. 2020, Ashour ve ark. 2021, Hassan ve ark. 2021). Arbüsküler mikorizal mantarların toprak minerallerinin (P ve N) emilimini artırdığı, bitkinin strese (biyotik ve abiyotik) karşı toleransını iyileştirdiği, toprak kalitesini iyileştirip bitkilerin biyokimyasal ve enzimatik aktivitelerini hızlandırdığı saptanmıştır (Sivakumar ve ark. 2020). Yapılan bir çalışmada da yosun gübresi ile mikorizanın birlikte uygulanmasının; mercimekte kök ağırlığını, klorofil konsantrasyonunu, bitki boyu ve kök uzunluğunu artırdığı bildirilmiştir (Küçük ve Demir 2025). Mikoriza kullanımına bağlı olarak bitki gelişimindeki artış; mikorizanın konukçu bitki köklerindeki karbonhidratlar/karbondan yararlanırken, geniş hif ağları aracılığıyla konakçı bitkilere besin ve su sağlamasından kaynaklanıyor olabilir (Basiru ve Hijri 2024). Yosun gübresi polisakkaritler, aminoasitler, vitaminler ve diğer aktif bileşikler dahil olmak üzere büyüme için çok sayıda hayati besin sağlamaktadır (Subbiah ve ark. 2023). Anlı ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada yosun gübresi ve mikoriza kombinasyonunun klorofil miktarını kontrole göre önemli ölçüde artırdığı, fotosentetik aktivitenin artışı ile hurma ağacının büyümesini iyileştirebilecek CO₂ asimilasyonunun artmış olabileceği açıklanmıştır. Bu durumun yosun gübresinin içerdiği zengin fitohormon bileşiminden dolayı hücrelerin karbon bağlama yeteneğinin ve fotosentetik pigment içeriğinin artmasından kaynaklandığı düşünülmüştür (Anlı ve ark. 2020).

Klorofil floresansının yoğunluğu, doğrudan uyarılmış klorofil moleküllerinin konsantrasyonu ile ilişkili olabilir (Oyetunji ve ark. 2007). Benzer şekilde, arbüsküler mikoriza (*R. irregularis*) inokülasyonu, kavak fidanlarının klorofil konsantrasyonunu, su içeriğini ve gaz değişimini iyileştirmiştir (Liu ve ark. 2018). Araştırmacıların çalışmasına benzer olarak, bu çalışmada uygulanan yosun gübresinin %1 ve %1.5'lik dozları ile mikorizanın birlikte kullanılması klorofil içeriğini arttırmıştır (Çizelge 2). Sonuçlar araştırmacıların bulguları ile benzerlik göstermektedir. Sıvı yosun gübresinin toprağın üreaz ve dehidrogenaz aktivitesini artırdığı, bu artışın da sıvı yosun gübresinin toprağın azot döngüsünde yer alan enzim üreten mikroorganizma popülasyonunu teşvik etmesinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Wang ve ark. 2018, Vafa ve ark. 2022). Tujula ve ark. (2010), yosundaki epifitik mikrobiyal topluluğun ağırlıklı olarak Alphaproteobacteria (%70) ve Bacteroidetes (%13)'ten oluştuğunu bildirmiştir. Bu nedenle, sıvı yosun gübresinin topraktan uygulaması, topraktaki mikrobiyal çeşitliliği ve aktiviteye katkı sağlayarak topraktaki minerallerin çözünürlüğünü ve dolayısıyla mikrobiyal popülasyonu arttırmıştır (Prasedya ve ark. 2022). Mikrobiyal popülasyonun artması, topraktaki besin maddelerinin çözünmesini sağlayarak bitkiler tarafından alımını kolaylaştırmış ve bitki büyümesini destekleyebilmiştir (Prasedya ve ark. 2023). Bu çalışmada da kontrolle karşılaştırıldığında hem yosun gübresinin farklı dozları hem de mikoriza uygulamaları alkalın fosfataz, dehidrogenaz, katalaz ve beta-glukosidaz enzim aktivitelerini artırmıştır. Yosun gübresinin ve mikorizanın birlikte uygulanması ile artış daha fazla olmuştur.

