



Bu makaleye şu şekilde atıf yapılır: Karaca K., Maral Gül D., Eltem R. (2026). Trichoderma: Bitki Sağlığını ve Tarımsal Sürdürülebilirliği Destekleyen Çok Yönlü Bir Fungus Genusu, Mantar Dergisi, 17(1) 77-98.

Geliş(Received) :23.12.2025

Kabul(Accepted) :12.03.2026


Derleme


Doi: 10.30708/mantar.1840153


Trichoderma: Bitki Sağlığını ve Tarımsal Sürdürülebilirliği Destekleyen Çok Yönlü Bir Fungus Genusu

Kemal KARACA^{1*}, Derya MARAL GÜL², Rengin ELTEM³

*Sorumlu yazar: kemalkaraca1@gmail.com

¹ Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, 35000, İzmir, Türkiye / kemalkaraca1@gmail.com 

² Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, 35000, İzmir, Türkiye / deryamaralgul@gmail.com 

³ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 35000, İzmir, Türkiye / rengin.eltem@ege.edu.tr 

Öz: Bitkiler üzerinde çok çeşitli yararlı etkileri bulunan bir fungus genusu olan *Trichoderma* bitki büyümesini teşvik etmek ve bitkileri hastalıklardan korumak için yaygın olarak kullanılmaktadır. *Trichoderma*, mikoparazitizm, antibiyoz, besinler için rekabet ve bitki sistemik direncini indüklenmesi gibi biyolojik mücadele yeteneğine katkıda bulunan çeşitli etki mekanizmalarına sahiptir. Mikrobiyal gübre olarak *Trichoderma*'nın, besin minerallerini çözümlenerek, çeşitli hormonları ve metabolitleri sentezleyerek bitki büyümesini desteklediği bilinmektedir. Bu özelliklerinin yanında *Trichoderma*, bitkilerin bu stres koşullarına adaptasyon sağlamasına destek olarak iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı tarımsal dayanıklılığı artırabilmektedir. İklim değişikliği, tarımsal üretim üzerinde önemli baskılar yaratmakta ve özellikle kuraklık, tuzluluk ve sıcaklık artışı gibi abiyotik stresler bitkilerin verimliliğini düşürmektedir. Böylece *Trichoderma*, çevresel faktörlerin değişimine karşı bitkilerin dirençli hale gelmesine yardımcı olarak tarımsal sürdürülebilirliği artırma potansiyeline sahiptir. Tarımsal sürdürülebilirliğin sağlanması yalnızca bitki verimliliğinin artırılmasını değil, aynı zamanda toprak sağlığının korunmasını ve iyileştirilmesini de kapsamaktadır. Ayrıca *Trichoderma* gibi mikroorganizmalar, toprak ve su kirliliğini azaltmak için kullanılabilir. *Trichoderma*, ağır metallerin ve diğer toksik bileşiklerin ayrıştırılmasına katkıda bulunarak kirlenmiş alanları temizlemeye yardımcı olmaktadır. Bu şekilde, hem sürdürülebilir tarımı destekleyici bir bitki büyüme düzenleyici hem de çevresel kirliliği azaltmada biyoremediasyon ajanı olarak işlev görebilmektedir.

Anahtar kelimeler: *Trichoderma*, Biyolojik mücadele, Mikrobiyal gübre, İklim değişikliği, Dekompozisyon, Biyoremediasyon

Trichoderma: A Multifaceted Fungus Genus Promoting Plant Health and Agricultural Sustainability

Abstract: *Trichoderma*, a genus of fungi with a wide range of beneficial effects on plants, is widely used to promote plant growth and protect plants from diseases. *Trichoderma* has various mechanisms of action that contribute to its biological control abilities, including mycoparasitism, antibiosis, competition for nutrients, and the induction of systemic resistance in plants. As a microbial fertilizer, *Trichoderma* is known to support plant growth by dissolving minerals, and



synthesizing various hormones and metabolites. In addition to these properties, *Trichoderma* can enhance agricultural resilience against the adverse effects of climate change by supporting plants' adaptation to these stressful conditions. Climate change results in significant pressures on agricultural production by increasing abiotic stresses, including drought, salinity, and elevated temperatures. Thus, *Trichoderma* has the potential to improve agricultural sustainability by helping plants become more resilient to environmental changes. The achievement of agricultural sustainability requires not only the enhancement of crop productivity but also the protection and improvement of soil health. Furthermore, microorganisms like *Trichoderma* can be used to reduce soil and water pollution. *Trichoderma* contributes to the remediation of heavy metals and other toxic compounds, assisting in the cleanup of contaminated areas. In this way, it functions both as a plant growth regulator that supports sustainable agriculture and as a bioremediation agent in reducing environmental pollution.

Keywords: *Trichoderma*, Biological control, Microbial fertilizer, Climate change, Decomposition, Bioremediation

Giriş

Kullanılabilir tarım arazilerinin oranının azalması, Dünya nüfusundaki hızlı artış ve iklim değişiklikleri nedeniyle oluşan gıda ihtiyacını karşılamak için sürdürülebilir ve kaliteli tarıma ihtiyaç duyulmaktadır. Kimyasal gübreler, gıda hammaddelerinin üretiminde artış sağlamak amaçlı çok sık kullanılan ürünler olsa da toprakta farklı maddelerin birikimine neden olarak toprak yapısının bozulmasına neden olmaktadır. Bitki zararlılarına karşı pestisit kullanımı ihtiyacı, yüksek maliyet gerektirmekle birlikte insan sağlığına büyük zararlar vermektedir. Dünya çapında tarımsal üretimi daha ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilir bir şekilde arttırmak için daha az kimyasal gübre kullanımına ve abiyotik streslere karşı bitki toleransını artırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Dünya çapında sürdürülebilir tarım uygulamalarına ilginin artmasıyla birlikte kalıntısız üretime yönelik biyolojik preparatların üretimi ve kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Bader ve ark., 2020; Vinale ve Sivasithamparam, 2020; Lopes ve ark., 2021; Poveda, 2021).

Rizosfer mikroflorasında bulunan fungus ve bakteri topluluğu, içeriğinde bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmalar (Plant Growth Promoting Microorganisms – PGPM) olarak bilinen faydalı mikroorganizmaları barındırabilmektedir. Bu mikroorganizmalar, fitohormonların üretimini modüle ederek, toprakta bulunan besin maddelerinin mevcudiyetini ve toprak altı bölgenin (kök, yumru ve nodüllerin) patojenlere karşı direncini artırarak bitki köklerini kolonize etme yeteneğine sahiptir. Tarımda PGPM kullanımı, daha sürdürülebilir ve çevre dostu tarım sistemlerinde ürün verimliliğini arttırmak, gıda kalitesini ve güvenliğini geliştirmek için uzun yıllardır kullanılan avantajlı bir tekniktir. Kullanılan bu mikroorganizmalar arasında *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Beauveria*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Frankia*,

Fusarium (patojen olmayan suşlar), *Gliocladium*, *Klebsiella*, *Penicillium*, *Phoma*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Rhodococcus*, *Serratia*, *Streptomyces* ve *Variovorax* vb. cinsler bulunmaktadır. Bakteriler için “bitki büyümesini teşvik edici rizobakteriler (Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)” terimi kullanılırken funguslar için ise “bitki büyümesini teşvik edici funguslar (Plant Growth Promoting Fungi, PGPF)” terimi kullanılmaktadır (Abhilash ve ark., 2016; Naamala ve Smith, 2020; Lopes ve ark., 2021; Malgioglio ve ark., 2022; İşlek ve ark., 2025; Karaca ve ark., 2025a).

Çeşitli uygulamaları bulunan funguslar, biyoteknolojik alanlarda ve farklı endüstrilerde tercih edilen bir mikroorganizma grubudur. Antibiyotikler, antikanser ajanlar, endüstriyel enzimler, bitki zararlılarına karşı koruma ürünleri ve birçok farklı uygulamanın yanı sıra mikrobiyal gübre veya biyoremediatörler olarak funguslar kullanılmaktadır (Poveda, 2021). Genellikle toprak ve kök ekosisteminde serbest yaşayan *Trichoderma* Pers. (yeşilküf) bitki simbiyotu ve diğer fungusların paraziti olarak işlev gören yeşil sporlu kültür. Güncel veriler ile 500'e yakın tanımlanmış türü bulunan *Trichoderma*'nın 365 adetinin DNA barkodlaması yapılmıştır (Ruocco ve ark., 2015; Kashyap ve ark., 2017; Karupiah ve ark., 2019; Bader ve ark., 2020; Sesli ve ark., 2020; Poveda, 2021; Cai ve ark., 2022; Cai ve Druzhinina, 2021; Contreras-Soto ve ark., 2025; Herrera Perez ve ark., 2024). İzole edildikleri toprak ve bitki kökleri dışında kabuklu deniz hayvanları, deniz süngerleri ve termitlerin üzerinde de bulunabilirler (Błaszczyk ve ark., 2014; López-Bucio ve ark., 2015; Sarangi ve ark., 2021). Hızlı büyümeleri, çevresel koşul değişikliklerini tolere yetenekleri, tüm iklim kuşaklarında yaygın olarak bulunmaları ve farklı substratları kullanma potansiyeline sahip olmaları tercih sebepleridir (Błaszczyk ve ark., 2014; López-Bucio ve ark., 2015; Poveda, 2021). *Trichoderma* spp. tarımda biyolojik mücadele etmeni ve farklı endüstrilerde enzim üreticisi olarak kullanılmasıyla

birlikte son yıllarda bitki büyümesini teşvik etmesi ve abiyotik stres faktörlerine karşı toleransı desteklemesi nedeniyle mikrobiyal gübre, gen kaynağı olarak biyoteknolojide veya mikoremediatör olarak kullanımı da yaygınlaşmaktadır. *Trichoderma* spp.'nin kullanım alanlarını temel olarak endüstri, tarım, insan sağlığı ve çevre başlıkları altında toplanmaktadır (Mukherjee ve ark., 2013; Sargin ve ark., 2013; Waghunde ve ark., 2016; Jaroszuk-Ścisel ve ark., 2019; Poveda, 2021). Ayrıca, bazı *Trichoderma* türlerinin şapkalı mantarlar ve insanlar için fırsatçı patojen olduğu bilinmektedir (Błaszczuk ve ark., 2014; Mis ve ark., 2024).

Bulgular

Trichoderma spp.

Ascomycota bölümü, *Sordariomycetes* sınıfı, *Hypocreales* takımı, *Hypocreaceae* familyasına ait olan *Trichoderma* cinsinin sistematiği ve taksonomisi, Persoon'un *Trichoderma* adını tanıttığı 1794'ten beri gelişmiştir (Błaszczuk ve ark., 2014; Waghunde ve ark., 2016; Herrera Perez et al., 2024).

Trichoderma türleri 2 – 6 µm boyutunda hifler ile büyüyüp dallanmaktadır. Laboratuvar koşullarında genellikle konidia ve klamidospore olmak üzere aseksüel sporlar üretmektedir (López-Bucio ve ark., 2015). *Trichoderma* türlerinin ışık ve besin gibi rekabet oluşabilecek ortamlarda bile yüksek miktarda antibiyotik ürettiği ve hızlı büyüme gösterip spor üretimine devam ettiği saptanmıştır (Waghunde ve ark., 2016).

Rizosferde bulunan *Trichoderma* spp. ve sekonder metabolitleri bitki büyümesi teşvik etme, bitki sistemik direnci indüklemeye ve patojen mikroorganizmaların biyolojik kontrolü gibi etkilere sahiptir (Contreras-Cornejo ve ark., 2016).

Bitki Büyümesini Teşvik Edici Fungus (PGPF) Olarak *Trichoderma* spp.

Mikroorganizmaların ve/veya ürünlerinin; tarım alanlarında mahsul verimini arttırmak, ürün kalitesini iyileştirmek ve tarım alanlarında haşere kontrolünü sağlamak amaçlarıyla mikrobiyal gübre veya biyolojik mücadele etmeni olarak kullanımları son 25-30 yılda yaygınlaşmıştır (Suyal ve ark., 2016; Vinale ve Sivasithamparam, 2020).

PGPF'lerin çevresel ekolojiye doğrudan ve dolaylı olarak olumlu etkileri arasında büyümeyi teşvik edici hormonları salgılamak, toprakta bulunan besin maddelerinin bitki tarafından kullanılabilir forma dönüştürülmesini sağlamak, bitki büyümesini uyarmak ve patojenik enfeksiyonlardan koruma sağlamak yer almaktadır. Son zamanlarda yapılan araştırmalarla birlikte özellikleri iyi bilinen, bitki besin alımını ve büyüme hormonlarının üretimini artıran, bitkileri patojen enfeksiyonundan koruyan, bitki büyümesini teşvik eden

Trichoderma spp.'nin mükemmel bir PGPF olabileceği düşünülmektedir. Çoğu bulgu, *Trichoderma* türlerinin bitki için toprakta uygun şartları sağladığını ve büyük miktarda sekonder metabolit üreterek genel bitki sağlığını iyileştirdiğini göstermektedir. *Trichoderma* türlerinin metabolitlerinin veya kendilerinin direkt kullanılabilirliği fikrinin, tarım endüstrisinde sentetik/kimyasal gübre uygulaması yerine yeni biyogübrelerin uygulanmasını destekleyebileceği çalışmalar ile gösterilmektedir. Ancak birçok bitki büyümesini teşvik eden fungus kök sistemlerini yerinde kolonize edememeleri nedeniyle *in vitro* olarak etkililikten tarla çalışmalarında bitkilere önemli ölçüde fayda sağlayamamaktadır. Fakat kök gelişimini teşvik etme *Trichoderma* türleri için ortak özelliğidir (Ruocco ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2018; Zin ve Badaluddin, 2020; Syamsia ve ark., 2021).

Ayrıca, kombinasyon halinde formüle edilen suşlar veya konsorsiyumların yanı sıra bunların sekonder metabolitleri, etkili formülasyonlar için çok önemli biyoaktif bileşenleri temsil edebilir. Ayrıca, bu mikroorganizmalar hem biyotik hem de abiyotik streslere karşı mikrobiyal gübreler ve/veya hastalık direncinin biyo-arttırıcıları olarak kullanılarak mahsuller üzerinde olumlu etkiler gösterebilirler (Vinale ve Sivasithamparam, 2020).

Biyolojik Mücadele Etmeni Olarak *Trichoderma* spp.

Biyolojik mücadele kavramı; bir ya da daha fazla organizma tarafından, patojenin ortamdaki inokülüm yoğunluğunun veya hastalık yapıcı eylemlerinin azaltılması olarak tanımlanmaktadır (Adnan ve ark., 2019). Kısaca, zararlı popülasyonunu bastırmak için canlı organizmaların kullanılması olarak da tanımlanmaktadır (Zin ve Badaluddin, 2020). *Trichoderma* türlerinin geniş bir kök, sürgün ve hasat sonrası patojen spektrumuna karşı en yaygın kullanılan biyolojik mücadele etmeni olduğu bilinmektedir (Gajera ve ark., 2013; Adnan ve ark., 2019; Zin ve Badaluddin, 2020; Karaca ve ark., 2025b).

