



Impacts of Climate Changes on Plant-Beneficial Microorganism Interactions

Kubilay Kurtulus Bastas^{1,a,*}

¹Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Selçuk University, 42250Konya, Turkey

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>^aThis study was presented as an online presentation at the 2nd International Journal of Agriculture - Food Science and Technology (TURJAF 2021) Gazimağusa/Cyprus</p> <p>Review Article</p> <p>Received : 02/12/2021 Accepted : 31/12/2021</p> <p>Keywords: Plant Bacteria Fungi Climate change Bio-control</p>	<p>Global climate is estimated to change drastically over the next century and the ecosystems will be affected in this changing environment. Plant-associated beneficial microorganisms can stimulate plant growth and increase resistance to biotic and abiotic stresses. Nowadays, the effects of climate change factors such as increased carbon dioxide (CO₂), drought and warming on plant-beneficial microorganism interactions are increasingly being investigated in the scope of plant growth and health. Recent studies have shown that high CO₂ level has a positive effect on the abundance of mycorrhizal fungi, whereas the effects on plant growth promoting bacteria and endophytic fungi are more variable. Elevated CO₂ conditions lead to increased colonization of beneficial fungi. Additionally, the results of increasing CO₂ levels, warming and drought, depend upon the plant and the microbial genotype. Also, plant growth promoting microorganisms, especially bacteria, positively affect plants exposed to drought stress. Altered communities of beneficial microorganisms depending on climate changes, might have to compete with different microbial communities and, therefore microbial activities may also get affected. This work presents that climate change is an important factor affecting microorganism and plant interactions, needs to take into consideration the adaptation processes in plants and microorganisms and might require the selection of adapted plant cultivars.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(sp): 2594-2603, 2021

İklim Değişikliğinin Bitki-Faydalı Mikroorganizma Etkileşimleri Üzerindeki Etkileri

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p>Derleme Makale</p> <p>Geliş : 02/12/2021 Kabul : 31/12/2021</p> <p>Anahtar Kelimeler: Bitki Bakteri Fungus İklim değişikliği Biyo-kontrol</p>	<p>Önümüzdeki yüzyılda küresel iklimin büyük ölçüde değişeceği ve ekosistemlerin bu değişen ortamdan etkileneceği tahmin ediliyor. Bitki ile ilişkili faydalı mikroorganizmalar, bitki büyümesini uyandırabilir ve biyotik ve abiyotik streslere karşı direnci artırabilir. Günümüzde artan karbondioksit (CO₂), kuraklık ve ısınma gibi iklim değişikliği faktörlerinin bitki faydalı mikroorganizma etkileşimleri üzerindeki etkileri, bitki gelişimi ve sağlığı kapsamında giderek daha fazla araştırılmaktadır. Son çalışmalar, yüksek CO₂ seviyesinin mikorizal fungusların bolluğu üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu, buna karşın bitki büyümesini teşvik eden bakteriler ve endofitik mantarlar üzerindeki etkilerinin daha değişken olduğunu göstermiştir. Ek olarak, artan CO₂ seviyeleri, ısınma ve kuraklığın sonuçları bitkiye ve mikrobiyal genotipe bağlıdır. Ayrıca bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmalar, özellikle bakteriler, kuraklık stresine maruz kalan bitkileri olumlu yönde etkiler. İklim değişikliklerine bağlı olarak değişen faydalı mikroorganizma toplulukları, farklı mikrobiyal topluluklarla rekabet etmek zorunda kalabilir ve bu nedenle mikrobiyal faaliyetler de etkilenebilir. Bu çalışma, iklim değişikliğinin mikroorganizma ve bitki etkileşimlerini etkileyen önemli bir faktör olduğunu, bitkilerde ve mikroorganizmalarda adaptasyon süreçlerinin dikkate alınması gerektiğini ve adapte edilmiş bitki çeşitlerinin seçimini gerektirebileceğini ortaya koymaktadır.</p>

kbastas@selcuk.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-2367-1849>



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Giriş

İklim değişikliği “karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan insan faaliyetleri sonucunda iklimde oluşan değişiklikler” olarak tanımlanmaktadır (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi, 2002). Sanayi devrimi sonrasında artan fosil yakıt kullanımı sonucunda karbondioksit salımları, okyanusların ve orman alanlarının soğurabileceğinden çok daha hızlı bir şekilde artmaktadır (Can ve Baygüven, 2004). Bu hızlı artış, beraberinde küresel iklim değişikliğini getirmiş ve küresel boyutta, insan hayatını ve tüm ekosistemi etkileyecek boyutlara gelmiştir.

Bazı sera gazları doğal yollarla oluşabilecekleri gibi insan faaliyetleri sonucunda oluşum hızları ve atmosferdeki konsantrasyonları daha da artmaktadır. Bu tür sera gazları; su buharı, karbondioksit, ozon, metan ve nitröz oksitlerdir. Atmosferdeki karbondioksit konsantrasyonu sanayi devrimi öncesinde 275 ppm’ den, günümüzde 400 ppm den daha yüksek değerlere ulaşmıştır vebu da %43 seviyesinde bir artış göstermektedir. Bilimsel modeller, karbondioksit konsantrasyonunun 550 ppm e ulaşmasıyla sıcaklıkların 1,4 ile 4,5 arasında artacağını öngörmektedir (IPCC, 2007).

Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli’nin (IPCC, 2021) raporuna göre; küresel ısınmada 1,5°C artışın daha çok sayıda sıcak dalgası, daha uzun süren ılıman mevsimler ve daha kısa süren soğuk mevsimler anlamına geldiği belirtilmektedir. Küresel ısınmada 2°C artışta ise, aşırı sıcaklık olayları daha büyük sıklıkla tarım ve sağlık bakımından kritik tolerans eşiklerine geleceği ifade edilmektedir. İklim değişikliği nedeni ile su döngüsü yoğunlaşmakta ve bunun sonucunda daha şiddetli yağmur ve yağmurun neden olduğu sel/taşkınlarla sebep olurken başka birçok bölgede ise daha şiddetli kuraklığı oluşturduğu bildirilmektedir. IPCC, Avrupa’da Türkiye’yi de içine alan Akdeniz bölgesine ait yorumlarında, küresel ısınmanın derecesinden bağımsız olarak, Baltık Denizi hariç bütün Avrupa bölgesinde deniz seviyesinin, küresel ortalamaya yakın ya da bunun üzerinde bir hızla yükselmeye devam edeceğini belirtmektedir. Bölge için hidrolik, tarımsal ve ekolojik kuraklığın artabileceğini öngören rapor, küresel ısınmadaki 2°C ve üzerindeki yükselişlerde çoraklık ve yangın hava koşullarının artacağını ortaya koymaktadır. Aynı koşullarda, ısınma, ekstrem sıcaklıklar, kuraklıklarda artış ve çoraklık, nemlilik artışı, yangın havalının artması, ortalama ve ekstrem deniz seviyeleri, kar örtüsünde azalış ve rüzgar hızında azalma olarak sıralanan iklimsel etki sürükleyici değişikliklerinin yüzyıl ortasında farklı kombinasyonlarının gözleneceği tahmin edilmektedir.

Dünya çapında bitkisel üretim milyonlarca dolarlık kayıplara neden olan biyotik ve abiyotik stres faktörlerinden etkilenmektedir (Suzuki ve ark., 2014). Günümüzde artan dünya nüfusunun beslenmesi için yetiştirilecek alanlarının ve tüm enerji kaynaklarının artırılması çok önemlidir. Bu nedenle tarım, sürdürülebilir, üretimi artırıcı ve tüm canlı sistemler için daha güvenilir olan yöntemlerin kullanımı gerekmektedir. Bitkilerde hastalıklarla savaşım, bitkisel ürünlerin miktarını arttırabilmek için en önemli ve vazgeçilemez

yöntemlerden biri olma önceliğini korumaktadır. Biyolojik savaşım bu amaca hizmet eden ve doğadaki sürdürülebilirliği sağlayan bir savaşım yöntemi olmak seçeneğini sunmaktadır. Biyolojik savaşım, bitkilerde verim artışını, hastalık yapan patojen inokulumunu ortadan kaldırarak veya baskılayarak yapmaktadır, aynı zamanda bitkileri enfeksiyonlara karşı korumakta ve bitkide dayanıklılık sistemini uyarmaktadır. Dengesi bozulmamış bir ekosistemde, bitki popülasyonları oluşan değişikliklere karşı başarılı bir dayanıklılık gösterirler. Biyolojik toplulukdaki karmaşıklık dengelyi de beraberinde getirmektedir. Böyle bir ortam ekolojik bir nişin maksimum düzeyde kullanılmasını sağlamakta ve birbirine kenetlenmiş bir ekosistem yaratmaktadır.

Bu çalışmada, iklim değişikliklerinin, tarımda önemli etkilere sahip faydalı mikroorganizmalar üzerindeki etkileri incelenerek, özellikle bitkisel üretimdeki gübre ve pestisit kullanımının azaltılmasında giderek önem kazanan bu mikroorganizmalar için oluşabilecek tehlikeye dikkat çekilmesi amaçlanmıştır.