Alkalın fosfataz enzim aktivitesinde en yüksek artış 1.5 g/l yosun gübresi x mikoriza kombinasyonu ile %165.8, dehidrogenaz enzim aktivitesinde en yüksek artış ise 1 g/l yosun gübresi x mikoriza kombinasyonu ile %172.7 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda (Zhang ve ark. 2012, Wang ve ark. 2018) toprak düzenleyicilerinin kullanımının toprak enzimlerinin aktivitelerini artırabileceği bildirilmiştir. Mikoriza ve *Cladophora* sp.'nin farklı dozlarının toprağa uygulanması ile mısır bitkisinin rizosferindeki dehidrogenaz, alkalın fosfataz, üreaz ve beta-glukosidaz enzim aktivitelerinde farklılık belirlenmiş, uygulamaların artan dozları ile kombine uygulamaları enzim aktiviteleri üzerinde istatistiki anlamda önemli bulunmuştur (Küçük ve ark. 2024). Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlara göre en yüksek glukosidaz ve katalaz enzim aktiviteleri; yosun gübresinin 1.5 g/l uygulama dozunda alınmıştır (Şekil 1). Bu parametrelerin en düşük değerleri hiçbir uygulama yapılmayan kontrol grubunda belirlenmiştir. Sıvı yosun gübresinin içerdiği makro ve mikro besinler, büyüme hormonları, aminoasitler, betain, sitokinin vb. ile tohumun çimlenme sürecini hızlandırdığı, kök gelişimini artırdığı, yaprakların klorofil miktarını artırdığı, toprakların biyolojik özelliklerini iyileştirdiği Vafa ve ark. (2022) ile Mendez ve ark. (2023) tarafından açıklanmıştır. Topraklara uygulanan mikoriza, yosun gübresi gibi biyolojik uygulamaların toprak mikroorganizmalarının bileşimi ve dağılımı üzerinde de dolaylı etkisinin olduğu bilinmektedir (uz Zaman ve ark. 2025). Rizosfer bölgesinde test edilen enzim aktivitelerindeki değişimler muhtemelen kök eksüdatları ile mikroorganizma türleri ve miktarlarındaki değişiklikleri yansıtmaktadır. Kök ortamı ile mikroorganizmalar arasındaki etkileşimleri ve bu etkileşimlerin toprak enzim aktivitelerini nasıl etkilediğini ayrıntılı olarak incelemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, sıvı yosun gübresi ve mikoriza uygulamasının arpa fidelerinin gelişimi ve rizosferin bazı enzimatik aktivitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca uygulamalar, bitkinin klorofil miktarını da önemli ölçüde artırmış, böylece bitki büyümesini teşvik etmiştir. Sıvı yosun gübresi ve mikorizanın ayrı ayrı uygulamaları ile kombine uygulamalar kontrolle karşılaştırıldığında; özellikle kombine uygulamaların daha etkili olduğu bulunmuştur. Sıvı yosun gübresi ve mikorizanın kombine uygulaması, arpa bitkisinin hem gelişimini desteklemek hem de rizosferin mikrobiyal aktivitesini artırmada; sürdürülebilir ve uygulanabilir bir biyofertilizasyon yaklaşımı olarak katkıda bulunabilir. Bu biyostimülantların, özellikle kombinasyon halinde uygulamasının besin eksikliği olan sistemlerde toprağın mikrobiyal aktivitesini artırarak, bitkisel üretimi iyileştirme de potansiyel rollerinin olabileceği de düşünülmektedir.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen “Proje No:21265” numaralı projeden hazırlanmıştır. Projenin yürütülmesi ve araştırmanın gerçekleştirilmesi sürecinde sağlanan katkı ve desteklerden dolayı ilgili kuruma teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Agarwal P, Gupta R, Gill IK (2018) Importance of biofertilizers in agriculture biotechnology. *Annals of Biological Research*, 9(3):1–3.