Trichoderma türlerini, rizosferdeki dayanıklılıkları, besin ve yer için patojenle rekabet edebilmeleri, patojen üzerinde parazitik etki gösterebilmeleri, çeşitli enzimleri ve antibiyotikleri üretebilmeleri, bitki büyümesini desteklemeleri, farklı substratları kullanabilmeleri, phorate, klorpirifos, karbendazim ve topsin gibi tarım kimyasalları ile uyumlu olmaları, zorlu iklimsel koşullara karşı tolerans göstermeleri, geniş pH değeri aralığında canlı kalabilmeleri, tarla koşullarında uzun dönem varlık gösterebilmeleri ve ekolojik olarak güvenli olmaları gibi çeşitli özellikleri farklı tarımsal ekosistemlerde başarılı biyolojik mücadele etmeni yapmaktadır (Kidwai ve Nehra, 2017; Prajapati ve ark., 2020; Savas ve ark., 2021; Maral Gül ve Eltem, 2022). Kimyasal pestisit kullanımına kıyasla kullanımları daha güvenli ve aynı zamanda kimyasal pestisitlerle etkileri benzerdir. Ayrıca biyokontrol

ajanlarının bitki büyümesi, sağlığı ve verimliliği için faydalı olan diğer organizmalar üzerinde zararlı etkileri yoktur. Etkili bir biyokontrol ajanı, genetik olarak kararlı olmalı, ucuz üretim ortamları kullanılarak verimli bir şekilde seri üretilmeli ve çeşitli patojenlere karşı düşük konsantrasyonlarda etkili olabilmelidir. İdeal bir biyokontrol ajanı insanlar için toksik olmamalı, pestisitlere karşı dayanıklı olmalı, çevreye karşı zararlı olmamalı ve konukçu bitki için patojenik olmamalıdır (Abdul-Halim ve ark., 2023). Bu özellikleri ile en çok çalışılan ve fungal biyokontrol ajanı olarak kullanılan cins *Trichoderma*'dir. *Trichoderma* türleri genellikle toprak ve tohum kökenli patojenler ile yaprak patojenlerine karşı biyofungisit olarak bilinmekle birlikte, bionematosit, biyoherbisit ve

biyoinspektisit olarak da geliştirilip ticarileştirilme potansiyeline sahiptirler (Kidwai ve Nehra, 2017).

Trichoderma türlerinin bazı bitki hastalık etmenlerine karşı antagonistik etki göstermelerine sebep olan olası etki mekanizmaları Tablo 1'de verilmiştir. Mekanizmalarının bu çok yönlülüğü ve farklı ortamlara uyum sağlama yeteneği sayesinde, *Trichoderma* türleri, sera, tarla ve hasat sonrası gibi farklı koşullarda mahsullere zarar veren funguslar, nematodlar ve böceklerin neden olduğu bitki hastalıklarını kontrol etmek için kullanılmaktadır (Ferreira ve Musumeci, 2021; Kubheka ve Ziena, 2022; Lahlali ve ark., 2022; Gams ve Bissett, 2002).

Tablo 1. *Trichoderma* türlerinin antagonistik etki göstermelerine sebep olan olası etki mekanizmaları (Sesli ve ark., 2020; Ferreira ve Musumeci, 2021; Ksiazek ve Szpyrka, 2022; Kubheka ve Ziena, 2022; Woo ve ark., 2023).

Trichoderma türleri	Hastalık etkeni	Etki mekanizması
<i>T. pseudokoningii</i> Rifai (Yalan yeşilküf)	<i>Fusarium oxysporum</i> Schldl. (Sebze küfü)	Antibiyozis, apoptotik hücre ölümü
<i>T. harzianum</i> Rifai (Üç yeşilküf)	<i>Botrytis cinerea</i> Pers. (Kürşuniküf)	Kitinazlar, glukanaazlar, proteazlar, selülozlar, kitobiosidaz, yer için rekabet, 6-pentyl- α -pyrone, reaktif oksijen türleri, parazitizm, antibiyozis, indüklenmiş sistemik direnç, patojen enzimlerinin kısıtlanması
	<i>F. oxysporum</i>	
	<i>Sclerotium rolfsii</i> Sacc.	
	<i>Rhizoctonia solani</i> J.G. Kühn (Hırçın dalindiren)	
	<i>Fusarium fujikuroi</i> Nirenberg	
	<i>Globisporangium ultimum</i> Trow (Halep kesesi)	
	<i>F. graminearum</i>	
	<i>Pseudoperonospora cubensis</i> (Berk. & M.A. Curtis) Rostovzev (Yalancımildiyö)	
<i>T. virens</i> (J.H. Mill., Giddens & A.A. Foster) Arx (Yeşilküf)	<i>R. solani</i>	Kolonizasyon, antibiyozis, gliotoksin, kitinazlar, selülozlar, gliovirin
	<i>B. cinerea</i>	
	<i>G. ultimum</i>	
<i>T. brevicompactum</i> G.F. Kraus, C.P. Kubicek & W. Gams	<i>R. solani</i>	Mikoparazitizm
<i>T. asperellum</i> Samuels, Lieckf. & Nirenberg (Kaba yeşilküf)	<i>Pseudomonas syringae</i>	İndüklenmiş sistemik direnç, rekabet, bitkiye yararlı bakterileri destekleme, parazitizm antibiyozis
	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i> Penz. (Ağuantraknozu)	
	<i>F. oxysporum</i>	
	<i>P. myriotylum</i>	
	<i>F. fujikuroi</i>	
	<i>Stromatinia cepivorum</i> (Berk.)	
<i>T. atroviride</i> P. Karst (Koyu yeşilküf)	<i>Verticillium dahliae</i> Kleb. (Avcı şamdanküfü)	Proteazlar, sekonder metabolitler
	<i>Phytophthora</i> spp. (Mildiyö)	
<i>T. koningii</i> Oudem (Tez yeşilküf)	<i>Colletotrichum</i> spp. (Bozantraknoz)	Trichokoninler
	<i>Clavibacter michiganensis</i>	
<i>T. longibrachiatum</i> Rifai (Uzun yeşilküf)	<i>G. ultimum</i>	Selülozlar
<i>T. hamatum</i> Bonord. (Çengel yeşilküf)	<i>Xanthomonas campestris</i>	Uçucu organik bileşenlerden oluşan sekonder metabolit karışımı
<i>Trichoderma</i> sp. <i>Trichoderma</i> s	<i>Pythium aphanidermatum</i> Edson	Enzimatik, antibiyozis, rekabet
	<i>F. fujikuroi</i>	

Mikoparazitizm

Trichoderma türlerinin fitopatogenik funguslara karşı antagonistik etki göstermesini sağlayan ana mekanizmalardan biri mikoparazitizmdir (Mukhopadhyay ve Kumar, 2020; Bhandari ve ark., 2021). Mikoparazitizm süreci bir fungus türünün diğerine doğrudan saldırması olarak tanımlanmaktadır (Chalie-u ve Jakhar, 2018; Singh ve ark., 2018; Sood ve ark., 2020; Bhandari ve ark., 2021). Mikoparazitizme sebep olan mekanizma oldukça karışıktır ve sırasıyla şu şekilde gerçekleşmektedir: *Trichoderma*'nın kemotropik büyümesi, konağın tanınması, sarmal ve appressorium oluşumu, hidrolitik enzimlerin salgılanması, hiflere penetrasyon ve konağın ölümü (Singh ve ark., 2018; Sood ve ark., 2020; Bhandari ve ark., 2021). Bu karmaşık süreç *Trichoderma* hücre duvarındaki karbonhidratların hedef fungus üzerindeki lektinlere bağlanmasıyla tanıma döngüsünün gerçekleşmesini, hifsel sarılmayı ve ardından gliserol gibi daha yüksek miktarda ozmotik çözünen içeren appressorium oluşumu sağlar. Appressorium oluşumuyla penetrasyon indüklenir, glukanazlar, kitinazlar ve proteazlar gibi çeşitli hücre duvarını parçalayıcı fungitoksik enzimler üreterek hücrelere saldırır. Bu enzimlerin kümülatif etkisi sonucu hedef fungusun hücre duvarlarının çözünmesine neden olur. Hedef fungusta appressorium oluşum yerinde *Trichoderma* hiflerinin konakçı lümenine doğrudan girmesine yol açan delikler oluşmakta ve bu durum konağın ölmesine yol açmaktadır (Singh ve ark., 2018; Gezgin ve ark., 2020; Sood ve ark., 2020; Zin ve Badaluddin, 2020; Abdul-Halim ve ark., 2023; Guzmán-Guzmán ve ark., 2023).

Hücre duvarı parçalayıcı enzimlerin üretimi, mikoparazitizmin son aşamasının ayrılmaz bir parçasıdır. Fungusların hücre duvarının %5-15'i kitin (bir N-asetilglukozamin polimeri), %50-60 kadarı β -(1,3)-, β -(1,4)- ve β -(1,6)-glukanlar (β -glikosidik bağlar yoluyla bağlanan D-glikoz birimlerinden), α -glukanlardan, kitosan, mannan ve galaktomannan gibi polisakaritler ile proteinlerden oluşmaktadır. *Trichoderma* suşları, esas olarak, patojen hücre duvarının ana bileşenlerini hidrolize edebilen kitinazlar, β -(1,3)- ve β -(1,6)-glukanazlar ve proteazlar dahil olmak üzere bir dizi hücre dışı enzim salgılama yeteneğine sahiptirler (Tablo 2) (Sood ve ark., 2020; Tyskiewicz et al., 2022; Karaca and Eltem, 2023; Gow ve ark., 2017; Free, 2013). Kitinazlar, kitin zincirindeki iki komşu N-asetilglukozaminlerin C1 ve C4 karbonları arasındaki β -glikozidik bağları hidrolize eden

Trichoderma türleri tarafından sentezlenen en önemli litik enzim grubudur. Glukanaz enzimleri ise patojenik fungusların hücre duvarlarını ekzo- β -glukanazlar ve endo- β -glukanazlar yoluyla parçalamaktadır. Mikoparazitizm sürecinde kitinazlar ve glukanazlara ek olarak, proteinlerdeki peptit bağlarının hidrolizini katalize eden proteolitik enzimler de belirleyici rol oynamaktadır (Tyskiewicz ve ark., 2022). Liyofilize halde patojenik *Fusarium culmorum* (Wm.G. Sm.) Sacc. (Başakküf) suşunun hücre duvarını tek karbon kaynağı olarak içeren sıvı kültürlerde, *Trichoderma* TkZ3A0 izolatu tarafından artan kitinolitik ve glukanolitik aktivite gösterilmiştir. Benzer şekilde, *Trichoderma* ThJt1 izolatu, kitin ve *S. rolfsii* hücre duvarının varlığında maksimum enzimatik aktivite göstermiştir. Bu durum, bir fitopatogenin varlığında hidrolitik enzimlerin artan miktarda üretimini göstermektedir. *T. harzianum* tarafından sentezlenen Prb1 proteazın biyolojik kontrolde çok önemli bir rol oynadığı gösterilmiştir. Prb1 transformantlarının, *R. solani*'ye karşı beş kata kadar daha etkili olduğu gösterilmiştir. *Trichoderma* türleri tarafından üretilen proteazların, mikoparazitizmde yer alan diğer hidrolitik enzimlerin ekspresyonunu veya etkisini düzenlediği düşünülmektedir. Örneğin, β -1,6-glukanaz geni *bgn16.2* ve *papA*'yı (bir hücre dışı aspartil proteazı kodlayan bir gen) aynı anda aşırı eksprese eden *T. harzianum* transformantları, *bgn16.2* tek transformantlarına kıyasla β -1,6-glukanaz aktivitesinde %30'luk bir artış göstermiştir (Tyskiewicz ve ark., 2022).

Antibiyozis

Antibiyozis bir mikroorganizma tarafından üretilen, patojenlerin büyümesi için zararlı olan düşük moleküler ağırlıklı, difüze olabilen sekonder metabolitleri ya da antibiyotikleri içeren antagonistik etkileşim şeklidir (Gajera ve ark., 2013; Chalie-u ve Jakhar, 2018; Singh ve ark., 2018; Sood ve ark., 2020; Bhandari ve ark., 2021). Antibiyozis temelde, parazitik bir mikroorganizma üzerinde önleyici veya ölümcül etkilere yol açan sekonder metabolitlerin salınımını içeren bir biyolojik süreçtir (Sood ve ark., 2020). Farklı kimyasal ürün sınıflarını içeren 300'den fazla sekonder metabolit, *Trichoderma* türlerinden izole edilmiştir (Chalie-u ve Jakhar, 2018; Sood ve ark., 2020; Guo ve ark., 2022). Biyosentetik kökenlerine bağlı olarak bu bileşikler peptaibol, poliketid ve terpen olarak gruplandırılmaktadır (Sood ve ark., 2020).

Tablo 2. *Trichoderma* türleri tarafından sentezlenen enzimler ve gerçekleştirdikleri işlevler (Sesli ve ark., 2020; Sood ve ark., 2020)

Üretici Başlıca <i>Trichoderma</i> türleri	Enzim Grubu	Hedef Substrat	Gerçekleştirdiği İşlev
<i>T. harzianum</i> , <i>T. koningii</i> , <i>T. longibrachiatum</i> , <i>T. viride</i> Pers. (Hepyeşilküf)	Selüloolitik enzimler	Selüloz	Selüloz molekülündeki β -1,4-D-glikosidik bağları hidrolize eder.
<i>T. viride</i> , <i>T. harzianum</i> , <i>T. reesei</i> E.G. Simmons, <i>T. koningii</i>	Ekzo- β -1,4-glukanazlar	Selüloz zincir uçları	İndirgeyici veya indirgeyici olmayan terminallerden bir selobiyoz molekülü oluşturarak selülozun hidrolizini sağlamaktadır.
<i>T. viride</i> , <i>T. longibrachiatum</i> , <i>T. pseudokoningii</i> , <i>T. reesei</i>	Endo- β -1,4-glukanazlar	Selülazun amorf bölgeleri	Selülozun enzimatik lizisi sırasında, amorf bölgelerdeki β -1,4-glikosidik bağların rastgele hidrolizi ile farklı zincir uzunluklarında selülozodekstrinler meydana gelmektedir.
<i>T. viride</i> , <i>T. harzianum</i> , <i>T. reesei</i> , <i>T. longibrachiatum</i>	β -Glukosidazlar	Selobioz, kısa oligosakkaritler	Kısa zincirli oligosakkaritlerin ve selobiozun glikoza hidrolizini katalize etmektedir.
<i>T. harzianum</i> , <i>T. koningii</i> , <i>T. longibrachiatum</i> , <i>T. pseudokoningii</i> , <i>T. reesei</i> , <i>T. viride</i> , <i>T. virens</i> , <i>T. asperellum</i> , <i>T. atroviride</i>	Ksilanazlar	Ksilan (hemiselüloz)	Ksilooligomerler, ksilobiyoz ve ksiloz oluşturmak için ksilanların parçalanmasını katalizlemektedir
	Kitinazlar	Kitin	Kitinin düşük moleküler ağırlıklı kito oligomerlerine parçalanmasını katalize etmektedir
	Endokitinazlar	Kitin polimerinin iç bölgeleri	Kitini iç bölgelerde rastgele hidrolize etmekte ve diasetilkitobioz dimerini ve ketotrioz ve kitotetraoz gibi GlcNAc'nin düşük moleküler ağırlıklı multimerlerini oluşturmaktadır.
	Ekzokitinazlar	Kitin zincir uçları	2 alt kategoriye ayrılmıştır: 1. Kitobiyosidazlar kitin mikrofibrilinin indirgeyici olmayan ucundan başlayarak diasetilkitobiozun ardışık salınımını katalize etmektedirler. 2. 1-4- β -glukozaminidazlar, endokitinazların ve kitobiyosidazların oligomerik ürünlerini parçalayarak GlcNAc monomerlerini üretmektedirler.
<i>T. viride</i> , <i>T. harzianum</i> , <i>T. aureoviride</i> Rifai, <i>T. atroviride</i>	Proteazlar	Proteinler, peptitler	Patojen hücre duvarı proteinlerinin parçalanmasını katalizlemektedir.
	Ekzopeptidazlar	Peptit uçları	Amino veya karboksi terminalinde peptit bağının parçalanmasına neden olmaktadır.
	Endopeptidazlar	Protein iç bağları	Peptid bağlarını uçlardan uzak şekilde ayırmaktadır.
<i>T. reesei</i> , <i>T. koningii</i> , <i>T. harzianum</i> , <i>T. virens</i> , <i>T. viride</i>	Lipazlar	Lipitler	Lipaz, triaçilgliserollerin ester bağlarını hidrolize ederek mono ve diaçilgliserollerin, serbest yağ asitlerinin ve bazı durumlarda gliserolün oluşmasına neden olmaktadır.
<i>T. virens</i> , <i>T. asperelloides</i> Samuels	Glukoz oksidaz	Glikoz	Reaktif oksijen türlerinin oluşmasına neden olmaktadır.
<i>Trichoderma</i> spp.	Antioksidatif enzimler (Süperoksit dismutaz, katalaz, peroksidaz)	Reaktif oksijen türleri	Bitkilerde antioksidatif savunma mekanizmasını desteklemektedirler.