Bitki ve Faydalı Mikroorganizma Arasındaki İlişkiler

Bitkiler son zamanlarda ayrı bir mikrobiyotaya ve mikroorganizmalarla yakın simbiyotik ilişkilere sahip bir metaorganizma olarak kabul edilmektedir (Mendes ve ark., 2013). Bitki ekolojisi, bitkinin mikroorganizmalarla olan karmaşık ilişkilerinden etkilenmektedir. Rizosfer mikroorganizmaları, topraktaki farklı nitrojen veya fosfor formlarının varlığını değiştirirken kaynak paylaşımı aracılığıyla bitki-bitki etkileşimlerini etkileyebilmektedir. Toprak mikroorganizmaları, bitki kök salgılarına, uçucu organik karbona ve rizodepozisyona kemotaktik olarak çekilir ve daha sonra bu karbonca zengin ortamda çoğalır. Bitki kök salgıları bitki türleri arasında farklılık gösterir, bu nedenle farklı bitki türlerinin rizosfer mikrobiyomlarında farklılıklar olması beklenir. Bitkiler ayrıca mikrobiyal topluluğu kök salgıları yoluyla şekillendirebilir. Kök salgıları şekerler, amino asitler, organik asitler, nükleotitler, flavonoidler, antimikrobiyal bileşikler ve enzimler olarak kategorize edilmektedir (Lugtenberg ve ark., 2009). Bazı mikroorganizmalar konukçuları için nötr veya patojenik olabilirken, bazılarının da bitki büyümesini desteklediği ve biyotik ve abiyotik streslere karşı bitki toleransını arttırdığı bilinmektedir (Bent, 2006).

Son çalışmalar, bitki kök salgılarının toprak bakteri topluluğunu şekillendirdiğini göstermiştir (Lareen ve ark., 2016). Mikrobiyal bileşimdeki değişiklik, toprak mikroorganizmalarının o bitki türleri ile bir arada bulunmaları üzerindeki uzun vadeli etkilerini tanımlayan bitkinin göreceli performansı hakkında bilgi vermektedir (Bever ve ark., 2003). Genom çapında ilişkilendirme çalışmaları gibi sistematik yöntemler, bitki lokusları ve simbiyotik toplulukların ilişkilerini ayrıntılı olarak anlamamızı sağlamıştır (Herrera Paredes ve ark., 2016). Biyoinformatik ile birleştirilmiş transkriptomik, proteomik ve metabolomik gibi omik teknolojileri, bitki abiyotik stres çalışmalarında kapsamlı bir şekilde uygulanmıştır (Compant ve ark., 2010b; Soda ve ark., 2015).

İklim değişikliği nedeniyle değişen çevre koşullarının bitki fizyolojisinde ve kök salgılarındaki değişikliklere neden olması muhtemeldir. Özellikle yüksek CO₂, birçok durumda, kök bölgesine artan karbon kullanımına ve potansiyel olarak, kök salgılarının bileşiminin değişmesine de yol açacaktır (Haase ve ark., 2007). Yüksek sıcaklık ve kuraklık, benzer değişikliklere neden olabilir ve bunların birlikte bitkiyle ilişkili mikrobiyal toplulukların bileşiminde, miktarında veya aktivitesinde değişiklikler gösterecektir. İklim değişikliği bu nedenle bitkilerle ilişkili bu tür mikrobiyal toplulukların çeşitliliğini ve faaliyetlerini önemli ölçüde etkileyebilir (Drigo ve ark., 2008). Bitki gelişimini teşvik eden bakterilerin yanı sıra mikorizal funguslar ve endofitler, tarımda biyokontrol ajanları, biyogübreler ve/veya fitostimülatörler olarak veya fitoremediasyon uygulamalarında parçalayıcı mikroorganizmalar olarak kullanılmaktadırlar (Denton, 2007; Lugtenberg ve Kamilova, 2009). Küresel değişimin etkileri performanslarını etkileyebileceğinden, değişen koşullar altında en iyi performans gösteren uygun ırkların seçilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak, bitki gelişimi veya sağlığı üzerindeki yararlı etkileri ile bilinen mikroorganizmalar da, arzu edilen özelliklerini ve belirli koşullar altında kolonizasyon kapasitelerini sergileme açısından bozulabilir. Bununla birlikte, bitki ile ilişkili mikrobiyal toplulukların, değişen çevre koşullarından doğrudan veya değişen bitki fizyolojisinden dolayı olarak nasıl etkilendiği ve bunun bitki performansını ve son olarak ekosistem işleyişini nasıl etkilediğine dair ayrıntılı bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

İklim Değişikliklerinin Faydalı Fungus - Bitki Etkileşimleri Üzerindeki Etkileri

Bitkilerin yaklaşık %90'ı mikorizal birliktelikler oluşturur (Brundrett, 2009). Arbüsküler ve ektomikorizal fungusların, rizosfer karbonhidrat bileşikleri karşılığında bitki besin alımını arttırdığı ve köklerde, gövdelerde ve/veya yapraklarda bulunan endofitik fungusların da aynı ya da bazı farklı mekanizmaları kullanarak biyotik ve abiyotik stres koşullarına dayanıklılık sağladıkları bilinmektedir (Courty ve ark., 2010). Bununla birlikte birçok çalışma, atmosferdeki artan CO₂ konsantrasyonları, toprak sıcaklığı veya kuraklık stresi gibi iklim değişikliği etkileri nedeniyle, faydalı funguslar üzerinde doğrudan ya da dolaylı etkileri olduğunu bildirmektedir (Auge, 2001; Compant ve ark., 2010b).

Bitki – fungus ilişkilerinde CO₂ Seviyelerinin Etkileri

Artan ortam CO₂ seviyelerinin, arbüsküler mikorizal funguslar tarafından hif gelişimi ve kök kolonizasyonu üzerinde etkileri olduğu rapor edilmiştir (Rillig ve Allen, 1999). Bununla birlikte, *Pisum* sp. ile bazı arbüsküler mikorizal fungus ırklarının ilişkisinde CO₂ konsantrasyonundan etkilenmediğini gösteren sonuçlar Gavito ve ark. (2000) tarafından elde edilmiştir. Farklı arbüsküler mikorizal funguslar, konukçu bitkiler üzerindeki etkileri bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler ve birkaç çalışma, bazı arbüsküler mikorizal fungusların tercihli olarak bazı konukçu bitkilerle ilişki kurdukları veya belirli koşullar altında meydana geldikleri için belirli bir nişleri olduğunu bildirmiştir (Verbruggen ve

ark., 2010). Buna göre, farklı mikorizal ırklar, bitki genotipleri veya spesifik ortaklıklar, ekosistem ve değişen çevresel koşullara farklı tepki verebilmektedir.

Bitki türleri ve bitki fonksiyonel grupları, yüksek CO₂'ye farklı tepkiler vermektedir. Poorter ve Navas (2003), yüksek CO₂ seviyelerinin C3 bitkilerinin yer üstü biyokütlesini ortalama %45 artırdığını, C4 bitkilerinin ise biyokütle üretiminde yalnızca %12 artış gösterdiğini bildirmiştir. Ayrıca, bu farklılıkların mikorizal kolonizasyon seviyeleri ile de bağlantılı olabileceği düşünülmektedir (Tang ve ark., 2009). Bu örnek, yüksek CO₂ seviyeleri tarafından değişen çevresel koşulların kısmen değişmiş bitki-mikroorganizma etkileşimleri nedeniyle bitki rekabetini ve bitki topluluk yapısını değiştirebileceğini göstermektedir (Compant ve ark., 2010b).

Arbüsküler mikorizal fungusların kolonizasyonunun besin alımını artırarak bitki büyümesini teşvik bilinmektedir (Tylianakis ve ark., 2008). Bu nedenle, CO₂ konsantrasyonlarının yükselmesi, arbüsküler mikorizal fungusların artışı ile bitki gelişiminin desteklenmesine yol açabilir. Bununla birlikte, birçok doğal ekosistemde, bitki gelişimi, karbon varlığı ile değil besin mevcudiyeti ile sınırlıdır (Reich ve ark., 2006). Bu nedenle, artan CO₂ seviyeleri, tarla koşullarında bitki üretkenliğini mutlaka arttırmamaktadır.

Birkaç çalışma, ektomikorizal funguslar ve arbüsküler mikorizal fungusların iklim değişikliğine benzer tepkilerini bildirmiştir. Ortam CO₂ koşullarına kıyasla üç kata kadar artan CO₂ altında, *Pinus sylvestris* (L.) fideleri, *Hebeloma crustuliniforme* fungusu ile daha fazla büyüklüğe ulaşmıştır (Fransson ve ark., 2005). Bu, artan karbon mevcudiyetinin bir sonucu olarak fungusun daha fazla miselyum üretebildiğini göstermektedir. Diğer çalışmalar, yüksek CO₂'nin benzer etkilerini göstermiştir (Garcia ve ark. 2008). Bununla birlikte, mikorizal oluşumun CO₂ yükselmesi nedeniyle sadece geçici olarak arttığı da bildirilmiştir (Lewis ve ark., 1994). Ancak Markkola ve ark. (1996), köklerde ve toprakta fungus biyokütlesinin, *Pinus sylvestris* (L.) ve *Cenococcum geophilum* ve *Suillus* sp. fungal türleri ile ilişkisinde artmadığını gözlemlemişlerdir.