- Anlı M, El kaoua M, Ait El Mokhtar M, Boutasknit A, Ben-laouane R, Toubali S, Baslam M, Lyamlouli K, Hafidi M, Meddich A (2020) Seaweed extract application and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation: a tool for promoting growth and development of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv “Boufgous”. *South African Journal of Botany*, 132:15–21. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.04.004>
- Arnon DT (1967) Copper Enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24:1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Ashour M, Hassan SM, Elshobary ME, Ammar GA, Gaber A, Alsanie WF, El-Shenody R (2021) Impact of commercial seaweed liquid extract (TAM®) biostimulant and its bioactive molecules on growth and antioxidant activities of hot pepper (*Capsicum annuum*). *Plants*, 10(6):1045. <https://doi.org/10.3390/plants10061045>
- Basavaraja PK, Yogendra ND, Zodape ST, Prakash R, Ghosh A (2018) Effect of seaweed sap as foliar spray on growth and yield of hybrid maize. *Journal of Plant Nutrition*, 41:1851–1861. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1463381>
- Basiru S, Hijri M (2024) Trade-off between soil organic carbon sequestration and plant nutrient uptake in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Fungal Biology Reviews*, 49:100381. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2024.100381>
- Battacharyya D, Babgohari MZ, Rathor P, Prithiviraj B (2015) Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196:39–48. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.012>
- Beck TH (1971) The determination of catalase activity in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 130:68–81. <https://doi.org/10.1002/jpln.19711300108>
- Bona E, Cantamessa S, Massa N, Manassero P, Marsano F, Copetta A, Lingua G, D’Agostino G, Gamalero E, Berta G (2017) Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting pseudomonads improve yield, quality and nutritional value of tomato: a field study. *Mycorrhiza*, 27:1–11. <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0727-y>
- Colla G, Cardarelli M, Bonini P, Roupheal Y (2017) Foliar applications of protein hydrolysate, plant and seaweed extracts increase yield but differentially modulate fruit quality of greenhouse tomato. *HortScience*, 52:1214–1220. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12200-17>
- Craigie JS (2011) Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23:371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>
- Cüre B (2022) Kimyasal ve organik gübrelerin çevre üzerine etkisi. *Biyosistem Mühendisliği Dergisi*, 3(2): 98–107.
- Di Mola I, Cozzolino E, Ottiano L, Giordano M, Roupheal Y, Colla G, Mori M (2019) Effect of vegetal and seaweed extract-based biostimulants on agronomical and leaf quality traits of plastic tunnel-grown baby lettuce under four regimes of nitrogen fertilization. *Agronomy*, 9(10):571. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100571>
- Du Jardin P (2015) Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Science Horticulture*, 196:3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Güler A, Küçük Ç (2024) Sıvı yosun gübresinin farklı dozlarının tuz stresi koşullarında arpa gelişimi ve rizosferdeki bazı biyolojik özelliklere etkisi. *Mus Alparslan University Journal of Science*, 12(1):51–57. <https://doi.org/10.18586/msufbd.1403059>
- Hassan SM, Ashour M, Sakai N, Zhang L, Hassanien HA, Gaber A, Ammar G (2021) Impact of seaweed liquid extract biostimulant on growth, yield and chemical composition of cucumber (*Cucumis sativus*). *Agriculture*, 11(4):320. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040320>
- JMP Statistical Software (2020) JMP 1989–2007. Version 5.0. SAS Institute Inc: Cary, NC, USA. <https://www.capterra.com/p/151815/JMP-Statistical-Software>
- Kaur S, Suseela V (2020) Unraveling arbuscular mycorrhiza-induced changes in plant primary and secondary metabolome. *Metabolites*, 10:1–30. <https://doi.org/10.3390/metabo10080335>
- Kinany SE, Achbani E, Faggrou M, Ouahmane L, Hilali RE, Haggoud A, Bouamri R (2019) Effect of organic fertilizer and commercial arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of micropropagated date palm cv. Feggouss. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18:411–417. <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2018.01.004>
- Kulkarni MG, Rengasamy KR, Pendota SC, Gruz J, Plackova L, Novak O (2019) Bioactive molecules derived from smoke and seaweed *Ecklonia maxima* showing phytohormone-like activity in *Spinacia oleracea* L. *New Biotechnology*, 48:83–89. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.08.004>