Antibiyotik üretimi en önemli antagonistik yeteneklerden biridir. *Trichoderma* türleri tarafından temelde üç çeşit sekonder metabolit üretilmektedir; a) uçucu antibiyotikler (6-pentil- α -piron), b) suda çözünen bileşenler (heptelidik asit veya koningik asit) ve c) peptaiboller (15-22 amino asit uzunluğunda ve amino izobütirik asit bakımından zengin, N-tarafında Nasetillenmiş ve C-tarafında bir amino-alkolden oluşan lineer oligopeptidler) (Adnan ve ark., 2019). Çoğu

Trichoderma spp, antagonize ettiği mikroorganizmaların kolonizasyonunu engelleyen uçucu ve uçucu olmayan toksik metabolitler üretmektedir. Bu metabolitler harzianik asit, alametisinler, trikolin, peptaiboller, antibiyotikler, 6-pentil- α -piron, massoilakton, gliotoksin, viridin, viridol, koningininler, pironlar, gliovirin, glisopreninler, heptelidik asit şeklinde sıralanmaktadır. Tablo 3'te *Trichoderma* türleri tarafından üretilen çeşitli sekonder metabolitler yer almaktadır (Gajera ve ark., 2013; Singh ve ark., 2018).

Tablo 3. Farklı *Trichoderma* türleri tarafından üretilen sekonder metabolitler (Kidwai ve Nehra, 2017; Ali ve ark., 2021; Manzar ve ark., 2022; Hernández ve ark., 2024; Bansal ve ark., 2023; Yadav ve Khare, 2025; Zhang ve ark., 2025).

<i>Trichoderma</i> türü	Sekonder Metabolit	<i>Trichoderma</i> türü	Sekonder Metabolit	
<i>T. harzianum</i>	Trichoharzianin A1	<i>T. virens</i>	Gliotoxin	
	Trichoharzianin B1		Gliovirin	
	Trichorzin HA, MA		Gliocladic asit	
	Trichorzin PA		Trichorenin B	
	Trichokinin		2-butanone	
	Trichothene		Limonene	
	Trichokindin I, II, III, IV, V, VI, VII		Trichorzins TVB I, II, IV	
	Trichotoxins A-50		3,4-dihydroxycarotene	
	Azaphilone		Trichodermin	
	Butenolide		Viridin	
	Trichosetin		Cedrene	
	Harzianolide		Sesquiterpene	
	Harzianopyridone		<i>T. longibrachiatum</i>	Longibrachins
	Isonitrin A			Sohirnone A
	Trichodiene	3-methylbutyl propanoate		
	Hypomurocins B	2,4-heptadienal		
	Trichosimmonsins	β -farnesene		
	9- α -trihydroxyergosta-7	2-norpinene		
	Trichodermin	Ergokonin A		
	6-Pentyl- α -pyrone	5-Hydroxyvertinolide		
	Koninginin E, B, A	Bisvertinolone		
	Hydroxykoninginin B	Sorbicillin		
	Seco-koninginin	10,11-dihydrocycloclonerotriol		
	Harzianum A	Sohirnone A		
	Cycloneodiol oxide	Trichokonin A		
	Epicycloneodiol oxide	Catenioblin C		
	Pachybasin	<i>T. stromaticum</i> Samuels & Pardo-Schulth.	Trichostromaticins	
	Harzianic acid		3-methyl-1-butanol	
Caffeic acid	<i>T. asperellum</i>		Trichotoxin	
Trichophenol A			Ethyl-2-methylbutyrate	
Isorhamnetin		Octadecane		
<i>T. viride</i>		6-Pentyl- α -pyrone	Bisabolan- 1,10,11-triol	
	Trichodecenin	12-nor-11-acetoxybisabolon-3,6,7-triol		
	Dermadin	Dechlorotrichodenone-C		
	Viridofungin A	3-hydroxytrichodenone-C		
	Trichotoxin A	<i>T. arundinaceum</i> Zafari, Gräfenhan & Samuels	Harzianum A	
	Trichorovin		Harzianic acid	
	Trichocellins	<i>T. reesei</i>	Cyclonerodiol	
	Trichodimerol		Trichodermin	
	6-Pentyl- α -pyrone	<i>T. pseudokoningii</i>	2-methyl-1-propanol	
	Ergokonin A, B		Acetone	
	Viridin		β -caryophyllene	
	Viridepyronone	<i>T. citrinoviride</i> Bissett (Sarı yeşilküf)	Lignoren	
	Emodin		Trichocitrin	
	Heptelidic acid		Nafuredin	
Alamethicin	Trichodermin			
<i>T. koningii</i>	Trichokonin	<i>T. polysporum</i> (Link) Rifai	Trichodermin	
	6-Pentyl- α -pyrone		<i>T. sporulosum</i> (Link) S. Hughes	Trichodermin
	<i>Trichoderma</i> ketone A	Isochinulin A		
	Trichodermin	Echinuline		
	Koninginin E, C, B, A	Fructigenine A		
	Ergokonin A, B	Cyclophenol		
	Viridin	Wickerol A		
	Dermadin	Epicycloneodiol oxide		
	Cyclonerodiol	Cycloneodiol oxide		
<i>T. atroviride</i>	Neatroviridin A-D	<i>Trichoderma</i> spp.		Ascochlorin
	Atroviridin A-C		β -acoradiene	
	Hypomurocin B		β -cubebene	
	6-Pentyl- α -pyrone		β -cedrene	
	Catenioblin C		β -bisabolene	
Lignoren	Lignoren			
			Viridin	

Rekabet

Besinler ve yer, mikrobiyal büyüme için iki ana sınırlayıcı faktördür. Bu nedenle diğer mikroorganizmaların büyümesini önlemek için rekabet stratejileri besin gereksinimlerine dayanmaktadır (Zaki ve ark., 2020). Rekabet, en yaygın biyolojik kontrol mekanizmalarından biridir. *Trichoderma* türleri çok hızlı büyümeleriyle bilinirler ve agresif yarışmacılar olarak kabul edilirler (Chalie-u ve Jakhar, 2018; Pylak ve ark., 2019; Guzmán-Guzmán ve ark., 2025).

Rekabet iki türe ayrılmaktadır (1) biyolojik kontrol ajanlarının diğer patojenik funguslarla besin elementleri (karbonhidratlar, azot, oksijen ve demir gibi mikro besinler) için rekabet ettiği topraktaki besin rekabeti; (2) fungusların, diğer mikroorganizmaların büyümesini önlemek için (örneğin rizosferi asitleştirerek) diğer mikroorganizmalara karşı kendi alanlarını koruduğu yer rekabeti (Zaki ve ark., 2020). Yer ve besinler için rekabet her zaman mikroorganizmanın etkileşime girdiği yerde gerçekleşir ve birçok mikroorganizmanın ölüm nedenlerinden biridir (Chalie-u ve Jakhar, 2018; Singh ve ark., 2018; Bhandari ve ark., 2021).

Antagonistik funguslar, bitki dokuları, rizosferler veya filosferler gibi ortak yaşam alanlarını kolonize ederek patojenleri yerden ve besinlerden mahrum bırakmaktadır. Bu durum, konukçu bitkiyi kolonize etme derecelerine ve yaşadıkları çevresel koşullara adaptasyonlarına bağlıdır. *Trichoderma* türleri etkili bitki kolonizasyon stratejilerine sahip olmaları ve diğer funguslarla rekabetin meydana geldiği nişte bol bulunmaları sebebiyle yer ve besinler için patojenlerle başarılı şekilde rekabet edebilmektedirler. Çeşitli substratları hızla kolonize etmekte ve yavaş büyüyen patojenleri ortadan kaldırmaktadırlar (Tyskiewicz ve ark., 2022; Villavicencio-Vásquez ve ark., 2025). *Trichoderma* türleri, diğer mikroorganizmalara kıyasla topraktan besin maddelerini mobilize etme ve alma konusunda çok daha iyi bir yeteneğe sahiptir. Bu süreç, toprak pH'ını düşüren ve fosfatların ve mikro elementlerin (demir, manganez veya magnezyum) çözünürlüğünü artıran glukonik, sitrik ve fumarik organik asitlerin biyosentezi ile ilgilidir (Singh ve ark., 2018; Sood ve ark., 2020; Chen ve ark., 2025).

Aerobik ortamda (oksijen ve nötr pH ile) demir esas olarak Fe^{+3} formunda bulunur ve çözünmeyen demir oksit oluşturma eğilimi göstermektedir, bu da onu kök emilimi ve mikrobiyal büyüme için demiri kullanılamaz hale getirmektedir. Demir, çok sayıda enzimin kofaktörü olarak, bitkiler ve diğer mikroorganizmaların büyümesi için gerekli bir besin maddesidir. *Trichoderma* türleri, çözünmeyen Fe^{+3} iyonlarına yüksek afiniteyle bağlanan ve demirin hücre içine alınmasını sağlayan düşük moleküler ağırlıklı demir şelatlayıcı bileşikler olan sideroforları salgılamaktadır. Bu süreç, ortamda serbest

demirin sınırlanmasına yol açarak bitki patojenlerinin gelişimini baskılamaktadır. Mikrobiyal sideroforlar genellikle kimyasal yapılarına ve demir ile koordinasyon bölgelerine bağlı olarak hidroksamat, katekolat ve karboksilat olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Genel olarak funguslar, ortak bir yapısal birim olan N5-asil-N5-hidroksiornitin içeren koprojenler, ferrikromlar ve fusarininler gibi hidroksamat tipi sideroforları sentezlemektedir (Singh ve ark., 2018; Sood ve ark., 2020; Shao ve ark., 2025).

T. harzianum, *Fusarium acuminatum* Ellis & Everh., *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl. (Astım küfü) ve *Alternaria infectoria* E.G. Simmons (Meşeküfü) patojenleri arasındaki etkileşimin incelendiği in vitro çalışmalar, besin açlığının çalışılan fungusların ölümüne neden olduğunu göstermiştir. *T. asperellum*'un *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici*'ye karşı antagonistik etkisinde ve domates bitkilerinin solgunluk hastalığına karşı korunmasında ana faktörlerden birinin demir rekabeti olduğu belirlenmiştir. *Trichoderma* türlerinin *Colletotrichum* sp., *Botrytis* sp., *Verticillium* sp. ve *Phytophthora* sp. cinsi fitopatojenlerle basit ve karmaşık karbon substratları için etkili bir şekilde rekabet edebildiği bildirilmiştir. Ayrıca, besinler ve yer için rekabete aracılık eden enzimlerin, *Trichoderma*'nın *B. cinerea*, *F. graminearum* Schwabe ve *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. (Amanmantarı) patojenleri üzerindeki güçlü inhibitör etkisinden sorumlu olduğu bilinmektedir (Tyskiewicz ve ark., 2022).

İndüklenmiş Sistemik Direnç

Trichoderma türleriyle muamele edilerek konukçu bitkide direnç indüklenmesi başka bir biyolojik kontrol mekanizmasıdır (Chalie-u ve Jakhar, 2018). Bir patojenle savaşmak için bitkilerin çok çeşitli biyokimyasal ve moleküler savunmayı etkinleştirebildiği sistemik direnç olarak tanımlanmaktadır (Zaki ve ark., 2020). Bitkilerde sistemik direnç, patojen enfeksiyonu sonucu aktive olan sistemik kazanılmış direnç (SAR) ve faydalı mikroorganizmalar sonucu oluşan indüklenmiş sistemik direnç (ISR) olarak ikiye ayrılmaktadır (Yu ve ark., 2022). *Trichoderma* türlerinin bitki köklerini kolonileştirme ve onlarla sağlam ve istikrarlı bir ilişki kurma yeteneği, özellikle biyolojik bitki korumada oldukça önemlidir. Bu türe ait funguslar, sistemik savunma mekanizmasını indükleyerek bitkiler aracılığıyla patojenik mikroorganizmaları dolaylı olarak etkileyebilmektedirler (Chalie-u ve Jakhar, 2018; Tyskiewicz ve ark., 2022). Bu sistemle bitkiler zararlı mikroorganizmaların varlığında fitoaleksin gibi antimikrobiyal aktiviteye sahip sekonder metabolitler üretirek veya lignin birikimi ile hücre duvarını kalınlaştırarak önleyici mekanizmaları kullanmaktadır. Bitkilerin patojenik olmayan mikroorganizmalarla

etkileşimi de sistemik direnci indükleyebilmektedir (Zaki ve ark., 2020).