Arbüsküler mikorizal funguslara benzer şekilde yüksek CO₂ koşulları altında, ektomikorizal funguslar tarafından kolonize edilen bitkilerin genotipe özgü tepkileri rapor edilmiştir. Değişen CO₂ konsantrasyonları, ektomikorizal fungus topluluklarının bileşiminde, yapısında ve ayrıca birkaç türün bolluğunda bir değişikliğe neden olmaktadır (Courty ve ark., 2010). Birkaç çalışma, artan CO₂'nin mikoriza oluşumu üzerindeki olumlu etkilerinin daha sonra konukçu bitkiler tarafından artan su ve besin alımına yol açtığını bildirmiştir (Buscot ve ark., 2000). Bu durum su sıkıntısı yaşanan bölgelerde dikkate alınması gereken bir konudur.

Artan CO₂ düzeylerinin endofitik funguslar üzerindeki etkisini araştıran az sayıda çalışma vardır. *Neotyphodium coenophialum* ve konukçusu *Schedonorus phoenix* ilişkisinde, endofit enfeksiyonunun, yüksek CO₂ altında daha fazla olduğu rapor edilmiştir (Brosi ve ark., 2009). Tersine, Marks ve Clay (1990), artan CO₂'in *Lolium perenne* ve *Tridens flavus* ve onların endofitik-fungus ortakyaşarları, sırasıyla *Acremonium lolii* ve *Balansia epichloe* arasındaki etkileşimleri değiştirmediklerini

bildirmiştir. Ayrıca konukçu bitki ve onun endosimbiyozları üzerindeki CO₂'in etkisi, bitkinin karbonhidrat içeriğini de değiştirebildiği *Neotyphodium lolii* ve *L. perenne* ilişkisinde gösterilmiştir (Hunt ve ark., 2005). Bu sonuçlar yüksek CO₂'in bitki-fungus simbiyozu ile etkileşime girebileceğini ve düşük toksin üretimine rağmen endofit enfeksiyon sıklığının artmasına neden olabileceğini düşündürmektedir (Brosi ve ark., 2009; Compant ve ark., 2010b).

Bitki – fungus ilişkilerinde Sıcaklığın Etkileri

Artan sıcaklıkların çoğunlukla arbüsküler mikorizal fungusların kolonizasyonu ve hif uzunluğu üzerinde olumlu etkileri belirlenmiştir (Fitter ve ark., 2000) ve bu durum *Glomus intraradices* ve *Glomus mossae* mikorizal fungusları üzerindeki çalışmalar ile gösterilmiştir (Monz ve ark., 1994). Belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir artış düzeyinde bitki büyümesinin artması veya azalması bitki türüne bağlı olacaktır (Heinemeyer ve Fitter, 2004). Sıcaklık ayrıca arbüsküler mikorizal fungusların hifal yapısını önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Hawkes ve ark., 2008).

Ektomikorizal funguslar, *Cenococcum geophilum*, *Suillus intermedium* ve *Lactarius pubescens*'in solunumlarının artan sıcaklık altında azalabildiği belirlenmiştir (Malcolm ve ark., 2008). Ayrıca, *C. geophilum* morfolojileri 12 ve 40'in *Quercus myrsinaefolia*'da yüksek sıcaklık altında kolonizasyonunun azaldığı gösterilmiştir (Kasai ve ark., 2000).

Toprak ısınmasının bitkiler ve fungus endofitleri arasındaki faydalı ilişkileri etkileyebileceği bilinmektedir (Hunt ve ark., 2005) ve sıcaklık, bitki dokularında endofitin dalgalanmasını etkileyen önemli bir parametre gibi görünmektedir (Ju ve ark., 2006).

Bitki – fungus ilişkilerinde Kuraklığın Etkileri

Kuraklığın bitkiler üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir, ancak kuraklığın bitki mikrobiyomu üzerindeki etkisi hakkında fazla araştırma bulunmamaktadır. Ancak mevcut çalışmalar göstermektedir ki kuraklık bitki ve mikrobiyom biyokütlesinde azalmaya neden olmaktadır (Bastida ve ark., 2017; Naylor ve Coleman-Derr, 2018).

Auge (2001)'e göre, genellikle kuraklık arbüsküler mikorizal fungus kolonizasyonunu azaltmıştır. Yapılan bir çalışmada kuraklık, *Glomus* sp. ZAC-19'un arbüskül oluşumunu ve hif gelişimini arttırırken, buna karşın bir *Glomus fasciculatum* ırkı tarafından kolonizasyonun azalışına neden olmuştur (Davies ve ark., 2002). Ayrıca birçok çalışma, farklı arbüsküler mikorizal fungusların kuraklık koşulları altında bitkilerde kolonize olma yeteneğini kaybettiğini göstermiştir (Staddon ve ark., 2004).

Kuraklık, ekstramikorizal miselyum oluşumunda değişikliklere yol açabilmektedir. Bununla birlikte, bitkiler kuraklığa daha uzun süre maruz kalma sırasında konukçularını kolonize eden mikoriza tipini de değiştirebilmektedir (Querejeta ve ark., 2009).

Arbüsküler mikorizal fungusların bitkilerin kuraklık direncini artırabilme özelliği dünyanın çeşitli bölgelerinde beklenen artan kurak dönem sıklığı ile daha önemli hale

gelebilir. Bu, bitkilerin iklim değişikliği nedeniyle değişen koşullarla baş edebilmeleri açısından önemli bir özelliktir. Bu faydalı etkiler farklı bitki türleri ile gösterilmiştir ve daha yüksek kök/sürgün oranlarından ve çeşitli mahsullerin artan biyokütlesinden ve veriminden sorumlu olduğu bildirilmiştir (Al-Karaki ve ark., 2004).

Kuraklık, ektomikorizal fungus kolonizasyonunu ve topluluk yapılarını da önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca farklı ektomikorizal fungusların, oluşumları ve miktarları açısından kuraklığa farklı tepkiler vermişlerdir (Shi ve ark., 2002). Bazı ektomikorizal fungus ırkları, kuraklık koşulları altında bile bitkiye faydalı etkiler sağladığından, örneğin yeniden ağaçlandırma için kuraklık stresini hafifletmede kullanılabileceklerdir (Morte ve ark., 2000). *C. geophilum* ile simbiyoz, düşük su içeriği koşullarında, birçok fungusa oranla daha başarılıdır (Courty ve ark., 2010). Ektomikorizal fungusların sağlamış oldukları kuraklık stresi toleransının yanısıra toprakta organik madde birikimine de neden olmaktadır (Clemmensen ve ark., 2006). Bu nedenle herhangi bir kuraklık stresi sadece bitki- ektomikorizal fungus ilişkilerini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda ek etkilerden dolayı ekosistem işleyişini de etkileyebilir.

Endofitik fungusların, çevresel streslere karşı direnci artırarak konukçu bitkiye rekabet avantajı sağladığı bildirilmektedir. Ayrıca endofitlerin, kuraklıktan kaçınma, kuraklık toleransı ve kuraklıktan kurtulma mekanizmalarını teşvik ettiği gösterilmiştir (Rodriguez ve ark., 2008). *Piriformospora indica*'nın *Arabidopsis thaliana*'ya kuraklık toleransı sağlamada kullandıkları çeşitli genlerin aktivasyonu ve düzenlemeleri Sherameti ve ark. (2008) tarafından ortaya konmuştur. Bu özellikler, özellikle suyun büyümeyi sınırlayan faktör olduğu yerlerde, bitki kalıcılığı veya yeniden kolonizasyon için faydalı olabilecektir.

Fungal endofitler, şiddetli kuraklık durumunda bitkiler için büyük potansiyele sahip olabilir. Bununla birlikte ve daha önce belirtildiği gibi, belirli endofitlerin otu enfekte etmesi gibi bazı problemler ortaya çıkabilir. Bununla birlikte, sadece mantar endofitleri ve onların konukçu bitkilerle etkileşimleri etkilenemez, aynı zamanda iklim değişikliği koşullarından bitkiyle ilişkili diğer mikroorganizmalar da etkilenebilir.

Bitki fungus ilişkilerinde Toprak Asiditesi (pH) ve Besin Maddeleri

Toprağın pH'ı, karbon, azot ve fosfor gibi besin elementlerinin miktarı, bitki kök salgılarının salınımını, toprakta spesifik kimyasal nişlerin yaratılmasını ve ayrıca faydalı mikroorganizmalar ve bitki patojenlerinin miktarını etkilediği belirlenmiştir (Dumbrell ve ark., 2010).