- Küçük Ç, Uslu P, Sezen G (2024) *Cladophora* sp. ve *Arbüküler* Mikorizal Fungus (AMF) spor aşılmasının mısır bitkisinin (*Zea mays* L.) gelişim parametreleri ve bazı rizosfer toprak enzimlerine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2): 189–196. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1473028>
- Küçük Ç, Demir M (2025) Yosun gübresi ve mikoriza uygulanmasının mercimek bitkisi rizosfer bölgesinin biyolojik aktivitesine etkileri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 15(1): 11–20. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1444495>
- Liu CY, Zhang F, Zhang DJ, Srivastava AK, Wu QS, Zou YN (2018) Mycorrhiza stimulates root-hair growth and IAA synthesis and transport in trifoliate orange under drought stress. *Science Reports*, 8:1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20456-4>
- Mendez A, Martinez S, Leal A, Hernandez A, Garcia J, Sanchez M (2023) Synergism of microorganisms and seaweed extract on vegetative growth, yield and quality of cucumber fruit. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51:12888. <https://doi.org/10.15835/nbha51312888>

- Mukherjee A, Gaurav AK, Patel AK, Singh S, Chouhan GK, Lepcha A (2021) Unlocking the potential plant growth-promoting properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seed endophytes bio-inoculants for improving soil health and crop production. *Land Degradation & Development*, 32(15):4362–4374. <https://doi.org/10.22541/au.161518112.26081982/v1>
- Ngoroyemoto N, Kulkarni MG, Stirk WA, Gupta S, Finnie JF, van Staden J (2020) Interactions between microorganisms and a seaweed-derived biostimulant on the growth and biochemical composition of *Amaranthus hybridus* L. *Natural Product Communications*, 15(7):1-11. <https://doi.org/10.1177/1934578X20934228>
- Oral E, Kendal E, Doğan Y (2017) Adıyaman ve Şanlıurfa-Hilvan şartlarında yazlık arpa genotiplerinde verim ve bazı kalite kriterlerinin araştırılması. *Journal of Agricultural Faculty of Uludağ University*, 31(2):23-36.
- Oyetunji OJ, Ekanayake U, Osonubi O (2007) Chlorophyll fluorescence analysis for assessing water deficit and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Advances in Biological Research*, 1(3-4): 108-117.
- Pepper IL, Gerba CP, Brendecke JW (1995) Environmental Microbiology: A Laboratory Manual. Academic Press Inc. New York, USA.
- Prasedya ES, Kurniawan NSH, Kirana IAP, Ardiana N, Abidin AS, Ilhami BTK, Jupri A, Widyastuti S, Sunarpi H, Nikmatullah A (2022) Seaweed fertilizer prepared by EM-Fermentation increases abundance of beneficial soil microbiome in paddy (*Oryza sativa* L.) during vegetative stage. *Fermentation*, 8:1-15. <https://doi.org/10.3390/fermentation8020046>
- Prasedya ES, Kurniawan NSH, Fitriani F, Saraswati PBA, Qoriasmadillah W, Ilhami BTK, Hernawan A, Widyastuti S (2023) Sustainable use of organic seaweed fertilizer improves the metagenomic function of microbial communities in the soil of rice plants. *Sustainability*, 15(23):16328. <https://doi.org/10.3390/su152316328>
- Rasouli F, Amini T, Asadi M, Hassanpouraghdam MB, Aazami MA, Ercisli S, Skrovankova S, Mlcek J (2022) Growth and antioxidant responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to arbuscular mycorrhiza inoculation and seaweed extract foliar application. *Agronomy*, 12(2):401. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020401>
- Rouphael Y, Colla G (2020) Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11:1-7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Ruiz-Sánchez M, Aroca R, Muñoz Y, Polón R, Ruiz-Lozano JM (2010) The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 167:862–869. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.01.018>
- Sharma S, Chen C, Khatri K, Rathore MS, Pandey SP (2019) Gracilaria dura extract confers drought tolerance in wheat by modulating abscisic acid homeostasis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 136:143–154. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.01.015>
- Shukla PS, Mantin EG, Adil M, Bajpai S, Critchley AT, Prithiviraj B (2019) Ascophyllum nodosum-based biostimulants: sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers Plant Science*, 10:655. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>
- Sivakumar PV, Palanisamy K, Lenin M (2020) Potential role of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and vermicompost (VC) on the maturation of agriculture crops. *South Asian Journal of Life Sciences*, 8(2):24-37. <https://doi.org/10.17582/journal.sajls/2020/8.2.24.37>