Bitki direncinin indüklenmesi, mikroorganizma hücrelerinden (ekzoelisitörler) ve bitki dokularından (endoelisitörler) salınan çeşitli elisitörlerin (savunma tepkisi indükleyicileri) etkisinin bir sonucudur. Oligosakkaritler (glukanlar ve kitinler ve oligogalakturonitler), proteinler ve peptitler (endoksilanaz ve elisitiner), glikopeptitler ve glikoproteinler (invertazin glikopeptit fragmanları), glikolipidler (lipopolisakaritler) ve lipofilik bileşikler (yağ asitleri) dahil olmak üzere farklı elisitör sınıfları karakterize edilmiştir. Elisitörler tarafından sinyal iletim yollarının aktivasyonu bitkilerde, membran boyunca iyon akışı, reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimi, fitopatojenlerin yayılmasını önlemek için fiziksel bir bariyer oluşturma (kaloz birikimi, bitki hücre duvarının güçlendirilmesi) ve farklı savunma bileşiklerinin sentezi (fitoaleksinler, uçucu organik bileşikler, enzimler ve fitohormonlar) gibi fiziksel, biyokimyasal ve moleküler değişikliklere yol açmaktadır (Tyskiewicz ve ark., 2022). Bir bitkide sistemik direncin uyarılmasının bitki türlerine, patojenik mikrobiyal türlere, çevresel faktörlere ve rizosfer ile ortak yaşam ilişkisine bağlı olduğu da bilinmektedir (Abdul-Halim ve ark., 2023). Domates bitkisinde yapılan bir çalışmada, *T. harzianum* (T9) izolatu tarafından

bakteriyel lekeye karşı (*Xanthomonas campestris* pv. vesicatoria) direncin indüklendiğini ve aşılamaadan 14 gün sonra hastalık insidansının %69.32'ye kadar azaltıldığı bildirilmiştir (Waghunde ve ark., 2016; Bhandari ve ark., 2021).

Benzer şekilde, gri yaprak lekesinde (*Stemphylium solani*), *T. asperellum* (T18) suşu bitki sistemik direncini indükleyerek aşılamaadan 10 gün sonra leke sayısında %19.23'e kadar önemli bir azalma göstermiştir. *T. harzianum*'un (PDBCTh10 izolatu) elisitör filtratının biber bitkisinde kök çürüklüğüne (*Phytophthora capsici*) karşı etkili olduğu ve %23 daha az enfeksiyonla sonuçlanan direnci indüklediği görülmüştür. Farklı patojenlere karşı moleküler düzeyde direnç, bitkide savunma mekanizmalarının aktivitesinin artmasıyla ilişkilidir. Bu artış, kalkon sentaz ve fenilalanin amonyok liyaz gibi enzimlerin yanı sıra kitinaz, glukanaz ve ceratoplatanin protein ailesine ait proteinler, fitoaleksinler ve PKS/NRPS hibrit enzimleri gibi savunma ile ilişkili metabolitlerin daha yüksek konsantrasyonlarda sentezlenmesiyle sonuçlanmaktadır. Bunlar, oksidatif strese yanıtta yer alan patogeneze ile ilgili proteinleri ve enzimleri içermektedir (Waghunde ve ark., 2016). Tablo 4'te *Trichoderma* spp.'nin bitkiler üzerindeki indüklenmiş sistemik direnç mekanizmaları yer almaktadır.

Tablo 4. Bazı *Trichoderma* türlerinin sebep olduğu indüklenmiş sistemik direnç (Waghunde ve ark., 2016; Ghazanfar ve ark., 2018).

<i>Trichoderma</i> türü	Bitki türü	Patojenler	Sonuç
<i>T. virens</i>	<i>Gossypium hirsutum</i> (Pamuk)	<i>R. solani</i>	Fungusa karşı toksik olan terpenoid fitoaleksinler indüklenmektedir
<i>T. harzianum</i>	<i>Capsicum</i> (Biber)	<i>Phytophthora capsici</i>	Patojenlere toksik olan fitoaleksinler capsidiolun artan üretimi
<i>T. virens</i>	<i>Solanum lycopersicum</i> (Domates)	<i>Pseudomonas syringae</i>	Salgılanan proteinler-Sm1 ve Epl1'in her ikisi de sistemik kazanılmış direnci indüklemektedir.
<i>T. atroviride</i>	<i>S. lycopersicum</i>	<i>Alternaria solani</i> , <i>B. cinerea</i> ve <i>P. syringae</i> pv. <i>tomato</i> (Pst DC3000)	Salgılanan proteinler-Sm1 ve Epl1'in her ikisi de sistemik kazanılmış direnci indüklemektedir.
<i>T. asperellum</i>	<i>Cucumis sativus</i> (Salatalık)	<i>Pseudomonas syringae</i>	Jasmonik asit/etilen sinyali ile ilgili proteinlerin ekspresyonunu modüle etmektedir.
<i>T. harzianum</i> T-22; <i>T. atroviride</i> P1	<i>Phaseolus vulgaris</i> (Fasulye)	<i>B. cinerea</i> , <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>phaseoli</i>	Köklerde bulunduğu yapraklardaki antifungal bileşenlerle ilgili yolları aktive etmektedir.
<i>Trichoderma</i> GT3-2	<i>C. sativus</i>	<i>Colletotrichum orbiculare</i> , <i>P. syringae</i> pv. <i>lachrymans</i>	Lignifikasyonlar ve süperoksidaz oluşumundan sorumlu genlerle ilgili savunma indüklenmektedir.
<i>T. asperellum</i> SKT-1	<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.	<i>P. syringae</i> pv. <i>tomato</i> DC3000	SKT-1 ve hücretsiz kültür filtratı tarafından kolonizasyona karşı indüklenmiş sistemik direnç.
<i>T. asperellum</i> SKT-1	<i>A. thaliana</i>	<i>Cucumber mosaic virus</i>	CMV enfeksiyonuna karşı geliştirilmiş savunma mekanizması
<i>T. harzianum</i> Tr6 ve <i>Pseudomonas</i> sp. Ps14	<i>C. sativus</i> ve <i>A. thaliana</i>	<i>C. sativus</i> 'da <i>F. oxysporum</i> f.sp. <i>radicis cucumerinum</i> ; <i>A. thaliana</i> 'da <i>B. cinerea</i>	Ps14 ve Tr6 savunma ile ilgili genleri aktive etmektedir.

Mikrobiyal Gübre Olarak *Trichoderma* spp.

Biyolojik mücadele etmeni özelliklerine kıyasla, *Trichoderma* spp.'nin bitki büyümesini teşvik edici (Plant Growth Promoting - PGP) aktivitesini destekleyen faktörler hakkında çok daha az bilgi mevcuttur (Ruocco ve ark., 2015). *Trichoderma* bitki büyümesinin teşviki, biyolojik kontrol, abiyotik strese toleransı, bitki metabolizmasını düzenleme ve biyoremediasyon özellikleri bakımından tarımda yaygın olarak biyolojik mücadele ajanıdır. *Trichoderma* mikrobiyal biyogübre olarak toprak ıslahında en sık kullanılan, araştırılan ve pazarlanan filamentli bir fungustur. *Trichoderma* türlerinin bitkilerde stres toleransını arttırmak için fosfat miktarını, fotosentez hızını ve oksidatif dengeyi iyileştirmekte olduğu, kök biyokütlesini geliştirdiği bilinmektedir (Tripathi ve ark., 2017; Bader ve ark., 2020; Vinale ve Sivasithamparam, 2020).

Trichoderma spp.'nin bitki hastalık etmeni birçok fitopatogene karşı antagonistik etkisinin yanında bitki büyümesinin desteklenmesine yönelik toprakta bulunan bitki besin elementlerini (fosfat, potasyum, demir vb.) kullanılabilir forma dönüştürme yetenekleri, bitki büyüme hormonlarını (IAA, GA vb.) üretme kapasiteleri, ACC deaminaz üretimleri gibi mikrobiyal gübre özelliklerine de sahiptirler (Waghunde ve ark., 2016).

Bitki büyüme düzenleyicilerin sentezi

Trichoderma bitki büyümesini teşvik etmek amaçlı birçok mekanizma geliştirmiştir. Bitki büyümesini ve faydalı mikroorganizmalar tarafından besin alımını teşvik etmek için mikrobiyal simbiyozların kurulması, bitki büyüme düzenleyicilerinin ve fitohormonların biosenteziyle ilişkilendirilmektedir (Tablo 5). Bu mekanizmalardan ilki bitki büyüme hormonlarının üretimidir. Rizosferden izole edilen *Trichoderma* spp. fitohormonlar üreterek kök gelişimini, bitki bağışıklığını ve stres toleransını manipüle etmek için evrimleşmişlerdir. Bitkiyi kolonize eden mikroorganizmaların konakçı hormon sentezini indüklemenin yanı sıra kendi fitohormonlarını sentezleyerek bitkilerin hormonal ağını da modüle edebildiği bilinmektedir. Fitohormonlar beş ana kategoriye ayrılmaktadır: Oksinler (indol-3-asetik asit: IAA), sitokininler, etilen (ET), giberellinler (GA'lar) ve absisik asit (ABA). Fakat *Trichoderma* türlerinin brassinosteroid, oligosakkarinler, biyoaminler, salisilat-salisilik asit gibi bir dizi başka hormon benzeri maddeleri ve jasmonik asitleri (JA) ürettiği de çalışmalar ile belirlenmiştir (Contreras-Cornejo ve ark., 2016; Jaroszuk-Ścisel ve ark., 2019; Vinale ve Sivasithamparam, 2020; Zin ve Badaluddin, 2020; Illescas ve ark., 2021).

Bitki gelişiminde çok önemli bir yere sahip olan IAA, oksin sınıfından bir bitki hormonudur. IAA, bitkinin primer ve lateral köklerinin gelişimini düzenleyen fitohormondur. IAA'nın hücre büyümesi, bölünmesini ve doku

farklılaşmasını indüklediği, ışığa ve yer çekimine karşı bitki tepkilerini kontrol etme konusunda da önemli bir yeri olduğu bilinmektedir. Biyotik ve abiyotik stresler sırasında bitki gelişimi kontrolü ve sinyal yollarının aktivasyonu yoluyla doku kolonizasyonunu ve besin alımını desteklemektedir. IAA'nın sentezlenmesinin ortamda bulunan triptofan (Trp) miktarına bağlı olduğu bilinmesine rağmen, herhangi bir indükleyici olmadan *Trichoderma* spp.'nin IAA ve GA üretebildiği de çalışmalar sonucunda gösterilmiştir. Ek olarak *Trichoderma* metabolitlerinin ve proteinlerinin, bitkideki IAA sinyallerinin düzenlenmesinde yer aldığı; kılcal kök büyümesine ve kök kütlesi gelişiminin artmasına yol açtığı iyi bilinmektedir. GA'lar, tohum çimlenmesi, gövde uzaması, çiçeklenme ve yaşlanma dahil olmak üzere bitki gelişiminin süreçlerini kontrol eden fitohormonlardır (Contreras-Cornejo ve ark., 2016; Jaroszuk-Ścisel ve ark., 2019; Vinale ve Sivasithamparam, 2020; Zin ve Badaluddin, 2020; Illescas ve ark., 2021).

İkinci olarak *Trichoderma* spp. bitki büyümesini teşvik etmek için 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit deaminaz (ACCD) enzimini sentezlemektedirler. Etilen (ET) bitki büyümesini, gelişmesini ve yaşlanmasını düzenleyen bir fitohormondur ve kök bölgesindeki düşük ET konsantrasyonlarının daha yüksek sürgün büyümesine karşılık geldiği iyi bilinmektedir. Bu nedenle, ET seviyelerinin sınırlandırılması, tarımsal üretimi arttırmaya hizmet etmektedir. Bitkileri desteklemek için birçok rizosferik mikroorganizmanın izlediği bir strateji, ET'nin öncü molekülü olan 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit (ACC) konsantrasyonunun, mikroorganizmaların ACCD enzimini üretme yeteneği aracılığıyla azaltılmasından oluşur. Etilenin öncüsü olan ACC, bu enzim sayesinde α -ketobutirat ve amonyaka çevrilmektedir. Bitki ve *Trichoderma* etkileşimi sırasında fungus endojen savunma ve hormon miktarını arttırdığı tartışılmaktadır (Contreras-Cornejo ve ark., 2016; Illescas ve ark., 2021).

Ayrıca koningininler, 6-pentil- α -piron, trichocaranes A–D, harzianopridon, siklonerodiol, harzianolid ve harzianik asit gibi çeşitli *Trichoderma* sekonder metabolitleri bitki gelişimi üzerinde olumlu etkileri olduğu çalışmalar ile desteklenmektedir. Mikrobiyal uçucu bileşikler (Volatile Organic Compounds, VOC), mikoriza ve *Trichoderma* dahil olmak üzere bakteri ve funguslarda bitki büyümesinin önemli indükleyicileri olarak tanımlanmaktadır. *Trichoderma* VOC'ları, fungusun bitki ile doğrudan temas halinde olmadığı durumlarda da, biyokütle ve klorofil içeriği üzerinde olumlu etki ile bitki büyümesini önemli ölçüde destekleyebilmektedir (Vinale ve Sivasithamparam, 2020).

Tablo 5. *Trichoderma* türlerinin sentezlediği bitki büyüme düzenleyiciler (López-Bucio ve ark., 2015; Contreras-Cornejo ve ark., 2016; Jaroszuk-Ścisel ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2019; Gezgin ve ark., 2020; Zin ve Badaluddin, 2020; Abdullah ve ark., 2021; Alfiky ve Weisskopf, 2021; Kubheka ve Ziena, 2022; Malgioglio ve ark., 2022; Abdul-Halim ve ark., 2023).