Toprak pH'ı, rizobakteriyel bileşimin en büyük çevresel belirleyicilerinden biridir ve bakteri türlerinin küçük pH değişiklikleriyle değiştiği, fungus türlerinin ise pH değişiklikleriyle düşük bağlantılı olduğu bulunmuştur (Deng ve ark., 2018). Bunun örnekleri arasında, düşük pH'lı topraklarda baskın olan Acidobacteria alt gruplarını ve daha yüksek pH'lı topraklarda Alfa- ve Gamaproteobakterileri tanımlayan çalışmalar bulunurken, daha düşük pH'lı topraklarda arbüsküler mikoriza mantarlarının daha düşük oranlarda bulunduğunu tespit eden çalışmalar

yer alır (Young ve ark., 2018). Bakteriyel çeşitliliğin de daha asidik pH ile azaldığı belirlenmiştir (Yun ve ark., 2016). Bitkilerde alkali stresini hafifletme konusunda umut vaat eden bazı bitki büyümesini teşvik eden bakteriler bulunmaktadır. Dixit ve ark. (2020) bitki büyümesini teşvik eden üç bakteriyi (*Alcaligenes* sp. NBRI NB2.5, *Bacillus* sp. NBRI YE1.3 ve *Bacillus* sp. NBRI YN4.4) alkali topraklardan izole etti ve mısır biyokütlesini ve çimlenmeyi artırdıklarını bulmuşlardır.

Dumbrell ve ark. (2010) uzun süreli bir gübreleme denemesinde mısırdaki arbusküler mikorizal fungus ve bakterilerin bileşiminin önemli ölçüde etkilendiğini ve pH, fosfat ve toprak karbon içeriğindeki değişikliklerle ilişkili olduğunu ayrıca fenoliklerin kök salgılanması Fe-eksik toprakta teşvik ettiğini buna bağlı olarak da rizosferdeki mikrobiyal topluluğu değiştirdiği belirlemiştir.

İklim Değişikliklerinin Faydalı Bakteri - Bitki Etkileşimleri Üzerindeki Etkileri

Bitkiler farklı bakteriler tarafından kolonize edilir ve birçoğu konukçularına faydalı etkiler sağlarlar. Bakterilerin bitki büyümesini ve sağlığını destekleyebileceği mekanizmalar çok yönlüdür ve hormonlar gibi büyümeyi teşvik eden maddelerin üretimini, biyotik ve abiyotik streslerin hafifletilmesini, patojen antagonizmini ve sistemik tepkilerin teşvik edilmesini içermektedir (Lugtenberg ve Kamilova, 2009). Bitki ile ilişkili bakteriler, kök salgılarına veya bitki metabolitlerine bağlı olduğundan bitkideki fizyolojik değişiklikler de iklim değişikliğine bağlı çevresel parametrelerden büyük ölçüde etkilenmektedirler (Rasche ve ark., 2009) Ayrıca kök, gövde, sürgün, yaprak, çiçek, meyve ve tohumlar gibi bitki iç dokularını kolonize eden bakteriyel endofitik bakteriler benzer şekilde tepki vermektedirler (Compant ve ark., 2010).

Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler, konukçu bitkileriyle simbiyotik olmayan bir ilişki kurabilir. Bu bakteriler, bitki rizosferinde yaşadığı ve bitki köklerini kolonize etmeden; toprak besin elementlerinin çözünürlüğünü ve toprak özelliklerini etkilemek, bitkileri hormon, enzim ve organik asit üretimine teşvik etmek, diğer toprak mikroorganizmaları ile etkileşim kurmak ve patojenleri baskılamak gibi fonksiyonları bulunmaktadır (Glick, 2012). Son on yılda *Rhizobium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Pantoea*, *Paenibacillus*, *Burkholderia*, *Achromobacter*, *Azospirillum*, *Microbacterium*, *Methylobacterium*, *Variovorax* ve *Enterobacter* dahil olmak üzere farklı cinslere ait bakterilerin, konukçu bitkilere, farklı abiyotik stres ortamları altında yararlı oldukları bildirilmiştir (Compant ve ark., 2010b; Grover ve ark., 2011).

CO₂ Seviyelerinin Bakteri - Bitki Etkileşimleri Üzerindeki Etkileri

Drigo ve ark. (2008), yüksek CO₂'nin rizobakteriyel topluluklar üzerindeki etkilerini bildirmiştir. Araştırmacılara göre, yüksek CO₂'in *Pseudomonas* spp. ve *Burkholderia* spp. üzerinde ve ayrıca antibiyotik üretim genleri üzerinde bitki genotipine ve toprağa özgü etkilere sahiptir. Ancak burada güçlü antibiyotik üreticileri olan Actinomycetes ve bazı *Bacillus* spp. etkilenmemiştir.

Rizosferi kolonize eden bakteri topluluklarına ek olarak, endofitik popülasyonlar da etkilenebilir. Artan ortam CO₂'nin baklagillerin *Rizobium*'lar ile etkileşimini tetiklediği bir çok araştırmada ortaya konmuştur (Sessitsch ve ark., 2002). Montealegre ve ark. (2000), ayrıca bazı bitkilerde yüksek atmosferik CO₂'in bazı *Rhizobium leguminosarum* ırklarını diğerlerine göre tercih ettiğini göstermişler ve bu izolatlardan köklerde %17 daha fazla nodül ürettiği bildirmişlerdir. Kök bakterilerinin yanı sıra, *Pseudomonas* spp., Actinobacteria ve Deltaproteobacteria (Jossi ve ark., 2006) gibi diğer bitki ile ilişkili bakteriler hakkında çalışmalar yapılmıştır.

Lolium perenne ve *Medicago coerulea* kök fraksiyonlarından izole edilen patojen fungusların potansiyel inhibitörleri olarak kabul edilen HCN üreten *Pseudomonas* ırklarının oranı, yüksek CO₂ altında azalmış, bununla birlikte, siderofor üreten ve nitratı parçalayan ırkların oranı artmıştır (Tarnawski ve Aragno, 2006). Yüksek CO₂ konsantrasyonları altında bitki büyümesini teşvik eden bakteri ırklarının farklı performansları nedeniyle, tarımda uygulama için farklı ırkların seçilmesi gerekecektir. Kohler ve ark. (2009), bitki büyümesini teşvik eden bir *Pseudomonas mendocina* ırkının, yüksek CO₂ koşulları altında marul bitkilerinin büyümesini artırdığını bildirmiştir. Bu örnekler, artan CO₂ konsantrasyonları altında gelecekle ilgili olabilecek, muhtemelen iklim değişikliğinin dayattığı yeni streslerin hafifletilmesi için bakterilerin potansiyelini göstermektedir.

Sıcaklığın Bakteri - Bitki Etkileşimleri Üzerindeki etkileri

Bazı rizosferik ve endofitik bakterilerin bitkiler üzerindeki sıcaklık stresini hafiflettiği ve bu bakteriyel ırkların farklı iklimlerde, topraklarda ve sıcaklıklarda farklı bitkilerin gelişimini teşvik ettiği ancak sıcaklık ve toprak tipinin faydalı bakterilerinin performansını etkileyebileceğini bildirilmiştir (Bashan ve Holguin, 1998). Egamberdiyeva ve Hoflich (2003), yarı karasal iklimten izole edilen *Mycobacterium* sp. 44, bir *Pseudomonas fluorescens* ve bir *Pantoea agglomerans* ırkının, 26°C'ye kıyasla kışlık buğdayın kök ve sürgün gelişimini 16°C'de önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. Bununla birlikte, *Mycobacterium phlei* MbP18 ve *Mycoplana bullata* MpB46 her iki koşulda da iyi performans göstermişlerdir. Waldon ve ark. (1989), bir baklagil bitkisi olan *Prosopis glandulosa* nodüllerinden izole edilen *Rhizobium*'ların 36°C'de 26°C'ye göre daha iyi geliştiğini göstermiştir.

Endofitik *Burkholderia phytofirmans* PsJN ile yapılan bir çalışma, 10°C'den 30°C'ye bir sıcaklık artışının domates rizosferinde bu ırkın kolonizasyonunu azalttığını, buna karşın endofitik yoğunluğun etkilenmediğini göstermiştir (Pillay ve Nowak, 1997). Başarılı kolonizasyondan sonra, endofitik bakterilerin yanı sıra rizosfer, sistemik bir tepkiyi indükleyerek bitkiler üzerindeki sıcaklık veya kuraklık stresini hafifletebilir (Aroca ve Ruiz-Lozano, 2009).

Termo toleranslı *Pseudomonas putida* AKMP7'nin, ısı stresi altında buğdayın (*Triticum* spp.) bakteri inokule edilmemiş bitkilere kıyasla buğdayın kök ve sürgün uzunluğunu ve kuru biyokütlesini önemli ölçüde artırdığı

ortaya konmuştur (Ali ve ark., 2011). Yine sorgum fideleri, *Pseudomonas* sp. AKM-P6 ile birlikte, artan sıcaklığa karşı gelişmiş tolerans göstermiş ve yapraklarda yüksek moleküler ağırlıklı proteinlerin biyosentezini teşvik ederek prolin, klorofil, şekerler, amino asitler ve proteinler gibi hücre metabolitlerinin seviyelerini arttırmıştır.