- Subbiah V, Xie C, Dunshea FR, Barrow CJ, Suleria HA (2023) The quest for phenolic compounds from seaweed: nutrition, biological activities and applications. *Food Reviews International*, 39(8):5786-5813. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2094406>
- Tabatabai MA, Bremner JM (1969) Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1:301-307. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1)
- Tarraf W, Ruta C, Tagarelli A, De Cillis F, De Mastro G (2017) Influence of arbuscular mycorrhizae on plant growth, essential oil production and phosphorus uptake of *Salvia officinalis* L. *Industrial Crops and Products*, 102:144–153. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.010>
- Tujula NA, Crocetti GR, Burke C, Thomas T, Holmstrom C, Kjelleberg S (2010) Variability and abundance of the epiphytic bacterial community associated with a green marine Ulvacean alga. *The ISME Journal*, 4(2):301-311. <https://doi.org/10.1038/ismej.2009.107>
- Türkmen M, Su A (2019) The effect of sea lettuce (*Ulva lactuca*) liquid fertilizer and zeolite combinations on the development of cucumber (*Cucumis sativus*). *Turkish Journal of Agriculture Food Science and Technology*, 7:1021–1027. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i7.1021-1027.2520>
- uz Zaman Q, Guo L, He X, Luo Y, Liu C, Murtaza G, Sultan K, Fahad S, Cheng X, Ashraf K, Deng G (2025) Synergistic effect of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and seaweed extract for improving the copper tolerance in hemp. *Industrial Crops and Products*, 224:120358. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120358>
- Vafa Z, Najafi Y, Sohrabi R, Sayyed Z, Luh Suriani N, Datta R (2021) Effects of the combinations of rhizobacteria, mycorrhizae, and seaweed, and supplementary irrigation on growth and yield in wheat cultivars. *Plants*, 10:811. <https://doi.org/10.3390/plants10040811>
- Vafa NZ, Sohrabi Y, Mirzaghaderi G, Heidari G (2022) Soil microorganisms and seaweed application with supplementary irrigation improved physiological traits and yield of two dryland wheat cultivars. *Frontiers Plant Science*, 13:855090. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.855090>
- Varma A, Prasad R, Tuteja N (2018) Mycorrhiza-Nutrient uptake, Biocontrol, Ecorestoration. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1–539.
- Wang MP, Chen L, Li YT, Chen L, Liu ZY, Wang XJ, Yan PS, Qin S (2018) Responses of soil microbial communities to a short-term application of seaweed fertilizer revealed by deep amplicon sequencing. *Applied Soil Ecology*, 125:288-296. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.013>
- Wipf D, Krajinski F, van Tuinen D, Recorbet G, Courty PE (2019) Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhiza networks. *New Phytology*, 223:1127–1142. <https://doi.org/10.1111/nph.15775>
- Xiao Y, Liu M, Chen L, Ji L, Zhao Z, Wang L (2020) Growth and elemental uptake of *Trifolium repens* in response to biochar addition, arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilizer applications in low-Cd-polluted soils. *Environmental Pollution*, 260:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113761>
- Xie X, Lai W, Che X, Wang S, Ren Y, Hu W, Tang M (2022) A SPX domain-containing phosphate transporter from *Rhizophagus irregularis* handles phosphate homeostasis at symbiotic interface of arbuscular mycorrhizas. *New Phytologist*, 234:17973. <https://doi.org/10.1111/nph.17973>

- Yakhin OI, Lubyantsev AA, Yakhin IA, Brown PH (2017) Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers Plant Science*, 7:2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Yıldırım F, Cevheri C, Küçük Ç (2024) Effect of different mycorrhizal inoculations and phosphorus doses on vetch (*Vicia sativa*) growth under greenhouse conditions. *Commagene Journal of Biology*, 8(1): 24-29. <https://doi.org/10.31594/commagene.1449187>
- Zhang Z, Chen Q, Yin C, Shen X, Chen X, Sun H, Mao Z (2012) The effects of organic matter on the physiological features of *Malus hupehensis* seedlings and soil properties under replant conditions. *Scientia Horticulturae*, 146:52-58. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.08.011>
- Zhang F, Liu M, Li Y, Che Y, Xiao Y (2019) Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa*. *Science of the Total Environment*, 655:1150–1158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.317>