<i>Trichoderma</i> türü	Sentezlenen bitki büyüme düzenleyici	İşlevi
<i>T. atroviride</i> <i>T. citrinoviride</i> <i>T. longibrachiatum</i> T6 <i>T. brevicompactum</i> <i>T. gamsii</i> Samuels & Druzhin. (Çiy yeşilküf) <i>T. harzianum</i> <i>T. virens</i> <i>T. koningiopsis</i>	İndol-3-asetik asit (IAA)	Oksin sınıfından bir bitki büyüme hormonu olan IAA bitki büyümesi ve kök gelişimini desteklemektedir.
<i>T. longibrachiatum</i> T6 <i>T. harzianum</i> <i>T. koningiopsis</i>	ACC deaminaz	ET'nin öncü molekülü olan 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit (ACC)'in α -ketobutirat ve amonyoka yıkımını sağlamaktadır.
<i>T. harzianum</i> <i>T. koningiopsis</i>	Giberellin (GA)	Bitki büyüme hormonu sınıfından olan giberellinler tohum çimlenmesi, gövde uzaması, çiçeklenme ve yaşlanma dahil olmak üzere bitki gelişiminin süreçlerini kontrol etmektedir.
<i>T. virens</i> <i>T. atroviride</i>	Absisik asit (ABA)	Kuraklık ve yüksek tuzluluk koşulları gibi çeşitli çevresel streslere yanıt olarak vejetatif gelişme dahil olmak üzere bitki yaşam döngüsü boyunca birçok fizyolojik süreçte rolü olan bir izoprenoid bitki hormonudur
<i>T. atroviride</i> <i>T. harzianum</i> <i>T. arundinaceum</i>	Harzianik asit (HA)	Çimlenme ve kök gelişimini destekler
<i>T. atroviride</i> <i>T. asperellum</i> <i>T. harzianum</i>	6-pentil- α -piron (6PP)	Oksin benzeri bir mekanizma ile bitki büyümesini destekler, lateral kök oluşumuna yardımcı olur

Besin elementlerinin çözündürülmesi

Fotosentez ve metabolizma olaylarının gerçekleşmesi için yeterli miktarda besin maddesine gerek duyulmaktadır. Rizosferde, hem makro besinler hem de mikro besinler kökle ilişkili mikroorganizmalar yardımıyla karmaşık bir çözünürlük, alım ve taşıma dengesine tabi tutulmaktadır. *Trichoderma* spp. bitkilerin ihtiyacı olan besin elementlerinin toprakta daha iyi çözünmesine veya kullanılabilir forma dönüştürülmesine yardımcı olmaktadır. *Trichoderma* rizosferde bulunan bitki büyümesini sınırlayan fosfat, demir, bakır ve mangan gibi elementleri çözebilmektedir (Tablo 6). Azot (N) ve fosforun (P), embriyonik gelişim sonrası kök gelişimini, primer-yanal kök büyümesini ve kılcal kök oluşumunu indüklediği, bitki-mikroorganizma birlikteliğinin başarısında rol oynayan sinyalleri doğrudan harekete geçirdiği düşünülmektedir. *Trichoderma* suşlarının toprağa, tohumlara veya bitki yüzeylerine uygulanması

besinlerin çözünürlüğünü ve ayrıca kökün besin alım kapasitesini arttırdığından *Trichoderma*'nın mikrobiyal gübre olarak etkinlik gösterdiği bilinen bir gerçektir. Demir (Fe) eksikliği, Fe formlarının çözünmezliği nedeniyle alkali topraklarda tarımsal açıdan önemli bir sorundur. *T. harzianum* türünün Fe⁺³ ve Cu⁺² elementlerini indirgemek için Fe(II)-Na₂ batofenanthrolin disülfonik asit ve Cu(I)-Na₂-2,9-dimetil-4,7-difenil-1,10-fenanthrolin disülfonik asit ürettiği çalışmalar sonucu gösterilmiştir (Altomare et al., 1999). *Trichoderma* tarafından metal oksitlerin çözünmesi hem şelatlama hem de redüksiyon ile gerçekleşebilmektedir. *Trichoderma* tarafından sentezlenen harzianik asidin Fe(III) şelatlama aktivitesi nedeniyle bitki büyümesini düzenlediğini bilinmektedir (Vinale ve ark., 2013; López-Bucio ve ark., 2015; Contreras-Cornejo ve ark., 2016; Zin ve Badaluddin, 2020).

Tablo 6. *Trichoderma* türlerinin besin elementi çözündürmesi (López-Bucio ve ark., 2015; Malgioglio ve ark., 2022)

<i>Trichoderma</i> türü	İşlevi
<i>T. harzianum</i>	Toprakta NH ₄ ⁺ ve NO ₃ ⁻ miktarının artırılması MnO ₂ ve metalik çinkonun çözündürülmesi Bitki kökünde Cu, P, Fe, Zn, Mn ve Na; bitki gövdesinde Zn, P ve Mn konsantrasyonlarının artırılması Organik karbonun bitki tarafından kullanılabilirliğini artırır
<i>T. viride</i>	Toprakta organik karbon, N, P ve K miktarının artırılması
<i>T. virens</i>	Toprakta P miktarının artmasına ve bitki tarafından yararlanımına yardımcı olur
<i>T. asperellum</i>	Rizosferde Fe çözündürülmesi
<i>T. atroviride</i>	Rizosferde Fe çözündürülmesi

Dekompoze edici ajan olarak *Trichoderma*

Dekompozisyon, biyolojik ve fiziksel ajanlar tarafından ölü organik materyalin yok edilip parçalanması sonrasında ise mineral materyallere ve organik kolloidal humusa dönüştürüldüğü bir işlemdir. Organik maddenin ayrışması da genellikle mineralizasyon süreci olarak adlandırılmaktadır. Organik maddenin ayrıştırıcı tarafından bozunma sürecini etkileyebilecek sıcaklık, nem, tuzluluk ve pH gibi birçok faktör bulunmaktadır. Mikroorganizmalar, mahsul kalıntılarının toprak organik maddesine dönüştürülmesinden sorumlu oldukları için ayrışma sürecinde rol oynarlar. *Pleurotus*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Azotobacter* gibi bazı mikroorganizmalar karmaşık substratları parçalamakta iyi olduğu bilinmektedir (Devika ve ark., 2019; Yunasfi ve ark., 2021; Organo ve ark., 2022).

Funguslar, organik maddede bulunan selüloz, hemiselüloz ve ligninin ayrışmasında aktif olarak yer almaktadırlar. Saprotrofik türlerin ölü bitki biyokütlesinin bozunmasında ve mikorizal türlerin bitki köklerinden toprağa karbon (C) hareketliliği ile besin döngüsünde kilit rol oynadığı bilinmektedir. Filamentli funguslar biyokütleri veya sekonder metabolitleri sayesinde karasal ekosistemde hem organik hem de inorganik besin döngüsünde önemli bir yere sahiptirler. *Aspergillus* ve *Trichoderma* gibi selüloz, hemiselüloz ve lignini parçalayabilen selülaz, hemiselülaz, proteaz, glukanaaz ve ksilanaz gibi enzimler üretme yeteneklerinden dolayı selülitik fungusların kullanımı ile dekompozisyon işlemi kısa sürede gerçekleşmektedir. Doğada, *Trichoderma* spp. saprofitik fungus olması sayesinde bitki biyokütlesinin parçalanması için mükemmel bir enzim üreticisidir ve aynı zamanda toprak biyokimyasını

iyileştirme yetenekleri bulunmaktadır. *Trichoderma* spp. karasal ekosistemlerin baskın türleridir ve çeşitli ekolojik döngülerde önemlidir. *Trichoderma*'nın ekolojik işlevleri çevresel koşullar tarafından şekillendirilmektedir. Ağaç kabuğundan izole edilen *Trichoderma* spp.'nin habitatu nedeniyle daha yüksek lignoselülitik enzimlere sahip olacağı; çürüyen odun, bahçe ve mantar kompostundan izole edilen *Trichoderma* suşlarının selüloz ve ksilozu parçalama kapasitesinin daha yüksek olacağı düşünülmektedir (Brabcová ve ark., 2016; Siddiquee ve ark., 2017; Sapareng ve ark., 2018; Devika ve ark., 2019; Op De Beeck ve ark., 2020; Wang ve Zhuang, 2020; Martzy ve ark., 2021; Sarangi ve ark., 2021).

Trichoderma spp. selülitik ve hemiselülitik enzimler ürettiği için biyolojik ayrışmada önemli bir rol oynamaktadır. *Trichoderma*, selülozik substratları monomerik glikoz zincirlerine verimli bir şekilde hidrolize edebilmektedir. Lignin, ligninolitik enzimler tarafından daha basit fenil halkalarına indirgenmektedir. *Trichoderma* spp. iyi kalitede kompost yaratabilen potansiyel bir doğal çürüme ajanı/etmeni olarak kabul edilebilir. Kompost yığınının *Trichoderma* spp. ile aşılmasının kompostlama süresinin geleneksel kompostlaştırma yöntemlerinin yarısından daha az olduğu çalışmalar sonucu gösterilmiştir. *Trichoderma* ile aşılınmış kompost ile toprağın besinsel açıdan zenginleşeceği, C/N oranının düşerek toprak kimyasının iyileşeceği ve tarımsal ve evsel atıkların kötü koku yayılmadan hızlı bir şekilde ayrıştırılabildiği bildirilmektedir (Pratiwi ve ark., 2021; Sarangi ve ark., 2021; Organo ve ark., 2022). Tablo 7'de *Trichoderma* spp.'nin dekompoze ettiği organik atık örnekleri yer almaktadır.

Tablo 7. *Trichoderma* türlerinin dekompozisasyonu (Kumar, 2013; Kumar ve ark., 2014; Wang ve Zhuang, 2020; Zin ve Badaluddin, 2020; Pratiwi ve ark., 2021; Sarangi ve ark., 2021; Yunasfi ve ark., 2021).

<i>Trichoderma</i> türleri	Dekompoze edilen organik atıklar
<i>T. viride</i>	Muz atığı
<i>T. harzianum</i>	Pirinç samanı Zeytin ezmesi kompostu (selüloz ve lignin) Olgun biber Lignin Paçuli atığı Olgun inek gübresi
<i>T. virens</i>	Bitkilerin selüloz ve hemiselüloz artıkları
<i>T. asperellum</i>	Paçuli atığı Olgun inek gübresi
<i>T. reesei</i>	Pirinç samanı Filtre kağıdı Selüloz Odun
<i>T. atroviride</i>	Pirinç samanı
<i>Trichoderma</i> spp	Birçok bitki kalıntısı ve odunsu atıklar Boş meyve salkımı, hurma yağı atık suyu Çeltik samanı, şeker kamışı samanı, buğday samanı <i>Rhizophora mucronata</i> yaprak çöpü (Bir çeşit mangrov)

Biyoremediasyon ajanı olarak *Trichoderma* spp.

Ksenobiyotik bileşenler tarafından toprağın ve suyun kontaminasyonu dünya çapında büyük bir problemdir. Ksenobiyotikler, doğal olarak oluşan bileşikler, ilaçlar ve çevresel ajanlar dahil olmak üzere biyolojik sisteme yabancı olan kimyasal maddelerdir. Ksenobiyotik çeşitleri, pestisitler, poliaromatik hidrokarbonlar (PAHs), poliklorlu aromatikler, çözücüler, hidrokarbonlar ve yüzey aktif maddeler, silikonlar, plastikler gibi diğer kirleticileri içermektedir. Bu tür kirleticilerin uzaklaştırılması, toprağın ve kirleticinin belirli özelliklerine bağlı olarak seçilen fiziksel, kimyasal ve biyolojik teknikleri gerektirmektedir. Kirleticileri çeşitli ortamlardan uzaklaştırmak için geleneksel fizikokimyasal yöntemler temel olarak, kimyasal indirgeme, elektrokimyasal arıtma, iyon değişimi, çökeltme ve buharlaştırarak geri kazanımı içermektedir. Bununla birlikte, bu tür işlemler, yüksek geri kazanım maliyeti, tamamlanmayan uzaklaştırma, yüksek enerji ve kimyasal tüketiminin yanı sıra diğer toksik yan ürünlerin üretilmesi gibi önemli dezavantajlara sahiptir (Tripathi ve ark., 2013). Bununla birlikte, çevrede her geçen gün artan kimyasal kalıntı birikimi biyoçeşitliliğin büyük ölçüde kaybolmasına neden olmakta ve insanoğlu için ciddi sağlık tehlikelerini de beraberinde getirmektedir. Toprak mikroorganizmaları yalnızca tarımsal ürün üretimi ve toprak sağlığı için çok önemli olmakla kalmayıp aynı zamanda çevresel kirleticilerin temizlenmesi için de önemli araçlar haline gelmiştir (Harman ve ark., 2021).

Biyoremediasyon, ekosistemdeki doğal biyolojik aktiviteyi kullanarak çeşitli kirleticileri yok etme veya zararsız hale getirme imkanı sunan bir tekniktir. Biyoremediasyon, organik veya inorganik atıkların biyolojik olarak bozunduğu veya genellikle zararsız malzemelere dönüştürüldüğü bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Tarekegn ve ark., 2020; Bhandari ve ark., 2021). İnsan sağlığına zararlı içerikleri parçalamak ya da detoksifiye etmek için bakteriler, funguslar ya da bitkiler kullanılmaktadır (Tarekegn ve ark., 2020; Conte ve ark., 2025). Biyoremediasyon, atmosferden (endüstriyel emisyonlar ve toprak havalandırma gazları), katılardan (topraklar, sedimentler ve çamur), sıvılardan (yeraltı suyu, endüstriyel atıklar) ve endüstriyel işlemlerden gelen hammaddelerden kirli alanları temizlemek için kullanılan bir metottur. Mikroorganizmalar bu görevi gerçekleştirmek için ürettikleri enzimlerini kullanmaktadırlar (Tarekegn ve ark., 2020; García-Latorre ve ark., 2025). Toprak mikroorganizmalarının kullanıldığı biyoremediasyon, kirletici bölgesinde yüksek parçalama yetenekleri olan seçilmiş mikrobiyal suşların popülasyonlarının artırılmasıyla gerçekleşmektedir (Harman ve ark., 2021). *Trichoderma* uygulamasının bu konuda uygulanabilir ve sürdürülebilir bir çözüm olabileceği düşünülmektedir (Bhandari ve ark., 2021).

Çeşitli faydalı mikroorganizmaların, topraktaki kimyasal pestisitler, petrol hidrokarbonları ve ağır metal kirleticiler için yüksek biyoremediasyon potansiyeline sahip olduğu bildirilmiştir (Harman ve ark., 2021). *Trichoderma* türleri, toksik kirletici maddeleri verimli bir

şekilde biyolojik olarak parçalama yetenekleriyle tanınmaktadır (Tripathi ve ark., 2013). *Trichoderma* türlerinin, naftalin, fenantren, krisen, piren ve benzen gibi çok çeşitli polisiklik aromatik hidrokarbonları (PAH'lar) parçalayabildikleri bilinmektedir (Harman ve ark., 2021). Ayrıca, rizosfer uyumlu *Trichoderma* suşlarının birkaç sentetik boya, pentaklorofenol, endosülfan, diklorodifenil trikloretanı (DDT), klor ve lindan parçalama potansiyeli pek çok çalışmada gösterilmiştir. *Trichoderma* türleri, pestisitlerle kirlenmiş toprağın biyoremediasyonunda önemli rol oynamakta ve çok çeşitli insektisitleri (organoklorinler, organofosfatlar ve karbonatları) parçalama yeteneğindedir. *Trichoderma* türleri tarafından üretilen hidrolazlar, peroksidaz, lakkazlar ve diğer litik enzimler, bu kontaminantların parçalanmasına yardımcı olabilecek olası faktörlerdir. Toprağa inoküle edilen *Trichoderma* türleri, fungusitler, herbisitler, insektisitler ve

fenolik bileşikler gibi birçok toksik bileşiğe karşı doğal olarak dirençli olmaları nedeniyle hızla büyüebilmektedirler (Tripathi ve ark., 2013; Waghunde ve ark., 2016; Chalie-u ve Jakhar, 2018).

Trichoderma türlerinin çeşitli tarım kimyasallarına direnci, onu fiziksel, kimyasal ve biyolojik araçların birlikte kullanımını içeren entegre bitki hastalığı yönetimi için favori yapmaktadır. Mikroorganizmalar metal direnci için çeşitli mekanizmalar geliştirmiştir. Bunlardan bazıları, hücre zarı metal akışı, metalotiyonin proteinleri tarafından hücre içi şelasyon, fitoşelatinler adı verilen glutatyon türevi peptitler ve metallerin vakuollerde alıkonulmasıdır (Tripathi ve ark., 2013). *Trichoderma* türlerindeki ABC taşıyıcı protein sistemleri, test edilen zararlı bileşiklere karşı direnç mekanizmaları arasında yer almaktadır (Waghunde ve ark., 2016).