Pseudomonas sp. DSMZ 13134, *Bacillus amyloliquefaciens* subsp. *plantarum*, mikro besinler (Zn/Mn) içeren *Bacillus simplex* R41 veya deniz yosunu özlerinin yararlı soğuk stres koruyucusu olduğu kanıtlanmıştır (Bradaacova ve ark., 2016). *Arthrobacter*, *Flavobacterium*, *Flavimonas*, *Pedobacter* ve *Pseudomonas* cinslerinden bitki büyümesini teşvik eden psikrotolerant bakterilerle domates tohumlarının aşılması, yaprak dokularında bitki boyunu, kök uzunluğunu ve zar hasarını önemli ölçüde iyileştirmiştir (Subramanian ve ark., 2016). Soğuğa toleranslı buğday filozferinden izole edilen *Methylobacterium phyllosphaerae* IARI-HHS2-67, düşük sıcaklıkta 60 günde kontrole kıyasla daha iyi hayatta kalma, büyüme ve besin alımı göstermiştir (Verma ve ark., 2015). Asma bitkilerinin soğuğa karşı direnci, *Burkholderia phytofirmans* PsJN ile artmıştır (Barka ve ark., 2006).

Kuraklığın Bakteri - Bitki Etkileşimleri Üzerindeki Etkileri

Bitki mikrobiyomunun birçok yönü, bitkiyi kuraklık stresine karşı koruma yetenekleri açısından incelenmiştir. *Acinetobacter* ve *Pseudomonas* ırklarının, muhtemelen 1-aminosiklopropan-1-karboksilat (ACC) deaminaz sentezi yoluyla, kuraklığın neden olduğu fotosentez inhibisyonunu azaltmış, böylece kuraklığa karşı asmalarda kök ve sürgün biyokütlesindeki azalma durmuştur. Bununla birlikte, bu bakteri ırkları, iyi sulanan bitkilerde büyümeyi arttırmamıştır (Rolli ve ark., 2015). *Bacillus thuringiensis* IAM 12077 inokule edilmiş yarı kurak iklimlerde çok sayıda bitki türü üzerinde yapılan bir başka çalışmada, bitki büyümesi ve besin alımı üzerinde olumlu etkiler tespit edilmiştir (Armada ve ark., 2018). Bitkilerin kuraklığa karşı direncini artıran bakterilerin çoğu, bunu metabolizma ve besin üretimi, etilen üretimini azaltma ve kök su alımını artırma yoluyla yapma eğilimindedir (Rolli ve ark., 2015).

Azospirillum ırkları ile aşılamanın bitki-su ilişkilerini iyileştirebileceğini ve daha yüksek tane verimine yol açabileceği su stresine maruz kalan buğday, mısır ve sorgum fidelerinde yapılan denemelerle ortaya konulmuştur (Creus ve ark., 2004). Ek olarak, buğdayın *Azospirillum brasilense* 245 ile inokulasyonu su stresini azaltmış ve koleoptil büyüme hızı arttırmıştır. Trehaloz biyosentez genlerini kodlayan bir plazmidi bulunan *A. brasilense* mutantları ile yapılan deneylerde bitkilerin ozmotik stresten korunabildiği gösterilmiştir (Rodriguez-Salazar et al., 2009). *Azospirillum*'a ek olarak, diğer bakteri türlerinin trehaloz birikimine alternatif mekanizmalar kullanarak kuraklık stresini hafiflettiği gösterilmiştir. *Burkholderia phytofirmans* PsJN'nin, örneğin bazı Cucurbitaceae gibi patates ve sebze bitkileri üzerinde kuraklık stresi altında faydalı etkiler gösterdiği rapor edilmiştir (Nowak ve ark., 1995). Ayrıca, çeşitli *Paenibacillus polymyxa* endofitik ırkları *Arabidopsis thaliana*'yı su eksikliğine karşı korumuştur (Timmusk ve Wagner, 1999). Actinobacteria'ya ait endofitik bakteriler,

ek olarak bitkinin kuraklığa karşı direncini artırma potansiyelini de göstermiştir (Hasegawa ve ark., 2005). Kuraklık koşullarda yetiştirilen ayçiçeğini kolonize eden bitki gelişimini teşvik eden farklı endofitik bakteri alt popülasyonları tanımlanmıştır (Forchetti ve ark., 2007). *P. fluorescens* Pfl inokulasyonu ile katalaz enziminin üretimi bitkilerde su stresi direnci arttırılmıştır (Saravanakumar ve ark., 2011).

Köklerde ve kök kollarında artan hücresel bölünme, kök ucu ile kök kolları arasındaki mesafenin azalması ve kök kollarının sayısının artması gibi bitkilerde çeşitli tepkileri indükleyebilir. Bu ayrıca bitki kökleri tarafından, özellikle daha derin toprak katmanlarından daha fazla su ve besin alımına yol açmaktadır. Kuraklık koşulları altında, bakteriler ayrıca stresle ilgili hormonların, yani absisik asit ve etilenin seviyelerini düzenleyebilir ve potansiyel olarak daha iyi bitki kuraklık toleransına yol açabilir (Aroca ve Ruiz-Lozano, 2009). Kuraklık sırasında, etilen üretiminin aslında arttığı bilinmektedir. Özellikle endofitik bakteriler gen ekspresyonunu modüle ederek artan ozmotik stres toleransı sağlayabilmektedirler. Ancak, mikroorganizmaların bitki gen düzenlemesini nasıl etkilediği ve iklim değişikliği nedeniyle değişen çevre koşullarının bu etkileşimi nasıl etkilediğine dair ayrıntılı bilgiler bulunmamaktadır.

İklim Değişikliklerinin Patojen - Faj Etkileşimleri Üzerindeki Etkileri

Fajların etkisi, hedef organizmanın duyarlılığının yanı sıra iklimsel faktörlere de bağlıdır. Fajlara en zararlı çevresel faktörün güneş ışığı (280-400 nm spektruma sahip olan UV-A ve UV-B) olduğu bilinmektedir. Bu nedenden dolayı genel olarak bakteriyofajlar, rizosfer veya endosfere kıyasla filozferde çok daha az yaygın olma eğilimindedir. Ayrıca yüksek veya düşük pH ve uygulama sonrası yağmur ile yıkanma da ayrı bir sorundur. Bunlara ilaveten, iklim değişiklikleri etkisi altında faja dayanıklı fungal / bakteriyel izolatların ortaya çıkma ihtimali de bulunmaktadır ve bu durum için faj kokteyllerinin kullanımı önerilmektedir (Jones ve ark., 2007; Vu ve Oh, 2020).

Virüslerin bitki mikrobiyomunda prokaryotlardan çok daha fazla sayıda olduğu tahmin edilmektedir (Parikka ve ark., 2017). Bu nedenle, çalışmaların ortalama olarak mera topraklarındaki bakterilerin %9-12'sinin ve su altındaki pirinç tarlalarındaki bakterilerin %23'ünün bakteriyofajlarla enfekteli olduğu belirlenmiştir (Takahashi ve ark., 2011). Bazı bakteriyofajlar, bitki mikrobiyomunda bulunan patojenleri doğal olarak hedef alır, bu da onları hastalık önleme yoluyla bitki büyümesini teşvik etmede kullanım için ilgi çekici hale getirir. Örneğin kabak bitkisi üzerindeki kabak sarı mozaik virüsü enfeksiyonunun, bakteri patojeni *Erwinia tracheiphila*'nın neden olduğu bakteriyel solgunluk oranlarını azalttığı gösterilmiştir (Shapiro ve ark., 2013).

Bakteriyofajlar, bakterilerle etkileşimleri yoluyla bitki mikrobiyomunu birçok şekilde değiştirebilir. En açık şekilde, litik bakteriyofajlar hedefledikleri bakteri popülasyon büyüklüğünü etkileyecek ve böylece bitki mikrobiyomunun yakından bağlantılı doğası nedeniyle doğrudan hedeflenen bakterilerle bağlantılı diğer organizmalarda zincirleme reaksiyona neden olacaktır. Bu

etki genellikle bakteri ve bakteriyofajlar arasında ortak evrime neden olur ve bakteriyofajlar, hedef bakteriler sonunda buna direnmek için evrimleştiğinde karşı uyum sağlar. Bakteriyofajlar ayrıca, bakteri genlerini yanlışlıkla bir konakçıdan diğerine yaydıkları yatay gen transferi yoluyla bitki mikrobiyomunda bakterileri önemli ölçüde etkiler. Aktarılan genler bakterinin hayatta kalmasına fayda sağladığından, bu süreç bitkinin bakteri kolonizasyonunun başarısını ve dolayısıyla bitki sağlığını da değiştirir (Koskella ve Taylor, 2018).

Daha az bilinmesine rağmen, mikovirüslerde mevcuttur ve oldukça yaygındır ve hücre dışı bir enfeksiyon yöntemine sahip olmadıkları için hücre bölünmesi yoluyla aktarılır (Son ve ark., 2015). Mikovirüslerin bitki patojenik funguslarda hipovirülansı indüklediği bilinmektedir ve bu nedenle tarımda potansiyel kullanım için çalışılmıştır. Böyle bir mikovirüsün bir örneği, *Sclerotinia sclerotiorum*'u enfekte eden tek sarmallı bir DNA geminivirüsü olan DNA virüsü l'dir (Nuss, 2005).