Tablo 8. *Trichoderma* türleri tarafından çeşitli kirleticilerin biyoremediasyonu (Bhandari ve ark., 2021; Ksiazek-Trela ve Szpyrka, 2022)

<i>Trichoderma</i> türleri	Kirletici türü	Sonuç
<i>T. atroviride</i>	Diklorvos	%56.7 (24 saat)
	Karbendazim	%21 (5 gün)
	Bakır (Cu)	%50-85 adsorpsiyon
	Çinko (Zn)	%47.6-64 adsorpsiyon; %30.4-45 absorpsiyon
<i>T. harzianum</i>	Karbendazim	%85 (5 gün)
	Ethion	%70-80 (21 gün)
	Klorpirifos	%97.9 (10 gün)
	DDT	%83
	Dieldrin	%74
	Endosülfan	%61
	Pentakloronitrobenzen (PCNB)	%52
	Pentaklorofenol (PCP)	%12
	Klorfenvinfos	%60 (165 gün)
	Clomazone	%24.2
	Fluazifop-p-butyl	%24.8
	Metribuzin	%23.5
	Karbofuran	%81.5
	Bromoksinil	%45.6-60.3 (3 gün)
	Oksamyl	%72.5 (10 gün)
	Penthiopyrad	%34.2 (3 gün); %56.9 (14 gün)
	Boscalid	%52
	Pyraclostrobin	%41
	Diazinon	%84.8-91.8
Profenofos	%71.1-84	
Malation	%90.6-91.8 (20 gün)	
<i>T. viride</i>	Kurşun, krom	9.14 mg/g kurşun; 2.55 mg/g krom alımı
	Bromoksinil	0.63 ppm (100 ppm başlangıç)
	2,4,6-trinitrotoluen (TNT)	5-(hydroxymethyl)-2-Furancarboxaldehyde gibi ana ve 4-propyl benzaldehyde gibi ikincil metabolitlere parçalanır.
<i>T. reesei</i>	Benzo(a)piren	%54 (12 gün)
	Dizel yakıt	%98.78 (40 gün)
<i>T. asperellum</i>	Kadmiyum (Cd)	%76.17
<i>Trichoderma</i> spp.	Karbendazim, Mankozeb	%36.25 (15 gün)

Biyoremediasyon sürecinin kontrolü ve optimizasyonu oldukça kompleks faktörlerden oluşmaktadır. Bu faktörler, kirleticileri parçalamada yetkin bir mikrobiyal popülasyonun varlığını, kirleticilerin mikrobiyal popülasyon tarafından ulaşılabilir olmasını, toprak tipi, sıcaklık, pH, oksijen veya diğer elektron alıcılarının varlığı ve besin öğelerinin mevcudiyeti gibi çevresel faktörleri içermektedir (Tarekegn ve ark., 2020). *Trichoderma* cinsi olarak gruplanan fungus suşları, yüksek biyobozunma potansiyelleri ile birlikte çok etkili bir toprak kolonizasyonuna sahiptir (Tablo 8).

İklim Değişikliği

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC) göre, 21. yüzyılda küresel sıcaklığın 1,7°C'den 4,8°C'ye yükselebileceği ve bu sebeple yağış düzeninin de değişeceği düşünülmektedir. Ek olarak, iklim değişikliğinin doğrudan ve dolaylı etkileri, topraklarda besin maddelerinin biyoyararlanımının değişmesine yol açacak ve eş zamanlı olarak bitki büyümesini ve üretkenliğini etkileyecektir. İklim değişikliğinin etkisi bitkiler üzerinde doğrudan olabileceği gibi patojenler aracılığıyla dolaylı olarak da olabilmektedir. Bu etki bitkileri hastalığa duyarlı hale getiren aşırı iklim olaylarının artmasıdır. *Fusarium* solgunluğu, gelişimi büyük ölçüde iklim değişikliğine bağlı olan arpacık soğanında önemli hastalıklardan biridir. Kurak arazilerde iklim değişikliği ile bağlantılı olarak sürdürülemez sulama ve yönetim uygulamaları, toprakta artan tuzlanmaya, besin maddelerinin tükenmesine ve erozyon nedeniyle toprak sağlığının bozulmasına neden olmuştur (Kashyap ve ark., 2017; Naamala ve Smith, 2020; Sudantha ve Swardji, 2021).

Trichoderma spp.'nin, bitki büyümesini ve canlılığını kuraklık gibi abiyotik streslere karşı toleranslı hale getirerek desteklediği de bilinmektedir. Yüksek sıcaklık, alkalinite ve pH gibi aşırı abiyotik çevresel parametrelerin, *Trichoderma* suşlarının PGPF etkinliği üzerinde olumsuz etkiye sahip olabileceği düşünülmektedir. Ancak yüksek üreme ve olumsuz koşullar altında büyüme yetenekleri yanı sıra rizosferi değiştirme ve sekonder metabolit üretme kapasiteleri ile birlikte *Trichoderma* spp.'nin bazı genleri, fizyolojik ve biyokimyasal adaptasyonlar yoluyla bazı mekanizmalar geliştirerek tuz, sıcaklık ve kuraklık gibi abiyotik streslere karşı direnç sağlayabilmektedir. Kimyasal fungusitlerin tehlikeli doğası; yüksek sıcaklık, tuzluluk ve yüksek toprak pH'ı gibi aşırı olumsuz abiyotik faktörlere tolerans karakterine sahip olması, biyolojik mücadele için bu antagonistlerinin kullanımının önemi öne çıkmaktadır. Antagonist aktivite söz konusu olduğunda, bazı abiyotik stres toleranslı *Trichoderma* türleri toprak kaynaklı patojenlere karşı oldukça antagonistik aktivite

göstermektedirler (Waghunde ve ark., 2016; Hidangmayum ve Dwivedi, 2018; Anwer ve ark., 2020).

Bitki büyümesini sınırlayan besin elementlerinin başında azot, fosfor ve potasyum gelmektedir. İklim değişikliği ile birlikte bu besin elementlerinin biyojeokimyasal dönüşümünü etkileyen yüksek sıcaklık, kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stresler, bitki alımı için ya kullanılabilir ya da daha az kullanılabilir hale getirmektedir. *Trichoderma* suşları ile inoküle edilen bitkilerde potasyum içeriğinin arttığı bilinmektedir. Artan potasyum bitkilerde tuzluluğun olumsuz etkisini iyileştirerek tuz stresinin neden olduğu ozmotik stresi dengelemektedir (Hidangmayum ve Dwivedi, 2018; Naamala ve Smith, 2020).

Ticari *Trichoderma* biyopreparatları

Trichoderma hakkında yayınlanan birçok makale, dünya çapında tarımsal üretimi iyileştirmedeki etkinliği ve rolü üzerinde durmuştur. Ancak yapılan çalışmalara kıyasla bu tür ürünlerin ticari olarak kullanımı oldukça sınırlıdır (Bhandari ve ark., 2021). Bir dizi *Trichoderma* bazlı ürün geliştirilerek dünya çapında biyolojik mücadele etmeni ve biyogübre olarak pazarlanmaktadır. *Trichoderma* üzerindeki çalışmaların çoğu istenen türün izolasyonu, tanımlanması ve geliştirilmesine odaklanmıştır ve ürünlerden yalnızca birkaçı tescil edilmiş ve ticarileşmiştir. Bunun nedeni, son ürünlerin ticarileştirilmesinin uğraştırıcı, zahmetli, zaman alıcı ve oldukça maliyetli olmasıdır (Abdullah ve ark., 2021).

Trichoderma bazlı ürünler dünya çapında biyopestisitler, biyogübreler, büyüme arttırıcılar ve bitki biyoyarıcıları olarak tarlalar, meyve bahçeleri, seralar, fidanlıklar gibi çeşitli ekili ortamlarda ve hasat sonrası depolama sırasında çeşitli sebzelerin, meyvelerin, tahılların, ağaçların ve süs bitkilerinin üretiminde kullanılmak üzere pazarlanmaktadır. *Trichoderma* biyokontrol ajanları beş kıtanın tamamında kayıtlı, ticarileştirilmiş ve uygulanmış olsa da, dünyadaki *Trichoderma* ürünlerinin en büyük dağılımı Asya'da bulunmaktadır ve en büyük pay da, Asya pazarının %90'ını oluşturan Hindistan'a aittir (Kredics ve ark., 2021). Kısıtlamalara rağmen, Asya kıtası, özellikle Hindistan, *Trichoderma* bazlı ürünlerin en fazla ticarileştiği bölge olurken, bunu Güney ve Orta Amerika izlemektedir (Abdullah ve ark., 2021).

Trichoderma türlerinin ticarileştirilmesi çeşitli mekanizmalarının tanıma sürecine ve bunun patojenik mikroorganizmalara ve bitkilere karşı etkinliğine bağlıdır. Bitki patojenlerinin ve hastalıklarının kontrolü için 1989 yılında EPA (U.S. Environmental Protection Agency-ABD Çevre Koruma Ajansı)'ya tescil edilen ilk *Trichoderma* türü *T. harzianum*'dur. Bu türlerin ticarileştirilmesi çok aşamalı bir süreçtir ve şunları içermektedir: a) Mikroorganizmaların izolasyonu b) Antagonistlerin

laboratuvar ve saha koşullarında değerlendirilmesi c) Saha koşullarında en iyi izolatin seçilmesi d) Seri üretim e) Formülasyon f) Uygulama şekli g) Uyumluluk h) Tescil etme ve piyasaya sunma (Ghazanfar ve ark., 2018; Ali ve ark., 2021).

Çeşitli mahsullerin korunması ve büyümesinin artırılması için birkaç *Trichoderma* türünün ticari kullanımı devam etmektedir. Şu anda, *Trichoderma* türlerinin ticari olarak temin edilebilen örnekleri Tablo 9'da listelenmiştir. Bu ürünlerin tümü bir biyokontrol ürünü olarak kayıtlı değildir, ancak bitki büyümesini destekleyiciler, bitki güçlendiriciler veya toprak düzenleyiciler olarak pazarlanmaktadır (Ghazanfar ve ark., 2018).

Tartışma

Bitkiler üzerinde geniş bir yelpazede faydalı etkiler gösteren *Trichoderma* türleri, bitki büyümesini teşvik etmek ve bitkileri hastalıklara karşı korumak için tarımda yaygın olarak kullanılan önemli bir mantar cinsini temsil etmektedir. *Trichoderma*, mikoparazitizm, antibiyoz, besin ve alan için rekabet ve bitkilerde sistemik direncin indüklenmesi de dahil olmak üzere çoklu mekanizmalar yoluyla biyolojik kontrol rolüne ek olarak, mineral besinleri çözme ve bitki gelişimini destekleyen hormonlar ve sekonder metabolitler sentezleme yeteneği nedeniyle mikrobiyal gübre olarak da son yıllarda ilgi görmektedir.

Tarımsal üretim, kuraklık, tuzluluk ve yüksek sıcaklıklar gibi abiyotik stres faktörleri nedeniyle olumsuz etkilenmekte ve bu nedenle mahsul verimliliği önemli ölçüde azalmaktadır. *Trichoderma* türleri, abiyotik streslere karşı toleransı artırarak ve böylece tarımsal direnci iyileştirerek bitkilerin bu olumsuz koşullara adaptasyonuna katkıda bulunmaktadır. Bu mekanizmalar aracılığıyla *Trichoderma*, değişen çevre koşulları altında daha dirençli ve sürdürülebilir mahsul üretim sistemlerinin geliştirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır. Sürdürülebilir tarım, yalnızca ürün verimini artırmakla kalmaz, aynı zamanda toprak sağlığını korumayı ve iyileştirmeyi de içermektedir. *Trichoderma* türlerinin, ağır metallerin ve diğer toksik bileşiklerin parçalanmasına veya ayrıştırılmasına katkıda bulunarak kirlenmiş ortamların iyileştirilmesinde rol oynadığı çalışmalar ile kanıtlanmıştır.

Sonuç olarak, *Trichoderma'nın* umut vadeden bir biyolojik kontrol etmeni ve/veya mikrobiyal gübre olarak kullanımı, tarımda kimyasal girdilere olan bağımlılığı azaltmak için sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır. *Trichoderma* temelli biyolojik kontrol ve gübreleme uygulamalarının optimize edilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulsa da, bugüne kadar elde edilen sonuçlar, bu cinsin modern ve sürdürülebilir tarım uygulamalarında çok fonksiyonlu bir biyolojik ajan olarak önemli bir potansiyele sahip olduğunu güçlü bir şekilde göstermektedir.

Tablo 9. Ticari *Trichoderma* ürünleri (Kumar, 2013; Woo ve ark., 2014; Ghazanfar ve ark., 2018; Thambugala ve ark., 2020; Ferreira ve Musumeci, 2021; Abdul-Halim ve ark., 2023; Alqahtani ve Almanzalawi, 2025).