Sonuç

Mevcut araştırmalar, iklim değişikliğinin bitkiye faydalı mikroorganizmaları birçok yönden etkilediği, etkilerinin çalışılan iklim değişikliği faktörüne, bitki türlerine, ekosistem tipine, toprak tipine ve mikrobiyal genotipe bağlı olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmaların çoğu, yüksek CO₂ koşullarının bitki gelişimini teşvik eden fungal kolonizasyonunun artmasına ve topluluk kompozisyonunun değişimine yol açacağını göstermiştir (Klironomos ve ark., 2005). Artan CO₂'nin yanı sıra sıcaklık artışı ve kuraklığın tepkisi de bu nedenle bitkiye ve mikrobiyal genotipe bağlı olacaktır.

Artan CO₂'nin bitki gelişimini teşvik eden bakteriler üzerindeki etkileri daha değişken olarak belirlenmiştir ve şimdiye kadar bakteri yoğunluğunun artması veya azalması açısından genel bir eğilim gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte birkaç çalışma, yüksek CO₂'nin, bitkiye faydalı topluluk üyelerini de etkileyen, bitki ile ilişkili mikroorganizmaların topluluk bileşiminde değişikliklere neden olabileceğini göstermiştir. Sıcaklık artışı ile ilişkili yapılan çalışmalar, bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmaların etkileşiminde olumlu ya da olumsuz sonuçlar vermiş ve mikroorganizma ve bitki genotiplerinin interaksiyonlarının belirli sıcaklıklara adaptasyonuna bağlı olduğu görülmektedir. Kuraklık genellikle bitkiye faydalı mikroorganizmaların kolonizasyonunu azaltma eğilimine sahip olmuştur ancak birçok çalışma, seçilen bakteri veya funguslarla inokulasyonun kuraklık stresini azalttığını ve bitki performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Mikrobiyal toplulukların bileşiminin bitki fizyolojisi ile ilişkili olduğu ve muhtemelen kök eksüdasyonu veya metabolit kalıpları tarafından yönlendirildiği gösterilmiştir. Bu, bitki ile ilişkili mikroorganizmaların kolonizasyonunun, bitki tarafından birincil besin kaynağı olarak hareket eden, kemo-çekici maddeler veya sinyal molekülleri olarak üretilen belirli bileşiklerin mevcudiyetine bağlı olduğunu gösterir. Sonuç olarak, özellikle yüksek CO₂ konsantrasyonlarında, aynı zamanda artan sıcaklık veya kuraklık koşulları altında, potansiyel olarak aynı zamanda farklı fonksiyonel aktiviteler gösteren farklı bitki gelişimini teşvik eden fungus veya bakteri genotipleri bitki ortamında oluşabilir (Drigo ve ark., 2009).

Ancak değişen topluluk yapılarının bir sonucu olarak, faydalı mikroorganizmalar farklı bir mikrobiyal toplulukla rekabet etmek zorunda kalabilir ve bu nedenle değişmiş bir kolonizasyon davranışı gösterebilir. İklim değişikliğinin mikrobiyal kolonizasyon özellikleri üzerindeki potansiyel etkilerine ek olarak, mikrobiyal faaliyetler de etkilenabilir (Haase ve ark., 2008). Farklı aktiviteler gösteren veya farklı sinyaller üreten mikrobiyal topluluklar, uzun vadede, değişmiş toplulukların oluşmasına ve/veya farklı bitki tepkilerinin ortaya çıkmasına neden olabilir.

Artan CO₂'ye bitki genotipine özgü tepkiler ve aynı zamanda artan sıcaklık veya kuraklık nedeniyle, iklim değişikliği uzun vadede bitki ekosistemlerini değiştirecektir. Bitki çeşitliliği seviyelerinin, yeraltı çeşitliliği üzerinde yüksek CO₂'den çok daha belirgin bir etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir bu da kısa vadeli çalışmaların iklim değişikliğinin faydalı bitki-mikroorganizma üzerindeki uzun vadeli etkilerini önemli ölçüde hafife alabileceğini göstermektedir.

Mikorizal funguslar ve azot bağlayıcı bakteriler gibi bitkiye faydalı mikroorganizmaların %80'e kadar azot ve %75'e kadar fosfor sağladığı ve son derece yüksek sayıda bitki türünün büyüme ve hayatta kalma için tamamen mikrobiyal ortakyaşarlara bağımlı olduğu gerçeği göz önüne alındığında (van der Heijden ve ark., 2008), bitkiye faydalı mikrobiyal topluluklardaki değişikliklerin nihayetinde bitki çeşitliliğini ve toprak mikrobiyotasının çeşitliliğini ve işleyişini etkileyebileceği açıktır. Ayrıca, biyokontrol aktiviteleri olan mikroorganizmaların bolluğu veya aktivitesi değişebilir ve bu nedenle bitki patojen popülasyonları etkilenebilir.

İklim değişikliği, bitkilerde ve mikroorganizmalarda adaptasyon süreçlerini tetikleyecektir ve tarımda adapte edilmiş bitki çeşitlerinin seçimini gerektirebilir. Bununla birlikte, adaptasyon süreçleri veya yeni çevre koşullarına tam olarak adapte olmayan çeşitlerin kullanımı, bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmaların bitki büyümesini teşvik potansiyelinden yararlanılarak desteklenebilir. Özellikle yüksek CO₂ koşulları altında, azot gibi besinler sınırlayıcı olabilir ve bu da tarımda gelişmiş gübre girdisi ihtiyacına yol açar. Mikorizalar veya azot bağlayıcı bakteriler gibi besin alımını destekleyen bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmalar böylece artan bir önem kazanabilir.

Mikrobiyotanın metagenom analizleri ile bitkinin biyotik ve abiyotik stresleri için aday mikrobiyal topluluklar olan 'kritik türleri' tanımlanabilecektir. Bitki-mikroorganizma ve mikroorganizma-mikroorganizma etkileşimlerinin anlaşılması, hastalık yoğunluğunu en aza indirmek ve bitki verimliliğini artırmak için modüle edici bir mikrobiyom olarak yararlı bir gelecek perspektifi sağlayacaktır. Gelecekte iyi çalışılmış bir bitki-mikroorganizma ortaklığı, iklim değişikliği baskısı altında, bitkisel verimliliğinin az masrafla artmasına yardımcı olurken yeni çevre dostu bir stratejiye öncülük edecektir.

Kaynaklar

Ali SZ, Sandhya V, Grover M, Linga VR, Bandi V. 2011. Effect of inoculation with a thermo- tolerant plant growth promoting *Pseudomonas putida* strain AKMP7 on growth of wheat (*Triticum* spp.) under heat stress. *Journal of Plant Interactions*, 6(4): 239-246.