Ticari Ürün	<i>Trichoderma</i> türü	Hedef patojen/Hastalık/Etki	Üretici veya distribütör
RootShield PLUS + WP	<i>T. harzianum</i> T-22 and <i>T. virens</i> G-41	<i>Phytophthora</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Thielaviopsis</i> , <i>Cylindrocladium</i>	BioWorks (ABD)
RootShield WP	<i>T. harzianum</i> T-22	<i>Pythium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Thielaviopsis</i> , <i>Cylindrocladium</i>	BioWorks (ABD)
T-22 Planter box	<i>T. harzianum</i> T-22	Kök çürüklüğü	BioWorks (ABD)
Trichodermil	<i>T. harzianum</i> SC 1306	<i>Fusarium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , <i>Pratylenchus zaeae</i> , <i>Thielaviopsis paradoxa</i>	Koppert Biological Systems (Hollanda)
Rizoderma	<i>T. harzianum</i> Th2	<i>F. graminearum</i> , <i>Drechslera</i>	Rizobacter (Arjantin)
Trichodex	<i>T. harzianum</i> T39	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Sclerotinia</i> , <i>Colletotrichum</i>	Makhteshim-Agan Industries (ADAMA) (İsrail)
SoilGard	<i>T. virens</i> GL-21	<i>Pythium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Sclerotinia</i> , <i>Sclerotium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Phytophthora capsici</i>	Certis (ABD)
Binab-T	<i>T. polysporum</i> (IMI 206039) ve <i>T. harzianum</i> (IMI 206040)	Kök çürüklüğü hastalığı ve budama yaraları patojenleri	Binab Bio-Innovation (İsveç)
Trieco	<i>T. viride</i>	Toprak temelli patojenler	Ecosense Lab (Hindistan)
Anti-fungus	<i>Trichoderma</i> spp.	Kök çürüklüğü	Grondontsmettingen De Ceuster (Belçika)
Biofungus, Superesivit	<i>Trichoderma</i> spp.	Kök çürüklüğü ve solgunluğu	Bioplant (Danimarka)
Root Pro	<i>T. harzianum</i>	Kök çürüklüğü	Efal Agri (İsrail)
T-22B, T-22G	<i>T. harzianum</i> T-22	Kök çürüklüğü	TGT Inc. New York (ABD)

T35	<i>T. harzianum</i>	Solgunluk	Makhteshim-Agan Chemical Israel PHP Ltd. (Güney Afrika)
GlioGard, SoilGard	<i>T. virens</i>	Kök çürüklüğü	Grace-Sierra Co. (Maryland)
Harzian 20, Harzian 10	<i>T. harzianum</i>	Solgunluk	Natural Plant Protection, Noguerras (Fransa)
Biospark Trichoderma	<i>T. parceramosum</i> , <i>T. pseudokoningii</i>	Solgunluk	Biospark Corporation (Filipinler)
F-stop	<i>T. harzianum</i>	Kök çürüklüğü	Eastman Kodak Co. TGT Inc, New York (ABD)
Soil Gard	<i>T. virens</i> GL-21	Kök çürüklüğü	Certis (ABD)
Tricho-X	<i>T. viride</i>	Kök çürüklüğü	Excel Industries Ltd. (Hindistan)
Trichopel	<i>Trichoderma</i> spp.	Kök çürüklüğü	Agrim Technologies (Yeni Zelanda)
Bip T	<i>T. viride</i>	Solgunluk	Poland (Hindistan)
Plant helper	<i>T. atroviride</i>	Kök çürüklüğü	Ampac (Kaliforniya)
Biobus 1.00WP	<i>T. viride</i>	Kök çürüklüğü	Nam Bac (Vietnam)
Biocon	<i>T. viride</i>	Kök çürüklüğü, solgunluk	Tocklai Experimental Station Tea Research Association, Assam (Hindistan)
TRICO-DHCT	<i>Trichoderma</i> spp.	Kılıf yanıklığı	Can Tho University (Vietnam)
Ecoderma	<i>T. viride</i> + <i>T. harzianum</i>	Kök çürüklüğü, solgunluk	Morgo Biocontrol Pvt. Ltd. (Hindistan)
Bio-Humaxin Sen Vang 65C	<i>Trichoderma</i> spp.	Pamuksu çürüklük	An Hung Tuong (Vietnam)
Fulhumaxin 5.15SC	<i>Trichoderma</i> spp.	Kök çürüklüğü	An Hung Tuong (Vietnam)
Trichogourd	<i>T. viride</i>	Çökerten hastalığı	Anu Biotech International Ltd., Faridabad (Hindistan)
Ecofit	<i>T. viride</i>	Kök çürüklüğü	Hoechst and Schering Agro. Evo. Ltd. (Hindistan)
Funginil	<i>T. viride</i>	Kök çürüklüğü	Crop Health Bioproduct Research Center (Hindistan)
Trichopel, Trichodowel, Trichobject	<i>T. harzianum</i> + <i>T. viride</i>	Solgunluk	Agrim Technologies Ltd. (Yeni Zelanda)
Binab- T&W	<i>T. harzianum</i> + <i>T. polysporum</i>	Solgunluk	Bio Innovation AB, Toreboda (İsveç)
Antagon	<i>Trichoderma</i> spp.	Toprak yapısını iyileştirme	DeCeusterMeststoffen (Belçika)
Promot Plus WP, Promot Plus DD	<i>Trichoderma</i> spp., <i>T. harzianum</i> , <i>T. koningii</i>	<i>Pythium</i>	Tan Quy (Vietnam)
Trichostar	<i>T. harzianum</i>	Toprak kaynaklı patojen mücadelesi	Green Tech Agroproducts (Hindistan)
Monitor	<i>Trichoderma</i> sp.	<i>Fusarium</i> , <i>Pythium</i> , <i>Phytophthora</i>	Agricultural and Biotech Pvt. Ltd. Gujarat (Hindistan)
Bioderma	<i>T. viride</i> , <i>T. harzianum</i>	<i>Alternaria</i> , <i>Cercospora</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Verticillium</i>	Biotech International Ltd. (Hindistan)
Bio Fit	<i>T. viride</i>	Parazitizm, antibiyosiz	Ajay Biotech Ltd. (Hindistan)
Biogourd	<i>T. viride</i>	Toprak kaynaklı patojen mücadelesi	Krishi Rasayan Export Pvt. Ltd. (Hindistan)
T-Gro	<i>T. harzianum</i>	Kök iyileştirme	Dagutat Biolab (ABD)

Yazar Katkıları

Tüm yazarlar eşit katkıya sahiptir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Etik Beyanı: Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde

bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur (Kemal KARACA, Derya MARAL GÜL, Rengin ELTEM)

Kaynaklar

- Abdul-Halim, A. M. A. A., Shivanand, P., Krishnamoorthy, S. ve Taha, H. (2023). A review on the biological properties of *Trichoderma* spp. as a prospective biocontrol agent and biofertilizer. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*.
- Abdullah, N. S., Doni, F., Mispan, M. S., Saiman, M. Z., Yusuf, Y. M., Oke, M. A. ve Suhaimi, N. S. M. (2021). Harnessing *Trichoderma* in agriculture for productivity and sustainability. *Agronomy*, 11(12), 2559.
- Abhilash, P. C., Dubey, R. K., Tripathi, V., Gupta, V. K. ve Singh, H. B. (2016). Plant growth-promoting microorganisms for environmental sustainability. *Trends in Biotechnology*, 34(11), 847-850.
- Adnan, M., Islam, W., Shabbir, A., Khan, K. A., Ghramh, H. A., Huang, Z., Chen, H. Y. H. ve Lu, G. D. (2019). Plant defense against fungal pathogens by antagonistic fungi with *Trichoderma* in focus. *Microbial pathogenesis*, 129, 7-18.
- Alfiky, A. ve Weisskopf, L. (2021). Deciphering *Trichoderma*-plant-pathogen interactions for better development of biocontrol applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 61.
- Ali, A., Zeshan, M. A., Mehtab, M., Khursheed, S., Mudasir, M., Abid, M., Mahdi, M., Rauf, H. A., Ameer, S., Younis, M., Altaf, M. T. ve Tahir, A. (2021). A comprehensive note on *Trichoderma* as a potential biocontrol agent against soil borne fungal pathogens: a review. *Plant Protection*, 5(3), 171-196.
- Alqahtani, T. M. ve Almanzalawi, E. A. (2025). *Trichoderma* spp. as Bio-Pesticides: Exploring Diverse Modes of Action. *ROMANIAN AGRICULTURAL RESEARCH*, 42, 533-548.
- Altomare, C., Norvell, W. A., Björkman, T. H. O. M. A. S. ve Harman, G. (1999). Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant-growth-promoting and biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. *Applied and environmental microbiology*, 65(7), 2926-2933.
- Anwer, M. A., Singh, K., Prasad, B. D., Yadav, A. K. ve Kumari, P. (2020). Abiotic stress tolerant *Trichoderma asperellum* Tvb1 from hot spring and its antagonistic potential against soil borne Phytopathogens. *International Archive of Applied Sciences and Technology*, 11(3), 70-90.
- Bader, A. N., Salerno, G. L., Covacevich, F. ve Consolo, V. F. (2020). Native *Trichoderma harzianum* strains from Argentina produce indole-3 acetic acid and phosphorus solubilization, promote growth and control wilt disease on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of King Saud University-Science*, 32(1), 867-873.
- Bansal, R., Sahoo, S. A., Barvkar, V. T., Srivastava, A. K. ve Mukherjee, P. K. (2023). *Trichoderma virens* exerts herbicidal effect on *Arabidopsis thaliana* via modulation of amino acid metabolism. *Plant Science*, 332, 111702.
- Bhandari, S., Pandey, K. R., Joshi, Y. R. ve Lamichhane, S. K. (2021). An overview of multifaceted role of *Trichoderma* spp. for sustainable agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 6(1), 72-79.
- Błaszczak, L. M. S. K. S., Siwulski, M., Sobieralski, K., Lisiecka, J. ve Jedryczka, M. (2014). *Trichoderma* spp.—application and prospects for use in organic farming and industry. *Journal of plant protection research*, 54(4).
- Brabcová, V., Nováková, M., Davidová, A. ve Baldrian, P. (2016). Dead fungal mycelium in forest soil represents a decomposition hotspot and a habitat for a specific microbial community. *New Phytologist*, 210(4), 1369-1381.
- Cai, F., Dou, K., Wang, P., Chenthamara, K., Chen, J. ve Druzhinina, I. S. (2022). *The current state of Trichoderma taxonomy and species identification*. In *Advances in Trichoderma biology for agricultural applications* (pp. 3-35). Cham: Springer International Publishing.
- Cai, F. ve Druzhinina, I. S. (2021). In honor of John Bissett: authoritative guidelines on molecular identification of *Trichoderma*. *Fungal diversity*, 107(1), 1-69.
- Chalie-u, R. ve Jakhar, S. R. (2018). Prospects of *Trichoderma* in Agriculture-Fundamentals and Applications. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(06), 3519-3527.
- Chen, X., Lu, Y., Liu, X., Gu, Y. ve Li, F. (2025). *Trichoderma*: Dual roles in biocontrol and plant growth promotion. *Microorganisms*, 13(8), 1840.
- Conte, E. D., da Rosa, E. J., Silvestrini, G. R., Motta, D. D. S., de Oliveira, C. F., Cocco, C., Pauletti, G. F., Silvestre, W. P., Magro, T. D. ve Schwambach, J. (2025). Can *Trichoderma* spp. Contribute to the Bioremediation and Biostimulation of Plants in Soil Contaminated with Herbicides?. *ACS omega*, 10(2), 2243-2252.
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Vergara, A. G. ve López-Bucio, J. (2015). *Trichoderma* modulates stomatal aperture and leaf transpiration through an abscisic acid-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34, 425-432.
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Del-Val, E. K. ve Larsen, J. (2016). Ecological functions of *Trichoderma* spp. and their secondary metabolites in the rhizosphere: interactions with plants. *FEMS microbiology ecology*, 92(4), fiw036.
- Contreras-Soto, M. B., Tovar-Pedraza, J. M., Solano-Báez, A. R., Bayardo-Rosales, H. ve Márquez-Licona, G. (2025). Biocontrol Strategies Against Plant-Parasitic Nematodes Using *Trichoderma* spp.: Mechanisms, Applications, and Management Perspectives. *Journal of Fungi*, 11(7), 517.
- Devika, O. S., Paul, S., Sarkar, D., Rajput, R. S., Singh, S., Parihar, M., Parewa, H. P., Pal, S., Singh, H. B. ve Rakshit, A. (2019). *Trichoderma*: a part of possible answer towards crop residue disposal. *Journal of Applied and Natural Science*, 11(2), 516-523.
- Ferreira, F. V. ve Musumeci, M. A. (2021). *Trichoderma* as biological control agent: Scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(5), 90.
- Free, S. J. (2013). Fungal cell wall organization and biosynthesis. *Advances in genetics*, 81, 33-82.

- Gajera, H., Domadiya, R., Patel, S., Kapopara, M. ve Golakiya, B. (2013). Molecular mechanism of *Trichoderma* as bio-control agents against phytopathogen system—a review. *Curr. Res. Microbiol. Biotechnol*, 1, 133-142.
- Gams, W. ve Bissett, J. (2002). Morphology and identification of *Trichoderma*. *Trichoderma and gliocladium*, 1, 3-34.
- García-Latorre, C., Ruiz-Moyano, S., Rodríguez, A., Velázquez, R., Poblaciones, M. J. ve Hernández, A. (2025). From Field to Fork: the benefits of *Trichoderma* spp. in food quality and safety. *Current Opinion in Food Science*, 101286.
- Gezgin, Y., Maral Gül, D., Sözer Şenşatar, S., Kara, C. U., Sargın, S., Sukan, F. V. ve Eltem, R. (2020). Evaluation of *Trichoderma atroviride* and *Trichoderma citrinoviride* growth profiles and their potentials as biocontrol agent and biofertilizer. *Turkish Journal of Biochemistry*, 45(2), 163-175.
- Ghazanfar, M. U., Raza, M., Raza, W. ve Qamar, M. I. (2018). *Trichoderma* as potential biocontrol agent, its exploitation in agriculture: a review. *Plant Protection*, 2(3).
- Gow, N. A., Latge, J. P. ve Munro, C. A. (2017). The fungal cell wall: structure, biosynthesis, and function. *Microbiology spectrum*, 5(3), 10-1128.
- Guo, R., Li, G., Zhang, Z. ve Peng, X. (2022). Structures and biological activities of secondary metabolites from *Trichoderma harzianum*. *Marine drugs*, 20(11), 701.
- Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de Los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Orozco-Mosqueda, M. D. C., Fadji, A. E., Hyder, S., Babalola, O. O. ve Santoyo, G. (2023). *Trichoderma* species: Our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—A review. *Plants*, 12(3), 432.
- Guzmán-Guzmán, P., Etesami, H. ve Santoyo, G. (2025). *Trichoderma*: a multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. *BMC microbiology*, 25(1), 434.
- Harman, G., Khadka, R., Doni, F. ve Uphoff, N. (2021). Benefits to plant health and productivity from enhancing plant microbial symbionts. *Frontiers in Plant Science*, 11, 610065.
- Hernández, G., Ponce de la Cal, A., Louis, Y., Baró Robaina, Y., Coll, Y., Spengler, I. ve Mirabal-Gallardo, Y. (2024). Identification of secondary metabolites by UHPLC-ESI-HRMS/MS in antifungal strain *Trichoderma harzianum* (LBAT-53). *Journal of fungi*, 10(8), 547.
- Herrera Perez, G. M., Castellano, L. E. ve Ramírez Valdespino, C. A. (2024). *Trichoderma* and mycosynthesis of metal nanoparticles: role of their secondary metabolites. *Journal of Fungi*, 10(7), 443.
- Hidangmayum, A. ve Dwivedi, P. (2018). Plant responses to *Trichoderma* spp. and their tolerance to abiotic stresses: a review. *J. Pharmacogn. Phytochem*, 7, 758-766.
- Illescas, M., Pedrero-Méndez, A., Pitorini-Bovolini, M., Hermosa, R. ve Monte, E. (2021). Phytohormone production profiles in *Trichoderma* species and their relationship to wheat plant responses to water stress. *Pathogens*, 10(8), 991.
- İşlek, S., Karaca, K. ve Eltem, R. (2025). pH Influence on Shelf Life of Liquid PGPR Formulations with *Bacillus subtilis* Strains. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi-C Yaşam Bilimleri Ve Biyoteknoloji*, 14(1), 14-24.
- Jaroszuk-Ścisiel, J., Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., Majewska, M., Hanaka, A., Tyskiewicz, K., Pawlik, A. ve Janusz, G. (2019). Phytohormones (auxin, gibberellin) and ACC deaminase in vitro synthesized by the mycoparasitic *Trichoderma* DEMTkZ3A0 strain and changes in the level of auxin and plant resistance markers in wheat seedlings inoculated with this strain conidia. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4923.
- Karaca, K. ve Eltem, R. (2024). Investigating Plant Growth Promoting Properties of *Trichoderma* Species for Sustainable Agriculture. *Authorea*.
- Karaca, K., Bora, Ş. ve Eltem, R. (2025a). Bazı bitki büyümesini teşvik eden rizobakterilerin (PGPR) buğday ve mısır tohumlarının gelişimi üzerindeki sinerjik etkisinin in vitro koşullarda belirlenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(1), 370-383.
- Karaca, K., İphar, M. ve Eltem, R. (2025b). Çeşitli *Trichoderma* İzolatlarının Bazı İnsan ve Bitki Patojeni Bakteriler Üzerindeki Antibakteriyel Etkisinin in vitro Koşullarda Taranması. *Mantar Dergisi*, 16(1), 34-41.
- Karuppiyah, V., Vallikkannu, M., Li, T. ve Chen, J. (2019). Simultaneous and sequential based co-fermentations of *Trichoderma asperellum* GDFS1009 and *Bacillus amyloliquefaciens* 1841: a strategy to enhance the gene expression and metabolites to improve the bio-control and plant growth promoting activity. *Microbial cell factories*, 18(1), 1-16.
- Kashyap, P. L., Rai, P., Srivastava, A. K. ve Kumar, S. (2017). *Trichoderma* for climate resilient agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(8), 1-18.
- Kidwai, M. K. ve Nehra, M. (2017). Biotechnological applications of *Trichoderma* species for environmental and food security. *Plant biotechnology: recent advancements and developments*, 125-156.
- Konappa, N., Krishnamurthy, S., Siddaiah, C. N., Ramachandrappa, N. S. ve Chowdappa, S. (2018). Evaluation of biological efficacy of *Trichoderma asperellum* against tomato bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 28, 1-11.
- Kubheka, B. P. ve Ziena, L. W. (2022). *Trichoderma*: A Biofertilizer and a Bio-Fungicide for Sustainable Crop Production. In *Trichoderma-Technology and Uses*. IntechOpen.
- Kumar, S. (2013). *Trichoderma*: a biological weapon for managing plant diseases and promoting sustainability. *International Journal of Agriculture Science and Medical veterinary*, 1(3), 106-121.
- Kumar, S., Thakur, M. ve Rani, A. (2014). *Trichoderma*: Mass production, formulation, quality control, delivery and its scope in commercialization in India for the management of plant diseases. *African journal of agricultural research*, 9(53), 3838-3852.