- Al-Karaki G, McMichael B, Zak J. 2004. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14: 263–269.
- Armada E, Leite MFA, Medina A, Azcón R, Kuramae EE. 2018. Native bacteria promote plant growth under drought stress condition without impacting the rhizomicrobiome. *FEMS Microbiol. Ecol.* 94 (7). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy092>
- Aroca R, Ruiz-Lozano JM. 2009. Induction of plant tolerance to semi-arid environments by beneficial soil microorganisms – a review. *Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms, Sustainable Agriculture Reviews*, Vol. 2 (Lichtfouse E, ed), pp. 121–135. Springer, the Netherlands.
- Augé RM. 2001. Water relations, drought and vesicular–arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11: 3–42.
- Barka EA, Nowak J, Clément C. 2006. Enhancement of chilling resistance of inoculated grape- vine plantlets with a plant growth-promoting rhizobacterium, *Burkholderia phytofirmans* strain PsJN. *Applied and Environmental Microbiology* 72(11): 7246–7252.
- Bashan Y, Holguin G. 1998. Proposal for the division of plant growth-promoting rhizobacteria into two classifications: biocontrol-PGPB (plant growth-promoting bacteria) and PGPB. *Soil Biol Biochem* 30: 1225–1228.
- Bastida F, Torres IF, Andres-Abellan M, Baldrian P, Lopez-Mondejar R, Vetrovsky T, Richnow HH, Starke R, Ondono S, Garcia C, Lopez-Serrano FR, Jehmlich N. 2017. Differential sensitivity of total and active soil microbial
- Bent E. 2006. Induced systemic resistance mediated by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and fungi (PGPF). *Multigenic and Induced Systemic Resistance in Plants* (Tuzun S & Bent E, eds), pp. 225–258. Springer, Berlin.
- Bever JD. 2003. Soil community feedback and the coexistence of competitors: Conceptual frameworks and empirical tests. *New Phytologist* 157(3): 465–473.
- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 2002. <http://iklim.cob.gov.tr/iklim/AnaSayfa/BMIDCS.aspx?sflan g=tr> (Erişim: 13.10. 2021).
- Bradacova K, Weber NF, Morad-Talab N, Asim M, Imran M, Weinmann M, et al. 2016. Micronutrients (Zn/Mn), seaweed extracts, and plant growth-promoting bacteria as cold- stress protectants in maize. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 3(1):19.
- Brosi GB, Nelson JA, McCulley RL, Classen AT, Norby R. 2009. PS 45–40: Global change factors interact with fungal endophyte symbiosis to determine tall fescue litter chemistry. The 94th ESA Annual Meeting, PS 45–40.
- Brundrett MC. 2009. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant Soil* 320: 37–77.
- Buscot F, Munch JC, Charcosset JY, Gardes M, Nehls U, Hampp R. 2000. Recent advances in exploring physiology and biodiversity of ectomycorrhizas highlight the functioning of these symbioses in ecosystems. *FEMS Microbiol Rev* 24: 601–614.
- Can A, Baygüven B. 2004. Sera Gazları Emisyon Envanteri Çalışma Grubu Taslak Raporu. TÜİK, Çevre İstatistikleri Şubesi, Ankara.
- Clemmensen KE, Michelsen A, Jonasson S, Shaver GR. 2006. Increased ectomycorrhizal fungal abundance after long-term fertilization and warming of two arctic tundra ecosystems. *New Phytol* 171: 391–404.
- Compant S, Clement C, Sessitsch A. 2010a. Colonization of plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: importance, mechanisms involved and future prospects. *Soil Biol Biochem* 42: 669–678.
- Compant S, van der Heijden MGA, Sessitsch A. 2010b. Climate change effects on beneficial plant-microorganism interactions. *FEMS Microbiol. Ecol.* 73: 197–214.
- Courty PE, Buee M, Diedhiou AG, Frey-Klett P, Le Tacon F, Rineau F, Turpault MP, Uroz S, Garbaye J. 2010. The role of ectomycorrhizal communities in forest ecosystem processes: new perspectives and emerging concepts. *Soil Biol Biochem.* 42: 679–698.
- Creus CM, Sueldo RJ, Barassi CA. 2004. Water relations and yield in Azospirillum inoculated wheat exposed to drought in the field. *Can J Botany* 82: 273–281.
- Davies FTJr, Olalde-Portugal V, Aguilera-Go´mez L, Alvarado MJ, Ferrera- Cerrato RC, Boutton TW. 2002. Alleviation of drought stress of chile ancho pepper (*Capsicum annum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. *SciHortic* 92: 347–359.
- Deng S, Ke T, Li L, Cai S, Zhou Y, Liu Y, Guo L, Chen L, Zhang D. 2018. Impacts of environmental factors on the whole microbial communities in the rhizosphere of a metal-tolerant plant: *Elsholtzia haichowensis* Sun. *Environ. Pollut.* 237, 1088–1097. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.037>.
- Denton BD. 2007 Advances in phytoremediation of heavy metals using plant growth promoting bacteria and fungi. *Microbiol Mol Genet* 3: 1–5.
- Dixit VK, Misra S, Mishra SK, Tewari SK, Joshi N, Chauhan PS. 2020. Characterization of plant growth-promoting alkalotolerant *Alcaligenes* and *Bacillus* strains for mitigating the alkaline stress in *Zea mays*. *Antonie van Leeuwenhoek* 113: 889–905. <https://doi.org/10.1007/s10482-020-01399-1>.
- Drigo B, Kowalchuk GA, van Veen JA. 2008. Climate change goes underground: effects of elevated atmospheric CO₂ on microbial community structure and activities in the rhizosphere. *Biol Fert Soils* 44: 667–679.
- Drigo B, van Veen JA, Kowalchuk GA. 2009. Specific rhizosphere bacterial and fungal groups respond to elevated atmospheric CO₂. *ISME J* 3: 1204–1217.
- Dumbrell AJ, Nelson M, Helgason T, Dytham C, Fitter AH. 2010. Relative roles of niche and neutral processes in structuring a soil microbial community. *ISME Journal* 4(3):337–345.
- Egamberdiyeva D, Höflich G. 2003. Influence of growth-promoting bacteria on the growth of wheat in different soils and temperatures. *Soil Biol Biochem* 35: 973–978.
- Fitter AH, Heinemeyer A, Staddon PL. 2000. The impact of elevated CO₂ and global climate change on arbuscular mycorrhizas: a myco-centric approach. *New Phytol.* 147: 179–187.
- Forchetti G, Masciarelli O, Alemanno S, Alvarez D, Abdala G. 2007. Endophytic bacteria in sunflower (*Helianthus annuus* L.): isolation, characterization, and production of jasmonates and abscisic acid in culture medium. *Appl Microbiol Biot* 76: 1145–1152.
- Fransson PMA, Taylor AFS, Finlay RD. 2005. Mycelial production, spread and root colonisation by ectomycorrhizal fungi *Hebeloma crustuliniforme* and *Paxillus involutus* under elevated atmospheric CO₂. *Mycorrhiza* 15: 25–31.
- Garcia MO, Ovasapyan T, Greas M, Treseder KK. 2008. Mycorrh. dynamics under elevated CO₂ and nitrogen fertilization in a warm temperate forest. *Plant Soil* 303: 301–310.
- Gavito ME, Curtis PS, Mikkelsen TN, Jakobsen I. 2000. Atmospheric CO₂ and mycorrhiza effects on biomass allocation and nutrient uptake of nodulated pea (*Pisum sativum* L.) plants. *J. Exp. Bot.* 51: 1931–1938.
- Glick BR. 2012. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica.* 1-15.
- Grover M, Ali SZ, Sandhya V, Rasul A, Venkateswarlu B. 2011. Role of microorganisms in adaptation of agriculture crops to abiotic stresses. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 27(5): 1231–1240.

- Haase S, Neumann G, Kania A, Kuzyakov Y, Romheld V, Kandeler E. 2007. Elevation of atmospheric CO₂ and N-nutritional status modify nodulation, nodule-carbon supply, and root exudation of *Phaseolus vulgaris* L. *Soil Biol Biochem.* 39: 2208–2221.
- Haase S, Philippot L, Neumann G, Marhan S, Kandeler E. 2008. Local response of bacterial densities and enzyme activities to elevated atmospheric CO₂ and different N supply in the rhizosphere of *Phaseolus vulgaris* L. *Soil Biol. Biochem.* 40: 1225–1234.
- Hasegawa S, Meguro A, Toyoda K, Nishimura T, Kunoh H. 2005. Drought tolerance of tissue-cultured seedlings of mountain laurel (*Kalmia latifolia* L.) induced by an endophytic actinomycete. II. Acceleration of callose accumulation and lignification. *Actinomycetologica* 19: 13–17.
- Hawkes CV, Hartley IP, Ineson P, Fitter AH. 2008. Soil temperature affects allocation within arbuscular mycorrhizal networks and carbon transport from plant to fungus. *Glob Change Biol* 14: 1181–1190.
- Heinemeyer A, Fitter AH. 2004. Impact of temperature on the arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis: growth responses of the host plant and its AM fungal partner. *J. Exp. Bot* 55: 525–534.
- Herrera Paredes S, Lebeis SL. 2016. Giving back to the community: microbial mechanisms of plant–soil interactions. *Functional Ecology* 30(7): 1043–1052
- Hunt MG, Rasmussen S, Newton PCD, Parsons AJ, Newman JA. 2005. Near-term impacts of elevated CO₂, nitrogen and fungal endophyte infection on perennial ryegrass: growth, chemical composition and alkaloid production. *Plant Cell Environ.* 28: 1345–1354.
- IPCC/UNEP/OECD/IEA, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume II, Energy, Mobile Combustion, 8-73.
- Jones JB, Jackson LE, Balogh B, Obradovic A, Iriarte FB, Momol MT. 2007. Bacteriophages for plant disease control. *Annual Review of Phytopathology.* 45: 245–262.
- Jossi M, Fromin N, Tarnawski S, Kohler F, Gillet F, Aragno M, Hamelin J. 2006. How elevated pCO₂ modifies total and metabolically active bacterial communities in the rhizosphere of two perennial grasses grown under field conditions. *FEMS Microbiol Ecol.* 55: 339–350.
- Ju HJ, Hill NS, Abbott T, Ingram KT. 2006. Temperature influences on endophyte growth in tall fescue. *Crop Sci* 46: 404–412.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007, Impacts, Adaptation and Vulnerability, 987p.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf(Erişim: 12.10.2021)
- IPCC, 2021. Climate Change 2021, The Physical Science Basis, 3949p.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6 (Erişim: 12.10.2021)
- Kasai K, Usami T, Lee J, Ishikawa S-I, Oikawa T. 2000. Responses of ectomycorrhizal colonization and morphotype assemblage of *Quercus myrsinaefolia* seedlings to elevated air temperature and elevated atmospheric CO₂. *Microbes Environ.* 15: 197–207.
- Klironomos JN, Allen MF, Rillig MC, Piotrowski J, Makvandi-Nejad S, Wolfe BE, Powell JR. 2005. Abrupt rise in atmospheric CO₂ over estimates community response in a model plant–soil system. *Nature* 433: 621–624.
- Kohler J, Caravaca F, del Mar Alguacil M, Roldan A. 2009. Elevated CO₂ increases the effect of an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant-growth-promoting rhizobacterium on structural stability of a semiarid agricultural soil under drought conditions. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1710–1716.
- Koskella B, Taylor TB. 2018. Multifaceted impacts of bacteriophages in the plant microbiome. *Annu. Rev. Phytopathol.* 56 (1), 361–380. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-045858>.
- Lareen A, Burton F, Schäfer P. 2016. Plant root-microbe communication in shaping rootmicro- biomes. *Plant Molecular Biology* 90(6): 575–587.
- Lewis JD, Thomas RB, Strain BR. 1994. Effect of elevated CO₂ on mycorrhizal colonization of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings. *Plant Soil* 165: 81–88.
- Lugtenberg B, Kamilova F. 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annu. Rev. Microbiol.* 63: 541–556.
- Malcolm GM, Lopez-Guiterrez JC, Koide RT, Eissenstat DM. 2008. Respiratory acclimation to temperature by ectomycorrhizal fungi. In: 93rd ESA Annual Meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- Markkola AM, Ohtonen A, Ahonen-Jonnarh U, Ohtonen R. 1996. Scots pine responses to CO₂ enrichment. 1. Ectomycorrhizal fungi and soil fauna. *Environ. Pollut.* 94: 309–316.
- Marks S, Clay K. 1990. Effects of CO₂ enrichment, nutrient addition, and fungal endophyte-infection on the growth of two grasses. *Oecologia* 84: 207–214.
- Mendes R, Garbeva P, Raaijmakers JM. 2013. The rhizosphere microbiome: Significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews* 37(5): 634–663.
- Montealegre CM, Van Kessel C, Blumenthal JM, Hur H-G, Hartwig UA, Sadowsky MJ. 2000. Elevated atmospheric CO₂ alters microbial population structure in a pasture ecosystem. *Glob Change Biol* 6: 475–482.
- Morte A, Lovisolo C, Schubert A. 2000. Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association *Helianthemum almeriense*–*Terfezia clavervyi*. *Mycorrhiza* 10: 115–119.
- Naylor D, Coleman-Derr D. 2018. Drought stress and root-associated bacterial communities. *Front. Plant Sci.* 8: 2223. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02223>.
- Nowak J, Asiedu SK, Lazarovits G. 1995. Enhancement of in vitro growth and transplant stress tolerance of potato and vegetable plants co-cultured with a plant growth promoting rhizobacterium. *Ecophysiology and Photosynthetic In vitro Cultures* (Carre F & Chagvardieff P, eds), pp. 173–180. CEA, Aix-en-Provence.
- Nuss DL. 2005. Hypovirulence: mycoviruses at the fungal-plant interface. *Nat. Rev. Microbiol.* 3 (8): 632–642. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1206>.
- Oldroyd GE. 2013. Speak, friend, and enter: Signalling systems that promote beneficial symbiotic associations in plants. *Nature Reviews Microbiology* 11(4): 252–263.
- Parikka KJ, Le Romancer M, Wauters N, Jacquet S. 2017. Deciphering the virus-to-prokaryote ratio (VPR): insights into virus–host relationships in a variety of ecosystems. *Biol. Rev.* 92 (2): 1081–1100. <https://doi.org/10.1111/brv.12271>.
- Pillay VK, Nowak J. 1997. Inoculum density, temperature, and genotype effects on in vitro growth promotion and epiphytic and endophytic colonization of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings inoculated with a Pseudomonad bacterium. *Can. J. Microbiol.* 43: 354–361.
- Querejeta JI, Egerton-Warburton LM, Allen MF. 2009. Topographic position modulates the mycorrhizal response of oak trees to interannual rainfall variability. *Ecology* 90: 649–662.
- Rasche F, Lueders T, Schaefer S, Buegger F, Gatteringer A, Schloter M, Hood-Nowotny RC, Sessitsch A. 2009. DNA-stable isotope probing enables the identification of active bacterial endophytes in potato. *New Phytol.* 181: 802–807.
- Reich PB, Hobbie SE, Lee T, Ellsworth DS, West JB, Tilman D, Knops JMH, Naeem S, Trost J. 2006. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature* 440: 922–925.

- Rillig MC, Allen MF. 1999. What is the role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant-to-ecosystem responses to elevated atmospheric CO₂? *Mycorrhiza* 9: 1–8.
- Saravanakumar D, Kavino M, Raguchander T, Subbian P, Samiyappan R. 2011. Plant growth promoting bacteria enhance water stress resistance in green gram plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. 33(1): 203-209.
- Sessitsch A, Howieson JG, Perret X, Antoun H, Martinez-Romero E. 2002 Advances in Rhizobium research. *Crit. Rev. Plant Sci.* 21: 323–378.
- Shapiro LR, Salvaudon L, Mauck KE, Pulido H, De Moraes CM., Stephenson AG, Mescher, MC. 2013. Disease interactions in a shared host plant: effects of pre-existing viral infection on cucurbit plant defense responses and resistance to bacterial wilt disease. *PLoS One* 8 (10), e77393. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077393>.
- Sherameti I, Tripathi S, Varma A, Oelmu'ller R. 2008. The root-colonizing endophyte *Piriformospora indica* confers drought tolerance in *Arabidopsis* by stimulating the expression of drought stress-related genes in leaves. *Mol. Plant Microbe In* 21: 799–807.
- Shi L, Guttenger M, Kottke I, Hampp R. 2002. The effect of drought on mycorrhizas of Beech (*Fagus sylvatica* L.): changes in community structure, and the content of carbohydrates and nitrogen storage bodies of the fungi. *Mycorrhiza* 12: 303–311.
- Smith SE, Read DJ. 2009. *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd edn. Academic Press, London.
- Soda N, Wallace S, Karan R. 2015. Omics study for abiotic stress responses in plants. *Advances in Plants and Agriculture Research* 2(1): 00037
- Son M, Yu J, Kim KH. 2015. Five questions about mycoviruses. *PLoS Pathog.* 11 (11), e1005172 <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1005172>.
- Staddon PL, Gregersen R, Jakobsen I. 2004. The response of two *Glomus* mycorrhizal fungi and a fine endophyte to elevated atmospheric CO₂, soil warming and drought. *Glob Change Biol.* 10: 1909–1921.
- Subramanian P, Kim K, Krishnamoorthy R, Mageswari A, Selvakumar G, Sa T. 2016. Cold stress tolerance in psychrotolerant soil bacteria and their conferred chilling resistance in tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) under low temperatures. *PloS One*.11(8):e0161592
- Suzuki N, Rivero RM, Shulaev V, Blumwald E, Mittler R. 2014. Abiotic and biotic stress combinations. *New Phytologist* 203(1): 32-43.
- Takahashi R, Bowatte S, Taki K, Ohashi Y, Asakawa S, Kimura M. 2011. High frequency of phage-infected bacterial cells in a rice field soil in Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 57 (1): 35–39. <https://doi.org/10.1080/00380768.2010.550864>.
- Tang J, Xu L, Chen X, Hu S. 2009. Interaction between C4 barnyard grass and C3 upland rice under elevated CO₂: impact of mycorrhizae. *Acta Oecologia* 35: 227–235.
- Tarnawski S, Aragno M. 2006. The influence of elevated pCO₂ on functions and diversity of rhizosphere and soil bacterial communities. *Managed Ecosystems and CO₂ – Case Studies, Processes and Perspectives*. Series: Ecological Studies, Vol. 187 (Noesberger J, Long SP, Norby RJ, Stitt M, Hendrey GH and Blum H, eds), pp. 393–412. Springer, Berlin.
- Timmusk S, Wagner EGH. 1999. The plant-growth-promoting rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* induces changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression: a possible connection between biotic and abiotic stress responses. *Mol. Plant Microbe In* 12: 951–959.
- Tylianakis JM, Didham RK, Bascompte J, Wardle DA. 2008. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecol. Lett.* 11: 1351–1363.
- van der Heijden MGA, Bardgett RD, van Straalen NM. 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecol. Lett.* 11: 296–310.
- Verbruggen E, Roling WFM, Gamper HA, Kowalchuk GA, Verhoef HA, van der Heijden MGA. 2010. Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: large-scale comparison of mycorrhizal fungal communities in agricultural soils. *New Phytol.* 186: 968–979.
- Vu NT, Oh CS. 2020. Bacteriophage usage for bacterial disease management and diagnosis in plants. *Plant Pathology Journal* 36 (3): 204-217
- Waldon HB, Jenkins MB, Virginia RA, Harding EE. 1989. Characteristics of woodland rhizobial population from surface- and deep-soil environments of the Sonoran Desert. *Appl. Environ. Microb.* 55: 3058–3064.
- Young E, Carey, M, Meharg, AA, Meharg C. 2018. Microbiome and ecotypic adaption of *Holcus lanatus* (L.) to extremes of its soil pH range, investigated through transcriptome sequencing. *Microbiome* 6 (1): 48. <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0434-3>.
- Yun Y, Wang H, Man B, Xiang X, Zhou J, Qiu X, Duan Y, Engel AS. 2016. The relationship between pH and bacterial communities in a single karst ecosystem and its implication for soil acidification. *Front. Microbiol.* 7: 1955. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01955>.