- Książek-Trela, P. ve Szpyrka, E. (2022). The effect of natural and biological pesticides on the degradation of synthetic pesticides. *Plant Protection Science*, 58(4), 273-291.
- Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., Kenfaoui, J., Esmaeel, Q., El Hamss, H., Belabess, Z. ve Barka, E. A. (2022). Biological control of plant pathogens: A global perspective. *Microorganisms*, 10(3), 596.
- Lopes, M. J. D. S., Dias-Filho, M. B. ve Gurgel, E. S. C. (2021). Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606454.
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R. ve Herrera-Estrella, A. (2015). *Trichoderma* as biostimulant: exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia horticultrae*, 196, 109-123.
- Malgioglio, G., Rizzo, G. F., Nigro, S., Lefebvre du Prey, V., Herforth-Rahmé, J., Catara, V. ve Branca, F. (2022). Plant-Microbe Interaction in Sustainable Agriculture: The Factors That May Influence the Efficacy of PGPM Application. *Sustainability*, 14(4), 2253.
- Manzar, N., Kashyap, A. S., Goutam, R. S., Rajawat, M. V. S., Sharma, P. K., Sharma, S. K. ve Singh, H. V. (2022). *Trichoderma*: Advent of Versatile Biocontrol Agent, Its Secrets and Insights into Mechanism of Biocontrol Potential. *Sustainability*, 14(19), 12786.
- Maral Gül, D. ve Eltem, R. (2022). Bazı Gübre ve Fungisitlerin *Trichoderma* Türlerinin Büyümesine Etkisinin in vitro Koşullarda İncelenmesi. *Anadolu (1300-0225)*, 32(2).
- Martzy, R., Mello-de-Sousa, T. M., Mach, R. L., Yaver, D. ve Mach-Aigner, A. R. (2021). The phenomenon of degeneration of industrial *Trichoderma reesei* strains. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 1-14.
- Mis, B., Karaca, K. ve Eltem, R. (2024). In Vitro Antagonistic Activity of Plant Growth Promoting Rhizobacteria Against Aggressive Biotypes of the Green Mold. *Journal of Basic Microbiology*, 64(12), e2400422.
- Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., Singh, U. S., Mukherjee, M. ve Schmoll, M. (2013). *Trichoderma* in agriculture, industry and medicine: an overview. *Trichoderma biology and applications*. Boston: CAB International, 16, 1-9.
- Mukhopadhyay, R. ve Kumar, D. (2020). *Trichoderma*: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 1-8.
- Naamala, J. ve Smith, D. L. (2020). Relevance of plant growth promoting microorganisms and their derived compounds, in the face of climate change. *Agronomy*, 10(8), 1179.
- Op De Beeck, M., Troein, C., Siregar, S., Gentile, L., Abbondanza, G., Peterson, C., Persson, P. ve Tunlid, A. (2020). Regulation of fungal decomposition at single-cell level. *The ISME journal*, 14(4), 896-905.
- Organo, N. D., Granada, S. M. J. M., Pineda, H. G. S., Sandro, J. M., Nguyen, V. H. ve Gummert, M. (2022). Assessing the potential of a *Trichoderma*-based compost activator to hasten the decomposition of incorporated rice straw. *Scientific reports*, 12(1), 1-12.
- Poveda Arias, J. (2021). *Trichoderma* as biocontrol agent against pests: new uses for a mycoparasite. *Biological Control*, 159 (2021).
- Prajapati, S., Kumar, N., Kumar, S., Lakharen, L. ve Maurya, S. (2020). Biological control a sustainable approach for plant diseases management: A review. *J Pharmacogn Phytochem*, 9(2), 1514-1523.
- Pratiwi, V., Oktarina, H. ve Sriwati, R. (2021). The potential of *Trichoderma* spp. and *Pseudomonas auregenosa* as patchouli waste decomposer. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 667, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- Pylak, M., Oszust, K. ve Fraç, M. (2019). Review report on the role of bioproducts, biopreparations, biostimulants and microbial inoculants in organic production of fruit. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(3), 597-616.
- Ruocco, M., Lanzuise, S., Lombardi, N., Woo, S. L., Vinale, F., Marra, R., Varlese, R., Manganiello, G., Pascale, A., Scala, V., Turra, D., Scala, F. ve Lorito, M. (2015). Multiple roles and effects of a novel *Trichoderma hydrophobin*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 28(2), 167-179.
- Sapareng, S., Ala, A., Kuswinanti, T. ve Rasyid, B. (2018). The ability of trichoderma sp and pleurotus sp for the decomposition of oil palm empty bunches. *Pakistan Journal of Biotechnology*, 15(2), 543-548.
- Sarangı, S., Swain, H., Adak, T., Bhattacharyya, P., Mukherjee, A. K., Kumar, G. ve Mehetre, S. T. (2021). *Trichoderma*-mediated rice straw compost promotes plant growth and imparts stress tolerance. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 44014-44027.
- Sargin, S., Gezgin, Y., Eltem, R. ve Vardar, F. (2013). Micropropagule production from *Trichoderma harzianum* EGE-K38 using solid-state fermentation and a comparative study for drying methods. *Turkish Journal of Biology*, 37(2), 139-146.
- Savas, N. G., Yıldız, M., Eltem, R. ve Ozkale, E. (2021). Determination of antifungal efficiency of some fungicides and secondary metabolites of *Trichoderma* species against *Botrytis cinerea*. *Journal of Environmental Biology*, 42(3), 705-713.
- Sesli, E., Asan, A. ve Selçuk, F. (edlr.) Abacı Günyar, Ö., Akata, I., Akgül, H., Aktaş, S., Alkan, S., Allı, H., Aydoğdu, H., Berikten, D., Demirel, K., Demirel, R., Doğan, H.H., Erdoğan, M., Ergül, C.C., Eroğlu, G., Giray, G., Halikî Uztan, A., Kabaktepe, Ş., Kadaifçiler, D., Kalyoncu, F., Karaltı, İ., Kaşık, G., Kaya, A., Keleş, A., Kırbağ, S., Kıvanç, M., Ocak, İ., Ökten, S., Özkale, E., Öztürk, C., Sevindik, M., Şen, B., Şen, İ., Türkekul, İ., Ulukapı, M., Uzun, Ya., Uzun, Yu. ve Yoltaş, A. (2020). *Türkiye Mantarları Listesi*. İstanbul: Ali Nihat Gökyiğit Vakfı Yayınları.

- Siddiquee, S., Shafawati, S. N. ve Naher, L. (2017). Effective composting of empty fruit bunches using potential *Trichoderma* strains. *Biotechnology reports*, 13, 1-7.
- Singh, A., Shukla, N., Kabadwal, B. C., Tewari, A. K. ve Kumar, J. (2018). Review on plant-*Trichoderma*-pathogen interaction. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci*, 7, 2382-2397.
- Shao, Y., Gu, S., Peng, H., Zhang, L., Li, S., Berendsen, R. L., Yang, T., Dong, C., Wei, Z., Xu, Y. ve Shen, Q. (2025). Synergic interactions between *Trichoderma* and the soil microbiomes improve plant iron availability and growth. *npj Biofilms and Microbiomes*, 11(1), 56.
- Shenouda, M. L. ve Cox, R. J. (2021). Molecular methods unravel the biosynthetic potential of *Trichoderma* species. *RSC advances*, 11(6), 3622-3635.
- Shukla, N., Singh, E. A. N. A., Kabadwa, B. C., Sharma, R. ve Kumar, J. (2019). Present status and future prospects of bio-agents in agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(4), 2138-2153.
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiw, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., Araniti, F. ve Sharma, A. (2020). *Trichoderma*: The "secrets" of a multitasking biocontrol agent. *Plants*, 9(6), 762.
- Sudantha, I. M. ve Suwardji, S. (2021, July). *Trichoderma* biofungicides formulations on shallot growth, yield and fusarium wilt disease resistance. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 824, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
- Suyal, D. C., Soni, R., Sai, S. ve Goel, R. (2016). *Microbial inoculants as biofertilizer*. In *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity* (pp. 311-318). Springer, New Delhi.
- Syamsia, S., Idhan, A., Firmansyah, A. P., Noerfitriyani, N., Rahim, I., Kesaulya, H. ve Armus, R. (2021). Combination on endophytic fungal as the Plant Growth-Promoting Fungi (PGPF) on cucumber (*Cucumis sativus*). *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(3).
- Tarekegn, M. M., Fikirte, Z. S. ve Ishetu, A. I. (2020). Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 1783174.
- Thambugala, K. M., Daranagama, D. A., Phillips, A. J., Kannangara, S. D. ve Promputtha, I. (2020). Fungi vs. fungi in biocontrol: An overview of fungal antagonists applied against fungal plant pathogens. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 718.
- Thapa, S., Rai, N., Limbu, A.K. ve Joshi, A. (2020). Impact of *Trichoderma* sp. in agriculture: A mini-review. *Journal of Biology and Today's World*, 9(7), 1-5.
- Tripathi, P., Singh, P. C., Mishra, A., Chauhan, P. S., Dwivedi, S., Bais, R. T. ve Tripathi, R. D. (2013). *Trichoderma*: a potential bioremediator for environmental clean up. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(4), 541-550.
- Tripathi, P., Singh, P. C., Mishra, A., Srivastava, S., Chauhan, R., Awasthi, S., Mishra, S., Dwivedi, S., Tripathi, P., Kalra, A., Tripathi, R. D. ve Nautiyal, C. S. (2017). Arsenic tolerant *Trichoderma* sp. reduces arsenic induced stress in chickpea (*Cicer arietinum*). *Environmental Pollution*, 223, 137-145.
- Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E. ve Jaroszuk-Ścisiel, J. (2022). *Trichoderma*: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 2329.
- Villavicencio-Vásquez, M., Espinoza-Lozano, F., Espinoza-Lozano, L. ve Coronel-León, J. (2025). Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1578915.
- Vinale, F., Nigro, M., Sivasithamparam, K., Flematti, G., Ghisalberti, E. L., Ruocco, M., Varlese, R., Marra, R., Lanzuise, S., Eid, A., Woo, S. L. ve Lorito, M. (2013). Harzianic acid: a novel siderophore from *Trichoderma harzianum*. *FEMS microbiology letters*, 347(2), 123-129.
- Vinale, F. ve Sivasithamparam, K. (2020). Beneficial effects of *Trichoderma* secondary metabolites on crops. *Phytotherapy Research*, 34(11), 2835-2842.
- Wang, C. ve Zhuang, W. Y. (2020). Carbon metabolic profiling of *Trichoderma* strains provides insight into potential ecological niches. *Mycologia*, 112(2), 213-223.
- Waghunde, R. R., Shelake, R. M. ve Sabalpara, A. N. (2016). *Trichoderma*: A significant fungus for agriculture and environment. *African journal of agricultural research*, 11(22), 1952-1965.
- Woo, S. L., Hermosa, R., Lorito, M. ve Monte, E. (2023). *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 21(5), 312-326.
- Woo, S. L., Ruocco, M., Vinale, F., Nigro, M., Marra, R., Lombardi, N., Pascale, A., Lanzuise, S., Manganiello, G. ve Lorito, M. (2014). *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. *The Open Mycology Journal*, 8(1).
- Yadav, K. ve Khare, P. (2025). Exploring the multifaceted roles of *Trichoderma* secondary metabolites. *Canadian Journal of Microbiology*, 71, 1-10.
- Yu, Y., Gui, Y., Li, Z., Jiang, C., Guo, J. ve Niu, D. (2022). Induced systemic resistance for improving plant immunity by beneficial microbes. *Plants*, 11(3), 386.
- Yunusfi, Aulia, S. P. ve Hartini, K. S. (2021). Application of *Trichoderma* sp. to leaf litter decomposition (*Rhizophora mucronata*) on various salinity levels in Belawan. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 713, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.
- Zaki, O., Weekers, F., Thonart, P., Tesch, E., Kuenemann, P. ve Jacques, P. (2020). Limiting factors of mycopesticide development. *Biological Control*, 144, 104220.

- Zin, N. A. ve Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178.
- Zhang, F., Huo, Y., Cobb, A. B., Luo, G., Zhou, J., Yang, G., Wilson, G. W. T. ve Zhang, Y. (2018). *Trichoderma* biofertilizer links to altered soil chemistry, altered microbial communities, and improved grassland biomass. *Frontiers in microbiology*, 9, 848.
- Zhang, F., Wang, Y., Liu, C., Chen, F., Ge, H., Tian, F., Yang, T., Ma, K. ve Zhang, Y. (2019). *Trichoderma harzianum* mitigates salt stress in cucumber via multiple responses. *Ecotoxicology and environmental safety*, 170, 436-445.
- Zhang, H., Zhang, Q., Jiang, J., Yang, N., Zhou, Y., Feng, Y., Shi, C., Tien, L. H., Tin, H. T., Dong, Y., Yang, S. ve Liu, T. (2025). Integrated genomic and metabolomic insights into the secondary metabolism of *Trichoderma koningiopsis* Z35. *Agrobiodiversity*, 2(3), 62-72.